

# COOPERAÇÃO INTERSETORIAL E INOVAÇÃO: FERRAMENTAS PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS



Christiane Pereira  
Klaus Fricke  
Coordenadores

2022

POR GRUPO





**COOPERAÇÃO  
INTERSETORIAL  
E INOVAÇÃO:  
ferramentas para a gestão  
sustentável de resíduos sólidos**



## **Informações bibliográficas mantidas pela Biblioteca Nacional Alemã**

Este livro está listado na Deutsche Nationalbibliografie;  
informações detalhadas estão disponíveis em: <http://dnb.d-nb.de>.  
1ª edição – Göttingen: Cuvillier, 2022

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen, Germany 2022

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefone: +49 (0)551-54724-0

Telefax: +49 (0)551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Todos os direitos reservados. Esta publicação não pode ser reproduzida por meios fotomecânicos (fotocópia, microfichas), no todo ou em parte, sem a prévia permissão expressa da editora.

1ª edição, 2022

Esta publicação é impressa em papel sem ácido.

ISBN 978-3-7369-7700-6

eISBN 978-3-7369-6700-7



Christiane Pereira – Klaus Fricke  
Coordenadores

# COOPERAÇÃO INTERSETORIAL E INOVAÇÃO: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos

## COLABORADORES

Adriana Zemiani Challiol	Günter Dehoust	Mauricio Aparecido Bortoloti
Ana Ghislane H. P. van Elk	Helinah Cardoso Moreira	Maurilo André da C. Assunção
André Luís Brasil Cavalcante	Henrique Vasquez F. do Vale	Michel Mott Machado
Andrea Pfeiffer	Hubert Baier	Moisés Antônio da C. Lemos
Andreas Haarstrick	Isabela Mangerino Sicchieri	Nadja Alves dos Reis
Armando B. de Castilhos Junior	Isaque Wilkson de S. Brandão	Neyson Martins Mendonça
Betina Ludwig Navarro	Itair da Silva Costa Filho	Paulo Christian de F. Machado
Carla Lorena Sandim da Rosa	Jean Marcel de Faria Novo	Plinio Barbosa de Camargo
Carlos E. S. C. P. da Cunha	Jessica Klarosk Helenas Perin	Priscila Liane Biesdorf Borth
Charles Vieira Neves	José Antônio Baptista Neto	Priscilla Santos
Celso Romanel	Joyce Sholl Altschul	Rafael Haruo Yoshida Silva
Christiane Pereira	Juliano da Cunha Gomes	Raísa Cardoso Peregrino
Christine Claire Gaylarde	Kai Münnich	Rayana Burgos dos Santos
Danilo Laert Lago Brito	Khauê de Silva Vieira	Ricardo Soares
Diego R. Borges da Silva	Klaus Fricke	Robson Malacarne
Emília Kiyomi Kuroda	Leticia Tavares Theotonio	Rodrigo Cândido P. da Silva
Estefan Monteiro da Fonseca	Luiz Gonzaga Alves Pereira	Tereza C. M. de B. Carvalho
Fabiana C. L. Pompermayer	Maíta dos Santos Rosa	Thainara C. F. de Quadros
Fábio Lippi Silva	Marcelo P. de Almeida	Thiago Villas Bôas Zanon
Fernando Fernandes	Marcelo X. Aguiar Bizerril	Vinícius M. da Conceição
Filipe Castro Pereira	Mariana Silva	Vivian F. Marinho Ferreira
Filippe Vilhena dos Santos	Mario Augusto Tavares Russo	Waryson Carlos S. de Souza
	Marlus N. P. B. V. de Oliveira	William de Paiva
	Mateus Almeida Cunha	Winfried Bulach

Technische Universität Braunschweig  
Braunschweig – 2022



Publicado por: Technische Universität Braunschweig

Apoio financeiro: PROTEGEER, através do Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), Secretaria Nacional de Saneamento

BMUV = Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Projeto EXCEED-SWINDON – Excellence Centre for Development Cooperation – Sustainable Water Management in Developing Countries

Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)

Coordenadores: Christiane Pereira – Klaus Fricke

Revisão técnica: Christiane Pereira

Revisão textual: Luciane Pansolin <<http://divacademico.blogspot.com.br/>>

Diagramação: Letras e Formas <[letras.e.formas@gmail.com](mailto:letras.e.formas@gmail.com)>

PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

ISBN: 978-3-7369-7700-6 – eISBN: 978-3-7369-6700-7

Technische Universität Braunschweig, 2022

Beethovenstraße 51a – 38106 – Braunschweig – Germany

[www.lwi.tu-bs.de](http://www.lwi.tu-bs.de)

As ideias e opiniões expressas neste livro são dos autores e não refletem necessariamente a posição dos Coordenadores ou da Technische Universität Braunschweig. A reprodução de todo ou partes (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que o livro seja citado como fonte da informação, conforme consta no início de cada artigo. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento por escrito dos Coordenadores ou da Instituição Technische Universität Braunschweig.

Sobre o PROTEGEER – O PROTEGEER é um projeto de cooperação técnica entre Brasil e Alemanha para promover uma gestão sustentável e integrada de resíduos sólidos urbanos, preservar os recursos naturais e reduzir o uso de energia e a emissão de gases de efeito estufa. É implementado no âmbito da cooperação técnica firmada entre o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Cooperação Brasil-Alemanha por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.



# Apresentação

A mudança climática é um dos maiores desafios enfrentados pela comunidade internacional. A Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática, em Sharm ash-Shaykh este ano (2022), enviou sinais ameaçadores.

A gestão de resíduos contribui significativamente para a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Nos países industrializados, sua participação representa entre 5 e 7% do total das emissões de GEE. Através de medidas sustentáveis de gerenciamento de resíduos, esta participação poderia ser reduzida a menos de 1,5% nos países da Europa Central.

Na Alemanha, as emissões de GEE foram reduzidas em cerca de 55 milhões de toneladas no período de 1990 a 2021, sendo que 30 milhões de toneladas em decorrência da redução das emissões da disposição final. As 25 milhões de toneladas remanescentes foram reduzidas por meio do incremento da reciclagem e pela recuperação de energia. Nos países em desenvolvimento e emergentes, a participação das emissões de GEE é muito maior do que, por exemplo, nos países da Europa Central, podendo alcançar até 12% do total das emissões nacionais de GEE.

Há muitas razões para isso. Uma das principais razões são aqueles aterros sanitários operados sem as devidas precauções climáticas, como a medida principal de destinação final dos resíduos sólidos, e muitas vezes a única medida de gerenciamento de resíduos.

Além disso, há um potencial significativamente maior de geração de biogás nos aterros sanitários em decorrência da elevada presença de resíduos orgânicos – principalmente àqueles identificados como resíduos domésticos. Nos países em desenvolvimento e nos países recém-industrializados, sua participação se situa entre 45 e 70%.

Os altos padrões técnicos empregados para os sistemas de captura e utilização de biogás, não são amplamente aplicáveis por razões de custo. Além disso, a captura eficiente de biogás em regiões tropicais é dificultada pelo início muito precoce de sua formação, que geralmente começa na fase inicial da operação, impondo desafios que somente operadores qualificados são capazes de responder.

Estão disponíveis sistemas e tecnologias para a gestão sustentável de resíduos e recursos para países em desenvolvimento e emergentes – sendo necessárias adaptações. Mas o que significa “necessárias adaptações”?



Por exemplo, a implementação da coleta seletiva de resíduos orgânicos em países em desenvolvimento e emergentes é viável no contexto das condições estruturais financeiras existentes, das características sociourbanísticas, da logística de coleta e das condições climáticas prevalentes? E faz algum sentido? Com estas proporções muito elevadas de resíduos orgânicos, poderão produzir compostos de alta qualidade a partir da coleta indiferenciada? Qual o balizador empregado no que diz respeito a proteção das águas, solos e ar quando se estabelece sua relação com o clima?

Independentemente destas questões conceituais, apesar da pressão normativa para prover uma gestão sustentável de resíduos sólidos, especialmente do ponto de vista da proteção climática, deve-se observar os desafios para implementar sistemas de gerenciamento ambientalmente adequados em curto e médio prazo.

Um dos principais desafios, além da indisponibilidade de recursos financeiros, é a insuficiência de pessoal qualificado. Isto abrange todos os níveis de gestão e gerenciamento de resíduos, desde a elaboração de políticas e tomada de decisões até o planejamento, construção e operação da planta, financiamento, arcabouço legal, licenciamento e monitoramento, bem como a utilização e comercialização de recursos secundários.

A disponibilidade de pessoal qualificado é vista como um pré-requisito para a introdução, bem-sucedida, da gestão sustentável de resíduos e, portanto, ocupa uma posição chave na estratégia do setor.

A insuficiência de conhecimento também afeta a área de pesquisa e desenvolvimento, pilares para a construção de soluções e adaptação tecnológica. Por último, mas não menos importante, faltam os pré-requisitos para criar uma ampla consciência ambiental na sociedade através de medidas educacionais direcionadas para o desenvolvimento sustentável.

A experiência com a implementação de uma gestão de resíduos ambientalmente adequada e eficiente, nos países em desenvolvimento e emergentes, evidencia o foco, quase exclusivo, nos aspectos organizacionais e técnicos. O desenvolvimento de capacidades geralmente assume um papel de figurante.

Apesar de algumas exceções, a área temática de gestão de resíduos e recursos não está presente nas grades curriculares das instituições educacionais dos países em desenvolvimento e, também, em muitos países emergentes. Conseqüentemente, há uma alta demanda por estratégias de treinamento direcionadas para o setor do saneamento em geral e em particular para a gestão sustentável de resíduos, que deverá estar acompanhada pela disponibilidade de ferramentas e processos de ensino e aprendizagem por meio de plataformas.



A educação para todos e o acesso global cada vez mais importante à informação e ao conhecimento são blocos centrais de construção das sociedades modernas do conhecimento. As ferramentas de ensino e aprendizagem, bem como as informações, devem estar disponíveis gratuitamente. É um direito humano e a chave para o desenvolvimento individual e social.

Recursos Educacionais Abertos (REA) ou, em inglês, *Open Educational Resources (OER)*, é a expressão usada para descrever materiais de aprendizagem e ensino gratuitos com uma licença aberta. O termo REA foi usado pela primeira vez pelo Fórum Unesco 2002 sobre o Impacto do *Software Livre* para o Ensino Superior nos Países em Desenvolvimento.

A motivação dos proponentes do REA fundamenta-se em uma quebra de paradigma relacionado com o mercado voltado para a comercialização de publicações a partir de uma missão relacionada com a criação de um mundo educacional no qual o conhecimento seja universalizado. Outro ponto importante deste movimento REA é a democratização de acesso aos meios digitais e à educação.

Corroborando esta tendência, a Technische Universität Braunschweig lançou a plataforma *Teach4waste*, uma unidade interativa de treinamento e informação multimídia para o setor de gestão de resíduos e recursos, onde consolida informações de cunho tecnológico e de gestão.

Também lançou esta publicação de livre acesso, em modalidade e-book e impressa, com apoio do projeto PROTEGEER, em especial através do Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR) por meio da Secretaria Nacional de Saneamento; do Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza, Segurança Nuclear e Proteção ao Consumidor da Alemanha (BMUV); da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH; do projeto EXCEED-SWINDON; e, do Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD) como também dos diversos autores, apaixonados pelo tema e comprometidos com as mudanças a serem enfrentadas para alcançar o patamar onde os resíduos são gerenciados como possíveis recursos em prol da preservação ambiental e proteção climática.

**Klaus Fricke / Christiane Pereira**

Braunschweig / Brasília, novembro 2022





# Sobre os Coordenadores

## Christiane Dias Pereira

Engenheira civil e Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). Mestre em Administração de Empresas (MBA = *Master in Business Administration*) em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e em Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Coordenadora das atividades da TUBS no Brasil, esta a primeira instituição técnica da Alemanha, fundada em 1745. Atuação especializada em tratamento mecânico e biológico de resíduos sólidos urbanos há mais de 24 anos, atuando em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos com atividades desenvolvidas junto a órgãos públicos e empresas privadas, desde o desenvolvimento de conceitos tecnológicos, implementação de plantas de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) até avaliação técnica, licenciamento ambiental, planos de gerenciamento, desenvolvimento de análise de risco e projetos de financiamento. Promoveu capacitação em gestão de resíduos para os Ministérios (Ministério de Meio Ambiente – MMA, Ministério das Cidades – MCidades, Ministério de Desenvolvimento Regional – MDR e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI) e Municípios brasileiros, como também para bancos públicos (Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e Caixa Econômica Federal – CAIXA), agências ambientais (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo – CETESB-SP e Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina – FATMA-SC), entre outras entidades públicas. Ministrou aulas em tecnologias ambientais na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), no curso de mestrado em Engenharia Urbana; Fundação Escola de Sociologia e Política de São Paulo (FESP-SP) e Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial (SENAC) em Jundiá. Como consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ) desenvolveu, em 2015, a minuta para as tratativas do Conama Compostagem nº 481, de 2017. Realizou em 2014 análise de potencialidade de recuperação energética para a Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Atuou como julgadora de projetos para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2014 e FINEP em



2022. Desenvolveu e coordenou o Caderno Energético, e ainda revisou o Caderno de Valorização de Orgânicos, documentos integrantes do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB); entre outras publicações para o Ministério de Desenvolvimento Regional em 2018 e 2019. Atua como consultora internacional do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico); e, GIZ. Desenvolveu, desde 2018, uma série de análises de editais para o setor privado e MDR, bem como, está responsável para sistematização de contratações na modalidade concessão comum e prestação regionalizada pelo BID em resposta à demanda do MDR e MMA, ambas publicadas em dezembro de 2022. Coordenou por seis anos, a componente acadêmica onde gerenciou uma rede de quinze instituições de ensino e pesquisa de excelência (Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ; Universidade Federal Fluminense – UFF; Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio; Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC; Universidade Estadual de Londrina – UEL; Universidade de Brasília – UnB; Universidade Federal de Pernambuco – UFPE; Universidade de Pernambuco – UPE; Universidade Federal do Ceará – UFC; Universidade Federal do Tocantins – UFT; Universidade Federal do Pará – UFPA; Universidade Estadual do Maranhão – UEMA; Universidade do Estado da Bahia – UNEB; Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará – NUTEC; e, TUBS) por meio do projeto alemão de gestão de resíduos e proteção do clima [[www.protegeer.gov.br](http://www.protegeer.gov.br)]. Organizou e desenvolveu o projeto PROMARES (Projeto Mar Circular: Construindo Soluções), apresentado para classificação em 05.02.2023 ao governo alemão envolvendo quarenta instituições públicas e privadas, a ser implementado em sete estados brasileiros. Tem diversas publicações sobre o tema gestão sustentável de resíduos sólidos. Planejou e acompanhou, por meio de consultoria prestada ao governo alemão, grupos técnicos brasileiros durante visitas em plantas de gerenciamento de resíduos na Alemanha.



## Klaus Fricke

Professor e Doutor em Engenharia. Atuando a mais de quarenta anos como consultor em gestão sustentável de resíduos sólidos e recursos, em projetos nacionais e internacionais com foco em reciclagem de materiais e recuperação energética. Iniciou sua carreira como *Chief Executive Officer* (CEO) e sócio da *Ingenieurgesellschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH*, com equipe de setenta empregados em escritórios na Alemanha, Reino Unido e Luxemburgo. Foi o inventor da coleta seletiva de orgânicos na Alemanha em projeto desenvolvido na cidade de Witzenhausen, em 1983. Planejou, implementou e monitorou mais de sessenta plantas de compostagem e biodigestão, e, ainda, mais de vinte plantas de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). Atuou, por 25 anos, como Diretor do Departamento de Gestão de Resíduos e Recursos na Technische Universität Braunschweig onde tem como foco a internacionalização da gestão sustentável de resíduos, especialmente no campo da biotecnologia e recuperação energética. No Brasil, atua desde 1997, prestando serviço de consultoria para o setor privado e para a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ), inclusive prestou assessoria técnica em programa de capacitação de técnicos da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo (CETESB-SP), este segundo com foco no licenciamento de plantas TMB. Atuou como julgador de projetos de pesquisa para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Implementou e gerencia, desde 2007, o curso de dupla titulação de mestrado profissional em Engenharia Urbana com a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), tendo sido ainda o responsável pela elaboração de minuta para o Conama Compostagem nº 481, de 2017. Detentor de mais de 250 publicações. Foi editor da *Müll und Abfall* (Rejeitos e Resíduos), a publicação técnica de maior relevância na Alemanha. No âmbito da Alemanha atua como consultor para os Ministérios de Meio Ambiente e de Educação e Pesquisa, bem como na Europa atua, ainda, como perito judicial em avaliação de performance tecnológica. Planejou e implementou projeto de pesquisa em mineração de aterros e análise de viabilidade técnica e ambiental de todas as plantas de biodigestão para resíduos orgânicos de origem urbana na Alemanha, contratos estes firmados com o Ministério Alemão de Meio Ambiente.





# Sumário

<b>Introdução .....</b>	<b>21</b>
<b>Cooperação Brasil-Alemanha na promoção de uma gestão de resíduos sólidos urbanos de baixas emissões: estratégias e resultados.....</b>	<b>23</b>
<i>Brazil-Germany cooperation in the promotion of low-emission municipal solid waste management: strategies and results</i>	
Helinah Cardoso Moreira	
Mariana Silva	
Nadja Alves dos Reis	
Christiane Pereira	
<b>Um retrato da realidade dos resíduos sólidos no Brasil .....</b>	<b>51</b>
<i>An overview of the reality of solid waste in Brazil</i>	
Luiz Gonzaga Alves Pereira	
<b>Gestão de resíduos sólidos: obstáculos e soluções potenciais.....</b>	<b>57</b>
<i>Solid waste management: obstacles and potential solutions</i>	
Mateus Almeida Cunha	
Raísa Cardoso Peregrino	
<b>Políticas públicas para gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: introdução e perspectiva geral.....</b>	<b>79</b>
<i>Public policies for urban solid waste management in Brazil: introduction and general perspective</i>	
Letícia Tavares Theotônio	
Marlus Newton Passos Bento Vianna de Oliveira	
<b>Caracterização de resíduos sólidos e seu compromisso com a gestão sustentável.....</b>	<b>99</b>
<i>Solid waste characterization and its commitment to sustainable management</i>	
Christiane Pereira	



**Aspectos quantitativos e qualitativos de resíduos sólidos urbanos nos municípios de Ananindeua, Belém e Marituba..... 135**

*Quantitative and qualitative aspects of municipal solid waste in the Ananindeua, Belém and Marituba municipalities*

Diego Rodrigues Borges da Silva  
Itair da Silva Costa Filho  
Waryson Carlos Silva de Souza  
Filippe Vilhena dos Santos  
Paulo Christian de Freitas Machado  
Isaque Wilkson de Sousa Brandão  
Filipe Castro Pereira  
Maurilo André da Cunha Assunção  
Rafael Haruo Yoshida Silva  
Mario Augusto Tavares Russo  
Neyson Martins Mendonça

**Plataforma de e-learning "teach4waste" para o desenvolvimento de capacidades na gestão de resíduos..... 161**

*E-learning platform "teach4waste" for capacity building in waste management*

Andrea Pfeiffer  
Klaus Fricke  
Christiane Pereira

**Centro de excelência em cooperação para o desenvolvimento – gestão sustentável da água nos países em desenvolvimento – Exceed-SWINDON ..... 185**

*Excellence centre for development cooperation – sustainable water management in developing countries – Exceed-SWINDON*

Andreas Haarstrick

**Sustentabilidade no ensino superior: extensão e formação na educação profissional e tecnológica ..... 203**

*Sustainability in higher education: extension and training in professional and technological education*

Robson Malacarne  
Fábio Lippi Silva  
Michel Mott Machado  
Marcelo Ximenes Aguiar Bizerril

**Economia circular aplicada aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos ..... 227**

*Circular Economy Applied to E-waste*

Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho  
Vivian Fernandes Marinho Ferreira



**Soluções circulares e resíduos sólidos:  
as propostas do programa Finep Startup..... 251**

*Circular solutions and solid waste: the proposals  
of the Finep Startup program*

Henrique Vasquez Fêteira do Vale

**Panorama da logística reversa do óleo usado  
ou contaminado (OLUC) no Brasil ..... 275**

*Overview of the reverse logistics of used or  
contaminated oil (OLUC) in Brazil*

Joyce Sholl Altschul

Jean Marcel de Faria Novo

Celso Romanel

**Combustível derivado de resíduos e sua contribuição  
para a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos..... 303**

*Residues derived fuel and its contribution to sustainable  
urban solid waste management*

Hubert Baier

Christiane Pereira

**Plástico (e microplástico) no meio ambiente:  
impactos e desafios para sua gestão ..... 343**

*Plastic (and microplastic) in the environment:  
impacts and challenges for its management*

Charles Vieira Neves

Christine Claire Gaylarde

José Antônio Baptista Neto

Marcelo Pompermayer de Almeida

Fabiana Cunha Leão Pompermayer

Khauê de Silva Vieira

Estefan Monteiro da Fonseca

**De resíduo à matéria-prima: possibilidades de reinserção  
do resíduo do açaí em cadeias produtivas na  
perspectiva de uma economia circular ..... 373**

*From residue to raw material: possibilities of reinsertion of açaí residue  
in production chains in the perspective of a circular economy*

Carla Lorena Sandim da Rosa

Rodrigo Cândido Passos da Silva

Plínio Barbosa de Camargo



**Influência de agregados provenientes de resíduos de construção e demolição na resistência à compressão de argamassas ..... 397**

*Influence of aggregates from construction and demolition waste on mortars compressive strength*

Maíta dos Santos Rosa  
Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk  
William de Paiva  
Vinícius Masquetti da Conceição

**Ferramenta de apoio à decisão para auxiliar a remediação de lixões de resíduos sólidos urbanos ..... 421**

*Decision support tool to assist the remediation of solid urban waste open dumps*

Juliano da Cunha Gomes  
Armando Borges de Castilhos Junior

**Modelagem da emissão zero de gases do efeito estufa em camadas de cobertura de aterros sanitários ..... 459**

*Modeling the zero emission of greenhouse gases in cover layers systems of landfills*

Moisés Antônio da Costa Lemos  
André Luís Brasil Cavalcante

**Avaliação da sustentabilidade operacional de aterros sanitários da região metropolitana do Rio de Janeiro ..... 481**

*Assessment of the operational sustainability of sanitary landfills in the metropolitan region of Rio de Janeiro*

Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha  
Marlus Newton Passos Bento Vianna de Oliveira  
Ricardo Soares

**Aproveitamento energético do biogás gerado em aterros de resíduos sólidos urbanos: panorama e perspectivas no Brasil ..... 527**

*Energy use of biogas generated in municipal solid waste landfills: overview and perspectives in Brazil*

Thiago Villas Bôas Zanon  
Danilo Laert Lago Brito

**Desempenho da coleta de biogás de aterro sanitário: status quo e perspectivas ..... 547**

*Landfill biogas collection performance: status quo and perspectives*

Christiane Pereira  
Klaus Fricke



**Mineração de aterros sanitários – é uma opção para o Brasil visando reduzir os impactos ambientais resultantes da disposição final de resíduos sólidos? ..... 561**

*Landfill mining – an option for Brazil aimed at reducing the environmental impacts resulting from the final disposal of solid waste?*

Kai Münnich  
Christiane Pereira

**Valorização de resíduos de frutas e vegetais em sistema de co-digestão anaeróbia com adição de biocarvão ..... 591**

*Valuation of fruit and vegetable waste in an anaerobic co-digestion system with biochar added*

Isabela Mangerino Sicchieri  
Thainara Camila Fernandes de Quadros  
Fernando Fernandes  
Emília Kiyomi Kuroda

**Avaliação do potencial de produção de metano de resíduos de restaurante universitário e operação de reator em escala real ..... 613**

*Assessment of the production potential of methane from university restaurant waste and real scale reactor operation*

Adriana Zemiani Challiol  
Jessica Klarosk Helenas Perin  
Mauricio Aparecido Bortoloti  
Priscila Liane Biesdorf Borth  
Betina Ludwig Navarro  
Emília Kiyomi Kuroda  
Fernando Fernandes

**Abordagens sociais e de gênero para uma economia circular inclusiva ..... 635**

*Social and gender approaches towards an inclusive circular economy*

Priscilla Santos  
Rayana Burgos

**Resíduos e clima ..... 663**

*Waste and climate*

Klaus Fricke  
Günter Dehoust  
Winfried Bulach  
Andrea Pfeiffer  
Christiane Pereira





# INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, publicada em 2010, foi o estopim para o advento de tecnologias pioneiras no Brasil tais como tratamento mecânico-biológico, combustível derivado de resíduos, biodigestão, incineração, mas também de compromissos de gestão sustentável, em especial, a logística reversa e a responsabilidade compartilhada. Estas definições quando incorporadas ao dia a dia do mercado passou a definir uma linha de atuação onde a inovação conquistada pela valorização dos resíduos sólidos, com a finalidade de preservar recursos naturais e proteger o meio ambiente, passou a ser privilegiada às práticas tradicionais de manejo (coleta, transporte e transbordo), e disposição final em aterros sanitários.

É de fundamental importância reconhecer que em um país onde 40% dos resíduos sólidos urbanos ainda são dispostos em lixões (Abrelpe, 2021) há necessidade de inicialmente se alcançar um patamar intermediário de advento tecnológico, onde primeiramente se privilegia o encerramento dos lixões, sua remediação e a disposição final adequada em aterros sanitários, e a partir dessa conquista, associa-se a inclusão social, implementa-se programas de educação ambiental, estuda-se a potencialidade do mercado para consumo de subprodutos derivados da valorização de resíduos, verifica-se sua viabilidade econômico-financeira e consolida-se a sustentabilidade de pagamento pelos serviços prestados.

Esse passo a passo dita o sucesso de uma gestão sustentável, afasta desconfortos e imprudências resultantes da ruptura dos sistemas, seja por comprometimento econômico-financeiro, seja por insuficiente capacidade técnica e operacional.

Neste sentido deve-se aprimorar as relações institucionais e privilegiar a cooperação intersetorial onde o diálogo amplo de mercado é estabelecido, bem como a inovação tecnológica e a gestão sustentável, com o objetivo de contribuir para a melhoria das condições institucionais para a valorização dos resíduos sólidos, como também, estabelecer discussões que sejam alinhadas a mitigação dos impactos ambientais e sociais, a fim de contribuir para a ancoragem a longo prazo de uma política de resíduos inovadora e com alto impacto na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Observando a pluralidade de contratações de longo prazo na forma de concessões bem como os marcos legais mais recentes, podemos afirmar que é possível, em curto e médio prazo, colocar o



país na vanguarda do conhecimento em áreas críticas, como energia e sistemas ambientais, bem como, biotecnologia e disposição final.

Nessas áreas, há inúmeras oportunidades para fomentar grandes projetos orientados à resolução de problemas concretos do país (como encerramento dos lixões, reciclagem de materiais, recuperação energética, novos materiais), que permitiriam alavancar atividades de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) e produção de tecnologias mediante a união de competências públicas e privadas, uma articulação cada vez mais valorizada e necessária para o avanço da inovação e da tecnologia.

Neste sentido, torna-se imprescindível o diálogo entre uma série de atores de mercado composta por uma massa crítica formada a partir de uma base acadêmica. A essência deste diálogo deve privilegiar a abordagem prática, gerando assim uma nova linguagem acadêmica que atenda às expectativas do mercado tanto privado quanto público através de ações que ratifiquem a exequibilidade de uma gestão sustentável dos resíduos.

Essa agenda que promove a sustentabilidade da gestão de resíduos sólidos impulsiona a retomada da taxa de crescimento de longo prazo, melhora oportunidades e combate desigualdades. A educação sustenta o crescimento econômico de longo prazo quando promove a capacitação do capital humano, o desenvolvimento de parque industrial e melhora a produtividade do setor.

É a articulação dessas três dimensões, mercado-educação-pesquisa, que apresentaremos nesse livro. A reunião de diferentes profissionais, todos com notório conhecimento, permite democratizar o acesso ao conhecimento, fortalecendo os elos mais frágeis da gestão de resíduos sólidos, fomentar novas gerações de pesquisadores e profissionais, incentivar a busca de patentes, desenvolver tecnologias, e, sobretudo, formar massa crítica para assegurar resultados claros para a economia e a sociedade, em que a promoção da gestão sustentável de resíduos sólidos deixe de ser visão de futuro e se torna uma realidade presente.

**Christiane Pereira / Klaus Fricke**

Brasília / Braunschweig, novembro 2022

## REFERÊNCIA

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 22 set. 2022.



# COOPERAÇÃO BRASIL-ALEMANHA NA PROMOÇÃO DE UMA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DE BAIXAS EMISSÕES: ESTRATÉGIAS E RESULTADOS

## *BRAZIL-GERMANY COOPERATION IN THE PROMOTION OF LOW-EMISSION MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT: STRATEGIES AND RESULTS*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

MOREIRA, Helinah Cardoso; SILVA, Mariana; REIS, Nadja Alves dos; PEREIRA, Christiane. Cooperação Brasil-Alemanha na promoção de uma gestão de resíduos sólidos urbanos de baixas emissões: estratégias e resultados. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Helinah Cardoso Moreira**

Engenheira Ambiental formada pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Técnica em Meio Ambiente pelo Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ). Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e Technische Universität Braunschweig (TUBS). Diretora de Projeto pela Cooperação Alemã para Desenvolvimento Sustentável por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e Team Leader no projeto GCoM Americas na área de Clima e Energia da União Europeia. E-mail: helinah.cardoso@giz.de

### **Mariana Silva**

Gestora ambiental, com especialização em gestão de projetos. Trabalha para agência de Cooperação Alemã Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH no Brasil desde de 2014. Atua na gestão do projeto, temas transversais e ações relacionadas ao Governo Federal fomentando a temática do potencial de mitigação de gases de efeito estufa no setor de resíduos sólidos urbanos.

E-mail: mariana.silva@giz.de

### **Nadja Alves dos Reis**

Formada em Comunicação Social, com habilitação em Comunicação Organizacional, pela Universidade de Brasília (UnB). Desde 2019, atua na comunicação interna e externa de projetos ambientais da Cooperação Alemã Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH no Brasil.

E-mail: nadja.reis@giz.de

### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig



(TUBS). *Master in Business Administration (MBA)* em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)*; *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); e; *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico)*. Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos temáticos para o PLANSAB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: [christiane@terramelhor.com.br](mailto:christiane@terramelhor.com.br)

## RESUMO

A cooperação Brasil-Alemanha, por meio do projeto PROTEGEER, atuou de 2017 a 2022 no Brasil, visando favorecer condições regulatórias, de mercado e institucionais positivas para modelos de gestão de RSU circulares e de baixas emissões de gases de efeito estufa (GEE). O legado do projeto demonstra avanços significativos do setor, com instrumentos concretos, fortalecimento de capacidades institucionais e pessoais, casos de sucesso e um novo momento de atratividade do setor para negócios sustentáveis.

Palavras-chave: Gestão. Clima. Resíduos. Tecnologias. Capacitação.

## ABSTRACT

German-Brazilian cooperation, through the PROTEGEER project, acted from 2017 to 2022 in Brazil, aiming to promote conditions positive regulatory, market and institutional conditions for MSW management models circular and low greenhouse gas (GHG) emissions. The legacy of the Project demonstrates significant advances in the sector, with concrete instruments, institutional and personal capacity building, success stories and a new moment of attractiveness for new moment of attractiveness of the sector for sustainable business.

Keywords: Management. Climate. Waste. Technologies. Capacity building.

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos ainda é um grande desafio para os municípios brasileiros. Questões como a viabilidade econômica ou a seleção das melhores tecnologias são apenas parte desse processo. Alguns dados demonstram a dimensão da complexidade: 79 milhões de toneladas geradas anualmente, a presença de mais de 3 mil lixões em operação no país, e cerca de 4% dos resíduos reciclados.

Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) já exista há mais de dez anos, a gestão municipal ainda tem dificuldade em definir a solução mais apropriada para seu município e acaba



mantendo os lixões. Implementar soluções adequadas não é tão simples assim: mais do que obrigações determinadas pela Lei, a gestão dos resíduos é uma questão de compromisso com o desenvolvimento social, respeito ao meio ambiente e ponto fundamental para o desenvolvimento econômico dos municípios.

Além disso, a gestão de RSU é um fator de comprometimento com os acordos globais pelo clima – e, sim, os municípios têm um papel fundamental no alcance das metas mundiais para frear o aquecimento global. Nesse contexto, uma gestão integrada de RSU contribui diretamente para mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Os municípios que têm conseguido se comprometer com as políticas pelo clima vêm se tornando exemplo para a gestão de outros municípios.

Com a finalidade de fortalecer o desenvolvimento de capacidades e promover instrumentos de apoio à tomada de decisões para o setor de resíduos, possibilitando o atendimento aos pressupostos legais de Resíduos e Clima, os Governos Brasileiro e Alemão firmaram uma cooperação para a proteção do clima na gestão de resíduos sólidos urbanos, denominado PROTEGEER. O principal objetivo do projeto é o desenvolvimento de capacidades e a implementação de medidas que possibilitem a redução da emissão de GEE no setor de resíduos sólidos urbanos a partir da integração de políticas públicas e de ações sistêmicas locais.

O PROTEGEER é coordenado no Brasil pelo Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), por meio da Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), responsável pela coordenação da implementação da Política Federal de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB).

Pelo Governo Alemão, o projeto é implementado pela agência de cooperação alemã para o desenvolvimento sustentável, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, conjuntamente com a Technische Universität Braunschweig (TUBS), sendo financiado pelo programa de proteção internacional do clima, em alemão, Internationale Klimaschutz Initiative (IKI), do Ministério do Meio Ambiente, Conservação da Natureza, Construção e Segurança de Reatores Nucleares (BMUV = Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) da Alemanha.

O projeto teve como foco três frentes de trabalho:

- ♦ Atuar junto aos Ministérios responsáveis pelas políticas de clima e resíduos visando aperfeiçoar instrumentos regulatórios, técnicos e de financiamento;



- ♦ Instrumentalizar municípios para avançarem no manejo sustentável de resíduos sólidos urbanos;
- ♦ Fomentar uma rede científica de ponta no Brasil para intercambiar conhecimento junto à TUBS e incorporar em seus cursos e em suas pesquisas um conhecimento técnico aplicado e focado nas demandas do mercado. Nas três ações, o desenvolvimento de capacidades institucionais e pessoais foram estimulados.

## 2 PANORAMA DE MERCADO

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) prevê que nos próximos trinta anos:

[...] o Brasil observará um aumento de quase 50% no montante de RSU, em comparação ao ano base de 2019. Para o mesmo período, a projeção de crescimento populacional esperada é de 12%, o que evidencia a influência decisiva na componente de perspectiva econômica nessa equação: o avanço gradual do Produto Interno Bruto (PIB) e conseqüentemente o aumento do poder aquisitivo da sociedade. (ABRELPE, 2020, p. 40)

Ainda, segundo a ABRELPE (2020), no período entre 2010 e 2019, a geração total de RSU aumentou em cerca de 19% no país, com um crescimento de 9% na taxa de geração *per capita*, atingindo cerca de 79 milhões de toneladas anuais ou 1,039 kg/hab./dia, sendo que 92% destes resíduos foram efetivamente coletados, o que corresponde a 72,7 milhões de toneladas anuais ou 0,956 kg/hab./dia. Desta forma, em 2019, a quantidade estimada anual gerada por habitante é de 379,2 kg e a coletada 348,9 kg (ABRELPE, 2020, p. 15 e 16).

Das 5.570 cidades do Brasil, quase 73% têm iniciativas de coleta seletiva, segundo ABRELPE (2020, p. 19 e 33), mas a maioria das cidades ou implementaram esse recurso apenas de maneira parcial ou não têm capacidade de triagem suficiente, o que resulta na destinação dos recicláveis coletados em aterros sanitários. Com isso, 40% dos resíduos gerados acabam em locais inadequados, tais como lixões e aterros controlados. No Brasil, os aterros sanitários dominam a destinação final no manejo de resíduos.

Levantamento do Ministério de Meio Ambiente (MMA) aponta para a existência em 2020 de 3.257 lixões, sendo que durante o período de 2020-2021 houve uma redução significativa na ordem de 600, o que representa uma forte política de redução de lixões (MMA, 2021).

O Brasil representa um mercado importante, tendo os municípios aplicado recursos na ordem de R\$ 25 bilhões em 2019 (R\$ 10 por habitante/mês), conforme ABRELPE (2020, p. 22).



O Poder Público, especificamente as prefeituras, destacam-se na operação do manejo dos resíduos, alcançando 59,3% e, em seguida, as empresas privadas 19,8%, os catadores 17,5%, outros operadores 2,6% e consórcios 0,9%. A participação pública torna-se ainda mais relevante quando da análise das ações de destinação dos resíduos, 84% realizada pelas prefeituras municipais e 13,6% por operadores privados, outros operadores 1,3% e consórcios 1,1% (SNIS, 2019).

ABRELPE (2020, p. 23 e 35) também aponta a geração de 332 mil empregos, entretanto, a Associação Nacional de Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis em Anuário da Reciclagem (ANCAT, 2020, p. 47) relata a existência de 1.829 organizações de catadores, com mais de 46 mil pessoas, além de um forte setor informal comentado pelo Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR, 2021), com mais de 800 mil pessoas envolvidas em serviços de coleta, triagem e venda de resíduos recicláveis.

Quanto da composição dos resíduos, observa-se uma proporção extremamente elevada da fração orgânica, típica das economias de mercado emergentes, e a consequência é um valor calórico muito baixo. Nesse sentido, as biotecnologias desempenham um papel importante como solução para minimizar o impacto ambiental, combinado com o uso de combustíveis alternativos no coprocessamento pelo mercado de cimento.

A oportunidade para novos negócios no Brasil está focada na formação de parcerias entre operadores nacionais e fornecedores estrangeiros de tecnologia, mas, também, no aumento do interesse de segmentos competitivos da economia, como a indústria de cimento, celulose e indústrias de energia, que irão dividir o mercado com os operadores tradicionais do setor de limpeza pública.

O desenvolvimento do mercado para recursos secundários é uma consequência da implementação dos mecanismos da Lei. Para tal, é necessária infraestrutura, tecnologia e sistemas eficazes de gerenciamento de resíduos.

Em relação à sustentabilidade econômica, a maioria das cidades não tem um mecanismo de cobrança adequado para o manejo dos resíduos, como apresentado pelo SNIS (2019). A fragilidade da sustentabilidade financeira permanece no setor, uma vez que apenas 44,8% dos municípios cobram pelos serviços, e o valor arrecadado subsidia apenas 57,2% dos custos.

A sustentabilidade econômico-financeira da gestão de resíduos no Brasil pode ser estimulada com a implementação de



consórcios se levarmos em conta que 68% dos municípios brasileiros, ou 3.782 (IBGE, [2020]), tem população inferior a 20 mil habitantes.

A regionalização por meio do estabelecimento de consórcios pode acelerar a implementação de medidas sustentáveis de gestão de resíduos, com o compartilhamento de despesas e capacidades técnicas, com objetivo de reduzir os custos e, sobretudo, os riscos tecnológicos e operacionais. O Observatório dos Lixões ([2021]) apresenta que 28% dos municípios já atuam em consórcio.

Segundo relatório publicado pela Radar PPP, em setembro de 2022, das 4.092 iniciativas de concessão, 482 estavam relacionadas com o gerenciamento de resíduos sólidos, ou seja, 11,77% do total. Contudo, dessas 482 iniciativas, apenas 63 contratos foram firmados, o que representa apenas 13% (Radar PPP, 2022).

A baixa assertividade das estruturas e licitações decorre de fatores multidisciplinares, relacionados tanto com condicionantes jurídicas quanto aspectos técnicos, econômico-financeiros e sociais.

Nesse momento, em razão do advento de premissas presentes na Lei nº 14.026/2020 (Novo Marco Legal do Saneamento), há um novo estímulo para o Poder Público e a iniciativa privada sobre a aplicação da concessão como modelo para execução das metas propostas nas políticas públicas para a gestão ambientalmente adequada do RSU.

Com as diretrizes relacionadas à regionalização, à sustentabilidade econômico-financeira obrigatória, aos mecanismos de cobrança e a regulação, considera-se que o país reúne condições para transmitir segurança jurídica, atraindo investimentos do setor privado por meio de novas concessões, o que tende a impulsionar novos projetos para as cidades.

A concessão também é um instrumento de política pública para garantir o alcance das metas, assegurar universalização dos serviços, encerramento dos lixões e a gestão sustentável do RSU com preservação dos recursos naturais e maior proteção ambiental, superando as limitações para realizar investimentos.

No entanto, a ausência de conhecimentos por parte de tomadores de decisão a nível local pode limitar, atrasar ou mesmo impedir a aplicação desse importante instrumento legal e dos investimentos dele decorrentes.

Isto posto, o mercado brasileiro tem demonstrado avanços concretos em políticas públicas e na transição para uma prestação de serviços com pilares mais sustentáveis. Por outro lado, é importante salientar que ainda existem grandes passos a dar no aperfeiçoamento das infraestruturas existentes, na estruturação de modelos de gestão



mais eficientes e no entendimento dos aspectos ambientais, climáticos e sociais como componentes fundamentais na tomada de decisão.

Para a inclusão de aspectos climáticos dentro dos processos de tomada de decisões do setor, é necessário contar com conhecimento técnico, visão de longo prazo do setor público e privado, ampliação da base de investidores, monitoramento, transparência nos processos e introdução de práticas que contribuam para a quantificação e mitigação de emissão de GEE.

Estabelecer uma política de baixas emissões no setor pode trazer inúmeros benefícios para a sociedade brasileira e, ainda, assegurar um posicionamento estratégico positivo nas negociações internacionais. Nessa conjuntura, a possibilidade de aumento exponencial de investimentos, combinada à capacidade técnica, à segurança jurídica e às oportunidades climáticas, aliam-se para garantir o desenvolvimento sustentável do setor, podendo, inclusive, representar uma alavanca para a retomada da economia brasileira.

Segundo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI, 2022, p. 46), “o subsetor Disposição de Resíduos Sólidos contribuiu com 3.172,9 Gg CH<sub>4</sub> ou 60,9% das emissões do setor em 2020, em termos de CO<sub>2</sub>eq, e apresentou um aumento de 16,7% se comparado com 2016”. O referido levantamento considerou as emissões de metano (CH<sub>4</sub>) “durante a decomposição anaeróbica da matéria orgânica depositada em aterros sanitários, aterros controlados e lixões” (MCTI, 2022, p. 46).

Contudo, para que esse cenário de redução de emissões de GEE possa ser alcançado, os esforços devem estar voltados para uma visão de longo prazo que conduza a uma adequação estruturante. Nesse sentido, o encerramento dos lixões é uma prioridade, seguido de práticas de valorização (tratamento) dos resíduos, disposição final dos rejeitos e destruição/aproveitamento energético do metano em aterros sanitários. Essas medidas irão contribuir diretamente para o aumento da resiliência e da qualidade de vida nas cidades brasileiras.

É importante ressaltar que a última década foi marcada por importantes avanços em termos regulatórios em prol de uma gestão sustentável do saneamento. Isso tem permitido romper barreiras entre o setor público e privado e criar um leque de oportunidades para democratização do conhecimento e inovação no setor, por meio do aporte tecnológico e de investimento necessário ao enfrentamento dos inúmeros desafios dentro do tema no Brasil.

Corroboram para o entendimento sobre o impacto da gestão de resíduos no clima, estudos promovidos pelo Ministério Alemão de



Meio Ambiente (BMUV) que estimam que o setor de resíduos, por meio da implementação de sistema de gestão sustentável, pode contribuir na redução de GEE na ordem de 10 a 15% do país. Estudos feitos pelo PROTEGEER demonstram um potencial de reduzir até 50% das emissões totais do setor de saneamento (resíduos e esgotos) em 2033 por meio da inserção de novas rotas tecnológicas de valorização de resíduos e tratamento sustentável de esgotos, considerando as metas do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES).

Grande parte dessas emissões podem ser reduzidas ou neutralizadas através da destruição de metano ou da geração de energia a partir do biogás gerado em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

Contudo, é fundamental que sejam incluídas práticas de valorização de resíduos, pois o desvio de massa dos aterros é mais representativo em termos de redução de emissões de GEE do que a destruição de metano ou geração de energia somente nos aterros.

A hierarquia de gerenciamento de resíduos estabelecida pela PNRS, fomenta a implementação de atividades de valorização de materiais e energética, desviando assim tanto frações secas quanto orgânicas dos aterros e contribuindo mais significativamente para a redução das emissões de GEE. Na Alemanha, por exemplo, durante o período de 1990 a 2019, o setor de saneamento foi o que reduziu emissões de GEE, na ordem de 75,8%, em razão da intensificação da reciclagem e a proibição da disposição de resíduos sem tratamento prévio nos aterros sanitários.

### **3 COOPERAÇÃO PROTEGEER**

O PROTEGEER é um projeto de cooperação técnica entre Brasil e Alemanha iniciado em 2017, após discussões globais sobre as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) e o grande encontro das Nações Unidas para as causas climáticas que originou o Acordo de Paris (Promulgado pelo Decreto nº 5.753/2006).

No momento em que o projeto foi elaborado, foi diagnosticada a insuficiência de tecnologias de valorização de resíduos, e da falta de avanços concretos na implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Por outro lado, um ambiente positivo para discussões sobre o combate às mudanças climáticas motivou sua implementação.

O aspecto inovador do projeto é o fomento a uma visão integrada e intersetorial do setor de resíduos, buscando modelos de gestão que considerem as potencialidades do manejo dos RSU



envolvendo a proteção climática, com o intuito de mitigar os impactos ambientais negativos e fortalecer práticas fundamentadas na economia circular.

Além disso, servidores públicos em diferentes esferas e colaboradores do setor privado tiveram suas capacidades institucionais e pessoais fortalecidas. Em paralelo, foram elaborados diversos instrumentos e conteúdos técnicos para apoio à tomada de decisão dos municípios, o que deu melhores condições para planejar e implementar medidas de gestão de RSU com alto impacto na redução de emissões de GEE.

O projeto atuou, também, na inserção de conteúdos de gestão de resíduos com alto impacto na redução de GEE em currículos universitários, bem como a construção de uma rede virtual de pesquisa e consultoria Brasil-Alemanha, a fim de contribuir para a ancoragem a longo prazo de uma política de resíduos inovadora.

Para atingir esses objetivos, o projeto foi desenhado em três linhas de ação voltadas para diferentes públicos-alvo: o governo federal, os municípios e as academias. A primeira linha de ação refere-se ao ambiente técnico-regulatório e financeiro, a nível macro, sendo chamado neste artigo de “condições regulatórias e financeiras”. A segunda componente será apresentada como “desenvolvimento de capacidades”, considerando que esse é um pilar fundamental da cooperação técnica. A terceira linha de ação é o “fortalecimento das instituições científicas”, que buscou uma aproximação das demandas do mercado com a pesquisa.

### **3.1 CONDIÇÕES REGULATÓRIAS E FINANCEIRAS**

A primeira linha de ação atuou diretamente com o Governo Federal, em especial com o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), do Meio Ambiente (MMA) e da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), além de instituições financeiras, como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Caixa Econômica Federal (CAIXA), que financiam projetos de resíduos sólidos no Brasil.

As ações previstas objetivaram assessorar tecnicamente os ministérios e instituições financeiras para a inclusão de parâmetros relevantes para o clima nos instrumentos públicos nacionais de gestão de resíduos e de financiamento, ou, em outras palavras, garantir a integração das políticas de clima e de resíduos. As ações planejadas podem ser resumidas nas seguintes etapas:

- ♦ Diagnóstico técnico sobre as emissões de GEE no setor de RSU no Brasil (validação da linha de base);



- ♦ Avaliação de potenciais cenários de mitigação de GEE no setor de RSU;
- ♦ Incorporação dos resultados do diagnóstico e cenários de mitigação de emissões de GEE no PLANSAB;
- ♦ Incorporação dos resultados técnicos sobre potenciais ações de mitigação no setor de RSU em manuais de seleção e instrumentos de financiamento.

Os principais impactos dessas ações são o desenvolvimento de capacidades individuais e institucionais sobre o tema, o entendimento do real potencial da gestão de resíduos na proteção do clima e a promoção do diálogo interministerial para aumentar a percepção sobre a importância da economia circular no estabelecimento de políticas públicas em gestão de resíduos.

### **3.2 DESENVOLVIMENTO DE CAPACIDADES**

Essa componente tinha como objetivo fortalecer as capacidades institucionais e pessoais de atores municipais para desenvolvimento de uma economia circular por meio do aumento da eficiência na utilização de recursos naturais e da redução de emissões de GEE. As ações planejadas podem ser resumidas nas seguintes etapas:

- ♦ Elaboração de ferramentas de apoio para tomada de decisão sobre a gestão de RSU;
- ♦ Treinamento de representantes e consultores de municípios etc. em cooperação com os parceiros de implementação (MDR, MMA, TUBS) e parceiros intermediários relevantes (consórcios e associações de municípios, associações de empresas de gestão de resíduos);
- ♦ Apoio e divulgação de melhores práticas na gestão de RSU para redução de emissões de GEE;
- ♦ Disseminação de literatura técnica que aborde os temas gestão de RSU e redução de emissões de GEE;
- ♦ Desenvolvimento de curso de Ensino à Distância (EaD) disponibilizado na plataforma CAPACIDADES do MDR.

### **3.3 FORTALECIMENTO DA ACADEMIA**

Essa componente visou, por meio de intercâmbio (programas, rede virtual, projetos de pesquisa) entre as instituições científicas brasileiras e alemãs, que a troca e disseminação de *know-how* sobre a redução de emissões de GEE – por meio da gestão adequada de resíduos no Brasil – tornem-se práticas recorrentes.



Para cumprir com este objetivo, a componente foi composta por três eixos de atuação: i) intervenção curricular teórica e de cunho prático; ii) projetos de pesquisa aplicada em larga escala; e, iii) formação de rede virtual. As ações planejadas são sintetizadas da seguinte forma:

- ♦ Implementação de módulos sobre mitigação à mudança do clima e tecnologias de tratamento ambientalmente adequadas em universidades brasileiras;
- ♦ Criação de uma Rede Virtual Brasil Alemanha para disseminação de informações sobre gestão de RSU para redução de emissões GEE;
- ♦ Promoção do diálogo acadêmico/científico e submissão de propostas de projetos de pesquisa na temática RSU e redução de emissões de GEE;
- ♦ Desenvolvimento de plataforma virtual *Teach4Waste* para disseminação de conteúdo robusto e atualizado.

Estes eixos de atuação foram planejados com o intuito de reduzir o abismo entre a academia e o mercado, incrementando o padrão de qualidade das universidades, voltado principalmente para o emprego de ferramentas que assegurem uma maior assertividade prática das instituições frente aos desafios reais do mercado.

## 4 PRINCIPAIS RESULTADOS

Os resultados coletados durante o implemento do projeto evidenciam sua capacidade em extrapolar os indicadores firmados e sua preocupação em garantir uma discussão a transversal e multidisciplinar com o mercado.

### 4.1 CONDIÇÕES REGULATÓRIAS E DE FINANCIAMENTO

As condições regulatórias e de financiamento representam o alicerce para o implemento de uma gestão sustentável de RSU. Para tal, durante o desenvolvimento desse arcabouço de instrumentos normativos e propostas de intervenção que garantam a viabilidade econômico-financeira foram consideradas as limitações do Poder Público e seus compromissos com a preservação ambiental, proteção do clima e à saúde pública.

#### 4.1.1 Fortalecimento de políticas e instrumentos públicos

O projeto atuou fortemente junto ao Ministério do Desenvolvimento Regional para revisar e contribuir com ações de redução de GEE no setor de RSU em instrumentos públicos regulatórios e de financiamento do Governo Federal.



No total, treze instrumentos, dentre eles um plano nacional, foram adaptados considerando critério ou uma abordagem de mitigação de emissões de GEE na gestão de RSU, sendo eles:

- ♦ Instrução Normativa nº 39 do MDR – Inserção de um critério de prioridade de mitigação de GEE em projetos de RSU – jul./2017;
- ♦ Fundo Verde para o Clima (*Green Climate Fund – GCF*) evidencia o setor de resíduos como potencial mitigador de GEE – nov./2017;
- ♦ Propostas de ações de mitigação para o setor de resíduos pelo Fórum Brasileiro de Mudanças do Clima (FBMC) – maio/2018;
- ♦ Inserção do tema “mitigação de GEE” enquanto um critério na Nota Técnica Conjunta nº 164/2018-MP – set./2018;
- ♦ PLANSAB – Contribuição no plano na parte de resíduos e na formulação de indicadores principais e auxiliares;
- ♦ Caderno Temático sobre Valorização de Resíduos Orgânicos – fev./2019 – para PLANSAB;
- ♦ Caderno Temático sobre cobrança pela prestação dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos – fev./2019 – para PLANSAB;
- ♦ Caderno Temático sobre Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos – fev./2019 – para PLANSAB;
- ♦ Caderno Temático sobre Gestão de resíduos sólidos urbanos com baixas emissões de GEE – fev./2019 – para PLANSAB;
- ♦ Contribuições técnicas para o MMA no Decreto nº 10.143/2019 que regulamenta o Fundo Clima – nov./2019;
- ♦ Incorporação do tema “economia circular” no Edital MMA/FDD [Fundo de Defesa de Direitos Difusos] – set./2019;
- ♦ Contribuições técnicas para incorporação de critérios climáticos e visão de economia circular no Edital da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan) Lab Procel para área de RSU – jan./2020;
- ♦ Contribuições técnicas para melhoria de dados no setor de resíduos para a IV Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – out./2021.

O projeto também apoiou o desenvolvimento de documentos técnicos que serviram como referência para estratégias e discussões do Governo Federal nos assuntos relacionados a: Digitalização no setor de Resíduos Sólidos Urbanos; Potencial Climático no setor de Saneamento, documento usado como referência para discussões na COP26; além de contribuições e outras análises críticas à políticas e decretos.



### 4.1.2 Desenvolvimento de um kit de ferramentas

Durante a assessoria técnica aos 46 municípios, foi observada a necessidade de sistematizar o conhecimento, com objetivo de sustentabilizar as práticas, integrando-as como mecanismos de gestão municipal. Pensando nisso, foi criado um conjunto de ferramentas e instrumentos para apoiar os gestores municipais, como uma solução gratuita e disponível via internet: o Kit de Ferramentas PROTEGEER para aprimoramento da Gestão Municipal de RSU.

O Kit de Ferramentas oferece um conjunto de orientações e instrumentos práticos de gestão de RSU com conteúdo que aborda diversos problemas e demandas do(a) gestor(a), trazendo soluções tecnológicas, administrativas e econômicas.

Ele é composto por ferramentas de simulação e cálculo em formato Excel e roteiros de tomada de decisão em formato PDF. Cada ferramenta foi testada e validada por ao menos três projetos-piloto, incluindo municípios e consórcios, além de ter passado por revisões e críticas de instituições do setor privado. O resultado disso foi o desenvolvimento de materiais atualizados, que podem ser utilizados como referências para apoiar os principais desafios apresentados pelos gestores municipais. No Quadro 1, apresenta-se um resumo breve dos instrumentos que foram publicados pelo MDR em 2021:

Quadro 1 – Ferramentas para manejo de  
Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Boas Práticas na Gestão de RSU	Ferramenta interativa para divulgar boas práticas na gestão de RSU. Indica os links para acessar e pesquisar o resumo das experiências de Melhores Práticas. De acesso simples e direto às experiências com as melhores práticas na gestão de RSU que podem promover o diálogo regional.
Roteiro para Planejamento e Implementação da Coleta Seletiva	Roteiro com orientações aos municípios para implantarem ou expandirem seus sistemas de coleta seletiva, as quais devem ser seguidas (cada uma das quatro etapas propostas no Manual) para obter os melhores resultados na separação, coleta e destinação dos RSU recicláveis com a coleta seletiva implantada no município, com altos índices de separação na fonte, eficiência da coleta e adequação da destinação final.



<p>Roteiro para Implementação de Consórcios Públicos de Manejo de RSU</p>	<p>Roteiro com orientações aos municípios para buscar soluções compartilhadas e consorciadas para que os sistemas de gestão de RSU sejam mais sustentáveis.</p> <p>Deve-se seguir as orientações das etapas propostas no Roteiro para obter os melhores resultados na definição de soluções centralizadas e consorciadas para o manejo dos RSU. Como resultados teremos um consórcio implantado com uma solução centralizada para algumas etapas do manejo dos RSU de vários municípios.</p>
<p>Roteiro para Avaliação da Produção e Utilização de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) – Passo a passo para avaliação preliminar de viabilidade</p>	<p>Roteiro com orientações ao gestor público sobre como coordenar a elaboração de um estudo sobre a viabilidade de um projeto CDR para seu município ou consórcio de municípios. Apóia na avaliação das condições básicas de viabilidade do projeto CDR; na preparação de estudo detalhado de viabilidade; na forma de apresentação para investidores privados; e na definição dos encaminhamentos do projeto CDR.</p>
<p>Roteiro para a Sustentabilidade do Serviço Público de Manejo de RSU</p>	<p>Roteiro para apoiar a implantação da política de cobrança pelo serviço público de manejo de RSU, considerando as diferentes dimensões do processo: política, jurídica, institucional e comunicacional. Seu uso facilita um processo estruturado da implementação da cobrança e promove a viabilidade e sustentabilidade econômico-financeira de longo prazo dos serviços de RSU.</p>
<p>Roteiro para Encerramento de Lixões e Próximos Passos</p>	<p>Roteiro com orientações para o município iniciar o planejamento do processo de encerramento de um lixão. O roteiro traz informações sobre o porquê encerrar um lixão, qual a importância desse passo para o município, e apresenta dez passos para concluir esse processo de forma satisfatória</p>
<p>Roteiro para Redução das Emissões de GEE no Manejo de RSU</p>	<p>Roteiro com orientações sobre como melhorar a gestão de resíduos sólidos urbanos no município e que, ao mesmo tempo, tragam benefícios para o clima, com base em escolha de rotas tecnológicas que reduzam a emissão de GEE.</p>

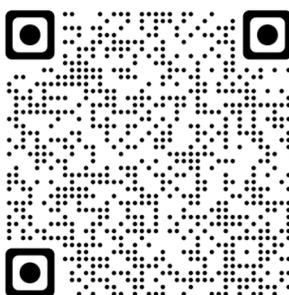


Ferramenta de Cálculo de Taxas ou Tarifas dos Serviços de Manejo de RSU	Ferramenta de cálculo de custos do serviço de manejo de RSU e do valor básico de cálculo (VBC) das respectivas taxas ou tarifas por meio de uma avaliação completa, com dados detalhados das despesas de gestão de RSU, ou uma avaliação simplificada. Permite a determinação de alternativas de taxas ou tarifas diferenciadas que considerem critérios sociais, geração de resíduos e outros.
Ferramenta de Rotas Tecnológicas e Custos para Manejo de RSU	Ferramenta de simulação de rotas tecnológicas que gera diferentes cenários de gestão de RSU e seus respectivos custos de implementação e operação. Funciona a partir da inserção dos dados locais de RSU e da tomada de decisão sobre cada etapa do processo incluindo a coleta, os diferentes tipos de tratamento e a disposição final. Viabiliza um melhor planejamento de ações por parte dos técnicos e gestores municipais, auxiliando na implementação de uma gestão integrada de RSU mais sustentável.
Ferramenta de Cálculo de Emissões de GEE no Manejo de RSU – Metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	Ferramenta de simulação para calcular e comparar os níveis de emissão de GEE por diferentes soluções de gestão de RSU existentes ou a serem implantados no município. Deve-se inserir os dados (geração, coleta, tratamento e disposição final) e a ferramenta irá comparar a contribuição das emissões de GEE de diferentes soluções de manejo de RSU implantados no município.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2022).

Na Figura 1 é disponibilizado acesso a todas as ferramentas do Kit.

Figura 1 – Código QR Code – ferramentas do Kit



Fonte: Imagem gerada pelas autoras (2022). Disponível em:  
<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer>.



Os instrumentos do Kit de Ferramentas foram amplamente divulgados pelo MDR e pelo PROTEGEER por meio da participação em eventos e capacitações (MDR, 2021).

#### 4.1.3 Desenvolvimento de capacidades

Durante os quase seis anos da implementação do projeto, cerca de 2 milhões de toneladas de resíduos foram gerenciados de forma mais sustentável, beneficiando mais de 9 milhões de pessoas em 46 municípios, de sete estados (Bahia, Pará, Ceará, Pernambuco, Mato Grosso, Distrito Federal e Minas Gerais), em razão da oferta de ciclos de capacitação e de serviços de assessoria técnica para o manejo sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos.

Cinco municípios submeteram propostas de projetos em RSU para financiamento com assessoria técnica do PROTEGEER – dentre eles, Campo Verde e a Região Metropolitana de Recife aprovados com respectivamente R\$ 3,7 e R\$ 13,9 milhões.

Tabela 1 – Municípios e regiões onde o PROTEGEER atuou

Projetos Pilotos (Fase I)	Número de Municípios	Habitantes
Região Metropolitana de Recife – PE	15	4,2 milhões
Consórcio COMARES Litoral Leste – CE	5	230 mil
Consórcio Convale (FEP) – MG	10	400 mil
Campo Verde – MT	1	44 mil
Brasília – DF	1	3 milhões
<b>Total Fase I</b>	<b>32 municípios capacitados</b>	<b>7.874.00 milhões</b> de habitantes beneficiados direta ou indiretamente

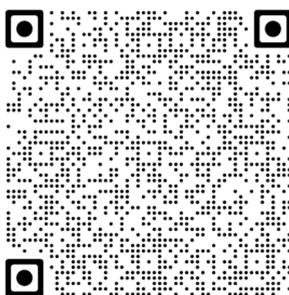
Projetos Pilotos (Fase II)	Número de Municípios	Habitantes
Abaetetuba – PA	1	160.439
Ananindeua – PA	1	535.547
Barcarena – PA	1	127.027

<b>Projetos Pilotos (Fase II)</b>	<b>Número de Municípios</b>	<b>Habitantes</b>
Belém – PA	1	1.532.844
Benevides – PA	1	64.780
Cametá – PA	1	139.364
Capanema – PA	1	19.172
Ilhéus – BA	1	159.923
Itacaré – BA	1	29.051
Marituba – PA	1	133.358
Paragominas – PA	1	115.838
Santa Bárbara – PA	1	21.449
Santa Izabel do Pará – PA	1	72.856
Vigia – PA	1	54.172
<b>Total Fase II</b>	<b>14 municípios capacitados</b>	<b>3.165.820 milhões</b> de habitantes beneficiados direta ou indiretamente

Fonte: Elaborada pelas autoras (2022).

Na Figura 2 é disponibilizado acesso ao vídeo da primeira fase “Saiba mais sobre cinco projetos-piloto que participaram da cooperação técnica do projeto PROTEGEER”.

Figura 2 – Código QR Code – vídeo “Saiba mais sobre cinco projetos-piloto que participaram da cooperação técnica do projeto PROTEGEER”



Fonte: Imagem gerada pelas autoras (2022).  
Disponível em: <https://youtu.be/V-gPqwgLTL4>.

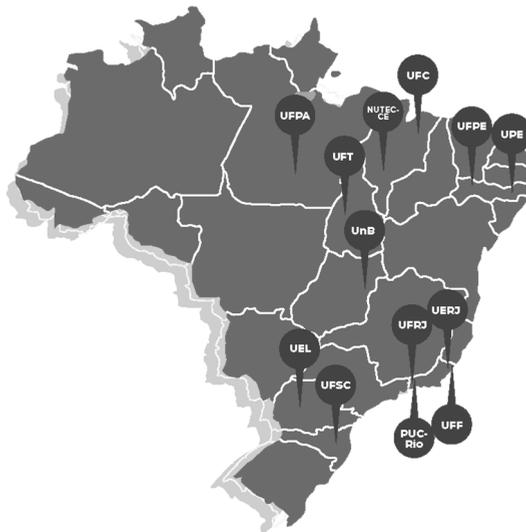


Além disso, o projeto contribuiu (participando tecnicamente ou organizando com outros parceiros) com 116 eventos nos anos de 2017 a setembro de 2022, disseminando o tema da gestão integrada de RSU para diversos públicos (Governo Federal, Municipal, Academia e Sociedade Civil). Ao todo, mais de 7 mil pessoas foram capacitadas.

De junho de 2021 a setembro de 2022, a participação de mulheres passou a ser contabilizada, representando, em média, 40% dessa amostra.

Na Figura 3, pode ser observada as instituições científicas que compõe a Rede Brasil-Alemanha.

Figura 3 – Rede acadêmica brasileira que coopera com a Technische Universität Braunschweig



Fonte: Posdeha (2017).

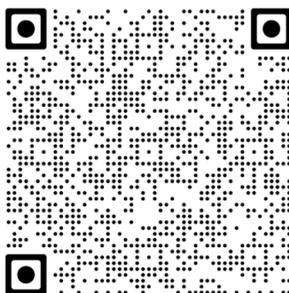
No âmbito acadêmico, a rede Brasil-Alemanha juntou treze instituições científicas brasileiras (Universidade Federal do Ceará – UFC; Universidade de Brasília – UnB; Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ; Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ; Universidade Federal Fluminense – UFF; Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC; Universidade Estadual de Londrina – UEL; Universidade Federal do Pará – UFPA; Universidade Federal de Pernambuco – UFPE; Universidade de Pernambuco – UPE; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio; Universidade Federal do Tocantins – UFT; e, Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará – NUTEC) que, em



cooperação com a Technische Universität Braunschweig (TUBS), realizaram a disseminação e internalização de conhecimento técnico, informação e sensibilização sobre o tema.

Na Figura 4 é disponibilizado acesso a diversos vídeos de treinamentos e eventos virtuais do projeto no Youtube.

Figura 4 – Código QR Code – playlist do Projeto PROTEGEEER no Youtube



Fonte: Imagem gerada pelas autoras (2022).  
Disponível em: [https://www.youtube.com/playlist?list=PLDAUSmB9bl3gZPI\\_9Yly3sP\\_-4AvBGLrY](https://www.youtube.com/playlist?list=PLDAUSmB9bl3gZPI_9Yly3sP_-4AvBGLrY).

## 4.2 INSTRUMENTOS DIDÁTICOS

O mercado brasileiro carece de publicações especializadas que promovam a gestão sustentável de RSU. Em razão dessa fragilidade, durante a implementação do projeto, muitas publicações foram desenvolvidas e disponibilizadas gratuitamente, garantindo assim a democratização às informações e dessa forma a universalização do conhecimento técnico.

### 4.2.1 Plataforma Teach4Waste

A plataforma *moodle Teach4Waste* foi desenvolvida pela Technische Universität Braunschweig em parceria com a Rede Virtual Brasil-Alemanha, para promover a internacionalização do ensino e o estabelecimento de cooperações voltadas para a formação de recursos humanos para a inovação, por meio de cursos ofertados em programas de pós-graduação, a partir de modelo de aplicação à distância. O intuito dessa iniciativa é o nivelamento de informações atualizadas no tema de gestão de resíduos sólidos com alto impacto na redução de emissões de GEE, disponíveis tanto no meio acadêmico quanto no mercado, através da expansão de material bibliográfico e do aprimoramento de grade curricular.



A plataforma é focada para as instituições acadêmicas e de pesquisa, mas também está aberta e disponível para o público geral de interesse como: técnicos, gestores públicos e privados, agentes de licenciamento e financiamento, bem como a sociedade civil e todos àqueles interessados pelo tema.

Ao longo do projeto foram desenvolvidos em conjunto com a Rede Virtual Brasil-Alemanha dez módulos que compõe a plataforma bem como sua internalização por meio de treinamentos e encontros promovidos. Dentre as treze universidades que compõe a Rede Virtual, sete universidades aplicaram os conteúdos dos módulos como parte dos cursos de pós-graduação nas universidades. Os temas dos módulos técnicos são:

- ◆ Geração e composição de resíduos;
- ◆ Coleta e entrega de resíduos;
- ◆ Processamento e beneficiamento de resíduos;
- ◆ Reciclagem;
- ◆ Biotecnologias I;
- ◆ Biotecnologias II;
- ◆ Coprocessamento;
- ◆ Aterro Sanitário;
- ◆ Resíduos e Clima; e,
- ◆ Tratamento de emissões gasosas.

Como forma de sustentabilidade para manter a plataforma *on-line* após o término do projeto, foi firmada uma parceria com a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE) para democratização e incremento do conhecimento em gestão sustentável de RSU.

Também as instituições UFC e UFPA incorporaram o endereço eletrônico e a apresentação da plataforma *Teach4Waste* como conteúdo fixo nas páginas das instituições, como uma oferta de conteúdo extra para os alunos.

#### **4.2.2 Cursos EaD sobre gestão integrada de RSU**

Como uma das principais frentes de desenvolvimento de capacidades do PROTEGEER, foram desenvolvidos dois cursos de Ensino à Distância (EaD) sobre Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos: "Fundamentos e Premissas Chave para a Gestão Sustentável de



Resíduos Sólidos Urbanos” e o curso “Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos”, ambos totalizando carga horária de 40 horas. Os cursos foram disponibilizados de forma gratuita no Portal Capacidades do Ministério do Desenvolvimento Regional.

O EaD é uma modalidade de ensino *on-line* que está transformando a educação, na qual o processo de aprendizagem é baseado na interatividade, dinamismo e inovação, adequado à evolução do perfil comportamental do aluno ao garantir flexibilidade de tempo e espaço. Isso potencializa, sobretudo, o aprendizado de temáticas atuais, democratizando os acessos, e contribuindo, dessa forma, para a transformação da sociedade.

Esse instrumento foi uma das principais contribuições do MDR para os municípios que têm tido dificuldades em atender aos preceitos legais para que possam reverter sua situação local inadequada.

Quadro 2 – Módulos dos cursos: “Fundamentos e Premissas Chave para a Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos” e “Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos”

<b>Curso 1</b> <b>Fundamentos e Premissas-chave para a Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos</b>	<b>Curso 2</b> <b>Tratamento e Valorização de Resíduos Sólidos Urbanos</b>
Módulo 1 Fundamentos da gestão integrada de RSU	Módulo 1 Gestão de RSU para baixas emissões de GEE
Módulo 2 Encerramento de lixões e próximos passos	Módulo 2 Rotas tecnológicas para a gestão integrada de RSU
Módulo 3 Estruturação e governança de consórcios para manejo de RSU	Módulo 3 Planejamento e implementação da coleta seletiva
Módulo 4 Implementação de mecanismo de cobrança para manejo de RSU	Módulo 4 Valorização de resíduos orgânicos
	Módulo 5 Recuperação energética com foco em CDR

Fonte: Elaborado pelas autoras (2022).



Os cursos são direcionados para todas as pessoas que trabalham na gestão pública e são responsáveis pelos caminhos trilhados pelos municípios brasileiros, na direção da eficiência técnica, coerência econômica e performance socioambiental.

Ao longo do projeto, duas turmas de cada curso foram abertas no Portal Capacidades, que resultaram na inscrição de quase 3 mil pessoas, com certificação de 844 participantes, (52,9% mulheres) e alcance de 348 municípios em 27 estados.

### 4.3 FORMAÇÃO DE MULTIPLICADORES

Um dos principais objetivos da segunda fase do projeto, de agosto de 2021 a setembro de 2022, foi a implementação de melhorias na gestão de resíduos municipal, por meio da aplicação das ferramentas de apoio a tomada de decisão na região norte do Brasil.

Para isso, foi desenvolvida uma estratégia para formação de multiplicadores no uso e aplicação das ferramentas em parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA), parceira da rede Brasil-Alemanha. Estes multiplicadores foram principalmente estudantes de pós-graduação e professores da UFPA, além de, técnicos de municípios engajados na gestão de RSU e interessados na capacitação.

Para delimitar o escopo e aprofundar os conhecimentos técnicos das ferramentas, foram selecionados quatro temas prioritários levantados para a região, sendo eles:

- ♦ Encerramento de Lixões;
- ♦ Coleta Seletiva;
- ♦ Sustentabilidade Econômico-Financeira; e,
- ♦ Rotas Tecnológicas.

Devido à crise da Covid-19 e as restrições para grandes eventos, foram propostas duas etapas para o processo de capacitação e formação de multiplicadores, sendo:

- ♦ Um curso *on-line* introdutório, de apresentação e sensibilização quanto aos conceitos e abordagens orientadoras da gestão integrada de RSU e das quatro ferramentas do PROTEGEER, comentadas anteriormente. Este curso foi voltado para um público mais amplo: estudantes e professores da UFPA, além de técnicos e gestores de municípios do Pará, técnicos e gestores das secretarias de meio ambiente e obras do estado do Pará, além de qualquer município do Brasil interessado no curso *on-line*.
- ♦ Um curso presencial, voltado mais especificamente para aqueles que fizeram o curso *on-line* introdutório e que viriam a ter o papel



de multiplicadores, principalmente os estudantes e professores da UFPA, técnicos do governo local e eventuais técnicos de municípios paraenses que se destacassem como potenciais multiplicadores. O objetivo do curso era promover tanto uma compreensão mais profunda e consistente do potencial, do funcionamento e do uso adequado das ferramentas do PROTEGEER, quanto à definição de uma estratégia de suporte e indução a mudanças junto aos municípios que seriam por eles apoiados.

Ambos os cursos foram desenhados com uma proposta metodológica de aprendizado dinâmico por meio de construção participativa. Isto significa que as intervenções foram iniciadas em uma primeira etapa, por meio de cursos teóricos para nivelamento do conhecimento, e em seguida, foram aplicadas dinâmicas apoiadas em estudos de caso onde os participantes tiveram a oportunidade, não somente, de discutir desafios e compartilhar experiências, mas sobretudo aplicar de forma concreta os conceitos teóricos, incrementando e consolidando o aprendizado.

Como resultado do processo de capacitação de multiplicadores, foram certificados no curso *on-line* 126 pessoas (46% mulheres), de 49 municípios de todo Brasil (sendo 21 da região norte). No curso presencial participaram 64 pessoas (29% mulheres), sendo que doze municípios do Pará ao final do evento escolheram um tema a ser trabalhado em maior profundidade e para tal firmaram compromisso de seguirem no processo para aplicação prática da ferramenta escolhida.

Quadro 3 – Municípios segundo áreas de interesse preliminar nas ofertas do PROTEGEER (até agosto/2022)

<b>Rotas Tecnológicas e Custos</b>	<b>Cobrança</b>	<b>Coleta Seletiva</b>	<b>Encerramento de Lixões</b>
Belém Cametá Barcarena	Ananindeua Vigia Paragominas Abaetetuba Santa Izabel do Pará Santa Bárbara Marituba	Capanema	Benevides

Fonte: Elaborado pelas autoras (2022).



Ao final de cada treinamento, foram aplicados questionários de avaliação, a fim de coletar retorno sobre os aspectos relacionados à:

- ♦ Qualidade do conteúdo abordado;
- ♦ Percepção sobre a utilidade do conteúdo ou da ferramenta abordados;
- ♦ Compreensão do conteúdo ou da ferramenta abordados; e,
- ♦ Percepção sobre a aplicabilidade do conteúdo ou da ferramenta na sua realidade.

Tanto no curso *on-line* quanto no curso presencial os dados, apontaram, de modo geral, avaliações positivas quanto à qualidade da abordagem do tema e sua utilidade. No entanto, há maiores dificuldades em relação à compreensão plena da ferramenta e à percepção da sua aplicabilidade nas realidades dos participantes, com maior ocorrência de avaliações “Média”.

Porém, de maneira geral, fica evidente que o curso foi muito bem-sucedido na apresentação das ferramentas, na sensibilização de sua importância para a gestão de RSU e na motivação dos participantes para se engajarem em processos práticos de discussão e articulação local para a sua utilização.

Além dos temas sugeridos pelos municípios, a UFPA, por meio da equipe de onze pessoas, realizou a aplicação da ferramenta de emissão de GEE em duas etapas: a primeira consistiu no levantamento de dados em campo e a segunda teve o objetivo de estimar o potencial de geração de GEE nos doze municípios apresentados no Quadro 3.

Esta simulação de geração foi realizada para cinco cenários tecnológicos diversos. Adicionalmente, a UFPA realizou levantamento de áreas sujeitas à disposição final e aportes necessários para encerramento de lixões. Também foram analisados seus impactos relacionados tanto quanto à emissão de GEE, quanto seu impacto na forma de emissões líquidas, o que representou um levantamento inovador no estado.

O projeto encerrou sua atuação no estado do Pará com a realização de um evento, com o objetivo de consolidar os resultados alcançados na região. A integração entre academia, instituições do setor público e privado, governo federal e local se tornou mais fortalecida para superar os desafios e proporcionar soluções que atendam às necessidades e especificidades dos municípios dessa região.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os marcos legais necessários à formulação de políticas públicas ainda são recentes no Brasil e carecem de implementação. Para a promoção de uma gestão integrada e sustentável, além dos desafios logísticos e tecnológicos, faz-se necessária a transformação do setor a um outro patamar de prestação de serviços onde a busca pela sustentabilidade seja a mola propulsora das ações de gestão e gerenciamento a serem planejadas e implementadas.

A priorização do encerramento de mais de 3 mil lixões no país deve ser acompanhada pela implementação de soluções de baixo impacto ambiental, que incorram na redução das emissões de GEE, buscando extrair o máximo possível de recurso que o resíduo possa oferecer.

A evolução de processos, diversificação de rotas tecnológicas e consolidação de novos modelos de negócios viáveis econômica e ambientalmente, serão fundamentais para a mitigação das emissões de GEE do setor.

O setor de saneamento é o que apresenta maior custo-benefício para investimentos em ações de mitigação de GEE e é um setor transversal para melhoria de todos os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS).

É fundamental que existam diversas soluções tecnológicas, mas o mais complexo é o entendimento da realidade local, a sinergia entre a vontade política e a base técnica, com o estabelecimento de um modelo de negócio viável financeiramente.

A atuação do PROTEGEER no diálogo entre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a Política Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) e a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), permitiu reconhecer o potencial de contribuição do setor de resíduos sólidos para os objetivos de mitigação às mudanças climáticas, embasando científica e tecnicamente o debate no Brasil.

Todos os materiais, treinamento e produtos gerados, após seis anos de projeto continuam atuais e respondendo aos maiores desafios que a prestação do serviço de manejo de resíduos enfrenta nos municípios e encontram-se disponíveis gratuitamente para todos interessados no tema. Parcerias para a garantia da sustentabilidade do projeto foram firmadas tanto com a rede de universidades quanto com o setor privado por meio de cooperação técnica estabelecida entre Technische Universität Braunschweig (TUBS) e a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (ABETRE).



O PROTEGEER foi ambicioso e deixa um legado robusto para o Brasil na gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos urbanos, composto por um leque de ferramentas que privilegiam uma abordagem tanto teórica quanto prática, demonstrando que a intersectorialidade é a maior força para transformação do mercado.

Deste modo, gradativamente, e a longo prazo, espera-se que ocorra a migração da atual matriz de tratamento de resíduos sólidos, com base apenas em aterro sanitário, para uma matriz que incorpore tecnologias de baixas emissões e maior eficiência no uso de recursos naturais, estabelecendo os princípios de uma economia circular.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ANCAT – Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis. **Anuário da Reciclagem 2020**. Brasília: Ancat, 2020. Disponível em: [https://uploads-ssl.webflow.com/5ebc1f5c7d4b534f7f022f62/5fcaa0d469d1141fbdaf040a\\_Anu%C3%A1rio%20da%20Reciclagem%202020.pdf](https://uploads-ssl.webflow.com/5ebc1f5c7d4b534f7f022f62/5fcaa0d469d1141fbdaf040a_Anu%C3%A1rio%20da%20Reciclagem%202020.pdf). Acesso em: 31 maio 2022.

BRASIL. **Decreto nº 5.753**, de 12 de abril de 2006. Promulga a Convenção para a Salvaguarda do Patrimônio Cultural Imaterial, adotada em Paris, em 17 de outubro de 2003, e assinada em 3 de novembro de 2003. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/decreto/d5753.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5753.htm). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 8.141**, de 20 de novembro de 2013. Dispõe sobre o Plano Nacional de Saneamento Básico – PNSB, institui o Grupo de Trabalho Interinstitucional de Acompanhamento da Implementação do PNSB e dá outras providências. [Revogado pelo Decreto nº 10.473, de 24.08.2020]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/decreto/D8141.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/decreto/D8141.htm). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 10.143**, de 28 de novembro de 2019. Altera o Decreto nº 9.578, de 22 de novembro de 2018, que dispõe sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2019/Decreto/D10143.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2019/Decreto/D10143.htm). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 39**, de 24 de outubro de 2012. Brasília: Ministério das Cidades – MDR, 2012. Publicada no D.O.U. de 16.11.2012, seção 1, p. 63-68 e no D.O.U. de 02.09.2013). Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosNSA/Arquivos\\_PDF/Instrucoes\\_Normativas/IN-39\\_2012\\_Publico\\_Consolidada\\_Julho\\_2017.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosNSA/Arquivos_PDF/Instrucoes_Normativas/IN-39_2012_Publico_Consolidada_Julho_2017.pdf). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.666, de 21 de junho de 1993, e nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de



maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.025, de 2020). D.O.U. de 08.01.2007, p. 3. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm). Acesso em: 31 maio 2021.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 04 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. D.O.U. de 16.07.2020, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Nota Técnica Conjunta nº 164/2018-MP**, de 04 de setembro de 2018. Diretrizes para a estruturação de projetos relacionados ao manejo dos resíduos sólidos urbanos no âmbito do Fundo de Apoio à Estruturação e ao Desenvolvimento de Projetos de Concessão e Parcerias Público-Privadas (FEP CAIXA) da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios. Brasília: Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão; Ministério das Cidades; Ministério da Saúde. 2018. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/residuos-solidos-urbano>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GIZ Brasil – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. **Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**. Playlist vídeos YouTube. 2022. Disponível em: [https://www.youtube.com/playlist?list=PLDAUSmB9b13gZPI\\_9YIy3sP\\_-4AvBGLrY](https://www.youtube.com/playlist?list=PLDAUSmB9b13gZPI_9YIy3sP_-4AvBGLrY). Acesso em: 28 ago. 2022.

GIZ Brasil – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. **Saiba mais sobre cinco projetos-piloto que participaram da cooperação técnica do projeto ProteGEEr**. 2021. Disponível em: <https://youtu.be/V-gPqwgLTL4>. Acesso em: 28 ago. 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. [2020]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 6. ed. Brasília: MCTI, 2022. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-aneais.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. **Kit de Ferramentas de Gestão de RSU**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MMA – Ministério de Meio Ambiente. **Brasil desativa mais de 600 lixões em menos de um ano**. Em 2020, foi sancionada a lei que aprova o Marco do Saneamento, que representou um grande passo para a melhoria da gestão de resíduos sólidos.



22.04.2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2021/04/brasil-desativa-mais-de-600-lixoes-em-menos-de-um-ano>. Acesso em: 31 maio 2022.

MNCR – Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis. **Quantos Catadores existem em atividade no Brasil?** 01.02.2017, atualizado em 02.12.2021. Disponível em: <http://www.mnccr.org.br/sobre-o-mnccr/duvidas-frequentes/quantos-catadores-existem-em-atividade-no-brasil>. Acesso em: 31 maio 2022.

OBSERVATÓRIO DOS LIXÕES. **Diagnóstico Municipal para a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. [2021]. Disponível em: <http://www.lixoes.cnm.org.br/>. Acesso em: 15 out. 2022.

POSDEHA – Pós-Graduação em Engenharia Civil. **Plataforma Teach4Waste**. 2017. Disponível em: <http://www.posdeha.ufc.br/teach4waste/>. Acesso em: 15 out. 2022.

RADAR PPP. **Termômetro do Radar de Projetos (TRP)**. setembro 2022. Disponível em: <https://radarppp.com/wp-content/uploads/2022/09/16-termometro-do-radar-de-projetos-ip.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos do SNIS**, ano de referência 2018. 17º Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento – SNS / Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR, 2019. Disponível em: [http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico\\_RS2018.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2018/Diagnostico_RS2018.pdf). Acesso em: 31 maio 2022.



# UM RETRATO DA REALIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL

## *AN OVERVIEW OF THE REALITY OF SOLID WASTE IN BRAZIL*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

PEREIRA, Luiz Gonzaga Alves. Um retrato da realidade dos resíduos sólidos no Brasil. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Interseccional e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Luiz Gonzaga Alves Pereira**

Engenheiro. Presidente da Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (Abetre).

E-mail: lgonzaga@abetre.org.br

## **RESUMO**

Este artigo relata como o Brasil está buscando equacionar, ainda que com atraso, a gestão dos resíduos sólidos, historiando as legislações adotadas para normalizar a questão, em especial o Novo Marco do Saneamento Básico, bem como os entraves para o cumprimento de prazos. O maior desafio refere-se à persistência dos chamados lixões, depósitos irregulares a céu aberto, danosos ao meio ambiente urbano e à saúde pública. Sua erradicação está prevista na lei, mas sofreu adiamentos. Buscamos demonstrar como têm sido os esforços para recuperar o tempo perdido e livrar a população de numerosas cidades brasileiras dessa alternativa anacrônica e ecologicamente equivocada. Além da destinação ambientalmente correta dos resíduos, consideramos a incineração, a reciclagem e o reaproveitamento dos materiais, num estímulo à economia circular. Procuramos apontar os prós e contras de cada alternativa e sua adequação à conjuntura brasileira. Também apoiamos e difundimos a logística reversa, prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos, outra legislação importante, promulgada em 2010. Embora num ritmo aquém do possível e do esperado, o Brasil está avançando nesse tema tão importante para o desenvolvimento urbano sustentável.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Novo Marco Legal do Saneamento. Aterros sanitários. Erradicação dos lixões. Meio ambiente urbano e saúde pública.

## **ABSTRACT**

This article reports how Brazil is seeking to solve the issue of solid waste management, albeit belatedly. It outlines the legislation adopted to solve the issue, especially the New Regulatory Framework for Sanitation, as well as the



existing obstacles to meeting deadlines. The most significant challenge lies in the persistence of garbage dumps – irregular open-air waste disposal sites harmful to the urban environment and public health. The current laws provide for the eradication of dumps, but this process has been postponed. We attempted to demonstrate how efforts have been made to make up for lost time and rid the population of several Brazilian cities of this anachronistic and environmentally unfriendly alternative. Further to the disposal of waste in environmentally adequate locations, we also consider incineration, recycling, and reuse of materials, as a means to foster the circular economy. We seek to point out the pros and cons of each alternative and their suitability for the Brazilian scenario. We also support and disseminate reverse logistics, outlined in the National Solid Waste Policy, another important law enacted in 2010. Albeit more slowly than possible and expected, Brazil is making progress in this instrumental area for sustainable urban development.

Keywords: Solid waste. New Regulatory Framework for Sanitation. Sanitary landfills. Eradication of dumps. Urban environment and public health.

## 1 INTRODUÇÃO

O novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) criou melhores condições para o cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei nº 12.305/2010), que segue atual e pertinente. Um dos principais avanços foi a extinção do modelo denominado *contrato de programa*. Tal modalidade permitia que empresas estatais fossem contratadas sem licitação e, portanto, sem a saudável concorrência, para prover serviços de água, esgoto, coleta, tratamento e destinação final do lixo. Era um convite ao clientelismo e ao fisiologismo, que precisam ser extirpados, dando lugar ao *compliance*, à ética e à transparência.

A nova lei é um avanço significativo no sentido de estimular investimentos, incentivar a participação da iniciativa privada e viabilizar a prioritária universalização dos serviços. Merecem análise específica seus impactos positivos no contexto do que se chama genericamente de lixo e na viabilização prática da PNRS, cujos dois eixos principais são os seguintes: logística reversa, pela qual cada cadeia de suprimentos deve se responsabilizar pelo recolhimento e destinação final dos respectivos produtos usados e embalagens; e a gestão adequada dos resíduos sólidos, que inclui reciclagem, tratamento, recuperação energética e disposição em aterros sanitários.

Pois bem, o novo Marco Legal do Saneamento Básico tem tudo para transformar esses pressupostos legais em realidade concreta, em benefício do meio ambiente, da saúde pública, da agenda climática e da economia sustentável. Seu grande aprimoramento é justamente ampliar a participação do setor privado na prestação dos serviços, não só de água e esgoto, como de coleta, tratamento, transporte e



destinação final dos resíduos sólidos. E faz isso com a obrigatoriedade de licitações, não apenas no que diz respeito a um município ou Estado, como também no que se refere a consórcios entre dois ou mais entes federados. Também possibilita, o que é essencial, a sustentabilidade econômico-financeira dos serviços, com sua cobrança específica, como já ocorre com os sistemas de água, energia elétrica e telecomunicações, dentre outros.

## 2 NOVO MARCO LEGAL DO SANEAMENTO BÁSICO

Um dos principais impactos positivos que se esperava do renovado Marco do Saneamento era a extinção dos lixões e dos aterros controlados, tão nocivos quanto os primeiros. Esses depósitos irregulares eram 3.257 no Brasil, em dezembro de 2018. O ritmo de extinção, embora incipiente, mostrou progressos, mas na esteira da sanção do Marco do Saneamento surgiram alguns revezes. São projetos que chegam à Câmara dos Deputados e ao Senado Federal. Em sua maioria são ditames que prorrogam os prazos determinados pela legislação.

Por oportuno, é sempre bom lembrar que a PNRS estabeleceu, em 2010, quando sancionada, datas que deixaram de ser cumpridas no capítulo do encerramento dos lixões. Ao invés da atitude para o fechamento dos locais inapropriados, o que se viu foi uma romaria de executivos municipais em direção ao Parlamento brasileiro com o propósito de postergar as medidas e deixar de cumprir o que se estabeleceu na legislação.

Cabe lembrar, também, que os municípios das regiões metropolitanas, segundo a nova lei, tinham prazo até 02 de agosto de 2021 para começar a destinar o lixo de modo correto. Não cumpriram. Até fevereiro de 2022, 337 municípios, sendo três capitais, continuavam irregulares. Logo, veio a seguinte etapa, abrangendo as cidades com mais de 100 mil habitantes. Seguem-se: entre 50 mil e 100 mil, até 2023; e menos de 50 mil, até 2024. E os avanços são miúdos. É necessário amplo empenho para que esse cronograma seja cumprido, mas, infelizmente, até agora, os sinais são negativos.

Houve algum tipo de esforço? Sim, mas se a sociedade não reagir, exigindo de seus governantes o cumprimento da legislação, demoraremos – aliás, como já está ocorrendo há muito tempo – décadas para elevar o patamar do país no que se refere à destinação adequada de seus resíduos. Os eleitores, que escolhem seus governantes pelo voto livre e soberano, precisam reagir e exigir dos seus eleitos o cumprimento daquilo que está na Lei.

É preciso mais engajamento, mobilização e cobrança nessa causa do meio ambiente urbano, sem o que a sociedade brasileira



continuará vivendo uma verdadeira "epidemia" ambiental. A população, exercitando um direito democrático legítimo e um dever intrínseco à cidadania, precisa exigir soluções e o cumprimento das leis ambientais por parte dos prefeitos, independentemente da interveniência do Governo Federal.

Além disso, a sociedade precisa avançar no sentido de gerar menor quantidade de resíduos sólidos. Mais do que nunca, é fundamental o consumo consciente. Todos precisam assumir um sério compromisso ecológico com os locais em que vivem, entendendo a importância e o alcance da responsabilidade de cada indivíduo no sentido de que as cidades sejam mais sustentáveis. Estima-se que cada brasileiro gere, em média, 380 quilos de resíduos por ano, número que vem aumentando. É evidente, portanto, a necessidade da conscientização e educação ambiental.

A mobilização da sociedade é essencial para o cumprimento das leis, que nunca faltaram no Brasil. O tema do afastamento irregular de resíduos no País data de 1954, quando, no Governo Café Filho (1954-1955), foi promulgada a Lei nº 2.312, em 03 de setembro, o chamado Código Nacional de Saúde (Revogada pela Lei nº 8.080/1990). Reforçada, em 1981, pela Política Nacional de Meio Ambiente, a erradicação dos lixões voltou a frequentar o dia a dia da sociedade brasileira após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em 02 de agosto de 2010, com a promulgação da Lei nº 12.305. Considerando todo o arcabouço legal, era para ser um assunto superado, mas, a falta de vontade política dos prefeitos (os grandes "proprietários" dos lixões) vem arrastando a erradicação. Consideram que o assunto não é prioritário. Esquecem a legislação e, o que é mais triste, sequer são apenados.

Em novembro de 2020, exatamente visando contribuir para o avanço da PNRS e do cumprimento do Marco do Saneamento, a Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes (Abetre) criou o *Atlas da Destinação Final de Resíduos*. Trata-se de ferramenta de livre acesso, que coloca à disposição da sociedade informações concretas para avaliação e cobrança das autoridades (Abetre, 2020).

Na construção da ferramenta, a Abetre tinha contabilizado, que, ao final de 2018, tínhamos o número de 3.257 lixões existentes no Brasil. Para um país com 5.570 municípios, o número soava negativamente, fosse qual fosse a maneira de analisá-lo. A partir de um trabalho minucioso, a entidade foi, trimestre a trimestre, verificando e atualizando os dados. Em pouco mais de 2,5 anos (junho/2022), a situação, embora não resolvida, é bem melhor. Foram erradicados 757



lixões. Embora os números estejam aquém do que se esperava, não deixam de ser representativos.

Para atender totalmente à demanda da destinação dos resíduos sólidos, já incluindo o volume hoje ainda encaminhado aos lixões, a Abetre calcula ser necessária a construção de 500 aterros sanitários regionais em todo o Brasil. O investimento é estimado em 2,6 bilhões de reais (506,89 milhões de euros, ao câmbio de 05 de outubro de 2022). O valor é pequeno, considerando que o governo brasileiro gasta anualmente cerca de três bilhões de reais (584,87 milhões de euros) no tratamento de saúde de pessoas que ficam doentes por causa da contaminação provocada pelos lixões.

Os aterros sanitários são a alternativa mais viável para a destinação dos resíduos sólidos no contexto da realidade brasileira, apresentando a melhor relação custo-benefício. Nessa análise, consideramos as limitações da capacidade de investimentos do setor público, ainda às voltas com forte desequilíbrio fiscal, e a necessidade de uma solução eficaz e de valor relativamente baixo para um problema que impacta o ambiente urbano e a saúde pública.

Obviamente, em seus 25 anos, a serem comemorados em novembro próximo, a Abetre sempre avaliou, além dos aterros sanitários, as mais variadas rotas tecnológicas ecologicamente corretas para a destinação dos resíduos sólidos e erradicação dos lixões. Consideramos a incineração, a reciclagem e o reaproveitamento dos materiais, num estímulo à economia circular. Procuramos, apenas, numa análise isenta, apontar os prós e contras de cada alternativa e sua adequação à conjuntura brasileira. Também apoiamos e difundimos a logística reversa, prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Como se observa, ainda há muito a ser feito no Brasil. O único intuito da Abetre – como uma das organizações referenciais no tema – é contribuir para os avanços. Nesse sentido, estabelecemos acordos de cunho técnico com organismos públicos, organizações do setor, instituições de ensino e pesquisa e da sociedade civil. A entidade é apartidária! Tem compromisso apenas com a população, mobilizando-se em favor do meio ambiente e da saúde pública.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A conclusão irrefutável de todas as informações contidas neste artigo é de que a gestão dos resíduos sólidos tem importância, impactos e consequências de amplo espectro, da saúde pública ao meio ambiente, passando pela geração de energia, criação de



empregos e renda, mitigação do aquecimento da Terra e viabilização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nas Nações Unidas. Assim, é fundamental a mobilização sinérgica de todas as instâncias do Poder Público, empresas, entidades de classe do setor e sociedade, para que o novo Marco Legal do Saneamento seja cumprido com extrema eficácia. Os ganhos serão imensos para o Brasil, incluindo sua inserção mais competitiva no cenário global como protagonista dos compromissos socioambientais da civilização.

## REFERÊNCIAS

- ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes. **Atlas da Destinação Final de Resíduos**. 2022. Disponível em: <https://abetre.org.br/site/atlas-da-destinacao-final-de-residuos-brasil-2020/>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes. **Atlas da Destinação Final de Resíduos**. 2020. Disponível em: <https://abetre.org.br/atlas-brasil/>. Acesso em: 12 out. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 2.312**, de 03 de setembro de 1954. Normas Gerais sobre Defesa e Proteção da Saúde. D.O.F.C. de 09.09.1954, p. 15217. [Revogada pela Lei nº 8.080/1990]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1950-1969/l2312.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l2312.htm). Acesso em: 12 out. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 8.080**, de 19 de setembro de 1990. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências. D.O.U. de 20.09.1990, p. 18055. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1950-1969/l2312.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l2312.htm). Acesso em: 12 out. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: D.O.U. de 03.08.2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 12 out. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 04 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Brasília, DF: D.O.U. de 16.07.2020. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm). Acesso em: 12 out. 2022.



# GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: OBSTÁCULOS E SOLUÇÕES POTENCIAIS

## *SOLID WASTE MANAGEMENT: OBSTACLES AND POTENTIAL SOLUTIONS*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

CUNHA, Mateus Almeida; PEREGRINO, Raísa Cardoso. Gestão de resíduos sólidos: obstáculos e soluções potenciais. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Mateus Almeida Cunha**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental (Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2004-2010). Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento (Escola Politécnica da UFBA, 2013-2015). Coordenador na área de Resíduos Sólidos da Secretaria de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia – SEDUR. Professor Convidado do Curso de Especialização (Pós-Graduação) de Gestão de Resíduos Sólidos Socialmente Integrada (GERSI/UFBA).

E-mail: mateuscunha@hotmail.com.br

### **Raísa Cardoso Peregrino**

Engenheira Sanitarista e Ambiental (Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – UFBA, 2013-2018). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho (Universidade Salvador – Unifacs, 2018-2020).

E-mail: raisaperegrino@gmail.com

## **RESUMO**

O presente trabalho versa sobre as políticas de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil. Para o desenvolvimento do tema discutido, buscou-se amparo no regramento legal que confere diretrizes ao saneamento básico, com foco na gestão e no gerenciamento dos resíduos sólidos. Avaliou-se todo o processo histórico no desenvolvimento das normativas, além de conceitos, diretrizes e recomendações técnicas para apuração dos fatores que obstaculizam a implantação de soluções neste campo de atuação. Apesar da orientação de ações, o aparato legislativo no país produz lacunas que não esclarecem como deverão ocorrer na prática a aplicação da norma, a participação social e a gestão e gerenciamento eficaz dos resíduos para atendimento dos objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). São destacados conceitos sobre a responsabilidade compartilhada, a classificação dos resíduos e os papéis dos entes envolvidos no processo de gestão e de gerenciamento, bem como o panorama atual estimado pelos indicadores do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES). Além disso, são discutidos os



impactos socioambientais associados à disposição inadequada dos resíduos e as possibilidades de soluções tecnológicas para resolução destas adversidades. Ainda, menciona-se a relevância das iniciativas consorciadas ou outras formas de cooperação entre os entes federados, com vistas à elevação das escalas de aproveitamento e à redução dos custos envolvidos na operação de aterros sanitários (disposição final ambientalmente adequada prevista na PNRS). Assim, o artigo objetiva elencar ações que servem de referência para uma gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos de modo sustentável e em consonância com o desenvolvimento tecnológico e propõe possibilidades resolutivas ao cenário brasileiro para uma gestão adequada por parte da Administração Pública Municipal.

Palavras-chave: Resíduos sólidos. Saneamento básico. Gestão e gerenciamento. Aterros sanitários. Consórcios Públicos.

## ABSTRACT

The present study deals with the policies for the management of solid waste in Brazil. For the development of the theme discussed, support was sought in the legal regulations that provide guidelines for basic sanitation, with a focus on the management of solid waste. The entire historical process in the development of the regulations was evaluated, in addition to concepts, guidelines, and technical recommendations to determine the factors that hinder the implementation of solutions in this field of action. Despite the guidance of actions, the legislative apparatus produces gaps that do not clarify how the application of the norm, the social participation and the effective management of waste should occur in practice in order to meet the objectives of the National Solid Waste Policy (PNRS). Concepts about shared responsibility, waste classification and the roles of the entities involved in the management process are highlighted, as well as the current panorama estimated by the indicators of the National Sanitation Information System (SNIS) and the National Solid Waste Plan (PLANARES). In addition, the socio-environmental impacts associated with the inadequate disposal of waste and the possibilities of technological solutions to solve these adversities are discussed. Furthermore, the relevance of consortium initiatives or other forms of cooperation among the federated entities is mentioned, aiming at increasing the scales of utilization and reducing the costs involved in the operation of sanitary landfills (environmental adequate disposal foreseen in the PNRS). Thus, the article aims to list actions that serve as reference for the management of solid residues in a sustainable manner and in line with technological development and proposes possibilities of solutions to the Brazilian scenario for an adequate management by the Municipal Public Administration.

Keywords: Solid waste. Sanitation. Management. Sanitary landfills. Public Consortium.

## 1 INTRODUÇÃO

Considera-se que o problema dos resíduos sólidos iniciou quando a humanidade começou a abandonar a vida nômade para se tornar sedentária. Nas Civilizações Antigas os primeiros processos de eliminação dos resíduos sólidos consistiam em essencialmente afastá-



los e fazer a sua disposição ao ar livre. É provável também que alguns restos inaproveitáveis fossem queimados. Com o passar do tempo, a partir desses costumes, passou-se a fazer o enterramento simples dos dejetos (Rocha, 2016).

Durante a Revolução Industrial na Inglaterra, em meados dos anos 1700, que os problemas das aglomerações humanas, associados à expansão industrial começaram a despertar uma maior preocupação da humanidade, iniciando-se a adoção de medidas preventivas e corretivas para minimizar, preservar ou corrigir possíveis agravos ao meio ambiente e à saúde (Rocha, 2016).

Junto ao crescimento populacional, a formação das cidades e o processo de industrialização surgem as problemáticas ambientais. Com total relevância para qualidade de vida, iniciativas de saneamento básico são observadas desde as primeiras formações de comunidades, contudo é notório que as ações não avançaram de forma linear na história. O desenvolvimento do saneamento básico passou a ser uma preocupação ampla a partir dos surtos de epidemias como cólera, varíola, peste bubônica e a gripe espanhola, que assolou a Europa no período da Revolução Industrial. Enquanto no Brasil, após muita negligência, apenas no século XIX foram tomadas iniciativas mais significativas para melhoria da qualidade de vida da população (Nunes; Díaz, 2020).

Ainda assim, atualmente ainda existem bilhões de pessoas que não tem acesso aos serviços públicos de saneamento básico, de forma que diversos países da África, Ásia e da América Latina ainda sofrem com doenças relacionadas à ausência do serviço (Souza *et al.*, 2015). Em 2020, quando lavar as mãos se tornou algo essencial para o enfrentamento da pandemia, ficou estampado que no Brasil ainda existem problemas graves na oferta do serviço, até mesmo nas grandes cidades. Tal situação causa inquietude e sobre as formas de alcance da universalização do acesso ao saneamento básico.

O saneamento básico era (e ainda é) compreendido como prevenção à saúde, de modo que suas ações ainda são pensadas com objetivo de evitar doenças. Entretanto, entendê-lo como uma política pública e social, que inclua a promoção de saúde e sustentabilidade ambiental, faz-se necessário para garantia da qualidade de vida. Analisando o panorama brasileiro, as políticas públicas de saneamento básico ainda são atrasadas, quando comparadas aos países desenvolvidos (Souza *et al.*, 2015).

Indo ao encontro do pensamento de Souza *et al.* (2015), Rocha (2016) identifica que segundo a definição clássica, o saneamento



corresponde ao conjunto de medidas que buscam preservar ou modificar as condições do meio ambiente com o objetivo de prevenir doenças e promover a saúde.

Apesar de o saneamento básico ser assegurado, no Brasil, pela Constituição Federal de 1988, o marco legal do saneamento só foi instituído em 2007 por meio da Lei nº 11.445, de 05 de janeiro, regulamentada por meio do Decreto nº 7.217, de 21 de junho de 2010 e alterada por meio da Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. O saneamento básico, de forma reducionista, é definido como o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de:

- ♦ Abastecimento de água potável;
- ♦ Esgotamento sanitário;
- ♦ Limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos; e
- ♦ Drenagem e manejo das águas pluviais urbanas.

No novo marco do saneamento, não houve revisão do conceito de saneamento básico, que permanece superficial no regramento legal.

O componente limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos é tratado de forma discreta na Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB). Para complementação, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Esta política estabelece, entre outros, princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (incluídos os perigosos), além de responsabilidades dos geradores e do Poder Público e, também, instrumentos econômicos aplicáveis para essa área.

O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) considera que, quando do seu lançamento em 2007, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) iria consolidar o comprometimento do Governo Federal com as intervenções na área do saneamento. Entretanto, existiram interesses diversos do Governo Federal que iam além de considerar o saneamento básico como um direito de todos e dever do Estado para sua promoção. Além disso, do total de investimentos previstos para o PAC 1 (1ª Etapa do PAC, que durou de 2007 a 2010), apenas 7,91% foram destinados ao saneamento básico (Cunha, 2015).

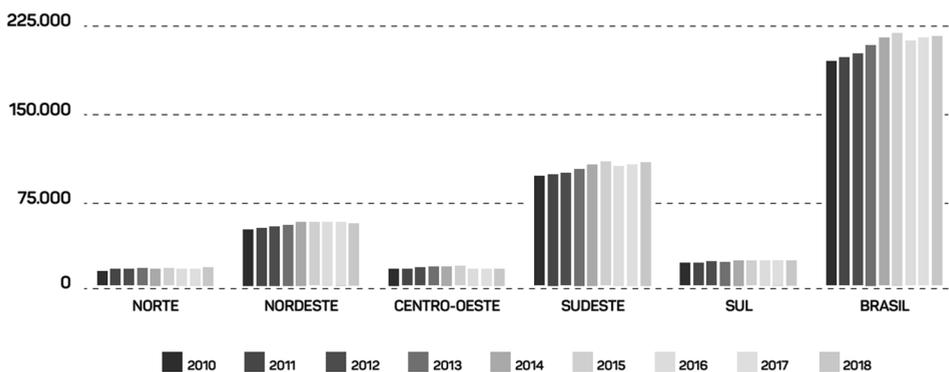
O percentual de investimentos previstos para a área de saneamento básico (R\$ 49,70 bilhões), quando comparado ao total previsto (R\$ 958,7 bilhões) para o PAC 2 (2ª Etapa do PAC, de 2011 a 2014), foi de apenas 5,18%, indicando a falta de prioridade do governo federal para a realização de ações de universalização do acesso a esses serviços (Cunha, 2015).



Conforme apresentado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), entre os anos de 2017 e 2018 houve um aumento na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em todas as regiões do Brasil. Considerando-se o mesmo período a população brasileira cresceu 0,40%, enquanto a geração *per capita* de RSU aumentou 0,39%, alcançando 1,039 kg/hab/dia (PLANARES, 2022, p. 17).

De acordo com o apresentado na Figura 1 identifica-se a contribuição de cada uma das regiões do país quanto à massa total de RSU gerado no período de 2010 a 2018 e constata-se que as regiões Sudeste (50%) e Nordeste (25%) foram as que mais contribuíram com a geração total desses resíduos no ano de 2018 (PLANARES, 2022, p. 18).

Figura 1 – Gráfico: Geração total de Resíduos Sólidos Urbanos (t/dia) nas regiões e Brasil, 2010 a 2018



Fonte: PLANARES (2022, p. 17).

A PNRS apresenta conceitos fundamentais para uma gestão eficaz, com destaque para os conceitos de ciclo de vida do produto e da responsabilidade compartilhada.

A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, corresponde ao conjunto de atribuições individualizadas e encadeadas dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, dos consumidores e dos titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, para minimizar o volume de resíduos sólidos e rejeitos gerados, bem como para reduzir os impactos adversos causados à saúde humana e à qualidade ambiental decorrentes do ciclo de vida dos produtos. Desta forma, ela define a participação de cada um dos responsáveis direta ou indiretamente pela geração e gerenciamento dos resíduos sólidos.



Uma efetiva gestão integrada de resíduos sólidos envolve a participação de diversos setores, controle social, além de um arranjo legal-institucional consoante. Segundo Barros (2012), quando os municípios conseguem estabelecer sistemas de gestão integrada sustentável de resíduos sólidos, obtém-se, simultaneamente:

- ♦ A satisfação às demandas de todos os cidadãos;
- ♦ A promoção da saúde e do bem-estar da população;
- ♦ A proteção da qualidade e a garantia da sustentabilidade do ambiente urbano;
- ♦ A preservação dos recursos naturais (da retirada das matérias-primas até a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos);
- ♦ O aumento da eficiência e da produtividade da economia; e,
- ♦ A geração de emprego e renda.

Estabelecer uma política ambiental que assegure a gestão integrada dos resíduos sólidos é a primeira etapa para atingir a sustentabilidade ambiental e social deste campo de atuação.

## **2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS: OBSTÁCULOS E SOLUÇÕES**

A legislação brasileira estabelece diretrizes e conceitos básicos para nortear a implantação de soluções de engenharia para o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. Todavia existe uma carência de normativas que incluam, de forma clara e eficaz, a participação social e a gestão integrada de todos os entes interessados neste campo de atuação. Essa ausência de informações fragiliza, a longo prazo, as iniciativas tomadas. Assim, os conceitos e as ações potenciais que sirvam de referência para uma gestão e gerenciamento sustentável dos resíduos sólidos urbanos devem ser apontadas e discutidas no âmbito teórico para embasar as possíveis soluções socioambientais para o tema.

### **2.1 CONTEXTO LEGAL PARA GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) teve origem na discussão do Projeto de Lei (PL) nº 203/1991, do Senado Federal, sendo sancionada em 02 de agosto de 2010 e regulamentada no mesmo ano por meio do Decreto nº 7.404/2010, revogado recentemente pelo Decreto nº 10.936/2022, que atualiza alguns conceitos importantes e unifica os decretos relacionados à temática para facilitar a consulta e entendimento dos usuários (Cunha, 2018).

Na PNRS são definidas as competências acerca da proteção ambiental, do controle da poluição, da responsabilidade por danos ao meio ambiente, proteção e defesa da saúde.



Até a instituição da Lei nº 12.305/2010 os resíduos sólidos eram tratados como “lixo”, assim como aparece na Lei nº 11.445/2007. Alguns autores atribuem a etimologia da palavra lixo à palavra “lix”, que em latim significa cinza. Para Pereira e Curi (2013), esta conotação se deve ao fato de que, na antiguidade, a maior parte do lixo constituía-se fundamentalmente de cinzas devido ao processo de queima. A PNRS então define os conceitos de resíduos sólidos e rejeitos, como aqueles materiais, substâncias ou objetos decorrentes das atividades humanas, quebrar esse conceito associado ao verbete “lixo” (daquilo que não é dotado de valor econômico).

Dentre os diversos instrumentos estabelecidos na PNRS estão os Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), de responsabilidade dos municípios. O PMGIRS realizará o diagnóstico do município, definirá indicadores de desempenho operacional e ambiental, além de apresentar sistema de cálculo dos custos e forma de cobrança da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos (Cunha, 2018). O PMGIRS pode ser elaborado em conjunto com o Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), com o objetivo de economizar custos, por exemplo, com as etapas de diagnóstico e mobilização social.

Alterações de caráter estratégico e institucional dificultaram a consolidação de um plano coordenado e, com isso, os prazos e as metas foram continuamente descumpridos (Gonçalves, 2020). Além disso, uma das dificuldades é a ausência de cobrança (taxa, tarifa ou preço público) pela prestação dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2020), para o ano de 2020 estima-se que apenas 40,3% dos municípios brasileiros cobram pelos serviços e, na maioria dos casos, o valor arrecadado é mínimo. Ou seja, quando existente, é insuficiente para a sustentabilidade e equilíbrio econômico-financeiro da prestação do serviço.

Compete ao titular dos serviços públicos a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, que são os originários de atividades domésticas em residências urbanas e os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. Para os demais tipos de resíduos a responsabilidade, *a priori*, pertence ao gerador (empreendedor).

Inspirado no conceito de economia circular, que predomina na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos na União Europeia, a PNRS estabeleceu uma ordem de prioridade sequencial para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos. O Parlamento Europeu define que a economia circular é um modelo de produção e de consumo que



envolve a partilha, o aluguel, a reutilização, a reparação, a renovação e a reciclagem de materiais e produtos existentes, enquanto possível. Desta forma, a economia circular implica a redução do desperdício ou dos resíduos ao mínimo, além da reinserção do resíduo na cadeia de produção, o que permite criar valor agregado ao resíduo (EEA, 2021). Isto posto, a PNRS define como ordem de prioridade a: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, por fim, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (nesse caso, em aterros sanitários).

Ainda, a PNRS deu os primeiros passos para estabelecer a logística reversa, que corresponde ao retorno dos produtos após o uso pelo consumidor ao setor empresarial (fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes), para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. Por meio de acordos setoriais, termos de compromisso ou regulamentos editados pelo Poder Público estão sujeitos a logística reversa:

- ♦ Os agrotóxicos, seus resíduos e embalagens;
- ♦ As pilhas e baterias;
- ♦ Os óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens;
- ♦ As lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista;
- ♦ Produtos eletroeletrônicos e seus componentes, entre outros.

A logística reversa foi destaque no Decreto Federal nº 10.936/2022, onde foi instaurado o Programa Nacional de Logística Reversa. O objetivo é aperfeiçoar a gestão do sistema que reinsere o resíduo na cadeia de produção, a iniciar pela integração ao SINIR, que rastreia o fluxo dos resíduos sólidos de qualquer origem, gerados em todo país.

## **2.2 PRINCIPAIS FORMAS DE CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL**

Segundo a PNRS, os resíduos sólidos podem ser classificados quanto à origem ou quanto à periculosidade e, a depender da classificação, existem diversas formas de tratamento, tais como: compostagem, autoclave, micro-ondas, desinfecção química, pirólise, plasma, entre outras (Cunha, 2018).

Quanto à origem os resíduos podem ser assim classificados (art. 13, inc. I, Lei nº 12.305/2010):



- a) *resíduos domiciliares*: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) *resíduos de limpeza urbana*: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) *resíduos sólidos urbanos*: os englobados nos itens "a" e "b";
- d) *resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços*: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nos itens "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) *resíduos dos serviços públicos de saneamento básico*: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos no item "c";
- f) *resíduos industriais*: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) *resíduos de serviços de saúde*: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);
- h) *resíduos da construção civil*: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) *resíduos agrossilvopastoris*: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) *resíduos de serviços de transportes*: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) *resíduos de mineração*: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

Quanto à periculosidade tem-se a seguinte classificação (art. 13, inc. II, Lei nº 12.305/2010):

- a) *resíduos perigosos*: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) *resíduos não perigosos*: aqueles não enquadrados conforme exposto no item de resíduos perigosos.

Cabe registrar que antes da instituição da PNRS, em 2010, já existia no Brasil a classificação dos resíduos quanto à periculosidade,



conforme definido na NBR 10004:2004. Desta forma, a NBR classifica os resíduos da seguinte forma:

- a) *Resíduos Classe I – Perigosos* (aqueles que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade).
- b) *Resíduos Classe II – Não perigosos*:
  - *Resíduos Classe II A – Não inertes* (aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos ou de resíduos Classe II B – Inertes. Os resíduos Classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água).
  - *Resíduos Classe II B – Inertes* (quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007:2004, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006:2004, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor, conforme 'Anexo G' da ABNT NBR 10004:2004).

A classificação dos resíduos sólidos é o critério primordial para estabelecer as ações de gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos ambientalmente adequadas.

### **2.3 SOLUÇÕES POTENCIAIS PARA GESTÃO E GERENCIAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

Segundo dados do SNIS, para 2020 estima-se em 20,04 milhões a quantidade de habitantes (população em área urbana e rural) que necessita ser atendida com o serviço regular de coleta domiciliar de resíduos sólidos no Brasil.

A coleta dos resíduos sólidos urbanos é uma importante atividade municipal, que pode ocorrer de quatro formas: sistema regular, coleta especial, coleta realizada pelo próprio produtor ou coleta seletiva (Barros, 2012). Na coleta regular os resíduos são coletados nas residências com periodicidade previamente definida, podendo ser porta a porta ou ponto a ponto. Já na coleta especial, o serviço é realizado conforme demanda, de acordo com escala ou pedido do interessado. A coleta realizada pelo próprio produtor ocorre quando há grandes volumes, e a coleta seletiva é o recolhimento que são segregados na origem e passíveis de reciclagem.



O sistema regular (convencional) de coleta deve ser realizado pelo próprio município visando à universalização desse serviço. Ressalta-se, que a coleta é um serviço oneroso para os cofres públicos, principalmente quando não há um dimensionamento adequado de veículos, horários e roteiros de coleta definidos, e quando a atividade é realizada diariamente (Cunha, 2018).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – PLANARES (Decreto nº 11.043/2022) apresenta uma estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Brasil em 2020, dos quais 33,6% são resíduos recicláveis secos. Portanto, é necessário que os municípios priorizem a organização e o funcionamento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis. A coleta seletiva dos resíduos é uma importante ferramenta para evitar que resíduos que ainda possuem algum valor sejam aterrados ou descartados em lixões, e principalmente para geração de emprego e renda de uma população marginalizada, realizando a inclusão socioprodutiva de catadores. Ainda, o Poder Municipal poderá fornecer apoio às cooperativas ou outras formas de associação com a cessão de veículos, fardamento, Equipamentos de Proteção Individual (EPI), galpão de triagem, doação de cestas básicas e inclusão dos catadores em programas sociais municipais, estaduais ou federais.

O SNIS pesquisa, independentemente da forma de coleta, a existência de coleta seletiva no município. Para o ano de 2020 constatou que a coleta seletiva não é uma realidade para a maior parte dos municípios brasileiros, sendo praticada em 2.022 dos 5.570 municípios participantes da pesquisa, o que corresponde a apenas 36,3% desse universo, um aumento de 0,6% se comparado à mesma pesquisa realizada em 2015.

No Brasil, segundo a composição gravimétrica apresentada no PLANARES (Decreto nº 11.043/2022), a fração orgânica, abrangendo sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras é a principal componente dos RSU, com 45,3%. Ela pode ser tratada/reciclada por meio de compostagem, na qual o produto desse processo, contribui para a redução de resíduos destinados aos aterros sanitários ou vazadouros a céu aberto, além de propiciar a recuperação de solos degradados ou exauridos. Ainda, o composto orgânico formado tem uso nas áreas públicas verdes municipais (tais como jardins, parques, praças, canteiros) e nas atividades de educação ambiental (Barros, 2012).

A ocorrência da decomposição anaeróbia da matéria orgânica de forma descontrolada (como a disposição de resíduos



orgânicos em vazadouros a céu aberto – “lixões”) decorrerá nos mais diversos impactos socioambientais, como:

[...] as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de odores, provocadas por gases liberados pelo metabolismo dos microrganismos anaeróbios; a contaminação de águas superficiais e subterrâneas causada pelo lixiviado, líquido resultante da decomposição anaeróbia, com alta carga poluidora; a elevada demanda por área para disposição dos resíduos; os problemas sociais e de saúde pública. (Ferreira, 2015, p. 9)

Outra possibilidade para os países em desenvolvimento que apresentam uma fração orgânica superior a 50% nos RSU é o tratamento dessa parcela através da biodigestão anaeróbia, ainda possibilitando a geração de energia. Entretanto, ainda se carece de regulamentação específica para o setor, além de instrumentos econômicos que viabilizem os projetos “para que os resíduos orgânicos sejam tratados gerando energia na forma de eletricidade ou de combustível substituindo o gás natural” (Magalhães, 2018, p. 29).

Ademais, existem 21,1% de outros tipos de materiais (resíduos têxteis, couros e borrachas, rejeitos sanitários, entre outros) presentes na composição dos resíduos sólidos urbanos que não foram enquadrados nas outras categorias. Esses resíduos devem ser devidamente tratados de acordo com as diversas tecnologias disponíveis e, esgotadas as possibilidades de tratamento, o rejeito deve ser enviado para aterros sanitários, que é a solução preconizada na PNRS.

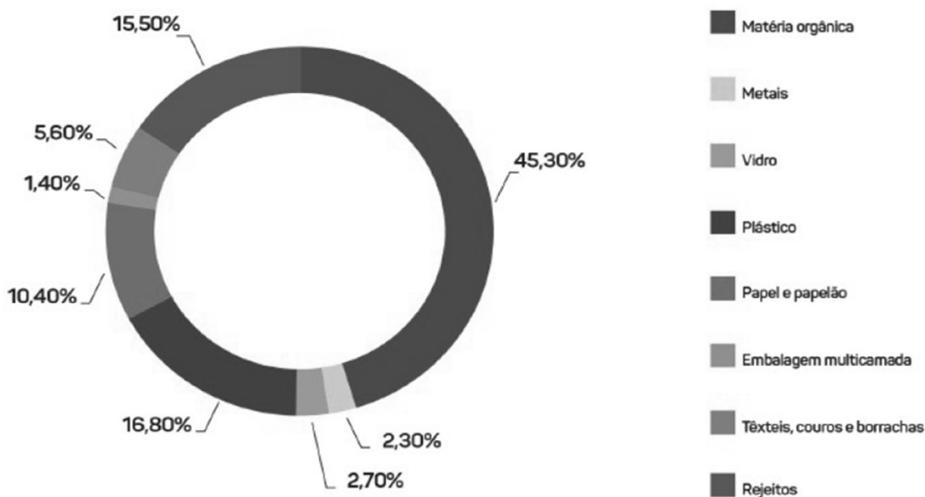
A Figura 2 apresenta a Estimativa da Composição Gravimétrica dos RSU Coletados no Brasil, de acordo com os dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), para o ano de 2020, apresentado no PLANARES (2022, p. 19).

A composição gravimétrica é responsável por traduzir/expressar o percentual de cada componente em relação ao peso total dos resíduos sólidos e subsidia estudos sobre diversas etapas do processo de gerenciamento e na destinação final, principalmente quanto ao potencial de reaproveitamento e de reciclagem dos resíduos (Barros, 2012).

Diversos estudos têm indicado a biomassa como possibilidade para a geração de energia elétrica. Para Silva e colaboradores (2005), a biomassa se caracteriza como toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia. Atualmente existem diversas tecnologias para realizar a conversão da biomassa, liberando a energia diretamente (calor ou eletricidade) ou convertendo-a em outra forma (biocombustível líquido ou biogás).



Figura 2 – Estimativa da Composição Gravimétrica dos RSU Coletados no Brasil



Fonte: PLANARES (2022, p. 19).

A depender do tipo de biomassa pode ser aplicada uma ou diversas tecnologias de conversão energética, para diferentes usos, conforme pode ser observado na Figura 3 (Konrad *et al.*, 2016).

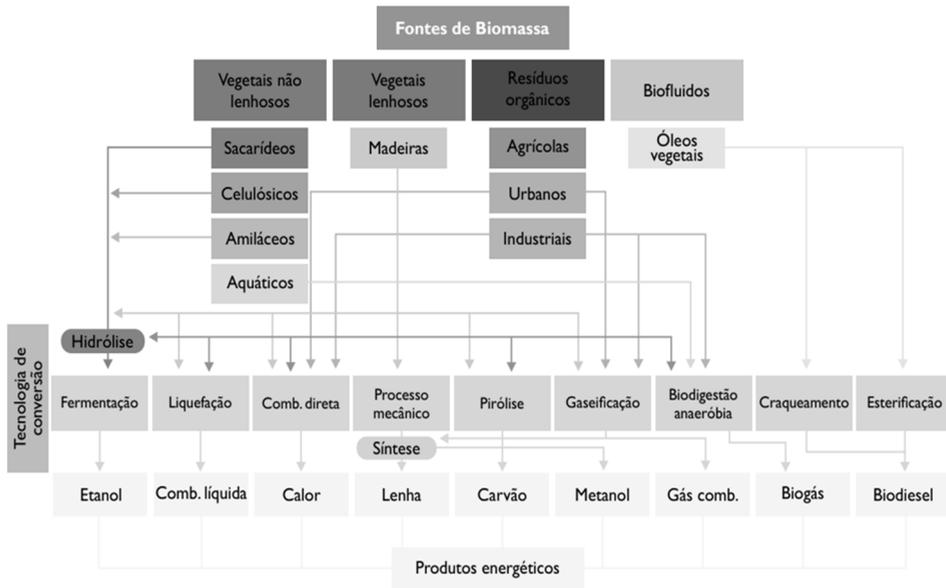
De acordo com o apresentado na Figura 3 identifica-se que existem as mais distintas fontes de biomassa, em especial destacam-se para efeito deste projeto de pesquisa os resíduos orgânicos (agrícolas/agrossilvopastoris, urbanos e industriais).

Um dos produtos da decomposição anaeróbia da matéria orgânica é o biogás. Essa matéria orgânica pode ser derivada de diversas formas de biomassa: resíduos sólidos urbanos, resíduos agrossilvopastoris e resíduos industriais.

O biogás produzido pode alcançar níveis entre 60% e 70% de metano e entre 30% e 40% de dióxido de carbono (Granzotto *et al.*, 2016, p. 132). O biogás possui um elevado potencial de aproveitamento energético, principalmente para geração de energia elétrica. A composição do gás gerado no aterro é um parâmetro que pode variar de um local para outro, inclusive durante todo o tempo. Desta forma, ela pode ser influenciada ou modificada por fatores externos, tais como: temperatura do aterro, idade do resíduo, mudança predominante de atividade microbológica (anaeróbia/aeróbia), entre outros (Fernandes, 2009 *apud* Paixão; Cunha, 2017).



Figura 3 – Diagrama Esquemático dos Processos de Conversão Energética da Biomassa



Fonte: Konrad et al. (2016, p. 17).

Outras formas de tratamento de resíduos sólidos são capazes de gerar produtos com alto potencial calorífico, tais como:

- a) gaseificação;
- b) pirólise;
- c) incineração;
- d) compostagem; e
- e) digestão anaeróbia.

A Digestão Anaeróbia (DA) é um processo natural ligado ao ciclo biogeoquímico do carbono que ocorre a partir da decomposição da matéria orgânica, na ausência do oxigênio, no qual os compostos orgânicos complexos são degradados por diferentes grupos de microrganismos através de distintas reações bioquímicas interdependentes (fermentações, oxidações, reduções). Estas reações são observadas em ambientes naturais (pântanos, manguezais, trato intestinal de ruminantes, jazidas de petróleo, xisto e gás natural) e em processos controlados de DA (metanização). Estima-se que a Digestão Anaeróbia com formação de metano seja responsável pela completa mineralização de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível no



planeta (Chernicharo, 2007 *apud* Ferreira, 2015; Van Haandel; Lettinga, 1994 *apud* Ferreira, 2015).

Para Fonseca e Teixeira (2007) citados por Granzotto *et al.* (2016) a digestão anaeróbia corresponde à forma mais adequada para o tratamento de resíduos orgânicos, quando se deseja obter como produtos o biogás e o biofertilizante. Esse tratamento envolve diferentes microrganismos e reações bioquímicas, dividindo-se essencialmente em quatro principais sequências de degradação: (i) hidrólise; (ii) acidogênese; (iii) acetogênese; e, (iv) metanogênese.

No Brasil as principais formas de tratamento do resíduo orgânico são a incineração, a compostagem e a digestão anaeróbia; enquanto a disposição final mais utilizada é o aterro sanitário (Granzotto *et al.*, 2016).

A disposição final ambientalmente adequada corresponde à distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários, devidamente projetados, operados e licenciados, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. Os aterros sanitários constituem-se como uma forma de disposição do material no solo, sem realizar nenhum tipo de tratamento dos resíduos e, na ordem de prioridade definida pela política é, portanto, a última alternativa.

De acordo com os dados de 2020 do SNIS, estima-se que existem apenas 652 unidades de aterros sanitários operando no país, enquanto o número de vazadouros a céu e aterros controlados totalizam 2.197 locais que recebem de forma inadequada os resíduos, tornando-se um grande problema ambiental. Ressalta-se que os dados do SNIS são autodeclaratórios e fornecidos pelos municípios e/ou pelos prestadores dos serviços.

Diferentemente dos vazadouros a céu aberto e dos aterros controlados, os aterros sanitários são obras de engenharia executadas em áreas selecionadas e licenciadas ambientalmente para disposição de forma tecnicamente adequada de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos, em tese, ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais adversos. Essa solução, considerada ambientalmente adequada pela PNRS, confina os resíduos sólidos ao menor volume possível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada parcela, com captação e tratamento dos gases e líquidos percolados resultantes da decomposição dos resíduos sólidos urbanos, conforme especificações das normas brasileiras (ABNT NBR 8419:1992 – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – e da ABNT NBR



13896:1997 – Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação).

A partir dos dados do SNIS (2020), constata-se que a maior parte dos municípios brasileiros não realiza cobrança pelos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e que o serviço não é autossustentável. A PNRS estabelece como instrumentos, dentre outros, o incentivo à adoção de consórcios ou de outras formas de cooperação entre os entes federados, com vistas à elevação das escalas de aproveitamento e à redução dos custos envolvidos. Estes mecanismos poderão ser utilizados para atendimento à legislação e redução de custos de implantação e operação de aterros, tendo em vista que há uma otimização dos custos operacionais de hora homem, aquisição de terrenos, transporte e máquinas, conforme aumenta a quantidade da população atendida.

Ademais, para municípios com pequena população os aterros sanitários de pequeno porte são, também, uma alternativa. Além de viáveis tecnicamente, a legislação brasileira os reconheceu como solução ambientalmente adequada quando instituiu, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) nº 404, de 11 de novembro de 2008, que “Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos” e estabeleceu Norma Técnica para tal (NBR 15849:2010 – Resíduos sólidos urbanos – Aterros Sanitários de Pequeno Porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento).

Como os aterros sanitários não preveem o tratamento dos resíduos sólidos, a sua utilização se constitui como um conceito entendido como fim-de-tubo (*end-of-pipe*). Isto posto, salienta-se a importância da adoção da economia circular, que já é bem estruturada na União Europeia, para a reintrodução dos recursos e materiais na economia, promovendo um impacto neutro no clima. A adoção de técnicas voltadas para a Prevenção da Poluição (PP), Produção Limpa (PL) e/ou de Produção Mais Limpa (P+L), são fundamentais para alteração do processo produtivo e para alcance dos objetivos da PNRS, da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos (Cunha, 2018).

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os parâmetros analisados no presente artigo, constata-se que, os conceitos e diretrizes, como a classificação dos resíduos sólidos, a responsabilidade compartilhada e os papéis dos



entes envolvidos no processo de gestão e de gerenciamento são bem definidos, mas falta iniciativa do Poder Público para mudança de cenário. Fica evidente que, apesar da existência de tecnologias de tratamento, oportunidade (e necessidade) em investir em saneamento básico no país, esta não foi e não é uma prioridade do governo federal. Assim sendo, ainda existe um longo caminho para alcançar a universalização dos serviços, que são imprescindíveis para a saúde e bem-estar humano.

O panorama atual estimado pelos indicadores do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) reforçam a urgência de iniciativas que solucionem os impactos socioambientais decorrentes da disposição inadequada dos resíduos sólidos. Ainda, os indicadores demonstram a ausência de políticas públicas que promovam melhorias significativas na promoção de saúde e sustentabilidade ambiental.

Há que se levar em conta que a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece os instrumentos necessários, bem como os objetivos, porém ainda existem obstáculos operacionais que dificultam a sua aplicação na prática; por exemplo a definição sob quais parâmetros e critérios se devem realizar a destinação final dos resíduos sólidos, tendo como base o seu arranjo populacional.

É evidente que os custos *per capita* de implementação e gestão de aterros sanitários em solo brasileiro diminuem em medida proporcionalmente inversa à população das regiões. Ou seja: um maior aporte populacional garante menores despesas *per capita*.

Posto isto, a proposta defendida é que se realize uma acomodação de regiões de maneira a agregar uma quantidade suficiente de municípios, adotando soluções economicamente viáveis para valorização dos resíduos sólidos. Assim, é possível otimizar a implementação e obter uma significativa diminuição dos custos dispendidos. Vale mencionar que as pesquisas não devem se limitar a somente realizar uma avaliação populacional, tampouco adotar critérios técnicos pontuais e escassos.

Embora não haja uma discriminação detalhada de como deve se dar a implementação do tratamento municipal, parte-se da premissa de que é dever da totalidade das municipalidades aderir a caminhos tecnológicos que não produzam, reduzam, reutilizem, reciclem, tratem e disponham os rejeitos de modo adequado ao meio ambiente.



## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:2004** – Resíduos Sólidos – Classificação. São Paulo: ABNT, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006:2004** – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. São Paulo: ABNT, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007:2004** – Amostragem de resíduos sólidos. São Paulo: ABNT, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13896:1997** – Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. São Paulo: ABNT, 1997.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15849:2010** – Resíduos sólidos urbanos – Aterros Sanitários de Pequeno Porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. São Paulo: ABNT, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419:1992** – Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. [Esta versão corrigida da ABNT NBR 8419:1992 incorpora Errata 1 de 30.04.1996. Confirmada em 30.11.2018], São Paulo: ABNT, 1992.
- BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos**. Belo Horizonte: Tessitura, 2012.
- BRASIL. Conama – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 404**, de 11 de novembro de 2008. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. D.O.U. de 12.11.2008. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=573](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=573). Acesso em: 22 set. 2022.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Presidência da República. D.O.U. de 05.10.1988, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 22 set. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 7.217**, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. D.O.U. de 22.06.2010, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm). Acesso em: 22 set. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. [Revogado pelo Decreto nº 10.936/2022]. D.O.U. de 23.12.2010, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm). Acesso em: 22 set. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 10.936**, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. D.O.U. de 12.01.2022, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm). Acesso em: 22 set. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 11.043**, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos [PLANARES]. D.O.U. de 14.04.2022, p. 2. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d11043.htm). Acesso em: 22 set. 2022.



BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.666, de 21 de junho de 1993, e nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.025, de 2020). D.O.U. de 08.01.2007, p. 3. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 04 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. D.O.U. de 16.07.2020, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 04 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. D.O.U. de 16.07.2020, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm). Acesso em: 31 maio 2021.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 203/1991**. Dispõe sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde. 01.04.1991. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichade tramitacao?idProposicao=15158>. Acesso em: 22 set. 2022.

CUNHA, Mateus Almeida. A Gestão Municipal dos Resíduos Sólidos: cenários e desafios. In: MARCHI, Cristina Maria Dacach Fernandez. (org.). **Gestão dos**



**Resíduos Sólidos:** conceitos e perspectivas de atuação. Curitiba: Appris, 2018, p. 19-41.

CUNHA, Mateus Almeida. **A implementação do Programa de Aceleração do Crescimento no estado da Bahia e sua contribuição frente aos desafios da universalização do saneamento básico.** 2015. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. Salvador, Bahia, 2015. Disponível em: [https://maasa.ufba.br/sites/maasa.ufba.br/files/34\\_a\\_implementacao\\_do\\_programa\\_de\\_aceleracao\\_do\\_crescimento\\_no\\_estado\\_da\\_bahia\\_e\\_sua\\_contribuicao\\_frente\\_ aos\\_desafios\\_da\\_universalizacao\\_do\\_saneamento\\_basico.pdf](https://maasa.ufba.br/sites/maasa.ufba.br/files/34_a_implementacao_do_programa_de_aceleracao_do_crescimento_no_estado_da_bahia_e_sua_contribuicao_frente_ aos_desafios_da_universalizacao_do_saneamento_basico.pdf). Acesso em: 22 set. 2022.

EEA – European Environmental Agency. **Waste recycling in Europe.** 18.11.2021. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/ims/waste-recycling-in-europe>. Acesso em: 18 set. 2022.

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **Avaliação de um Sistema de Metanização de Resíduos Alimentares com Vistas ao Aproveitamento Energético do Biogás.** 2015. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1132M.PDF>. Acesso em: 22 set. 2022.

GONÇALVES, Lara Sartorio. Pandemia de Covid-19: sobre o direito de lavar as mãos e o novo marco regulatório de saneamento básico. **Revista Científica Foz: Dossiê Águas**, [Revista Interdisciplinar da Faculdade Vale do Cricaré] São Mateus, Espírito Santo, v. 3, n. 1, p. 71-92, jan./jul. 2020. Disponível em: <https://revista.ivc.br/index.php/revistafoz/article/view/165>. Acesso em: 22 set. 2022.

GRANZOTTO, Fabiane; SCHERER, Minéia Johann; BRACHER, Eduarda Holz. Tratamento do Resíduo Orgânico Residencial Urbano através da Digestão Anaeróbica. **Scientia cum Industria**, v. 4, n. 2, p. 131-134, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18226/23185279.v4iss2p131>. Disponível em: <http://www.ucs.br/etc/revistas/index.php/scientiacumindustria/article/view/4472>. Acesso em: 22 set. 2022.

KONRAD, Odorico; GUERINI FILHO, Marildo; LUMI, Marluce; HASAN, Camila. **Atlas das Biomassas do Rio Grande do Sul para Produção de Biogás e Biometano.** Lajeado: Governo do Estado do Rio Grande do Sul / Secretaria de Minas e Energia, 2016. Disponível em: [https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/176/pdf\\_176.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/176/pdf_176.pdf). Acesso em: 29 set. 2022.

MAGALHÃES, Geísa Vieira Vasconcelos. **Avaliação da Biodigestão Anaeróbica de Resíduos Orgânicos:** Ensaios de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) e Projeto Piloto de um Biodigestor em Escala Real. 2018. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2018. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/34759/1/2018\\_tese\\_gvvmagalh%C3%A3es.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/34759/1/2018_tese_gvvmagalh%C3%A3es.pdf). Acesso em: 22 set. 2022.

NUNES, Larissa dos Reis; DÍAZ, Raphael Rodrigo Licheski. A evolução do saneamento básico na história e o debate de sua privatização no Brasil. **Revista de Direito da Faculdade Guanambi**, Guanambi, v. 7 n. 2, e 292, jul./dez. 2020. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8084950>. Acesso em: 20 set. 2022.

PAIXÃO, Jussilene; CUNHA, Mateus Almeida. **Potencial de geração de biogás em aterros dos arranjos municipais do Estado da Bahia.** 2017. Trabalho de Conclusão



de Curso. (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Área 1 – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Salvador, Bahia, 2017.

PEREIRA, Suellen Silva; CURI, Rosires Catão. Modelos de gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos: a importância dos catadores de materiais recicláveis no processo de gestão ambiental. In: LIRA, Waleska Silveira; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. (org.). **Gestão sustentável dos recursos naturais**: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB, 2013, pp. 149-172. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/bxj5n/pdf/lira-9788578792824-06.pdf>. Acesso em: 22 set. 2022.

PLANARES. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. [Coordenação de André Luiz Felisberto França *et al.*] Brasília, DF: MMA/SQA – Ministério do Meio Ambiente / Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf](https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf). Acesso em: 26 set. 2022.

ROCHA, Aristides Almeida. **Histórias do saneamento**. São Paulo: Blucher, 2016.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos – 2020**. 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-residuos-solidos>. Acesso em: 17 set. 2020.

SOUZA, Cezarina Maria Nobre; COSTA, André Monteiro; MORAES, Luiz Roberto Santos; FREITAS, Carlos Machado de. **Saneamento**: promoção da saúde, qualidade de vida e sustentabilidade ambiental. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2015.





# **POLÍTICAS PÚBLICAS PARA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL: INTRODUÇÃO E PERSPECTIVA GERAL**

## ***PUBLIC POLICIES FOR URBAN SOLID WASTE MANAGEMENT IN BRAZIL: INTRODUCTION AND GENERAL PERSPECTIVE***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

THEOTONIO, Letícia Tavares; OLIVEIRA, Marlus Newton Passos Bento Vianna de. Políticas públicas para gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil: introdução e perspectiva geral. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### ***Letícia Tavares Theotônio***

Formada em História pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Discente em Direito pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). Mestranda em Engenharia Urbana e Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e Technische Universität Braunschweig (TUBS). APMG – CP<sup>3</sup>PF programa de certificação em Parceria Público-Privada e Concessões. Gerente de projetos estruturados para novos negócios PPP/Concessão em águas e resíduos da Veolia.

E-mail: leticia.theotonio@gmail.com

### ***Marlus Newton Passos Bento Vianna de Oliveira***

Advogado. Graduado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Pós-Graduado em Recuperação Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela PUC-Rio e Technische Universität Braunschweig. Doutorando em Geociências Universidade Federal Fluminense (UFF). German Chancellor Fellow. Advogado da prática de Direito Ambiental do escritório BMA Advogados.

E-mail: marlus@bmalaw.com.br.

## **RESUMO**

Nos últimos 15 anos o Brasil tem incrementado seu arcabouço legal sobre saneamento básico, incluindo no que toca à gestão de resíduos sólidos. Dentre as normas editadas incluem-se o estabelecimento de um marco regulatório dos resíduos sólidos, delegação de competência fiscalizatória para uma agência reguladora, e edição de outras leis e normas regulamentares setoriais, cuja implementação vem sendo feita através de diferentes ferramentas de gestão. Este artigo apresenta uma introdução atualizada às principais



normativas e traz uma perspectiva sobre os mecanismos de planejamento e regulação, principalmente o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) e o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES).

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. PNRS. Políticas públicas. Marco do saneamento. Planos de gestão.

## ABSTRACT

In the last 15 years, Brazil has been strengthening its legal framework on basic sanitation, including solid waste management. Among the issued regulations are a comprehensive act on waste management, assignment of enforcement competence to a regulatory agency, and adopting other laws and sectoral regulatory standards, which are being implemented through different management tools. This article presents an updated introduction to the main planning and regulation tools, especially the National Basic Sanitation Plan (PLANSAB) and the National Solid Waste Plan (PLANARES).

Keywords: Urban solid waste. PNRS. Public policies. Sanitation framework. Management Plans.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os principais marcos legais das políticas públicas nacionais voltadas para a regulamentação da gestão de resíduos sólidos, são a Lei de Consórcios Públicos (Lei nº 11.107/2005), a Lei Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007), o Novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026/2020) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei nº 12.305/2010). Neste caso com especial relevância para a forma de organização dos municípios para fins da prestação ou concessão dos serviços de tratamento e disposição final de resíduos sólidos.

Por óbvio, as normas que tratam da gestão de resíduos encontram também assento na Constituição Federal de 1988, seja no art. 225, que estabelece o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado e as obrigações de proteção ao meio ambiente, seja de maneira indireta, na sua relação com a garantia social do direito à saúde (art. 6º) e à dignidade da pessoa humana (art. 1º, III). (Neta, 2012).

Além dos marcos legais apontados, diversas outras políticas públicas contemplam normas relacionadas, direta ou indiretamente, à gestão dos resíduos sólidos, como:

- ♦ A Política Nacional de Saúde (Lei nº 8.080/1990);
- ♦ A Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999);
- ♦ A Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605/1998);
- ♦ A Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA – Lei nº 6.938/1981);



- ♦ A Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997);
- ♦ O Decreto Federal nº 5.940/2006 que instituía a Separação dos Resíduos Recicláveis (Revogado pelo Decreto nº 10.936/2022);
- ♦ As diversas Normas Brasileiras (NBRs) aplicáveis à gestão de Resíduos, como a NBR 10004, que dispõe sobre os Resíduos Sólidos e a sua Classificação e a NBR 10007, que dispõe sobre a Amostragem de Resíduos;
- ♦ Entre diversas outras normas difusamente editadas como a Instrução Normativa MPOG 01/2010, que dispõe sobre os critérios de Sustentabilidade Ambiental em contratações da Administração Pública federal.

A área de saneamento no Brasil, neste conceito, atravessa momento importante de novas formulações teórico-conceituais e metodológicas, em especial após a promulgação das Leis nº 11.445/2007, nº 12.305/2010 e nº 14.026/2020. Tais instrumentos legais implicam a construção de um novo quadro institucional para o setor de saneamento básico e resíduos sólidos, cuja efetividade dependerá da maior clareza teórica possível das várias opções político-institucionais disponíveis para sua implementação.

## 2 POLÍTICAS PÚBLICAS

De uma forma geral, no entanto, a definição do conceito de Política Pública comporta interpretações e variações das mais diversas, limitando-se o consenso ao entendimento de que as políticas públicas resultam de decisões governamentais e se referem a ações de governo (Fonte, 2017).

De toda sorte, dentre as diversas definições elencadas na literatura especializada, o conceito de política pública adotada para fins do presente artigo pode ser assim sintetizado:

Dentre as definições de política pública, compiladas da literatura sobre o tema (Howlett e Ramesh, 2003; Jenkins, 1993; Nelson, 1996), pode-se extrair a seguinte, [...]: política pública é um processo, que envolve decisões por parte de corpos e autoridades governamentais, e ações, realizadas por um ator ou um conjunto de atores, e é composto por metas e os meios para alcançá-las. Devem-se destacar, dessa definição, as noções de processo, indicando o dinamismo histórico-temporal da política pública; de tomada de decisões como um seu aspecto inerente; do protagonismo do governo; e de metas e meios para seu alcance, ainda que em alguns casos ambos possam se verificar ocultos. (Heller; Castro, 2007, p. 286)



Especificamente para o caso das políticas públicas em saneamento básico, em 1988, com a promulgação da Constituição Federal do Brasil, o saneamento básico passou a ser um direito assegurado a todos, e os municípios tornaram-se detentores da titularidade dos serviços locais, para fornecê-los direta ou indiretamente, nas palavras de Silva e Capanema (2019).

A despeito de não estar previsto expressamente na Lei Maior, entende-se que o direito ao saneamento básico está inserido no âmbito do direito social à saúde estabelecido no artigo 6º, combinado com artigo 196, ambos da Carta Magna (Damasceno, 2013). Existe Proposta de Emenda à Constituição (PEC 02/2016) atualmente em tramitação no Senado Federal que propõe a expressa inclusão do direito ao saneamento Básico no *caput* do artigo 6º da Constituição Federal.

De toda sorte, apesar de constitucionalmente assegurado, é óbvio que os contornos do que viria a ser o direito ao saneamento básico e a forma como tal direito deve ser assegurado demandou a edição de diversas normas adicionais:

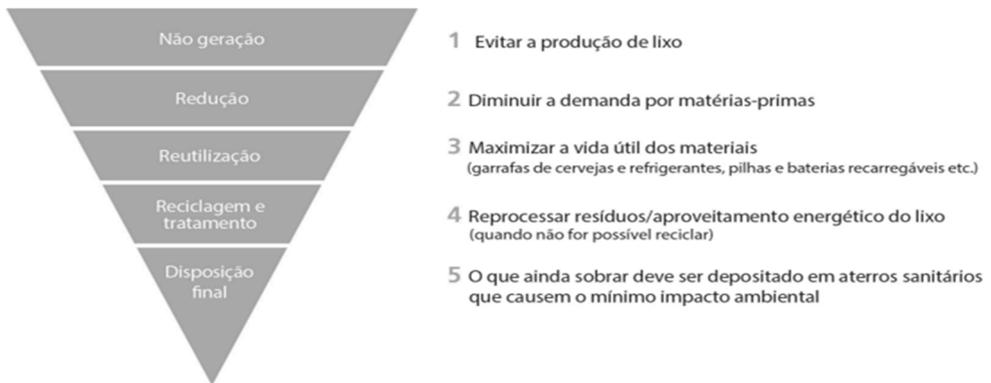
Posteriormente, em 2007, a Lei 11.445 definiu saneamento básico como o conjunto dos serviços, da infraestrutura e de instalações operacionais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana e de manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais.

No entanto, não havia no país um instrumento legal que estabelecesse diretrizes gerais aplicáveis aos resíduos sólidos para orientar sua gestão de forma adequada. Somente em 2010, depois de mais de vinte anos de discussões e tramitação no Congresso Nacional, foi aprovada a Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). (Silva; Capanema, 2019, p. 181)

De acordo com Grisa e Capanema (2018), com princípios legais alinhados com o que há de mais avançado em outros países, o texto da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) foi um marco importante no setor. A lei abrange todas as classes de resíduos sólidos e estabelece um conceito moderno e avançado de gestão de resíduos, com instrumentos que preveem a hierarquização das atividades e a prioridade em prevenção e redução da geração de lixo, alinhado com o estado da arte global em gestão de resíduos sólidos, incluindo a Diretiva Europeia sobre resíduos nº 2008/98/EC (EU, 1998), conforme apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos, com base na Lei nº 12.305/2010



Fonte: Grisa e Capanema, 2018, p. 181.

Neste cenário, a maneira mais frequente que uma política pública se externaliza no mundo real é a através de um plano (Bucci, 1997). No âmbito dos resíduos sólidos, objeto deste artigo, os principais instrumentos de gestão, são os planos nacionais de saneamento básico e resíduos, objeto de itens específicos, assim como os planos de gerenciamento integrado, cuja análise permite concebermos o cenário político institucional relacionado ao manejo de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Neste contexto, nos próximos itens são apresentados alguns aspectos centrais das principais normas que estabelecem políticas públicas relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos.

## 2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS – LEI Nº 12.305/2010

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010, PNRS) é a lei que versa, dentre outros aspectos, sobre o Resíduo Sólido Urbano (RSU), norteadas pelos princípios básicos de minimização da geração, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final, seguindo esta ordem de prioridade, conforme assinalado na Figura 1.

Para tanto, são definidas como diretrizes: o desenvolvimento de tecnologias limpas, alterações nos padrões de consumo e aperfeiçoamento da legislação. É interessante verificar que a PNRS considera a redução da periculosidade dos resíduos também como uma forma de sua minimização.



Na lei, são apresentados também os instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (art. 8º da Lei):

- ♦ Os planos e programas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos; a capacitação técnica e valorização profissional;
- ♦ Os instrumentos econômicos;
- ♦ A disseminação de informações;
- ♦ O licenciamento, o monitoramento e a fiscalização;
- ♦ As penalidades disciplinares e compensatórias;
- ♦ O apoio técnico e financeiro aos Estados, Distrito Federal e Municípios;
- ♦ A educação ambiental de forma consistente e continuada;
- ♦ A valorização dos resíduos.

Ao mesmo tempo que a PNRS impõe novos desafios ao setor privado, ao Poder Público também são estabelecidas novas obrigações associadas aos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, visando concretizar os objetivos de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Em acréscimo a esta complexa, embora necessária, hierarquia na gestão dos resíduos sólidos, a lei exige ainda ações voltadas à reutilização e a recuperação energética dos resíduos, conforme o artigo 9º, *caput*, e seu §1º.

Desta forma a PNRS aponta para a necessidade de reestruturação da cadeia produtiva nacional, em razão da introdução dos conceitos de produção ecoeficiente (art. 6º, inc. V), responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (art. 3º, inc. XVII) e logística reversa dos resíduos (art. 3º, inc. XII), além da óbvia necessidade de melhoria tecnológica e de capacitação do setor, tanto público como privado.

Além disso, a PNRS e seu Decreto Regulamentador (Decreto Federal nº 7.404/2010) apontam ainda para necessidade de serem observados alguns outros aspectos relevantes na gestão de resíduos como:

- ♦ A necessidade de planejamento do setor, através de planos municipais de gestão integrada, além do plano nacional de gestão de resíduos sólidos, dos planos estaduais e dos planos de gerenciamento de resíduos sólidos para geradores específicos;
- ♦ A erradicação dos lixões, através da obrigatoriedade de implementação de aterros sanitários para os rejeitos (art. 54) – Cujo



prazo original de agosto de 2014, após ser descumprido, foi alterado pela lei que estabeleceu o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei 14.026/2020);

- ♦ A inclusão social, através da organização formal de catadores e a sua integração na gestão de resíduos, e a coleta seletiva de resíduos sólidos domésticos (art. 18, art. 36);
- ♦ A regionalização da gestão de resíduos, através da priorização de financiamentos para consórcios intermunicipais (art. 16);
- ♦ A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa para alguns grupos de resíduos (art. 30).

Especificamente em relação ao aproveitamento energético dos resíduos, é importante ressaltar o diálogo com as políticas climáticas, expressamente reconhecido na Lei da PNRS e do seu decreto regulamentador, conforme trechos a seguir:

*Lei 12.305/2010 (PNRS):*

Art. 9º. Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

*Decreto nº 7.404/2010:*

Art. 37. A recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010, assim qualificados consoante o artigo 13, inciso I, alínea "c", daquela Lei, deverá ser disciplinada, de forma específica, em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades.

Parágrafo único. O disposto neste artigo [art. 37] não se aplica ao aproveitamento energético dos gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

## **2.2 LEI NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – LEI Nº 11.445/2007**

A Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB) e seu Decreto Regulamentador (Decreto Federal nº 7.217/2010), como o próprio apelido da norma antecipa, estabelecem as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil.



De acordo com a LNSB, o saneamento básico é o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (art. 3º, inc. I).

A limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, por seu turno, são entendidos como:

[...] constituídos pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais de coleta, varrição manual e mecanizada, asseio e conservação urbana, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbana. (art. 3º, inc. I, alínea “c”, Lei nº 11.445/2007)

Dentre as diversas rotas de gestão e tratamento dos resíduos sólidos, o artigo 48 da LNSB orienta pela necessidade de fomento ao “desenvolvimento científico e tecnológico, a adoção de tecnologias apropriadas e a difusão dos conhecimentos gerados”; enquanto que o artigo 49, inciso X estabelece como um dos objetivos da Política “minimizar os impactos ambientais relacionados à implantação e desenvolvimento das ações, obras e serviços de saneamento básico e assegurar que sejam executadas de acordo com as normas relativas à proteção do meio ambiente, ao uso e ocupação do solo e à saúde”.

Neste mesmo contexto, o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) constitui o eixo central da Política Federal para o Saneamento Básico, promovendo a articulação nacional dos entes da federação para a implementação das diretrizes da LNSB. O PLANSAB é instrumento fundamental à retomada da capacidade orientadora do Estado na condução da política pública de saneamento básico e, conseqüentemente, da definição das metas e estratégias de governo para o setor, no horizonte dos próximos vinte anos, com vistas à universalização do acesso aos serviços de saneamento Básico como um direito social.

A revisão do PLANSAB, de 25 de julho de 2020, define as metas para 2023 a 2033, relacionadas ao manejo dos resíduos sólidos segundo macrorregiões e no País. O documento prevê oito metas que abarcam desde aspectos de coleta diferenciada e indiferenciada, encerramento de lixões e aterros controlados, cobrança e desvio de frações orgânicas dos aterros, entre outros. Em seus programas, o Plano define também intervenções para:

- ♦ Fortalecimento de ações que visem a redução da geração de resíduos sólidos;



- ♦ A incorporação de rotas tecnológicas inovadoras e de baixo carbono, considerando a reutilização, a reciclagem e a recuperação energética dos resíduos sólidos;
- ♦ Incentivo ao desvio e reciclagem dos resíduos sólidos secos e orgânicos que são encaminhados aos aterros sanitários;
- ♦ O uso eficiente dos recursos naturais e energéticos;

Importante ressaltar que o PLANSAB é o principal instrumento de planejamento para o saneamento básico no Brasil e permite a orientação da ação dos agentes públicos e privados. Cabe anotar que o PLANSAB foi aprovado pelo Decreto nº 8.141, de 20 de novembro de 2013 e pela Portaria Interministerial nº 571, de 05 de dezembro de 2013 e sua elaboração foi prevista na lei de diretrizes nacionais para o saneamento básico – Lei nº 11.445/2007, regulamentada pelo Decreto nº 7.217/2010 – Devendo ser avaliado anualmente e revisado a cada quatro anos.

### **2.2.1 Novo Marco Legal do Saneamento Básico – Lei nº 14.026/2020**

A Lei nº 14.026/2020 alterou de forma representativa a Lei nº 11.445/2007, buscando modernizar e universalizar os serviços de saneamento básico, prevendo regras que visam fomentar investimentos privados, estimulando a livre concorrência e a sustentabilidade econômica dos serviços e incrementando a segurança jurídica entre os atores do setor.

Uma das principais novidades do novo marco legal foi a promoção de uma espécie de “federalização” do tema do saneamento, que se deu principalmente com a ampliação do rol de competências da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), anteriormente denominada apenas como Agência Nacional de Águas, com o novo marco, a agência reguladora passou a ter competências regulatórias também em matéria de saneamento básico. Isso porque, tradicionalmente, o tema sempre foi visto como de interesse local e, portanto, de competência dos Municípios, com algumas exceções no caso de regiões metropolitanas. Ao decidir a ADIn 1842, o Supremo Tribunal Federal entendeu que a titularidade dos serviços públicos de saneamento, embora seja dos Municípios, deve ser exercida de forma regionalizada, com participação do Estado, para o caso de regiões metropolitanas.

Também, o novo marco legal assegurou possibilidades de controle social para acompanhamento das políticas públicas e a



qualidade da prestação de serviços de saneamento (arts. 47 e 53), além de criar instrumento para a regulação dos serviços de saneamento e vedar a utilização de contratos de programa e outros instrumentos de natureza precária (arts. 10 e 13, § 8º).

Ainda com relação à utilização do contrato de programa, o novo marco legal, em seu artigo 17, estabeleceu que aqueles contratos já firmados somente poderão permanecer em vigor até o advento do termo contratual.

Esses acordos foram firmados no passado com regras de prestação de serviço mediante tarifação, porém a escolha dos prestadores de serviço foi feita sem concorrência. Com o novo marco legal, exige-se a licitação para celebração de contratos de concessão, permitindo que participem do processo seletivo tanto prestadores de serviços públicos como privados (GOV.BR, 2020).

Outra mudança prevista na lei se refere ao atendimento a pequenos municípios, com poucos recursos e ainda sem cobertura de saneamento básico. Pelo modelo anterior, as grandes cidades eram atendidas por uma mesma empresa estatal e ajudavam a financiar a expansão do serviço nos municípios menores e deficitários.

A nova lei determina que os estados, no intuito de atender aos pequenos municípios, componham grupos ou blocos de municípios que poderão contratar os serviços de forma coletiva. Esses blocos deverão implementar planos municipais e regionais de saneamento básico, enquanto a União poderá oferecer apoio técnico e financeiro para a execução dessa tarefa.

Vale citar que alguns estados já avançaram na instituição do que a lei denominou de "unidades regionais de saneamento básico", como foi o caso do Estado de Minas Gerais (Projeto de Lei nº 2.884/2021), o Estado do Maranhão (Lei Complementar nº 239/2021), o Estado do Rio Grande do Sul (Lei Estadual nº 15.795/2022) e o Estado de São Paulo (Lei Estadual nº 17.383/2021).

O marco legal, inclusive, define a priorização na aplicação de recursos não onerosos (artigo 50, § 1º), para aqueles investimentos de capital que viabilizem a prestação regionalizada de serviços, por meio dos blocos regionais.

Com relação à gestão de resíduos sólidos, o novo marco legal prorrogou o prazo de implementação da disposição final ambientalmente adequada, anteriormente prevista na Lei da PNRS. A depender do porte, de mecanismos de cobrança pelos serviços e da existência de Plano Intermunicipal de Resíduos Sólidos ou Plano



Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, os municípios poderão ter prazo até agosto de 2024 para sua implementação.

No que diz respeito à remuneração dos serviços de gestão dos resíduos sólidos, o Marco cria alternativas de cobrança (taxa, tarifa ou preço público), sem prejuízo de eventual subsídio ou subvenção (art. 29). Ademais, a lei possibilita a cobrança dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos conjuntamente com a fatura de água e esgoto (art. 35).

Quanto a este último aspecto, em 2022, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou norma que viabiliza a cobrança, por meio da fatura de energia elétrica, de taxa ou tarifa referente à prestação do serviço de coleta de lixo nas cidades, o chamado "manejo de resíduos sólidos urbanos", conforme Resolução Normativa ANEEL nº 1.047/2022.

Em sua decisão, a ANEEL estabeleceu que a cobrança é facultativa para a distribuidora e que não é necessária anuência prévia do consumidor para que ela seja realizada, por ser uma cobrança prevista na Lei nº 14.026/2020.

### **3 ASPECTOS REGULATÓRIOS E METAS NACIONAIS**

As políticas públicas voltadas para o manejo de resíduos partem de um referencial no qual há a promoção da qualidade de vida das populações e da preservação do meio ambiente através do estabelecimento de obrigações, das quais se extraem ações para a implementação das determinações legais.

A partir do estabelecimento de instrumentos orientadores para o atendimento legal, foram definidas metas quantitativas e qualitativas nos documentos publicados pelo Poder Público brasileiro, principalmente o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) e o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB).

O documento que possui o condão de definir as metas relacionadas à implementação da PNRS é o PLANARES, cuja versão mais atualizada foi publicada em março de 2022, através do Decreto Federal nº 11.043/2022. Sem prejuízo do Plano Nacional, também Estados e Municípios devem elaborar e publicar planos próprios de resíduos e saneamento, como já vem ocorrendo em diversos entes federativos como o Rio de Janeiro (Decreto Estadual nº 45.957 de 22 de março de 2017), Espírito Santo (Resolução Consema nº 004, de 16 de julho de 2019), Paraná (Lei Estadual nº 20.607, de 10 de junho de 2021) e outros.

Ademais, a política pública de gestão de resíduos sólidos, como um todo, possui outros documentos referenciais que devem



dialogar para o estabelecimento e cumprimento de metas, valendo especial menção ao PLANSAB.

Cabe mencionar que, ao contrário do que ocorre com os setores de esgotamento e abastecimento de água, a Lei nº 14.026/2020 não traz metas quantitativas para o setor de resíduos. Por outro lado, à medida que a lei define a regionalização e estipula prazos para a disposição ambientalmente adequada, a expectativa é que para consecução das metas qualitativas seja necessário incremento tecnológico para a adoção de novas rotas para substituir os lixões e possibilitar o tratamento dos resíduos antes da disposição final, encaminhando-se aos aterros sanitários somente os rejeitos.

Entretanto, é importante destacar que o § 2º do artigo 54 da Lei da PNRS estabelece que em casos de inviabilidade econômica da disposição final de rejeitos em aterros sanitários, poderão ser adotadas outras soluções, desde que aprovadas pelo órgão licenciador.

Essa redação dá margem à implantação de alternativas com menor rigor ambiental, em detrimento de soluções sob a perspectiva da economia circular e a proteção do meio ambiente e do clima.

Ainda sobre a PNRS, leciona Silva e Capanema (2019):

Assim, embora a PNRS represente um avanço, ao estabelecer diretrizes semelhantes às existentes em países mais avançados no tema de gestão de resíduos, até hoje o Brasil convive com lixões e há uma grande assimetria de gestão de resíduo sólido urbano entre seus diversos municípios e regiões. Para inserir o país na lógica da economia circular, priorizando a prevenção e a redução do lixo, precisam ser estimuladas políticas de educação ambiental, a fim de conscientizar e educar a população sobre a importância da separação correta do lixo doméstico e sua reciclagem, bem como uma política tributária que promova incentivos econômicos para o aproveitamento dos resíduos por meio de logística reversa, valorização e transformação dos resíduos. Para isso, é necessária uma articulação mais forte entre o poder público e a iniciativa privada, assim como a mobilização da sociedade. (Silva; Capanema, 2019, p. 184)

### **3.1 PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO**

O Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) foi aprovado em 2013 contemplando uma abordagem integrada do saneamento Básico, que incluiu os “quatro componentes: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas” (PLANSAB, 2019, p. 6). Conforme previsto na legislação, o Plano foi concebido com um horizonte de vinte anos (2014 a 2033),



com previsão de avaliações anuais e revisões a cada quatro anos, tendo sido revisado em 2019.

O PLANSAB 2019 apresentou diagnóstico da situação do saneamento básico no Brasil, considerou aspectos estruturantes, econômicos, políticos institucionais, sociais e técnicos para definição de cenários e proposição de metas para a Política de saneamento. Foram definidos assim os seguintes eixos de atuação:

- ♦ Cenário universalização (menor prazo);
- ♦ Cenário busca da universalização; e,
- ♦ Cenário distante da universalização.

Como a universalização do acesso aos serviços de saneamento consiste em um dos principais desafios no Brasil, os eixos foram definidos de modo a apresentar uma solução em cenários otimista, intermediário e conservador para definir as metas e estratégias.

Tabela 1 – Gestão de Resíduos Sólidos por macrorregiões – PLANSAB

	<b>Indicadores</b>	<b>Metas 2017</b>	<b>Metas 2023</b>	<b>Metas 2033</b>
1	% de domicílios urbanos e rurais atendidos por coleta direta ou indireta de resíduos sólidos	89,6%	90,6%	95,4%
2	% de domicílios urbanos atendidos por coleta direta ou indireta de resíduos sólidos	97,9%	98,7%	100%
3	% de domicílios rurais atendidos por coleta direta ou indireta de resíduos sólidos	32,8%	46,8%	70%
4	% de municípios com disposição final ambientalmente inadequado de resíduos sólidos	59,3%	34,8%	0,0%
5	% de municípios com coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares secos	35,3%	37,2%	43%
6	% de municípios que cobram pelo serviço de manejo de resíduos sólidos urbanos	46,3%	65,2%	100%
7	% de massa de resíduos sólidos com disposição final ambientalmente inadequada	24,8%	18,3%	0,0%
8	% de desvio de resíduos sólidos orgânicos da disposição final	0,57%	2,8%	10,4%

Fonte: PLANSAB (2019, p. 154-155).



Para o saneamento básico como um todo, o PLANSAB apresenta 29 indicadores, sendo 24, dos quatro componentes do saneamento básico e outros cinco referentes a aspectos de gestão. Para a gestão de resíduos sólidos urbanos foram definidas oito metas com indicadores específicos para monitoramento, estabelecidos para cada macrorregião.

Os aspectos estruturantes e estruturadores para o alcance das metas consideram a universalização dos serviços como ponto de partida, junto à adoção da cobrança pelos serviços. Dessa maneira, compreendemos que o desafio principal está relacionado à capacidade técnica para adoção de novas rotas tecnológicas e financeira para os investimentos necessários, de acordo com a hierarquia da gestão de resíduos definida na PNRS (art. 9º, Lei nº 12.305/2010), com redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE), mitigação de impactos ambientais e inclusão social para que seja construída uma alternativa viável para atingimento das metas e para o aterramento de resíduos sem qualquer aspecto de valorização.

### **3.2 PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) representa a estratégia de longo prazo em âmbito nacional para operacionalizar as disposições legais, princípios, objetivos e diretrizes da PNRS. O PLANARES apresenta o diagnóstico da situação do manejo de resíduos sólidos no Brasil, incluindo os sistemas de logística reversa. O documento estabeleceu um cenário de referência e definiu metas e indicadores de acompanhamento com horizonte de vinte anos.

Entre as principais metas do documento estão:

- ♦ A eliminação de práticas de disposição final inadequada (fim dos lixões);
- ♦ Minimização da quantidade de resíduos e rejeitos que recebem destinação final sem tratamento prévio (frações secas e orgânicas);
- ♦ Aumento da reciclagem de resíduos da construção civil.

A elaboração do PLANARES foi realizada pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2022) através de acordo de cooperação com o Ministério do Meio Ambiente (MMA). Foram utilizadas informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea, 2010) e da própria Abrelpe para construção do documento.



No âmbito dos resíduos sólidos urbanos, o PLANARES define nove metas quantitativas e qualitativas para a gestão do RSU, compatibilizadas para a federação como um todo, ou seja, observando-se as diferenças entre macrorregiões.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A melhoria do saneamento no Brasil tem sido objeto de diferentes legislações e regulamentos. Como exige a melhor hermenêutica jurídica, essas normas devem ser tratadas como um sistema jurídico, devendo ser interpretadas de maneira conjunta e complementares, e não isoladamente. Os instrumentos de gestão dessas políticas públicas devem ser utilizados para que projetos sejam implementados e garantam maior benefício econômico, social e ambiental para toda a sociedade.

A definição de uma política pública precisa necessariamente tratar as questões econômicas (como a capacidade de pagamento e investimento), as questões técnicas (que refletem o uso de tecnologias para um manejo mais eficiente), as questões climáticas (em sua relação com a geração de gases de efeito estufa), a questão social (com atenção para o setor informal e sua inclusão digna na cadeia produtiva) e, conjugando todas essas abordagens, a questão ambiental, que trata os resíduos como recursos para novas atividades produtivas, protegendo os recursos naturais e minimizando os impactos.

Por isso a necessidade do estabelecimento de uma abordagem que consiga trazer a perspectiva de como os instrumentos de implementação dessas políticas e as normas de regulação poderão fazer com que a legislação efetivamente construa um ambiente mais favorável para uma gestão de resíduos sólidos urbanos sustentável.

#### REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:2004** – Resíduos sólidos – Classificação – Esta Norma classifica os resíduos sólidos quanto aos seus potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. São Paulo: ABNT, 2004. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007:2004** – Amostragem de resíduos sólidos – Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para amostragem de



resíduos sólidos. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/nbr-10007-amostragem-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 22 nov. 2022.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL nº 1.047/2022**. Altera a Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, para regular a Lei nº 11.445, de 2007, com redação dada pela Lei nº 14.026, de 2020, que possibilita a cobrança de taxas ou tarifas decorrentes da prestação de serviço de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos na fatura de energia elétrica. D.O.U. de 16.11.2022. Disponível em: <https://www.lex.com.br/resolucao-normativa-aneel-no-1-047-de-8-de-novembro-de2022/>. Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**: promulgada em 5 de outubro de 1988. Presidência da República. D.O.U. de 05.10.1988, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. Constituição Federal (1988). **Proposta de Emenda à Constituição PEC 02/2016**. Altera o art. 6º da Constituição da República, para incluir, dentre os direitos sociais, o direito ao saneamento básico. 2016. Disponível em: <https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais//ver/pec-2-2016-sf>. Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 5.940**, de 25 de outubro de 2006. Institui a separação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal direta e indireta, na fonte geradora, e a sua destinação às associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis, e dá outras providências. D.O.U. de 26.10.2006, p. 4. [Revogado pelo Decreto nº 10.936/2022]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/decreto/d5940.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5940.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.217**, de 21 de junho de 2010. Regulamenta a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e dá outras providências. D.O.U. de 22.06.2010, p. 1. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7217.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. D.O.U. de 23.12.2010, p. 1. [Revogado pelo Decreto nº 10.936/2022]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 8.141**, de 20 de novembro de 2013. Dispõe sobre o Plano Nacional de Saneamento Básico - PNSB, institui o Grupo de Trabalho Interinstitucional de Acompanhamento da Implementação do PNSB e dá outras providências. D.O.U. de 21.11.2013, p. 1 [Revogado pelo Decreto nº 10.473/2020]. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2013/decreto/D8141.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/decreto/D8141.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 10.936**, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. D.O.U. de 12.01.2022, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm). Acesso em: 11 nov. 2022.



BRASIL. **Decreto nº 11.043**, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. D.O.U. de 14.04.2022, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Instrução Normativa MPOG 01**, de 19 de janeiro de 2010. Dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional e dá outras providências. Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão. Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação. D.O.U. de 20.01.2010, Seção 1, p. 40. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=115561>. Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 8.080**, de 19 de setembro de 1990. Dispõe sobre as condições para a promoção, proteção e recuperação da saúde, a organização e o funcionamento dos serviços correspondentes e dá outras providências. D.O.U. de 20.09.1990, p. 18055. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l8080.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8080.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 6.938**, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. DOFC de 02.09.1981, p. 16509. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. D.O.U. de 09.01.1997, p. 470. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 9.795**, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. D.O.U. de 28.04.1999, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9795.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.107**, de 06 de abril de 2005. Dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos e dá outras providências. D.O.U. de 07.04.2005, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2005/Lei/L11107.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11107.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, nº 8.666, de 21 de junho de 1993, e nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. (Redação pela Lei nº 14.025, de 2020). D.O.U. de 08.01.2007, p. 3. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de



Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 04 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. D.O.U. de 16.07.2020, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Portaria Interministerial nº 571**, de 05 de dezembro de 2013. Aprova o Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. D.O.U. de 06.12.2013, Seção 1, p. 176. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=176&data=06/12/2013>. Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. Supremo Tribunal Federal. **ADIn 1842 – Ação direta de inconstitucionalidade nº 1842/DF** – Distrito Federal. Relator: Ministro Luiz Fux. Disponível em: <https://redir.stf.jus.br/paginadorpub/paginador.jsp?docTP=AC&docID=630026>. Acesso em: 12 out. 2022.

BUCCI, Maria Paula Dallari. Políticas públicas e direito administrativo. **Revista de informação legislativa**, v. 34, n. 133, p. 89-98, 1997. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/item/id/198>. Acesso em: 12 out. 2022.

DAMASCENO, João Batista. Saneamento Básico, dignidade da pessoa humana e realização dos valores fundamentais. **Série aperfeiçoamento de magistrados 17**, Desenvolvimento Sustentável, 2013. Disponível em: [https://www.emerj.tjrj.jus.br/serieaperfeicoamentodemagistrados/paginas/series/17/desenvolvimento\\_sustentavel\\_38.pdf](https://www.emerj.tjrj.jus.br/serieaperfeicoamentodemagistrados/paginas/series/17/desenvolvimento_sustentavel_38.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

ESPÍRITO SANTO. **Resolução Consema Nº 004**, de 16 de julho de 2019. Dispõe sobre aprovação da Versão Final do Plano Estadual de Resíduos Sólidos-PERS-ES. 2019. Disponível em: <https://seama.es.gov.br/Media/seama/Consema/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20CONSEMA%20n%C2%BA%20004%202019.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

EU, **Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 19 de novembro de 2008 relativa aos resíduos e que revoga certa diretiva. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&from=EN>. Acesso em: 27 nov. 2022.

FONTE, Felipe de Melo. **Políticas públicas e direitos fundamentais**. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.

GOV.BR – Governo do Brasil. **Novo Marco de Saneamento é sancionado e garante avanços para o País**. Nova lei para universalização do saneamento básico foi sancionada, nesta quarta-feira (15), pelo presidente Bolsonaro. 15.07.2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/07/novo-marco-de-saneamento-e-sancionado-e-garante-avancos-para-o-pais>. Acesso em: 28 out. 2022.

GRISA, Daniela Cristina; CAPANEMA, Luciana Xavier de Lemos. Resíduos sólidos urbanos. In: PUGA, Fernando Pimentel; CASTRO, Lavínia Barros de. (org.). **Visão 2035**: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta. Rio de Janeiro: BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018.

p. 415-438. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/16284>. Acesso em: 28 ago. 2022.

HELLER, Leo; CASTRO, José Esteban. Política Pública de Saneamento: apontamentos teórico-conceituais. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 284-295, jul./set. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000300008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/sH4B9J7rYgvYsHG9nxc3mSN/>. Acesso em: 11 nov. 2022.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais. **Relatório de pesquisa**: pesquisa sobre o pagamento por serviços ambientais urbanos para gestão de resíduos sólidos. Brasília: IPEA, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7968>. Acesso em: 12 out. 2022.

MARANHÃO. **Lei Complementar nº 239/2021**. Institui as Microrregiões de Saneamento Básico do Norte Maranhense, do Sul Maranhense, do Centro-Leste Maranhense e do Noroeste Maranhense. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/ma/lei-complementar-n-239-2021-maranhao-institui-as-microrregioes-de-saneamento-basico-do-norte-maranhense-do-sul-maranhense-do-centro-leste-maranhense-e-do-noroeste-maranhense>. Acesso em: 12 out. 2022.

MDR – Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Plano Nacional de Saneamento Básico** – PLANSAB – 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/plansab>. Acesso em: 12 out. 2022.

MINAS GERAIS. **Projeto de Lei nº 2.884/2021**. Institui as Unidades Regionais de Saneamento Básico do Estado e dá outras providências. Disponível em: [https://www.almg.gov.br/projetos-de-lei/PL/2884/2021;PORTAL\\_SESSIONID=D01795828B8B14206695FB19303B1737.worker1](https://www.almg.gov.br/projetos-de-lei/PL/2884/2021;PORTAL_SESSIONID=D01795828B8B14206695FB19303B1737.worker1). Acesso em: 12 out. 2022.

NETA, Antonia Sousa de Jesus. Meio ambiente e gestão dos resíduos sólidos: estudo sobre o consumo sustentável a partir da Lei 12.305/2010. **Âmbito Jurídico**, 01.03.2012. Disponível em: <https://ambitojuridico.com.br/cadernos/direito-ambiental/meio-ambiente-e-gestao-dos-residuos-solidos-estudo-sobre-o-consumo-sustentavel-a-partir-da-lei-12-305-2010/>. Acesso em: 28 out. 2022.

PARANÁ. **Lei Estadual nº 20.607**, de 10 de junho de 2021. Dispõe sobre o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Paraná e dá outras providências. DOE – PR de 10.06.2021. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=415612>. Acesso em: 12 out. 2022.

PLANARES. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. [Coordenação de André Luiz Felisberto França *et al.*] Brasília, DF: MMA/SQA – Ministério do Meio Ambiente / Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf](https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf). Acesso em: 11 nov. 2022.

RIO DE JANEIRO. **Decreto Estadual nº 45.957**, de 22 de março de 2017. Institui o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro - PERS/RJ. Disponível em: <http://alerjrn1.alerj.rj.gov.br/scpro1923.nsf/b3156862637ed3b7832566ec0018d82d/3db3315347fe777f03258629006ef565?OpenDocument>. Acesso em: 12 out. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei Estadual nº 15.795**, de 24 de janeiro de 2022. Cria a Unidade Regional de Saneamento Básico 1 – URSB 1 – e a Unidade Regional de Saneamento Básico 2 – URSB 2, com fundamento no disposto na alínea “b” do inciso VI do art. 3º da Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, com a redação dada pela Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020, com o objetivo de propiciar viabilidade técnica e econômico-financeira ao bloco e garantir,



mediante a prestação regionalizada, a universalização dos serviços públicos de abastecimento de água potável e de esgotamento sanitário, e altera a Lei nº 12.037, de 19 de dezembro de 2003, que dispõe sobre a Política Estadual de Saneamento e dá outras providências. Disponível em: <https://www.cl.rs.gov.br/filerepository/repLegis/arquivos/LEI%2015.795.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

SÃO PAULO. **Lei Estadual nº 17.383**, de 05 de julho de 2021. Dispõe sobre a criação de unidades regionais de saneamento básico, com fundamento nos artigos 2º, inciso XIV, e 3º, inciso VI, alínea b, da Lei Federal nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, e dá providências correlatas. Disponível em: <https://governo-sp.jusbrasil.com.br/legislacao/1242063778/lei-17383-21-sao-paulo-sp>. Acesso em: 12 out. 2022.

SILVA, Vanessa Pinto Machado e; CAPANEMA, Luciana Xavier de Lemos. Políticas Públicas na gestão de resíduos sólidos: experiências comparadas e desafios para o Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 50, set. 2019, p. 153-200. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19062>. Acesso em: 12 out. 2022.



# CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SEU COMPROMISSO COM A GESTÃO SUSTENTÁVEL

## *SOLID WASTE CHARACTERIZATION AND ITS COMMITMENT TO SUSTAINABLE MANAGEMENT*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

PEREIRA, Christiane. Caracterização de resíduos sólidos e seu compromisso com a gestão sustentável. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). *Master in Business Administration (MBA)* em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)*; *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); e; *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico)*. Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos temáticos para o PLANSAB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: [christiane@terramelhor.com.br](mailto:christiane@terramelhor.com.br)

## **RESUMO**

A gestão integrada de resíduos sólidos é composta por multifatores que se relacionam transversalmente, seja durante a etapa de diagnóstico da gestão seja durante a projeção de intervenções futuras para fins de atendimento de pressupostos de universalização, sustentabilidade econômico-financeira, metas de redução, inclusão social, educação ambiental ou mesmo, quando das cessões dos serviços ao setor privado, todos esses aspectos essenciais para a formação de política pública. Diante deste emaranhado de fatores, temos que a caracterização de resíduos sólidos perpassa a simples quantificação e qualificação dos resíduos, espelhando não apenas uma ferramenta fundamental para a projeção de tecnologias de valorização e métodos de disposição final de rejeitos, mas sobretudo, seus resultados podem ser extrapolados e empregados para projeções de médio e longo prazo para fins de embasamento da política pública. Neste sentido, a busca pela



representatividade dos dados deve estar ancorada na compreensão de aspectos legais e de mercado.

Palavras-chave: Caracterização. Valorização. Metodologia. Resíduos. Representatividade.

## ABSTRACT

The integrated management of solid waste is composed of multifactors that relate transversally, either during the stage of diagnosis of management or during the projection of future interventions for purposes of meeting assumptions of universalization, economic and financial sustainability, reduction targets, social inclusion, environmental education or even, when the services are transferred to the private sector, all these essential aspects for the formation of public policy. In face of this entanglement of factors, we have that the characterization of solid waste goes beyond the simple quantification and qualification of waste, mirroring not only a fundamental tool for the projection of recovery technologies and methods of final disposal of waste, but above all, its results can be extrapolated and used for projections of medium and long term for the basis of public policy. In this sense, the search for data representativeness should be anchored in the understanding of legal and market aspects.

Keywords: Characterization. Recovery. Methodology. Waste. Representativeness.

## 1 INTRODUÇÃO

O intensivo crescimento demográfico observado nos centros urbanos a partir dos períodos de industrialização da atividade econômica apresentou consequências expressivas sobre a infraestrutura das cidades, trazendo a falência de serviços associados a aspectos como mobilidade e ocupação do solo. Adicionalmente, com relações entre estímulo e resposta separadas por períodos mais dilatados, a degradação da qualidade ambiental como fruto do fenômeno de explosão urbana passou a sofrer leitura crítica apenas nos últimos vinte anos.

Na responsabilidade pela perda da qualidade ambiental nas cidades evidencia-se como expoente maior de culpabilidade a falta de saneamento básico, tema necessariamente vinculado a políticas públicas e continuamente posto a margem dos programas governamentais. Inserido neste contexto, o resíduo sólido urbano (RSU) – em especial os resíduos domiciliares – apresenta-se como forte agente de degradação de recursos hídricos, com atuação paralela não menos significativa sobre a saúde pública, clima e a paisagem urbana.

No que diz respeito ao clima – segundo Governos Locais pela Sustentabilidade (ICLEI, 2020) –, o setor de resíduos contribuiu com até 4,4% das emissões de gases de efeito estufa nas cidades. E de acordo



com o último Inventário Nacional entre 2010 e 2016 houve um aumento de 26,3% nas emissões relacionadas com a disposição final de resíduos sólidos (MCTI, 2021, p. 174).

Grande parte dessas emissões podem ser reduzidas ou neutralizadas através da destruição de metano ou da geração de energia a partir do biogás gerado em aterros sanitários. Contudo, é fundamental que sejam incluídas práticas de valorização de resíduos, pois o desvio de massa dos aterros é mais representativo em termos de redução de emissões de GEE do que a destruição de metano ou geração de energia somente nos aterros.

Assim, é importante reforçar o papel das cidades na transição para uma sociedade mais resiliente, sendo o local que mais sofre com os impactos das mudanças climáticas.

Em relação à saúde pública, a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (Abren, 2019) comenta que conforme estudo da International Solid Waste Association (ISWA), o Brasil gasta um valor aproximado de 250 milhões de euros por ano no tratamento de doenças de pessoas que tiveram contato inadequado com os RSU, ou seja, 1,7 bilhões de euros em dez anos. Entre 2010 e 2014, o custo dos danos ambientais causados pelos RSU ficou entre 1,2 bilhão e 2,4 bilhões de euros, com uma média de 1,8 bilhões de euros.

No tocante à paisagem urbana, podemos apontar a presença de passivos ambientais gerados a partir da disposição final em lixões e aterros sanitários quando do encerramento das atividades operacionais, onde os possíveis impactos reforçam o entendimento de que não basta interromper as atividades do aterro sanitário, será necessário incutir esforço imediato para reduzir o seu impacto ambiental através de um projeto de encerramento e projeto de remediação.

E não menos relevante, ainda relacionada à paisagem urbana é a expressiva repercussão derivada da presença de plásticos em rios, mares e oceanos, uma ameaça a biodiversidade marinha e que tem 90% de sua origem proveniente das áreas urbanas (Bocchini, 2021; Velis *et al.*, 2018).

Os diferentes impactos gerados pelos resíduos sólidos justificam intervenções concretas, possíveis unicamente a partir do planejamento de programas de gerenciamento adequados.

Para tanto, as cidades precisam elaborar Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos que privilegiem a introdução tecnológica como ferramenta de redução de massa e de impactos ambientais. Neste sentido, o marco legal da gestão de



resíduos no Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 –, evidencia a necessidade de caracterização dos resíduos sólidos para fins de garantir uma intervenção customizada que abarca desde as soluções de logística e valorização até o dimensionamento da disposição final.

No Brasil, onde 88% (IBGE, 2020) dos municípios têm população abaixo de 50 mil habitantes, a grande dificuldade é conseguir viabilidade econômica, financeira e ambiental para introduzir uma gestão sustentável dos resíduos sólidos. Entretanto, para além destes aspectos, não menos relevante é ter uma base de dados confiável e representativa para formação de política pública e/ou para tomada de decisão (ME, 2020).

O despreparo e os erros cometidos nos editais de contratação pública ou privadas, dos últimos dez anos (2010-2020), como ainda o emprego em instrumentos de política pública de dados defasados, ou mesmo inexistentes, de caracterização dos resíduos, evidenciam a urgência por uma padronização através do estabelecimento de uma metodologia acessível para a caracterização dos resíduos. Assim, como parte integrante da solução do problema, pretende-se o desenvolvimento de metodologia simplificada para a caracterização dos resíduos sólidos domiciliares.

A caracterização dos resíduos sólidos domiciliares é uma ferramenta importante para o desenvolvimento dos conceitos tecnológicos das plantas de tratamento, pois possibilita selecionar as melhores tecnologias e adequá-las ao fluxo de material existente. A análise gravimétrica, granulométrica e analítica, permite dimensionar os equipamentos e escolher as melhores técnicas segundo seu potencial de empregabilidade no fluxo operacional e de receptividade do mercado consumidor de recursos secundários.

Mas afinal, por que esta intervenção, inerente a fase de planejamento do projeto, é negligenciada no mercado brasileiro?

A resposta desta pergunta toma como base três aspectos que se inter-relacionam:

- ♦ O primeiro é o desconhecimento de sua relevância para o embasamento de atividades de gestão dos resíduos;
- ♦ O segundo é a ausência de metodologia padronizada que permita não apenas uniformizar os resultados, mas também a sua replicabilidade; e,
- ♦ O terceiro é a insuficiente capacidade técnica que se depara com discussões estatísticas que importam em elevado grau de conhecimento.



Estes desafios precisarão ser superados para que o mercado tenha plantas de tratamento adequadas ao processamento dos resíduos efetivamente gerados, bem como, seja garantida uma previsão eficiente quanto aos recursos secundários esperados.

Quando se conhece as características de um resíduo, é possível avaliar o potencial de seu aproveitamento (subproduto) e as consequências derivadas do seu desaproveitamento. Também é possível avaliar quantitativamente e qualitativamente as consequências (positivas ou negativas) para o Planeta, a partir da análise do seu ciclo de vida (Santos, 2007).

O conhecimento dos impactos diferenciados gerados pelos resíduos sólidos justifica a necessidade de intervenções concretas que reduzam a insegurança jurídica das contratações do setor de resíduos e agregue maior eficiência e eficácia aos projetos de valorização de resíduos.

Urge, portanto, o desenvolvimento de uma metodologia simplificada e uniforme de caracterização dos resíduos que possa ser replicada em cidades, de todos os portes populacionais, possibilitando o planejamento de programas de gerenciamento adequados, aderentes a realidade cultural, social, técnica e econômica e apoiar a identificação das melhores rotas tecnológicas.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A caracterização de resíduos sólidos é um instrumento de ação indicado para inventariar continuamente as composições dos resíduos produzidos nas cidades. Para tal deve-se avaliar e verificar quais são as metodologias implementadas no mercado brasileiro para esta finalidade. Contudo, pode-se antecipar que não há metodologia específica para uma análise integral do RSU.

As características físico-químicas dos resíduos sólidos variam de região para região, com base em uma série de fatores que incluem, entre outras coisas, os hábitos de consumo de uma população do município e das empresas e a extensão das intervenções de recuperação que desviam componentes de resíduos sólidos antes da coleta, sobretudo, influenciado pela existência de um setor informal de catação.

De forma geral, os dados disponíveis no mercado brasileiro relativos à caracterização dos resíduos são frágeis e defasados. Frágeis por muitas vezes resultarem de campanhas incipientes que não demonstram a realidade do município por estarem amparadas em intervenções extremamente pontuais e podemos dizer econômicas, no



sentido em que se realizam campanhas aquém das intervenções necessárias para garantir segurança aos dados coletados.

Dessa maneira, a avaliação da composição dos resíduos é importante para determinar o potencial das frações a serem valorizadas dentro do fluxo de resíduos, a fim de determinar a viabilidade técnica e econômica de programas de recuperação energética e reciclagem. As avaliações também podem ajudar a determinar a extensão da presença de material biodegradável e sua repercussão no meio ambiente seja devido às emissões gasosas e líquidas seja devido aos possíveis recalques quando de aterramento.

## 2.1 METODOLOGIAS NACIONAIS

Primeiramente, há de se reforçar o entendimento de que apesar da existência de uma norma regulamentadora da amostragem de resíduos sólidos (ABNT NBR 10007:2004), esta tem uma abordagem extremamente superficial e sequer define parâmetros que garantam a representatividade da amostragem como, também, não define a composição mínima, não sendo específica para a caracterização de RSU.

No que diz respeito a representatividade a ABNT NBR 10007:2004 apresenta que “Para obtenção da concentração média do resíduo, deve ser coletada uma ou mais amostras compostas”, ou seja, não há qualquer balizador quantitativo e qualitativo que permita garantir um estudo com elevado intervalo de confiança, por exemplo como os 95% praticados na Europa (SWA-Tool, 2004).

A ABNT NBR 10007:2004 define uma amostra representativa como “uma parcela do resíduo a ser estudado, obtida através de um processo de amostragem, e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo”, portanto garantir a representatividade vai depender muito da experiência e dos critérios do realizador do serviço.

A ABNT NBR 10007:2004 também aponta definições quanto ao quarteamento e a coleta de amostras.

Quarteamento: Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado.

Retirar as amostras de pelo menos três seções (do topo, do meio e da base). Em cada seção, devem ser coletadas quatro alíquotas,



equidistantes. O amostrador deve penetrar obliquamente nos montes ou pilhas.

Com base na literatura, podem ser ainda citadas algumas entidades que recomendam procedimentos para caracterização dos RSU em municípios brasileiros, tais como: Instituto Brasileiro de Administração Municipal (IBAM, 2001); Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), Ministério de Meio Ambiente (MMA [Saffer, 2013]), Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2019) e Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2021).

Analisando as metodologias disponíveis no mercado brasileiro, observamos uma abordagem bastante superficial sem estabelecer critérios quantitativos que guiem a realização dos estudos. Salvo a metodologia desenvolvida pelo MMA (Saffer, 2013), as demais sequer delimitam as margens estatísticas para garantia de representatividade, previsão de equipe de segregação, capacidade de triagem, e, principalmente, esforço manual e/ou mecânico para preparo da amostra após a descarga dos resíduos, tanto para homogeneização quanto para abertura das sacolas. Dessa forma não há clareza nos procedimentos e um extremo racionamento de informações para garantir a padronização de metodologias.

Outro ponto observado durante a revisão bibliográfica é que os materiais técnicos empregados são bastante defasados, como a própria ABNT NBR 10007:2004: Amostragem de resíduos sólidos; IBAM 2001: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos, entre outros.

As considerações sobre as necessárias intervenções, apontadas nos manuais, são tão simplórias que corroboram o desenvolvimento de uma metodologia atualizada que pacifique o mercado e permita estabelecer inclusive comparativos a nível regional, e quem sabe, criar critérios que oportunizem a extrapolação dos resultados obtidos para os outros municípios com características similares, esta somente possível quando uma caracterização robusta que resguarde a representatividade.

**CEMPRE 2018** (Vilhena, 2018): Como o universo de amostragem é todo o resíduo gerado no município, o procedimento descrito no parágrafo anterior acaba por restringir o espaço amostral original. Esta deficiência deve ser corrigida, com a adoção de controle estatístico, para garantir a representatividade da amostra. [...]

O objetivo da amostragem é a obtenção de uma amostra representativa, ou seja, a coleta de uma parcela do resíduo a ser estudado que, quando analisada, apresente as mesmas características e propriedades de sua massa total.



**FEAM 2019:** O planejamento do estudo gravimétrico deverá ser realizado a fim de que se estabeleça uma padronização da metodologia a ser utilizada no processo de coleta e triagem das amostras.

**INEA 2021:** A definição das rotas e do número de amostras para o estudo de gravimetria deverá ser avaliada por cada município, de modo que seja expressivo e represente a realidade do território a ser estudado.

**IBAM 2001:** Indica a possibilidade de aproveitamento das frações recicláveis para comercialização e da matéria orgânica para a produção de composto orgânico.

Tabela 1 – Comparativo de metodologias nacionais de caracterização de resíduos

	<b>IBAM 2001</b>	<b>MMA 2013</b>
Coleta individualizada em domicílios		
Coleta indiferenciada / diferenciada	x	x
Período de realização da amostragem	De segunda a quinta-feira	Uma semana
Não indicada a coleta de amostra durante datas festivas ou dias chuvosos	NA	x
Indicadores estatísticos	NA	Intervalo de confiança 90 e 95% de desvio padrão (ASTM, 2008)
Quantidade mínima amostrada	500 kg (5 galões de 200 litros)	600 kg
Categorias	Matéria orgânica / papel / papelão / plástico / maleável / Pet / metal ferroso / metal não ferroso / alumínio / vidro claro / vidro escuro / madeira / borracha / couro / pano e trapos / ossos / cerâmica / agregado fino	Jornais / cartão canelado / plástico / resíduos de jardins / madeira / outros orgânicos / alumínio / vidro / outros inorgânicos
Análise Laboratorial	Umidade	Umidade



	<b>Cempre 2018</b>	<b>FEAM 2019</b>	<b>INEA 2021</b>
Coleta individualizada em domicílios		x	
Coleta indiferenciada / diferenciada	x		x
Período de realização da amostragem	NA	NA	Uma semana
Não indicada a coleta de amostra durante datas festivas ou dias chuvosos	NA	x	x
Indicadores estatísticos	NA	NA	NA
Quantidade mínima amostrada	150 kg (4 galões de 100 litros)	400 kg	100 kg
Categorias	Borracha / couro / madeira / matéria orgânica / metais ferrosos / metais não ferrosos / papel / papelão / plástico duro / plástico filme / trapos / vidro / outros materiais	NA	Restos de comida / podas / plásticos / papel e papelão / vidro / metal ferroso / metal não ferroso / pedra, louça, terra e cerâmica / madeira / couro e borracha / têxtil / contaminante biológico / contaminante químico / equipamento eletrônico / diversos
Análise Laboratorial	Umidade / teor de matéria seca	NA	NA

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

As metodologias nacionais pouco comentam sobre intervalo de confiança, margem de erro e representatividade da amostra. Também definem que toda e qualquer intervenção deverá ser feita após a descarga em forma de pilha. Apesar de algumas comentarem a importância da homogeneização e do rompimento das sacolas, essa estrutura na forma de pilha dificulta essas intervenções. Nenhuma das metodologias estudadas fazem menção a análise granulométrica e poucas comentam sobre a importância de conhecer o teor de umidade dos resíduos.



## 2.2 METODOLOGIAS INTERNACIONAIS

Existem mais de vinte ferramentas (Schwetje; Kaazke, 2012) para determinar a composição dos resíduos, contudo estas precisam ser adaptadas para a realidade local principalmente tomando em consideração os sistemas de coleta em contêineres ou não, entre outros aspectos, tais como aspectos legais, dados gerais demográficos, climáticos e de renda, infraestrutura disponível, como aterros e/ou plantas de tratamento.

Tabela 2 – Comparativo de metodologias internacionais de caracterização de resíduos

<b>Critério</b>	<b>ASTM</b>	<b>US EPA</b>	<b>ERRA</b>
Quantidade de amostra individual	91 a 136 kg	91 a 136 kg	100 a 200 kg
Indicadores estatísticos	Nível de confiança de 90 ou 95%, precisão de 10%	Cálculo de intervalo de confiança	Apenas mencionada necessidade de representatividade da amostra
Dimensão da campanha de amostragem	52 amostras para 90% de confiança	Processo iterativo que leva em conta o nível nominal de significância	500 a 12.500 kg
Duração da campanha de amostragem	Mínimo 1 semana	1 semana	---
Preparação da amostra	Formação de disco e quarteio	---	Formação de disco e quarteio
Nível de amostragem	Caminhão de coleta	Caminhão de coleta	Caminhão de coleta
Peneiramento	---	---	---
Amostra para analítico laboratorial	---	---	---



<b>Critério</b>	<b>SWA-Tool</b>	<b>Sachen</b>	<b>GIZ, Greece 2021</b>
Quantidade de amostra individual	Volume do contêiner	1 m <sup>3</sup>	1,5 m <sup>3</sup>
Indicadores estatísticos	Nível de confiança de 95%, precisão relativa do resultado final de 10% e 20% nas categorias predominantes	Nível de 95% de confiança, e margem de erro de 10% nas categorias importantes e na massa total	Nível de 95% de confiança
Dimensão da campanha de amostragem	Quando a variância é desconhecida: 45 m <sup>3</sup> para resíduos domésticos, 80 m <sup>3</sup> para domésticos/comerciais e 100 m <sup>3</sup> para comerciais	Mínimo de 48 amostras por campanha básica.	Mínimo de 30 amostras por campanha, 45 m <sup>3</sup> ou coleta de rejeitos – 6 t, coleta de recicláveis secos – 3 t e coleta de orgânicos – 7 t
Duração da campanha de amostragem	Mínimo 1 semana	Sempre em dias de semana. Período necessário para coletar as amostras, pelo menos 48 amostras para uma campanha básica	Período necessário para coletar as amostras, pelo menos 30 dias, considerando quatro pessoas em 8 h de trabalho
Preparação da amostra	----	-----	Formação retangular e em faixas de 0,5 m
Nível de amostragem	Contêiner	Contêiner domiciliares	Caminhão de coleta
Peneiramento	---	10 – 40 mm	10 mm
Amostra para analítico laboratorial	---	Entre 20 e 50 mm, pelo menos 4 litros	2 a 3 kg por amostra

Fonte: Adaptada pela autora, em 2021, de Carvalho (2005); Intecus (2016); e Greece (GIZ, 2021).



As metodologias internacionais sofrem relevante influência dos sistemas de coleta, sendo em sua maioria containerizada. Isto significa que os contêineres de coleta são estudados no local e objeto da caracterização. Há também, em relação à Alemanha um aspecto extremamente importante, onde os municípios são obrigados a se registrarem na Prefeitura, facilitando o mapeamento de quantas pessoas vivem na residência.

Estes dois fatores garantem uma apuração mais simplificada, bem como, uma melhor assertividade em relação ao padrão econômico e a quantificação e qualificação da geração.

### **2.3 CONSOLIDAÇÃO DE DESVIOS IDENTIFICADOS EM ALGUNS ESTUDOS DE CARACTERIZAÇÃO NO BRASIL**

A representatividade amostral pode ser apontada como um importante obstáculo a ser superado nas intervenções de caracterização dos resíduos no Brasil. Como não há nenhum marco legal que padronize este aspecto, a representatividade acaba sendo definida segundo a capacidade de investimento, muitas vezes limitando a confiança a ser depositada nos dados coletados e fundamentalmente na média final da caracterização que será empregada durante a formação de política pública.

Entre outros fatores que influenciam a caracterização temos observado práticas de aplicação de resultados de outros municípios, ou mesmo a média nacional gerada em 2008. Também intervenções pontuais sem considerar possíveis variações sazonais e que são realizadas a partir de uma quantidade amostral demasiadamente pequena, que compromete a apresentação dos resultados.

Ainda, percebe-se uma baixa sensibilidade para identificar possíveis desvios, por exemplo uma elevada presença de resíduos da construção civil no caminhão de coleta domiciliar deveria corresponder ao abandono da amostra e não sua integração na média da cidade.



Tabela 3 – Análise geral das metodologias empregadas no Brasil

Aspecto	Observações
Temporalidade	Muitos municípios empregam dados extremamente antigos, desconsiderando que a geração de resíduos é afetada, entre outros fatores, pelo padrão e potencial de consumo da população.
Aproveitamento de dados de terceiros	Dados captados em outros municípios são replicados sem que haja uma análise crítica quanto ao padrão cultural e econômico entre as cidades.
Plano de amostragem	<p>“O objetivo da amostragem é a obtenção de uma amostra representativa, ou seja, a coleta de uma parcela do resíduo a ser estudado que, quando analisada, apresente as mesmas características e propriedades de sua massa total.” (Vilhena, 2018)</p> <p>A representatividade deve considerar a incidência, em peso, de cada rota de coleta na geração total de resíduos sólidos domiciliares. E ainda a quantidade de rotas que a depender de suas similaridades, poderão ser agrupadas.</p> <p>Assim, durante a definição das rotas de coleta deve-se buscar estabelecer uma amostragem que radiografe a geração no município, garantindo que estas representem suas características globais, permitindo desta forma que os dados coletados sejam extrapolados para as demais regiões.</p>
Peso por amostra	Amostras em quantidades muito pequenas, por exemplo 30 kg, geram elevados desvios.
Presença de materiais alheios ao padrão da coleta domiciliar	O analista deve ter sensibilidade para perceber que uma elevada presença de frações adversas ao padrão da coleta domiciliar deve ser descartada. Por exemplo, elevada presença de entulho.
Rol de tipologias	O rol deve ser extensivo e compatível com a proposta tecnológica a ser estudada. Um rol muito reduzido, obrigará a realização de agrupamentos que não oferecerão segurança quando do desenvolvimento de conceito tecnológico de valorização de resíduos. Ainda, a fragilidade se reflete durante a realização da campanha onde há pouca experiência para identificar o tipo de resíduo, desta forma por muitas vezes confundindo suas condições qualitativas e nomeando grupos de compilação erroneamente.



Aspecto	Observações
Análises laboratoriais	Não há intervenção laboratorial que permita estimar o potencial de recuperação energética, ou mesmo de aproveitamento biológico seja através da compostagem ou da fermentação.

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Percebe-se uma elevada demanda no sentido de harmonizar as práticas de caracterização de tal forma que estas garantam a representatividade dos resultados, mas, sobretudo, preserve dois aspectos fundamentais: simplicidade e modicidade. Dessa forma, a investida em caracterização de resíduos precisa ser aplicável por um público com baixo conhecimento técnico e, sobretudo, o esforço financeiro deve garantir a representatividade, não precisa ser o mais barato, mas um montante que justifique a sua intervenção.

## 2.4 A RELEVÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

Segundo Campos (2012), os resíduos sólidos podem ser considerados como importante indicador socioeconômico, tanto por sua quantidade como ainda pela sua caracterização, já que sua geração depende diretamente de fatores culturais, hábitos de consumo, padrão de vida e da renda familiar que define o poder de compra.

A composição dos resíduos sólidos é influenciada por muitos fatores, tais como nível de desenvolvimento econômico, normas culturais, localização geográfica, fontes de energia e clima. À medida que os países se urbanizam e as populações se tornam mais ricas, o consumo de materiais inorgânicos aumenta, enquanto a relativa fração orgânica diminui. Geralmente, os países de baixa e média renda têm uma alta porcentagem de matéria orgânica na composição dos resíduos urbanos, variando de 40% a 85% do total. As frações como papel, plástico, vidro e metal aumentam no fluxo de resíduos dos países de média e alta renda (Riquelme *et al.*, 2016).

Os dados de gerenciamento de resíduos são decisivos durante a criação de políticas e planejamento para contextos locais. Observar a geração – especialmente devido a rápida urbanização e o crescimento populacional – bem como os tipos de resíduos gerados, ajudam os governos locais a selecionar métodos de gerenciamento apropriados e planejar a demanda futura. Este entendimento permite que os governos projetem um sistema com uma frota adequada, estabeleçam rotas eficazes, definam metas de redução de resíduos nos aterros, rastreiem o



progresso e se adaptem a variação dos padrões de consumo. Com dados precisos, os governos podem, de forma realista, alocar recursos, avaliar tecnologias relevantes e considerar parceiros estratégicos para a prestação de serviços, tais como organizações do setor privado ou não governamentais (Kaza *et al.*, 2018).

A determinação da composição gravimétrica dos resíduos é outro dado essencial. No caso dos resíduos de origem domiciliar e comercial, normalmente dispostos em aterros, os componentes comumente discriminados na composição gravimétrica são: matéria orgânica putrescível, metais ferrosos, metais não ferrosos, papel, papelão, plásticos, trapos, vidro, borracha, couro, madeira, entre outros. (Zanta; Ferreira, 2003, p. 7)

[...]

Esse conhecimento das características químicas possibilita a seleção de processos de tratamento e técnicas de disposição final. Algumas das características básicas de interesse são: poder calorífico, pH, composição química (nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e carbono) e relação teor de carbono/nitrogênio, sólidos totais fixos, sólidos voláteis e teor de umidade. (Zanta; Ferreira, 2003, p. 7)

Tendo os resíduos um valor econômico, o Poder Público poderá promover sua exploração adequada, em ação articulada com os setores socialmente envolvidos nesse processo, a exemplo dos catadores de materiais reciclados, garantindo as condições necessárias para o manejo desses resíduos com vistas a evitar danos ambientais (Naime; Rocha, 2007, p. 14).

A caracterização de resíduos tem efeitos que afetam diretamente a política pública de limpeza urbana, influenciando decisões que vão desde a gestão quando da definição de metas de redução da geração de resíduos, até o gerenciamento, este representado pelas atividades de coleta, destinação e disposição final.

A insuficiência ou inexistência de uma caracterização de resíduos representativa, influencia o atendimento das metas de redução de massa. Considerando que atualmente muitos contratos têm sua performance avaliada pelo atendimento dessas metas, a divergência entre valores corrobora para insegurança jurídica. Essas incertezas poderão ainda afetar diretamente o desempenho financeiro do contrato, e em casos extremos provocar sua própria extinção, em razão do descumprimento de obrigações contratuais.

Quanto aos aspectos de gerenciamento, o conhecimento das características dos resíduos permite um plano de coleta, seja indiferenciada, seja diferenciada, mais ajustado, isto significa, adequar



as características dos equipamentos e a frequência da coleta, bem como o estabelecimento de políticas públicas que fomentem o emprego de acondicionadores adequados.

Figura 1 – Fatores de influência da caracterização



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Em relação às alternativas de destinação adequada, em especial àquelas relacionadas às práticas de valorização de resíduos, o domínio do conhecimento das características dos resíduos permite o planejamento de plantas de tratamento, onde suas funcionalidades estarão ajustadas para incidência qualitativa e quantitativa dos resíduos. Permitindo que ao término do processo o balanço de massa operacional se aproxime ao máximo do balanço de massa do projeto, e, sobretudo, que não haja um comprometimento das instalações físicas da planta de tratamento, situação observada inúmeras vezes no mercado brasileiro.

Vale ressaltar que tudo o que não for aproveitado como subproduto será enquadrado como rejeito devendo ser encaminhado para disposição final, elevando assim os custos relacionados com o aterramento.

Quando avaliamos a potencialidade de geração de subprodutos, podemos ressaltar a repercussão tida como indireta da caracterização dos resíduos, no momento em que a radiografia do que entra permitirá vislumbrar o que poderá ser gerado como subproduto, refletindo quantitativos e apontando alguns aspectos qualitativos, por



exemplo quando da motivação pública de geração de composto a partir da coleta indiferenciada, ou tradicional, ou mesmo, quando da intenção de gerar combustível derivado de resíduos e recicláveis.

E, para finalizar o raciocínio, quanto a relevância da caracterização, encontramos também elevada influência na etapa de disposição final em aterros sanitários. Esta relevância está representada por fatores relacionados a vida útil, estabilidade do corpo do aterro e emissões líquidas e gasosas.

## 2.5 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

As categorias de classificação por tipologia serão preenchidas na ferramenta de acordo com um lista identificada como categorias principais, na mesma aba de preenchimento da rota, a ferramenta já consolida as categorias agrupadas, segundo potencialidade de aplicação tecnológica.

Estas categorias principais foram escolhidas de modo a representar as frações determinantes nos resíduos, entretanto, sem esgotar a possibilidade de futuros desmembramentos quando de uma clara definição tecnológica que mereça estudos mais apurados da potencialidade de aproveitamento dos resíduos sólidos.

Tabela 4 – Principais categorias gravimétricas durante amostragem e seus exemplos

Papel	Papel, jornais, revistas, cadernos, livros etc.
Papelão	Caixarias em geral, papel cartão, cartão canelado, pastas, cartonados plastificados (caixas de sucrilhos) etc.
Tetra Pak®	Embalagens longa vida
Higiênicos	Papel higiênico, lenço de papel, papel toalha
Fraldas	Fraldas infantis e geriátricas, absorventes
Plástico 2D	Sacos pretos, coloridos, incolor, plásticos finos, leitoso
Plástico 3D	Polipropileno (PP): copos e garrafas plásticas; Polietileno de alta densidade (PEAD): garrafas de detergentes; Polietileno tereftalato (PET): garrafas de bebidas; Polietileno tereftalato (PET) óleo: embalagens de maionese, óleo de cozinha, azeite; Poliestireno (PS): copos de café, água e de iogurte, bandeja de armazenamento de alimentos, tampas de vasos sanitários etc.
PVC	Embalagens de shampoo, tubulações etc.



Embalagem multicamadas	Embalagem de café a vácuo, embalagens de arroz, feijão e de biscoitos, embalagens metalizadas, embalagens de sabonete líquido (refil), embalagens de sabão líquido (refil) etc.
Metal	Metais ferrosos: palha de aço, alfinetes, agulhas, embalagens de produtos alimentícios, portões e grades de ferro etc. Metais não ferrosos: latas de bebidas, restos de cobre, restos de chumbo, restos de alumínio, fiação elétrica, alumínio panela e/ou torneira registro d'água de bronze, portões e grades de alumínio, perfil de portas e janelas de alumínio etc.
Vidro	Garrafas, copos, pratos, bebidas, espelho, embalagens de produtos de limpeza, embalagens de produtos de beleza, embalagens de produtos alimentícios, vidro plano (janelas e portas) etc.
Mineral	Pedras, louças, cerâmicas, vasos, xícaras, pratos, terra, tijolos, cascalho, pedras decorativas, restos de construção etc.
Orgânico	Restos alimentares, cascas de legumes e frutas etc.
Madeira verde	Folhagem, podas, galhos, cocos, resíduos de jardinagem, flores, grama etc.
Madeira seca	Paletes, embalagens, caixas, madeira de construção, tábuas, palitos de fósforo, tampas, móveis, lenhas etc.
Couro, borracha, têxteis	Sapatos, cintos, mochilas, tapetes, bolsas, luvas látex, balões, brinquedos, roupas, panos de limpeza, esponjas, máscaras de proteção (corona), aparas, bolsas de pano, pedaços de tecido etc.
Isopor	Pratos, marmitas, copos, embalagens térmicas em geral, embalagens diversas.
Rejeitos	Frações de difícil identificação e que não se enquadraram nas demais categorias, como: Velas de cera, restos de sabão e sabonete, carvão, giz, pontas de cigarro, rolhas, cartões de crédito, lápis de cera, sacos de aspirador de pó, lixas, disco de vinil, cds, porcelanas etc.
Contaminantes, pilhas, baterias	Medicamentos, aerossóis, pilhas, baterias, cotonetes, algodão, curativos, gases e panos com sangue, seringas, lâminas de barbear, cabelos, pelos, embalagens de anestésicos, luvas, lâmpadas, inseticidas, raticida, colas em geral, cosméticos, vidros de esmaltes, embalagens de produtos químicos, latas de óleo de motor, latas com tintas, embalagens pressurizadas, canetas com carga, papel carbono, filme fotográfico etc.
Diversos	Computadores, laptops, celulares, rádios, liquidificadores, mouses, teclados etc.

Fonte: Elaborada pela autora (2021).



A consolidação dos resultados se dará através de subagrupamentos das categorias, sendo o primeiro de forma a apresentar um panorama geral por meio de um reagrupamento das categorias principais e logo em seguida novos agrupamentos que buscam balizar, em caráter preliminar, a potencialidade dos resíduos em face da aplicação tecnológica de valorização, tais como: reciclagem de frações secas, compostagem / biodigestão e geração de CDR para fins de coprocessamento.

Tabela 5 – Reagrupamento de categorias principais

<b>Categorias principais reagrupadas na ferramenta</b>	
Papel, papelão e Tetra Pak®	Papel, papelão, Tetra Pak®
Plásticos	Plásticos 2D, 3D, PVC
Orgânicos	Orgânicos e madeiras verdes
Metal	Metal
Vidro	Vidro
Rejeitos	Rejeitos, isopor, higiênicos, fraldas, contaminantes, pilhas, baterias, mineral, madeira seca
Couro, borracha, têxteis	Couro, borracha e têxteis
Embalagem multicamadas	Embalagem multicamadas
Diversos	Diversos

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 6 – Categorias gravimétricas agrupadas segundo potencialidade de aplicação tecnológica: CDR de frações grossas

<b>Categorias CDR frações grossas na ferramenta</b>	
CDR	Papel, papelão, Tetra Pak®, higiênicos, fraldas, plástico 2D, plástico 3D, embalagens multicamadas, madeira seca, couro, borracha, têxteis, isopor



<b>Categorias CDR frações grossas na ferramenta</b>	
PVC	PVC
Metal	Metal
Inertes	Vidro, mineral
Orgânicos	Orgânicos, madeira verde
Rejeitos	Rejeitos, contaminantes, pilhas, baterias, diversos

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 7 – Categorias gravimétricas agrupadas segundo potencialidade de aplicação tecnológica: CDR de frações integrais

<b>Categorias CDR frações integrais na ferramenta</b>	
CDR	Papel, papelão, Tetra Pak®, higiênicos, fraldas, plástico 2D, plástico 3D, embalagens multicamadas, madeira seca, couro, borracha, têxteis, isopor, 70% orgânicos e 70% de verdes
PVC	PVC
Metal	Metal
Inertes	Vidro, mineral
Orgânicos	30% orgânicos, 30% madeira verde
Rejeitos	Rejeitos, contaminantes, pilhas, baterias, diversos

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 8 – Categorias gravimétricas agrupadas segundo potencialidade de aplicação tecnológica: reciclagem, compostagem e biodigestão

<b>Categorias reciclagem, compostagem &amp; biodigestão na ferramenta</b>	
Reciclagem	Papel, papelão, Tetra Pak®, plástico 2D, plástico 3D, PVC, metal, vidro
Compostagem & Biodigestão	Orgânicos e madeira verde
Rejeitos	Rejeitos, diversos, fraldas, higiênicos, madeira seca, couro, borracha, têxteis, isopor, mineral, contaminantes, pilhas, baterias, embalagens multicamadas

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

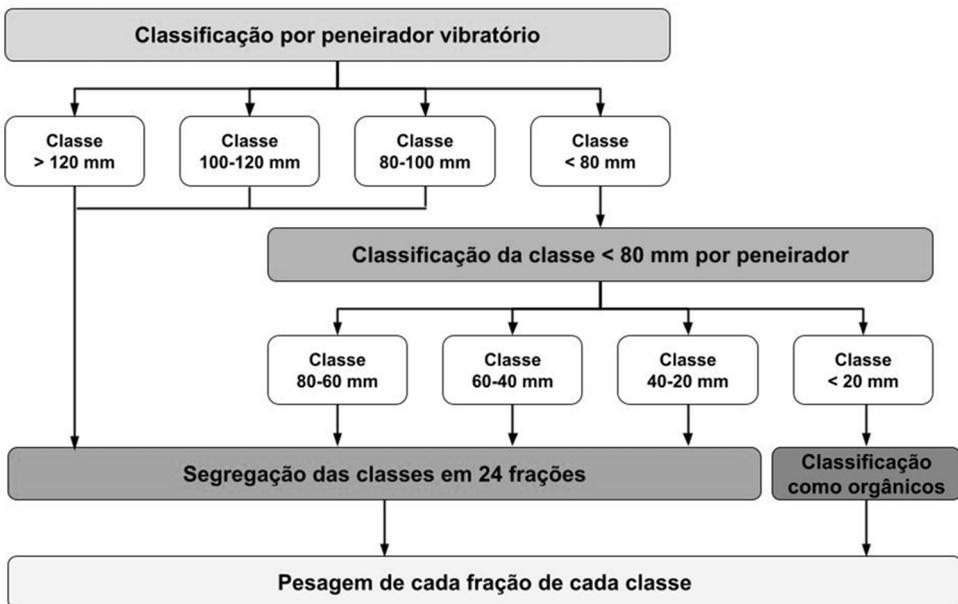


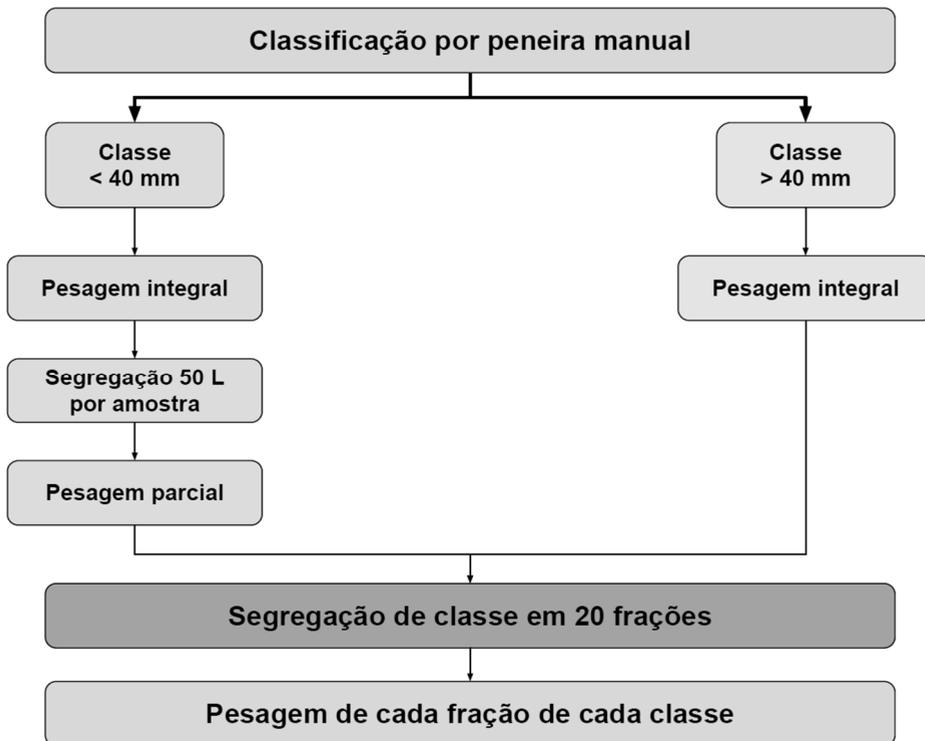
O agrupamento está diretamente relacionado com a predisposição tecnológica. Dessa forma, a depender do tipo de conceito a ser aplicado para a valorização de resíduos, seja reciclagem seja recuperação energética, deverão ser criadas categorias para atendimento desse fim.

## 2.6 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Na Alemanha, durante a caracterização dos resíduos, há verificação não apenas da gravimetria mas também sua repercussão segundo granulometria das frações. Esses desmembramentos podem ser em várias categorias diversas, sendo as mais aplicadas: 0 – 20 mm, 20 – 40 mm, 40 – 60 mm, 60 – 80 mm, 80 – 100 mm, 100 – 120 mm e acima de 120 mm.

Figura 2 – Caracterização granulométrica completa e parcial





Fonte: Elaborada pela autora, em Jundiá (2015).

Estas intervenções categorizadas segundo a dimensão das frações são bastante relevantes quando do dimensionamento de sistemas de valorização de resíduos, permitindo dimensionar de forma mais precisa os equipamentos envolvidos. Porém essa estratificação onera sobremaneira o estudo de caracterização, não apenas por ser necessário desenvolver um equipamento de peneiramento para esta finalidade, mas sobretudo, pelo incremento significativo do tempo empreendido para a amostragem combinado à necessidade de uma equipe maior.

Para se ter uma referência, em projetos anteriores no Brasil, por exemplo durante amostragem em projeto realizado em Jundiá nos anos de 2014/2015, para a caracterização gravimétrica, granulométrica e laboratorial de uma amostra de 150 kg, foi necessária uma equipe de dez pessoas durante 4 – 6 horas.

Como o propósito desse trabalho é buscar simplificar as intervenções ao mesmo tempo em que incrementa a qualidade dos estudos de caracterização realizados no Brasil, propomos que as frações sejam segregadas a partir de uma linha de corte de 40 mm.



Isto implica em facilitar o desenvolvimento de peneiras que contam com apenas uma malha de peneiramento de 40 mm, e que poderá ser manuseada por diversas pessoas da equipe simultaneamente.

Independentemente da metodologia simplificada desenvolvida neste estudo, havendo verba para um aprofundamento da caracterização, orientamos que as demais categorias granulométricas também sejam estudadas.

## **2.7 PROCEDIMENTO DE AMOSTRAGEM**

O procedimento de amostragem é composto das seguintes etapas:

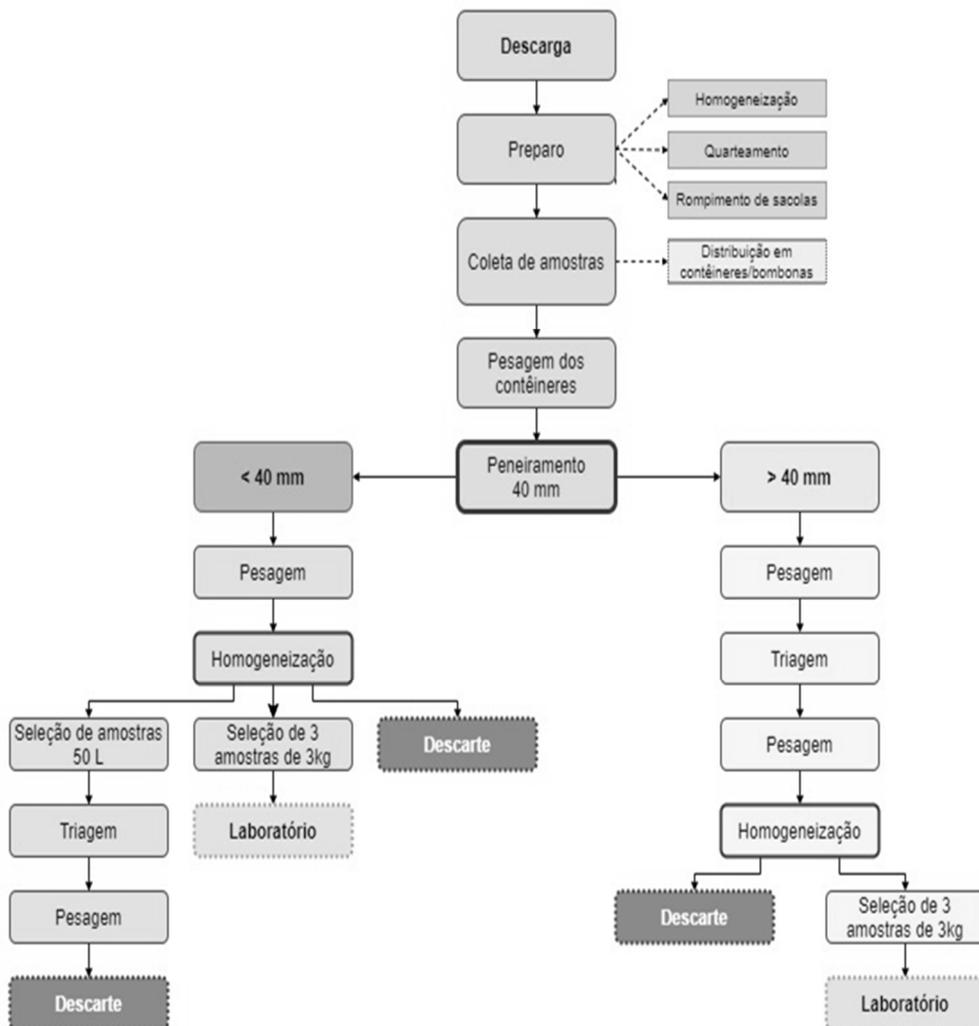
- 1 Definição do caminhão a ser amostrado, devendo ser anotado: Placa, Rota de Coleta, Horário de Descarga, Tara do Caminhão, Peso Líquido da Carga.
- 2 Deslocamento do caminhão para a baía de quarteamento.
- 3 Despejo do material em área impermeabilizada.
- 4 Espalhamento com pá carregadeira ou retroescavadeira.
- 5 Tombamento da pilha e homogeneização do material.
- 6 Realização do 1º quarteamento.
- 7 Escolha de 2/4 do material.
- 8 Remoção dos 2/4 restantes.
- 9 Nova homogeneização do material.
- 10 Realização do 2º quarteamento.
- 11 Escolha aleatória de 2/4 do material.
- 12 Remoção dos 2/4 restantes.
- 13 Nova homogeneização do material.
- 14 Realização do 3º quarteamento.
- 15 Escolha aleatória de 2/4 do material.
- 16 Remoção dos 2/4 restantes.



- 17 Rasgar os sacos de forma a expor o material.
- 18 Nova homogeneização do material.
- 19 Realização do 4º quarteamento.
- 20 Escolha aleatória de 2/4 do material e acondicionamento em bombonas / contêineres / tambores.
- 21 Remoção dos 2/4 restantes.
- 22 Encaminhamento das bombonas / contêineres / tambores para identificação e pesagem.
- 23 Início do processo de peneiramento em malha de 40 mm.
- 24 Separação das frações < e > de 40 mm, pesagem e acondicionamento em sacolas plásticas identificadas de 100 litros.
- 25 Encaminhamento das frações > 40 mm para a mesa de triagem e início da segregação por grupos, acondicionamento nas formas e pesagem. Anotação da tara da forma assadeira, peso bruto e peso líquido. Registro na planilha de pesagem.
- 26 Encaminhamento das frações < 40 mm para uma superfície lisa e impermeabilizada, homogeneização do material, separação de 50 litros de material com um balde, pesagem do balde, anotar tara, peso bruto e peso líquido. Iniciar processo de triagem das frações presentes no balde em mesa de triagem e segregação por grupos, acondicionamento nas formas e pesagem. Anotação da tara da forma assadeira, peso bruto e peso líquido. Registro na planilha de pesagem.
- 27 Opcional: Homogeneização, redução das frações e segregação de três amostras identificadas de 3 kg das frações > 40 mm. Homogeneização e segregação de três amostras identificadas de 3 kg das frações < 40 mm.
- 28 Encaminhamento imediato das amostras para laboratório ou acondicionamento em ambiente refrigerado.
- 29 Descarte adequado do material e limpeza do espaço de trabalho.



Figura 3 – Fluxograma da campanha de amostragem



Fonte: Elaborada pela autora (2021).



Figura 4 – Registro fotográfico: passo a passo da caracterização



Fonte: Elaborada pela autora, Salto (2016).



O procedimento de amostragem deverá ser flexível e atender às condições locais. Esforços de capacitação para uma adequada segregação deverão ser garantidos bem como uma adaptação de procedimento durante o quarteamento das frações. Cuidados com a dispersão dos materiais em função dos ventos, precisarão ser tomados.

## **2.8 RESULTADOS PARCIAIS E CONSOLIDADOS**

Após preenchimento das rotas e seus respectivos quantitativos serão reproduzidos os seguintes resultados:

- ♦ Ordenamento de representatividade das rotas;
- ♦ Verificação entre a quantificação mensal da rota e o somatório das rotas, este levantamento tem por objetivo identificar possíveis desvios nos dados alimentados;
- ♦ Identificação de possíveis perdas por peneiramento;
- ♦ Cálculo do peso específico por rota;
- ♦ Agrupamento das categorias segundo cada rota;
- ♦ Consolidação de todas as rotas com cálculo da margem de erro por categoria;
- ♦ Geração de gráficos gravimétricos e granulométricos segundo categorias agrupadas;
- ♦ Porcentagem de representatividade da amostragem em relação a carga líquida total coletada durante campanha.

O compromisso com os dados gerados é fundamental para que sejam retratados de forma fidedigna os resultados, e assim garantir assertividade nas análises tecnológicas e de gestão.

## **2.9 APLICABILIDADE TECNOLÓGICA**

A partir da caracterização dos resíduos inicia-se a fase de desenvolvimento do conceito tecnológico. As categorias tecnológicas presentes na ferramenta permitirão verificar a potencialidade, entretanto, vale observar que estes valores são apenas instrumentos de partida, devendo ser verificada a performance de cada tecnologia segundo a tipologia de resíduo. Balanço de massa para representar o fluxo operacional da tecnologia deverá ser desenvolvido, inclusive com análise de massa de rejeitos para aterramento.

Há ainda de se observar alguns condicionantes quando da tomada de decisão, para que não haja surpresas após a implementação do projeto, onde o balanço de massa elaborado



durante a etapa de planejamento, pode ser diretamente atingido quando da inexistência de consumidores, ou mesmo, quando do descompasso na quantidade a ser consumida de subprodutos.

Na ausência de consumo, estes resíduos valorizados deverão ser encaminhados como rejeitos para os aterros, não apenas afetando o balanço econômico, mas também, o próprio propósito do projeto, qual seja, a valorização das frações orgânicas e seu consequente desvio dos aterros.

Algumas condições de contorno são apontadas segundo a tecnologia a ser empregada.

Tabela 9 – Condições de contorno para escolha tecnológica

Tecnologia	Condições de contorno
Triagem manual ou mecanizada seleção de recicláveis	<p>Verificar potencial de mercado consumidor de recicláveis em um raio de 300 km: tipos, preços e padrão de qualidade.</p> <p>Verificar quantidade de catadores em associações / cooperativas.</p> <p>Verificar estimativa do setor informal de catação.</p> <p>Incluir na equação econômica os custos de transporte do material reciclável ou <b>se certificar de que os valores de preço de venda sejam “porta de fábrica”</b>.</p> <p>Avaliar o potencial teórico máximo existente no RSU e a capacidade de segregação da triagem mecanizada, sendo que quanto maior o % do objetivo de segregação, maiores serão os custos de Capex e Opex da triagem mecanizada.</p>
Tratamento biológico aerado: geração de composto	<p>Impacto ambiental: distância de núcleo habitacional.</p> <p>Área agrícola em raio até 50 km: dimensão e culturas agrícolas.</p> <p>Valor de comercialização de fertilizantes orgânicos.</p> <p>Avaliar a rejeição do consumidor por composto de origem mista.</p> <p>Em países tropicais como o Brasil, deve-se avaliar o custo benefício de cobertura das leiras de compostagem face ao alto potencial de incidência pluviométrica: usualmente entre 1.250 a 2.000 mm/m<sup>2</sup> por ano.</p> <p>Avaliar na modelagem econômica o <i>break even</i> entre se investir em um degrau tecnológico maior com insuflação de ar, cobertura e revolvimento vs produtividade ao longo do tempo.</p>



Tecnologia	Condições de contorno
Tratamento biológico anaeróbio e aeróbio: geração de biogás e composto	<p>Impacto ambiental: distância de núcleo habitacional.</p> <p>Área agrícola em raio até 50 km: dimensão e culturas agrícolas.</p> <p>Valor de comercialização de fertilizantes orgânicos.</p> <p>Preço de destinação de emissões líquidas.</p> <p>Preço de aquisição de energia elétrica / biometano de fonte renovável.</p> <p>Avaliar dentro da equação econômica a possibilidade de se criar valor através do autoconsumo de biometano ou energia elétrica.</p>
Tratamento mecânico: geração de CDR frações grossas	<p>Identificar capacidade de consumo de cimenteira localizada em raio de até 150 km.</p> <p>Verificar padrões de qualidade impostos pelo consumidor.</p> <p>Verificar a possibilidade de contrato de consumo em período superior a cinco anos.</p> <p>Preço de aquisição de CDR frações grossas.</p> <p>Avaliar a possibilidade de descartar materiais que tenham alto conteúdo de umidade para se atender às expectativas de qualidade dos consumidores, usualmente os papéis presentes nas frações grossas absorvem um percentual relevante da umidade quando em contato com a fração orgânica dentro da coleta mista e assim responde pela maior parte da umidade do CDR como produto acabado. Não parece fazer sentido desassociar a produção de CDR TM de uma triagem mecanizada, isso posto a maior parte do investimento para produção do CDR TM já está posto com a triagem mecanizada.</p>
Tratamento mecânico-biológico: geração de CDR frações totais	<p>Identificar capacidade de consumo de cimenteira localizada em raio de até 150 km.</p> <p>Verificar padrões de qualidade impostos pelo consumidor.</p> <p>Verificar a possibilidade de contrato de consumo em período superior a dez anos.</p> <p>Verificar o interesse do consumidor na biomassa gerada por biossecagem.</p> <p>Preço de aquisição CDR frações grossas e CDR frações finas.</p> <p>A utilização de processos de biossecagem de alta eficiência são fundamentais para assegurar a necessária remoção de umidade com o intuito de se atingir a usual meta de qualidade do CDR.</p>

Fonte: Elaborada pela autora (2021).



Ainda em relação às tecnologias a serem aplicadas, Sachsen – 1998 posiciona a categoria de resíduo e seu potencial de valorização frente a diversas modalidades de destinação, salvo a incineração *mass burning* que pode ser aplicada para todos os grupos (Intecus, 2016).

Tabela 10 – Aplicabilidade tecnológica segundo tipo de resíduo

<b>Tipo de resíduo</b>	<b>Recuperação energética</b>	<b>Recuperação de frações secas</b>	<b>Recuperação biológica</b>
Embalagens e materiais ferrosos		<input checked="" type="checkbox"/>	
Embalagens e materiais não ferrosos		<input checked="" type="checkbox"/>	
Papel e papelão	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Vidros		<input checked="" type="checkbox"/>	
Plásticos	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Resíduos de cozinha e outros orgânicos	<input checked="" type="checkbox"/> (após biosecagem)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Resíduos de jardim	<input checked="" type="checkbox"/> (após biosecagem)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Madeiras	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Têxteis	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Cerâmicos e outros minerais		<input checked="" type="checkbox"/>	
Embalagens multicamadas	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Sucata eletrônica	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Baterias		<input checked="" type="checkbox"/>	
Couro	<input checked="" type="checkbox"/>		
Borracha	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Higiênicos / Fraldas	<input checked="" type="checkbox"/>		

Fonte: Adaptada pela autora (2021) de Sachsen – 1998 (Intecus, 2016).



A escolha tecnológica é baseada em dois princípios, de semelhante relevância, sendo o primeiro a representatividade dos estudos que retratam a composição dos resíduos e o segundo a potencialidade de escoamento dos subprodutos gerados. Isto significa, que mesmo antes de iniciar os estudos relacionados com a composição dos resíduos, um levantamento preliminar do mercado consumidor precisará ser realizado. Este resultado servirá de fator orientador dos estudos de composição.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O serviço de saneamento é essencial à qualidade de vida, desenvolvimento econômico e redução dos impactos ambientais. A componente de resíduos assumiu o papel protagonista em face da proteção do meio ambiente, preservação de recursos naturais e geração de emprego e renda.

A última década foi marcada por importantes conquistas em termos regulatórios em prol de uma gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Isso tem permitido romper barreiras entre o setor público e privado através de instrumentos legais e discussões multidisciplinares onde a valorização dos resíduos sólidos assumiu o papel protagonista em face da proteção do meio ambiente, preservação de recursos naturais e geração de emprego e renda. Esse movimento criou a oportunidade da democratização do conhecimento e inovação através do aporte tecnológico necessário ao enfrentamento dos desafios da diversidade de cenários dentro do tema saneamento no Brasil.

Contudo, uma análise de valor que compare as investidas aportadas e o potencial do mercado brasileiro, este gigante pela própria natureza, evidencia os desafios atrelados a limitação de recursos fiscais, insuficiência de quadros técnicos especializados, sistemas de recuperação de custos subestimados, limitação de escala operacional, deficiência de infraestrutura e, sobretudo, dados defasados ou inconsistentes que permitam auferir as quantidades e as composições dos resíduos gerados, todos esses aspectos preponderantes para o atendimento das metas de redução dos resíduos em aterros sanitários e universalização dos serviços.

O desafio da universalização evidencia tanto a imposição por sustentabilidade econômica quanto a demanda por introdução de



práticas que contribuam para a mitigação dos impactos ambientais, entre eles a redução da emissão de gases de efeito estufa e a preservação dos recursos naturais. Entretanto, a alavancagem estruturante pressupõe como pilares o compromisso com a formação de política pública que evidencia a participação da sociedade e que seja implementada de forma criteriosa empregando dados factíveis e atualizados.

O desenvolvimento deste artigo ressaltou o descomprometimento do Poder Público e do setor privado quanto a variante composição dos resíduos. Não há compreensão quanto a necessidade de que o planejamento de um gerenciamento adequado e sustentável de resíduos exige que a radiografia da geração e composição dos resíduos reflita fidedignamente a realidade. Não bastando copiar os resultados de cidades vizinhas ou de consolidação nacional.

O binômio de gerenciamento formado pela coleta e aterro empregado prioritariamente no mercado brasileiro, abreviou o caminho durante a fase de planejamento devido ao raso entendimento de que para as atividades fundamentalmente de logística dispensam o aprofundamento dos dados disponíveis de geração e composição dos resíduos.

Com o aperfeiçoamento da discussão por meio do advento de políticas que privilegiam a valorização de resíduos mediante a aplicação de tecnologias de tratamento mecânicas, biológicas ou térmicas, restou comprovado que é fundamental para o dimensionamento da infraestrutura bem como para a estimativa de geração de recursos secundários, conhecer preliminarmente os resíduos a serem manejados.

Todavia não basta realizar o advento da caracterização dos resíduos como intervenção esporádica e desagregada das decisões políticas, esta deve ser enquadrada como uma atividade rotineira no âmbito da gestão dos resíduos, sendo realizada pelo menos uma vez por ano, a depender da influência oriunda de sazonalidades e, sobretudo, ter sua representatividade garantida.

A representatividade é palavra identificada com frequência nos anais dos estudos de caracterização, mas sem resultado prático, devido à pouca preocupação presente nas referências bibliográficas



nacionais que induzam às práticas que efetivamente possam ter seus resultados considerados adequados.

Quatro aspectos são fundamentais na busca pela representatividade dos resultados sendo eles:

- ♦ o estabelecimento da amplitude da amostra desde a metodologia de coleta das amostras;
- ♦ quantidades mínimas a serem estudadas que atestem confiabilidade e margem de erro programada;
- ♦ a observância de critérios técnicos durante a amostragem, a sensibilidade em identificar desvios de padrão; e,
- ♦ a repercussão financeira dessa intervenção.

Não obstante há de se ressaltar que a caracterização de resíduos considerada como ideal é aquela que não desperdiça esforços técnicos e orçamentários, no afã da busca pela representatividade. Esta deve ser simples e representativa, e que caiba no orçamento da Administração Pública.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007:2004** – Amostragem de resíduos sólidos – Esta Norma fixa os requisitos exigíveis para amostragem de resíduos sólidos. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/residuos/files/2014/04/nbr-10007-amostragem-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>. Acesso em: 22 set. 2022.

ABREN – Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos.

**Contribuição para Consulta Pública nº 025/2019**. 2019. Disponível em:

<https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas>. Acesso em: 12 out. 2022.

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais). Standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste. ASTM D531-92. EUA, 2008.

BOCCHINI, Bruno. **Estudo mostra que 70% dos resíduos do mar brasileiro são**

**plástico**. Os dados, divulgados hoje, são do projeto Lixo Fora D'Água. São Paulo:

Agência Brasil, 25.03.2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-03/estudo-mostra-que-70-dos-residuos-do-mar-brasileiro-sao-plastico>.

Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

CARVALHO, Elsa Maria Fernandes Duarte Branco. **Metodologias para a quantificação e caracterização física dos resíduos sólidos urbanos**. Lisboa: NOVA, 2005. Tese (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/1136>. Acesso em: 12 out. 2022.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Cartilha de orientações: estudo gravimétrico de resíduos sólidos urbanos**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2019. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/2019/>



MINAS\_SEM\_LIXOES/Bolsa\_reciclagem/maio/Cartilha\_Estudo\_Gravim%C3%A9trico.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. **Waste Composition Analysis for Greece and Proposals for the Amendment of JMD114218/1997**. Final Report. Eunomia, 26th February 2021. Disponível em: <https://www.giz.de/en/downloads/Final%20Report%20WCA%20CE%95CE%9D.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. [José Henrique Penido Monteiro. [et al.]; coordenação técnica Victor Zular Zveibil]. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativas da População**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=28674&t=resultados>. Acesso em: 12 out. 2022.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Em 2019, o setor de resíduos foi responsável por 4,4% das emissões de GEE no Brasil**. Dados estão presentes na oitava edição do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa. 20.11.2020. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/em-2019-o-setor-de-residuos-foi-responsavel-por-44-das-emissoes-de-gee-no-brasil/>. Acesso em: 12 out. 2022.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. **Estudo da Caracterização Gravimétrica de Resíduos Sólidos Urbanos Série Gestão Ambiental**. Conhecendo a composição dos resíduos para aplicação na gestão municipal. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2021/01/Cartilha-Estudo-da-Characteriza%C3%A7%C3%A3o-Gravim%C3%A9trica-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Urbanos-2.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

INTECUS GmbH. **Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen Sächsische Sortierrichtlinie 2014 mit Ergänzung zur Identifikation von Lebensmittelabfällen**. Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2016. Disponível em: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/23865>. Acesso em: 12 out. 2022.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA; Perinaz; WOERDEN, Frank Van. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Worldbank, 24.10.2018. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>. Disponível em: <https://olc.worldbank.org/system/files/What%20a%20Waste%202.0%20Overview.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. **Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações/ Secretaria de Pesquisa e Formação Científica, 2021. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/4\\_com\\_nac\\_brasil\\_web.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/comunicacoes-nacionais-do-brasil-a-unfccc/arquivos/4comunicacao/4_com_nac_brasil_web.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

ME – Ministério da Economia. **Cidades com mais de 50 mil habitantes terão de utilizar pregão eletrônico**. Até junho de 2020, todos os municípios brasileiros passam a utilizar o sistema para aquisição de bens e contratação de serviços com recursos de transferências voluntárias da União. 06.02.2020. Atualizado em 03.03.2020. Ministério da Economia. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2020/02/cidades-com-mais-de-50-mil-habitantes-terao-de-utilizar-pregao-eletronico>. Acesso em: 12 out. 2022.

NAIME, Roberto; ROCHA, Cláudio Silva da. Utilização de instrumentos legais para induzir melhorias na gestão de resíduos sólidos urbanos. **Gestão e**



**Desenvolvimento**, n. 4, v. 2, p. 11-25, 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5142/514252212001.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2020.

RIQUELME, Rodrigo; MÉNDEZ, Paola; SMITH, Ianthe. **Solid Waste Management in the Caribbean Proceedings from the Caribbean Solid Waste Conference**. Water and Sanitation Division. Technical Note n° IDB-TN-935. IDB – Inter-American Development Bank, 2016. Disponível em: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Solid-Waste-Management-in-the-Caribbean-Proceedings-from-the-Caribbean-Solid-Waste-Conference.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SAFFER, Mario. **Melhoria da Gestão Ambiental Urbana no Brasil – BRA/OEA/08/001**. Proposta Metodológica de Caracterização Nacional. Relatório Final. RT Final. Porto Alegre: Ministério do Meio Ambiente / Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2013.

SANTOS, Joana Luísa dos. **Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) – Departamento de Zoologia e Antropologia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007.

SCHWETJE, Anja; KAAZKE, Julia. **A sustainable waste management concept for Khanty-Mansiysk municipality, Russia**. Published by: Federal Environment Agency / ARGUS e.V. / Technische Universität Berlin. Editor: Hanna Griebbaum – Federal Environment Agency / Dr. Bertram Zwisele – ARGUS e.V. / Prof. Dr. B.-M. Wilke – Technische Universität Berlin. 2012. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/beratungshilfe/long/35-53-B-EN.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

SWA-TOOL Consortium. **Methodology for the Analysis of Solid Waste (SWA-Tool) User Version**. SWA-Tool, Development of a Methodological Tool to Enhance the Precision & Comparability of Solid Waste Analysis Data. European Commission. Vienna, Austria: SWA-Tool, 2004. Disponível em: <https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

VELIS, Costas; LERPINIÈRE, David; TSAKONA, Maria. **Previna o lixo marinho plástico – agora!** Uma parceria facilitada pela ISWA para evitar o lixo marinho, com um chamado global para a ação para investir em gestão sustentável de resíduos e recursos em todo o mundo. Relatório elaborado em nome da International Solid Waste Association (ISWA). Um produto da Força-Tarefa de Lixo Marinho. [Original: ISWA, Setembro 2017. Viena, p. 75]. Brasil, 2018. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/prevencao-a-poluicao-marinha/>. Acesso em: 12 out. 2022.

VILHENA, André. (coord.). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018. Disponível em: [https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo\\_Municipal\\_2018.pdf](https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

VILHENA, André. (coord.). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 4. ed. São Paulo: CEMPRE, 2018. Disponível em: [https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo\\_Municipal\\_2018.pdf](https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Lixo_Municipal_2018.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

ZANTA, Viviana Maria; FERREIRA, Cynthia Fantoni Alves. Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de (coord.). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003. Disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabArmando.pdf#page=14>. Acesso em: 12 out. 2022.





**ASPECTOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NOS MUNICÍPIOS DE  
ANANINDEUA, BELÉM E MARITUBA**

***QUANTITATIVE AND QUALITATIVE ASPECTS  
OF MUNICIPAL SOLID WASTE IN THE ANANINDEUA,  
BELÉM AND MARITUBA MUNICIPALITIES***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

SILVA, Diego Rodrigues Borges da; COSTA FILHO, Itair da Silva; SOUZA, Waryson Carlos Silva de; SANTOS, Filippe Vilhena dos; MACHADO, Paulo Christian de Freitas; BRANDÃO, Isaque Wilkson de Sousa; PEREIRA, Filipe Castro; ASSUNÇÃO, Maurilo André da Cunha; SILVA, Rafael Haruo Yoshida; RUSSO, Mario Augusto Tavares; MENDONÇA, Neyson Martins. Aspectos quantitativos e qualitativos de resíduos sólidos urbanos nos municípios de Ananindeua, Belém e Marituba. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

***Diego Rodrigues Borges da Silva***

Discente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: diego.borges.silva@itec.ufpa.br

***Itair da Silva Costa Filho***

Discente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: itair1068@gmail.com

***Waryson Carlos Silva de Souza***

Discente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental (FAESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: warysoncarlos@gmail.com

***Filippe Vilhena dos Santos***

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: filippevilhena@gmail.com

***Paulo Christian de Freitas Machado***

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Pará (UFPA).



E-mail: paulomachado@ufpa.br

### **Isaque Wilkson de Sousa Brandão**

Químico. Discente do Programa de Pós-Graduação em Química (PPGQ) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: isaquebrand@gmail.com

### **Filipe Castro Pereira**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental. Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: filipe.pereira@itec.ufpa.br

### **Maurilo André da Cunha Assunção**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental. Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: maurilo.assuncao@itec.ufpa.br

### **Rafael Haruo Yoshida Silva**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental. Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: rafaelharuoyoshidasilva@gmail.com

### **Mario Augusto Tavares Russo**

Doutor em Engenharia Civil. Professor do Instituto Politécnico de Viena do Castelo (IPVC). Pesquisador Visitante na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: mario russo@estg.ipvc.pt

### **Neyson Martins Mendonça**

Doutor em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento. Professor Associado do Instituto de Tecnologia, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental (PPGESA) na Universidade Federal do Pará (UFPA).

E-mail: neysonmm.ufpa@gmail.com

## **RESUMO**

Durante o período de 2018-2022 nos municípios de Ananindeua (PMA), Belém (PMB) e Marituba (PMM) que integram a Região Metropolitana de Belém (RMB), no estado do Pará (PA), desenvolveu-se o estudo da geração *per capita* e da composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos (RSU). Tal estudo, teve as seguintes etapas principais: i) Compilação de acervo de produções técnicas; e, ii) Levantamento de campo. Os resultados quantitativos, indicaram que a Central de Processamento e Tratamento de Resíduos (CPTR) de Marituba (PA) operou com média de  $1.330,3 \pm 58,1$  t/dia,



tendo se observado valores médios da geração *per capita* de RSU de 0,48 kg/hab.d-PMA, 0,63 kg/hab.d-PMB e 0,43 kg/hab.d-PMM, sendo o município de Belém responsável por demandar de 69,5% a 70,9% da massa de RSU para tratamento em aterro sanitário. E com relação a composição gravimétrica o conteúdo orgânico fermentável foi a fração predominante entre os distintos tipos de materiais segregados, tendo variado de 42,4% (mínimo) até 51,2% (máximo) em função do porte do município, número de roteiros de coleta, estrato social (padrão de classe baixa, média baixa-média alta e misto), sazonalidade (chuvoso e menos chuvoso) etc. Além disso, foi verificado que em média  $28,43\% \pm 3,54\%$  dos RSU (seco) gerados por Ananindeua, Belém e Marituba apresentam potencial de ser reciclado e/ou entrar numa rota de logística reversa. Enquanto, que  $17,76\% \pm 2,91\%$  se referem a materiais inertes (rejeitos e/ou baixo potencial econômico para a reciclagem). Também, demonstrou-se que a análise estatística de intervalo de confiança (IC) se constituiu numa ferramenta importante para se ter a confiabilidade quanto a validação da composição gravimétrica de RSU, sendo obtido, níveis de confiança de 75,0% para Ananindeua, 93,75% para Marituba e de 95% para Belém.

Palavras-chave: Composição. Gravimétrica. RSU. Geração. Segregação.

## ABSTRACT

During the period 2018-2022, in the municipalities of Ananindeua (PMA), Belém (PMB) and Marituba (PMM) that are part of the (RMB) Belém metropolitan region, the study of the per capita generation and the gravimetric composition of MSW was developed. This study had the following main steps: i) Compilation of the collection of technical productions; and, ii) Field research. The quantitative results indicated that the CPRT of Marituba (PA) operated with an average of  $1,330.3 \pm 58.1$  t/day, having observed average values of the per capita generation of MSW of 0.48 kg/inhab.d-PMA, 0, 63 kg/inhabitant.d-PMB and 0.43 kg/inhabitant.d-PMM, with the municipality of Belém responsible for demanding from 69.5% to 70.9% of the mass of MSW for treatment in a sanitary landfill. And regarding the gravimetric composition, the fermentable organic content was the predominant fraction among the different types of segregated materials, ranging from 42.4% (minimum) to 51.2% (maximum) depending on the size of the municipality, number of routes of collection, social stratum (lower class pattern, low-medium-high middle and mixed), seasonality (rainy and less rainy), etc. In addition, it was found that on average  $28.43\% \pm 3.54\%$  of MSW (dry) generated by Ananindeua, Belém and Marituba have the potential to be recycled and/or enter a reverse logistics route. Meanwhile,  $17.76\% \pm 2.91\%$  refer to inert materials (rejects, and/or low economic potential for recycling). Also, it was shown that the statistical analysis of IC constituted an important tool to have the reliability regarding the validation of the gravimetric composition of MSW, being obtained, confidence levels of 75.0% for Ananindeua, 93.75% for Marituba and of 95% for Belém.

Keywords: Composition. Gravimetric. MSW. Generation. Segregation.



## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de implementação do serviço de manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU) em termos de coleta, tratamento e destinação adequada nas cidades brasileiras está fazendo com que essas tenham distintas estratégias para universalizar o atendimento da população urbana quanto as metas de saneamento básico prevista na Lei nº 14.026/2020 (Leite *et al.*, 2022). Um dos desafios atualmente enfrentado por engenheiros, empresas (públicas e privadas) e prefeituras municipais do Brasil, refere-se à eliminação da prática habitual da disposição inadequada de RSU nos lixões, o que acaba por impactar o ambiente abiótico (água, ar e solo) e biótico (seres vivos) nas áreas onde se efetua tal operação.

Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), em seu Panorama dos Resíduos Sólidos – 2021, revela a situação crítica da Região Norte do Brasil neste assunto, que no ano de 2021, teve cerca de 35,8% (~1.773.927 t/ano) dos RSU dispostos de maneira adequada, sendo que 64,4% (~3.209.013 t/ano) tiveram destinação incorreta, tendo em vista a existência imutável do cenário de investimento não continuado para gerenciamento de RSU, bem como a adoção soluções precárias na coleta de RSU ou mesmo da infraestrutura para o tratamento e/ou destinação final, que via de regra, não estão adaptadas a realidade local dessas cidades da região do Brasil, e que necessitam de dinâmica diferenciada quanto ao transporte hidrorrodoviário, em razão destas estarem sujeitas a inundações e variação de maré constantes, e sob elevada pluviosidade (Abrelpe, 2021).

Contudo, para superar esse quadro de adversidades, diversas pesquisas no mundo e no Brasil têm direcionado esforços, no sentido de se investigar distintas técnicas, métodos, unidades e equipamentos que possam ser adaptados a um dado fluxograma de gerenciamento de RSU voltado a economia circular ou mesmo ser concebido segundo critérios econômicos (Capex e Opex) e/ou de baixa emissão dos gases de efeito estufa (GEE) conforme reportado por Russo *et al.* (2019), Junqueira *et al.* (2022) e Fernandes *et al.* (2022).

Um dos temas transversais e fundamentais, para implementação do sistema integrado de RSU, diz respeito ao conhecimento da geração *per capita* e da composição gravimétrica do RSU, o que tem motivado diversos pesquisadores como Silva *et al.* (2020), Menezes *et al.* (2019), Torres e Lange (2022) e Imbiriba *et al.* (2020), a realizarem estudos voltados a setorização de rotas de coleta de RSU, a análise estatística da caracterização gravimétrica, a



valoração energética da rota tecnológica de tratamento dos RSU, e de emissão dos GEE em aterros sanitários ou mesmo em lixões. Cujo trabalho pioneiro de Carneiro (2006) sobre o potencial econômico dos RSU gerados nos municípios de Belém e de Ananindeua, permitiu que se identificasse, entre 2000 e 2006, a ocorrência de alteração média de 13%, quanto ao material reciclado em função do perfil social da população.

Dessa maneira, o presente trabalho teve como objetivo avaliar para os municípios de Ananindeua, Belém e Marituba (1.973.625 hab – IBGE, 2010), que integram a Região Metropolitana de Belém (RMB), no estado do Pará (PA), a existência ou não de alterações sobre os aspectos quantitativo e qualitativo de RSU, mediante distintas condições de tempo (período chuvoso e menos chuvoso) e espacialmente (ano a ano), realizando para isso etapas de investigação sobre o acervo de produções técnicas existentes e de levantamento de campo no período de 2018-2022.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Neste trabalho, descreve-se a área de estudo, o material e os métodos empregados durante as etapas experimentais de tal investigação, assim como as hipóteses formuladas e o tratamento estatístico dos dados (descritivo e analítico) para avaliar a influência da sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso) sobre os aspectos quantitativos e qualitativos de RSU nos municípios de Ananindeua, Belém e Marituba, no estado do Pará.

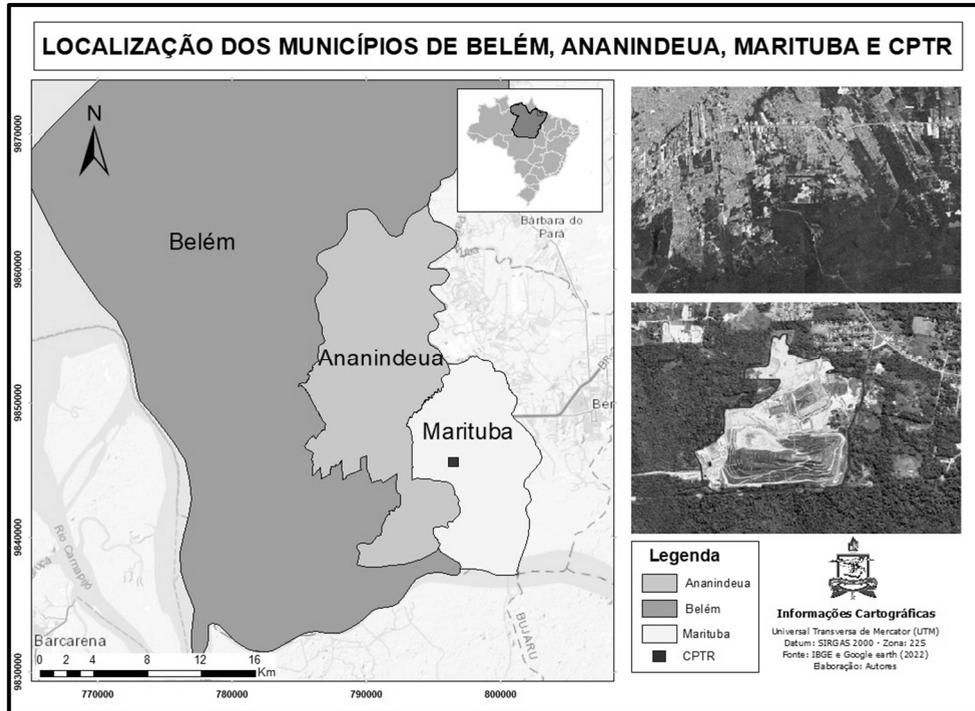
### **2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo envolve os municípios de Ananindeua, Belém e Marituba que integram a região metropolitana de Belém (RMB), no estado do Pará (PA), cuja área de abrangência é de 1.353,261 km<sup>2</sup>, na qual residem aproximadamente 1.973.625 habitantes (IBGE, 2010), resultando numa densidade de 1.458,42 hab./km<sup>2</sup>.

Em função do desenvolvimento urbano desses municípios o gerenciamento de resíduos sólidos domésticos tem como destinação final a Central de Processamento e Tratamento de Resíduos (CPTTR) situada no município de Marituba (PA), nas coordenadas geográficas 1°23'48,60" S e 48°20'12,58" O, com acesso por via terrestre pelo Km 04 da Alça Viária, PA 483, distante aproximadamente 4,0 km da Rodovia BR 316, ocupando área de aproximadamente 52 hectares (Figura 1).



Figura 1 – Localização dos municípios de Ananindeua, Belém, Marituba e CPTR situada no município de Marituba (PA).



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Essa CPTR realiza o processamento e tratamento de resíduos de classe II (inertes e não inertes) e cuja infraestrutura é integrada pelas seguintes unidades e instalações principais: unidades de apoio (guarita, portaria, balança, oficina, estacionamento, etc.), unidade administrativa, sistema de tratamento do lixiviado (Parque de Osmose Reversa – 1.200 m<sup>3</sup>/d), sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de drenagem e tratamento dos gases, aterro sanitário (AS) com células de disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), pátio de equipamentos e máquinas de operação, equipamentos de combate a incêndio e unidade de triagem de RSU (Mendonça *et al.*, 2019).

## 2.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A investigação experimental desse estudo foi realizada durante 2018-2022, sendo dividida em duas etapas distintas.

A primeira etapa denominada de *acervo de produções técnicas* envolveu a obtenção de informações disponibilizadas em



relatórios, planos municipais, estudos técnicos sobre a composição gravimétrica de RSU, e cujos registros foram os seguintes documentos principais a saber:

- ♦ Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Ananindeua. Secretaria Municipal de Serviços Urbanos (SEURB), Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE), Prefeitura Municipal de Ananindeua (dezembro 2015), 215 p.
- ♦ Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém. Relatório 3.2 Diagnóstico e Propostas Regionais Revisão 2. Prefeitura Municipal de Belém (2020), 390 p.
- ♦ Plano Municipal de Saneamento Básico de Marituba. Produto 3 – Diagnóstico do Saneamento Básico, Contrato nº 01-0102018/6 – PMM-TP-SEPLAN, EnvEx Engenharia e Consultoria Ltda, Curitiba (PR), Prefeitura Municipal de Marituba (2019), 334 p.

A segunda etapa, denominada de *levantamento de campo* abrangeu a quantificação de RSU na CPTR por tipo de gerador (público e privado) e a aplicação do protocolo de padronização da composição gravimétrica de RSU apenas no município de Marituba (PA).

Na composição gravimétrica de RSU para avaliação sistematizada foi necessário codificar os tipos de resíduos nas seguintes categorias principais:

- ♦ Resíduos orgânicos biodegradáveis (ROB = restos de alimentos);
- ♦ Papel/papelão (PP);
- ♦ Resíduos verdes (RV);
- ♦ Madeira;
- ♦ Plástico filme (PEBD = Polietileno de Baixa Densidade);
- ♦ Plástico rígido (PR);
- ♦ Polietileno Tereftalato / Polipropileno (PET/PP);
- ♦ Plástico mole (PM);
- ♦ Plástico duro (PD);
- ♦ Embalagem Tetra Pak® (ETP – longa vida);
- ♦ Têxteis sanitários;
- ♦ Têxteis (trapos);
- ♦ Tecidos/trapos (TT);
- ♦ Vidros;
- ♦ Alumínio (Al);
- ♦ Metais ferrosos (MF);
- ♦ Finos (F);
- ♦ Entulho;
- ♦ Outros; e,
- ♦ Rejeitos.

Depois de finalizada a codificação dos RSU, foram observados aspectos relativos à metodologia aplicada, número de categorias de RSU, segregação dos RSU (materiais com potencial de recicláveis, conteúdo orgânico biodegradável e rejeito), variabilidade espacial



das categorias de RSU na RMB, medidas de tendência central (número, média, mediana, desvio padrão, máximo e mínimo) e obtenção do intervalo de confiança (IC) por categoria de material mediante a natureza dos dados em paramétricos (Teste de  $t$  – Amostra Única) ou não paramétricos (Teste de Wilcoxon – Amostra Única) visando-se ter resumo global e os limites de tolerância.

Além da estatística descritiva e analítica também nessa etapa foram elaborados gráficos do tipo torta, utilizando-se o software Minitab 18 for Windows®, para representação dos distintos tipos de materiais encontrados na composição gravimétrica de RSU.

Quanto a quantificação da geração de RSU destinado a CPTM de Marituba (PA) esta foi realizada para o período de 2018 (janeiro a dezembro), 2019 (janeiro a dezembro) e 2020 (janeiro a julho) na qual se realizou a organização dos dados mediante a identificação do gerador: órgãos públicos (PMA, PMB e PMM) e empresas privadas (empresas de limpeza urbana, hipermercados, empresas de alimentos etc.).

O tratamento estatístico realizado nessa etapa envolveu a realização da técnica descritiva e analítica cujos principais objetivos foram, respectivamente, resumir as informações quanto as medidas de tendência central, variabilidade e dispersão da geração de RSU durante todo o período (anual) e sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso), assim como a verificação das seguintes hipóteses ( $H_0$  e  $H_1$ ) principais:

#### Primeira Verificação:

- ♦  $H_0$ : Não existe diferença nas medianas da geração total de RSU no período de 2018 e de 2019.
- ♦  $H_1$ : Existe diferença a geração total de RSU no período de 2018 e de 2019.

#### Segunda Verificação:

- ♦  $H_0$ : a geração total de RSU considerando a sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso) tem valores iguais considerando a período de 2018, 2019 e 2020.
- ♦  $H_1$ : a geração total de RSU considerando a sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso) não tem valores iguais considerando a período de 2018, 2019 e 2020.

Com relação ao protocolo de padronização da composição gravimétrica de RSU esse abrangeu o desenvolvimento das seguintes fases principais:

- ♦ **Preparação da campanha de caracterização:** antes de iniciar a caracterização gravimétrica de RSU se procedeu com a



capacitação da equipe de apoio, constituída por: Coordenador da Campanha (Engenheiro Civil/Sanitarista e/ou Sanitarista e Ambiental); Técnico de Apoio (Técnico em Saneamento); Agentes de Limpeza Pública (“gari”); e, os Operários de Segregação de RSU (Nível Fundamental, 1º e 2º grau de escolaridade). Nessa preparação, informou-se aos participantes da campanha o objetivo da caracterização gravimétrica de RSU, e mediante a exemplificação por componentes quais os materiais a serem segregados: 1) Resíduos Orgânicos biodegradáveis (restos de alimentos, comida); 2) Papel; 3) Papelão; 4) Plástico filme (PEBD, sacolas de plástico e similares); 5) Plástico PET; 6) Plástico propileno; 7) Embalagens plásticas (PVC = Polietileno Cloreto de Vinila, PEAD = Polietileno de Alta Densidade); 8) Outros plásticos (embalagens de margarina, manteiga, gorduras sólidas...) 9) Embalagens complexas (compósitos), tipo Tetra Pak®; 10) Metais ferrosos; 11) Metais não ferrosos (embalagens de alumínio, latas); 12) Vidros; 13) Resíduos verdes de jardins e similares; 14) Têxteis (roupas, trapos); 15) Têxteis sanitários (fraldas, absorventes higiênicos); 16) Resíduos eletroeletrônicos (pequenos aparelhos); 17) Outros resíduos e 18) Resíduos finos (< 20 mm).

- ♦ **Materiais e recursos humanos:** nessa fase se realizou o levantamento de todos os materiais necessários, equipamentos (veículos, balanças, container etc.) e recursos humanos (equipe coordenadora e de apoio) para se proceder com a segregação física, a execução física da composição gravimetria de RSU. Materiais, equipamentos e recursos humanos empregados no protocolo de padronização de caracterização gravimetria de RSU para município de Marituba (PA):

Coleta de amostra do RSU:

- Caminhão Basculante tipo Truck (1 unidade);
- Kit de Equipamento de Proteção Individual (EPI): óculos de proteção individual, bota de PVC galocha impermeável cano médio, luva nitrílica sem talco, luva de látex, protetor auricular tipo plugue, capa para chuva de PVC, colete de segurança refletivo de alta visibilidade (1 unidade/pessoa);
- Pá de bico pequena cabo de madeira 45 cm (2 unidades);
- Celular com sistema de posicionamento global (GPS = Global Positioning System) e cronômetro (1 unidade);
- Ancinho em aço carbono reforçado curvo de 14 dentes com cabo de madeira (2 unidades);



- Equipes de coleta: Motorista (1 pessoa), Coordenador da campanha (1 pessoa) e Agentes de limpeza pública (2 operários).

#### Caracterização física do RSU:

- Galpão metálico coberto 50 m × 50 m para segregação do RSU (1 unidade);
  - Bombona de PEAD de 200 litros (4 unidades);
  - Crivo de 2,0 m × 1,0 m, em rede metálica, com malha de 20 mm × 20 mm para a triagem primária;
  - Tesoura de poda para plantas com dimensões de 56 cm × 5,5 cm × 20 cm (6 unidades);
  - Balança para pesagens entre 5 e 100 kg, com precisão de 50 g (4 unidades);
  - Mesa de apoio em madeira de 2,0 × 2,0 cm para a triagem secundária (2 unidades);
  - Lona de polietileno impermeável de 10 m × 10 m ou similar (2 unidades);
  - Bombona de PEAD de 100 litros (18 unidades);
  - Ímã de neodímio N52 revestimento em aço até 60 kg com alça (2 unidades);
  - Kit de EPI: óculos de proteção individual, bota de PVC impermeável cano médio, luva nitrílica sem talco, luva de látex, protetor auricular tipo plug e máscara (1 unidade/pessoa);
  - Uniforme: na cor cinza constituído de camisa manga comprida brim e calça metade elástico e faixa refletiva (20 unidades);
  - Equipe Coordenadora: Coordenador da campanha (1 Engenheiro) para controle do procedimento de amostragem; Técnico de apoio (2 Técnicos em Saneamento) para registro dos resultados de segregação de RSU;
  - Equipes de apoio (operários de segregação de RSU): 8 operários de segregação de RSU para separação de material por categoria.
- ♦ **Obtenção da amostra e segregação das categorias dos RSU:** essa etapa compreende a obtenção da amostra de RSU, cujo procedimento de amostragem utilizado ocorreu mediante a aplicação do seguinte protocolo:
- Identificação e seleção do roteiro de coleta para realização da campanha de amostragem de RSU;



- Depois de selecionado o roteiro de coleta, iniciou-se o acompanhamento do percurso realizado pelo caminhão compactador de RSU da PMM com o veículo de apoio (caminhão basculante), sendo registrado em cada local de coleta a fotografia e o georreferenciamento mediante o uso do aplicativo Topografia App (Android®). No local de coleta, também, obtinha-se com auxílio dos agentes de limpeza e da equipe de apoio de caracterização de RSU, a amostragem aleatória dos sacos com RSU os quais eram transferidos para a viatura de apoio;
- Finalizado, o roteiro de coleta de RSU pelo caminhão compactador, todo o RSU previamente selecionado na viatura de apoio seguia para o galpão metálico, onde se procedia com o descarregamento dos sacos com RSU sobre uma lona de polietileno;
- Em seguida, com ancinho e tesoura de poda se executou a abertura dos sacos com RSU, para que esse material descarregado tivesse a referida homogeneização com auxílio de pá de bico;
- Posteriormente, na amostra homogeneizada de RSU se efetuou o quarteamento dessa, dividindo-se a amostra em quatro partes aparentemente iguais;
- Com auxílio de balança, efetuou-se o registro da massa inicial ( $M_0$ ) dos quatro tambores de PEAD de 200 litros e das dezoito bombonas de PEAD de 100 200, referente a esses vazios;
- Depois as quatro amostras homogeneizadas de RSU foram transferidas para os quatro tambores de PEAD de 200 litros, que tiveram registrado a massa final ( $M_1$ ) destes com RSU mediante o auxílio de balança;
- A seguir, o conteúdo de cada um dos quatro tambores de PEAD, foi despejado sobre a mesa de triagem primária, iniciando-se então a separação dos materiais e a transferência desses para o interior das dezoito bombonas de PEAD de 100 litros, as quais tiveram posteriormente a aferição da massa de RSU segregada ( $M_1$ ) referente a cada categoria de material.
- Terminado o procedimento de amostragem, teve início a etapa de tabulação dos dados em termos de massa e percentual de material segregado efetuada em planilha eletrônica no software Excel for Windows®.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor entendimento do presente artigo pelo leitor a organização quanto a apresentação dos resultados e discussões será realizada na seguinte sequência: i) Aspecto quantitativo da geração de RSU destinado a tratamento na CPTR de Marituba (PA); e, ii) Aspecto qualitativo de RSU nos municípios de Ananindeua, Belém e Marituba.

#### 3.1 ASPECTO QUANTITATIVO DA GERAÇÃO DE RSU DESTINADO A TRATAMENTO NA CPTR DE MARITUBA (PA)

O resumo estatístico descritivo em termos quantitativos de RSU destinados a CPTR de Marituba pode ser observado na Tabela 1, considerando-se o período de 2018, 2019 e 2020 (janeiro a julho).

Tabela 1 – Resumo descritivo da geração de RSU destinado a CPTR de Marituba (2018, 2019 e 2020)

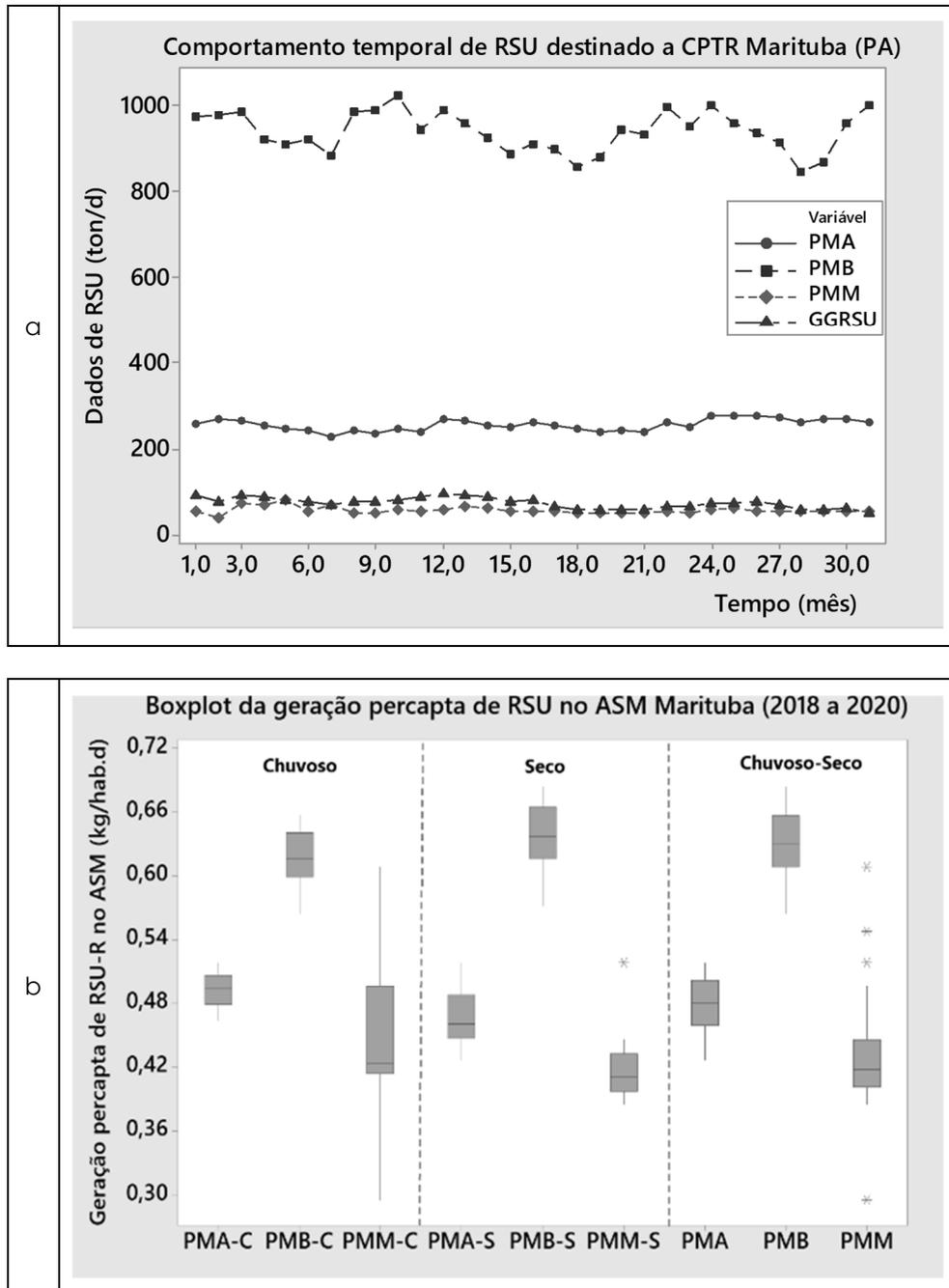
Variáveis (t/d)	N	Média	Distribuição Percentual (DP)	Mediana	Máxima	Mínima
Ananindeua (PMA)	31	256,73	13,66	228,4	257,32	277,63
Belém (PMB)	31	941,02	46,94	847,1	945,94	1.025,54
Marituba (PMM)	31	57,77	7,69	39,49	55,86	81,39
Grandes Geradores de Resíduos Sólidos Urbanos (GG-RSU) na RMB	31	74,77	12,36	51,97	76,77	97,05
ΣCPTR- RSUR (= soma de todos os geradores de resíduos sólidos na RMB)	31	1.330,3	58,1	1.218,5	1.282	1.334,7

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Na Figura 2 e na Figura 3, apresenta-se evolução temporal, o gráfico de box-plot da geração *per capita* e o de distribuição percentual (DP) envolvendo PMA, PMB, PMM e os grandes geradores de resíduos sólidos urbanos (GG-RSU), respectivamente.



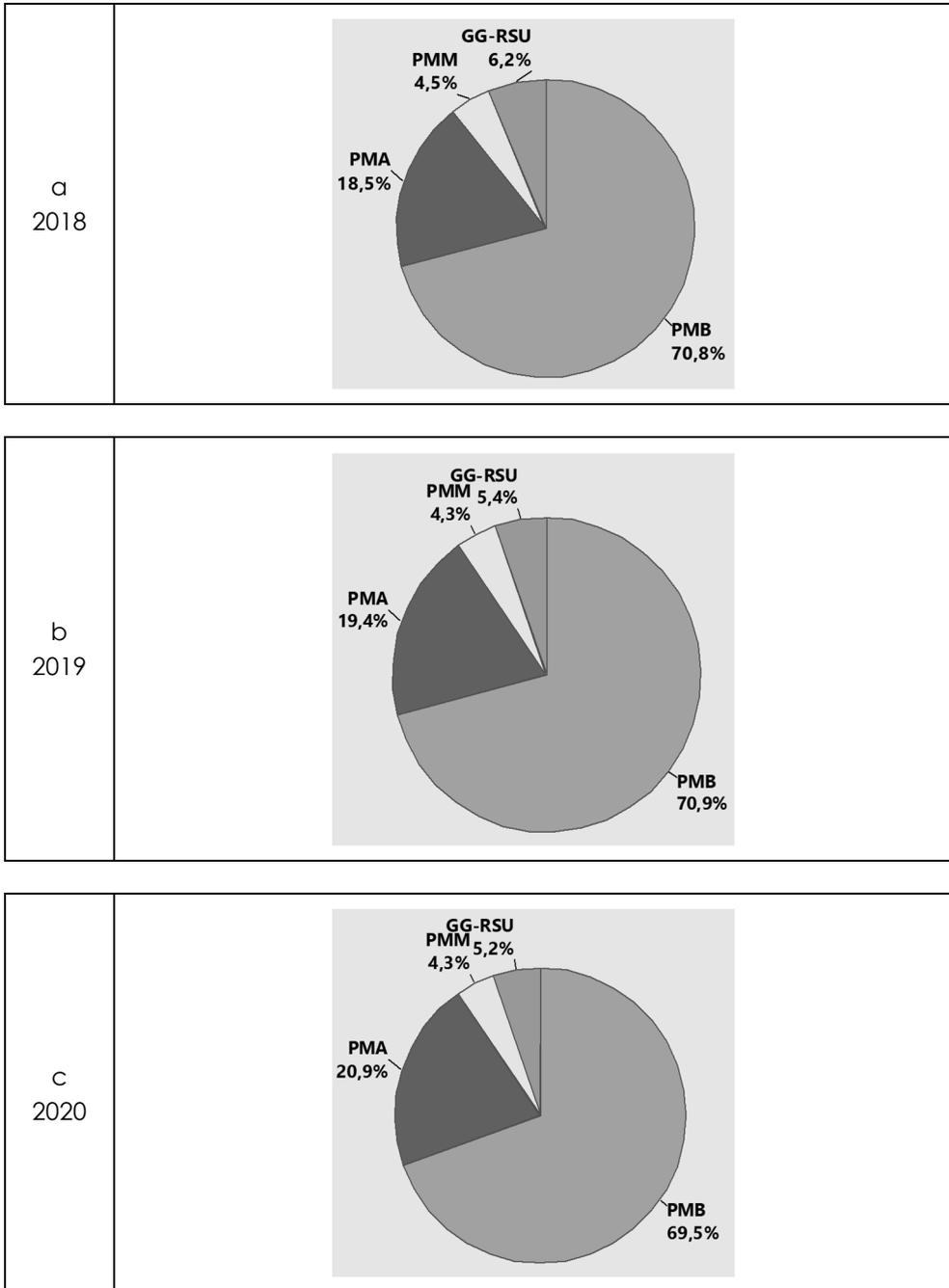
Figura 2 – Comportamento temporal (a) e box-plot da geração per capita de RSU na CPTR de Marituba (b)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Figura 3 – Percentual da geração de RSU recebido na CPTR de Marituba por tipo de gerador e CPTR situada no município de Marituba (PA)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Ao analisarmos os dados quantitativos de RSU destinados a CPTR de Marituba (PA) (Tabela 2) verifica-se que no período de investigação mencionado tal unidade operou em média com 1.330,3 t/dia. Além disso, é possível se notar mediante o comportamento temporal (Figura 3a) que entre os geradores de RSU, a contribuição da PMB é que apresenta quatro picos de destaque de produção de RSU em relação ao valor médio de 941,2 t/dia, que aconteceram nos meses 10 (outubro/2018), 22 (outubro/2019), 24 (dezembro/2019) e 31 (julho/2020), cuja faixa de variação percentual para esses eventos teve valor máximo de 8,24% e mínimo de 5,77%, quanto a geração média. Esses eventos estão relacionados a celebração do Círio de Nazaré e Festas Natalinas que aumentam o fluxo de pessoas e da atividade econômica e a reclusão domiciliar imposta pela pandemia da Covid-19 à população, a qual passou a ficar mais tempo em seus domicílios.

Em termos da geração *per capita* de RSU destinados a CPTR de Marituba (PA) (Figura 3b), ao se considerar apenas dos órgãos públicos, tem-se o seguinte ordenamento: PMB > PMB > PMM, independente da condição climática (período chuvoso e menos chuvoso), a qual é perfeitamente previsível diante das diferenças populacionais e de infraestrutura entre os municípios de Belém, Ananindeua e Marituba. Contudo, ao se estimar a população equivalente para os GG-RSU (a partir do valor médio de 0,51 kg/hab.d, obtém-se valor médio de 145.662 hab, o qual propicia na geração de RSU ordenamento distinto do apresentado anteriormente PMB > PMA > GG-RSU > PMM, e cuja comprovação pode ser observada nos gráficos de distribuição percentual (Figura 3) elaborados para o período de investigação desse trabalho, indicando de modo claro o destaque da PMB em demandar de 69,5% a 70,9% da massa de RSU para tratamento na CPTR de Marituba (PA).

Outro item importante a ser discutido em termos da geração *per capita* de RSU destinados a CPTR de Marituba (PA), é que os valores médios de 0,48 kg/hab.d-PMA, 0,63 kg/hab.d-PMB e 0,43 kg/hab.d-PMM, ao serem comparados com os dados da base Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) – Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, ano de referência 2018, onde se reporta valores da ordem de 1,05 kg/hab.dia para o Brasil e de 0,96 a 1,26 kg/hab.dia para o Estado do Pará, porém esses dados consideram a contribuição de resíduos de coleta domiciliar (RDO) mais a de resíduos sólidos públicos (RPU). Então, se levarmos em consideração a série histórica do SNIS (2015 a 2018) para o Estado do Pará obtém-se o valor médio de 1,09 kg/hab.d que ao ser subtraído do valor médio 0,51 kg/hab.d (PMA, PMB e PMA) resulta em



cerca de 0,58 kg/hab.d para a contribuição equivalente teórica de RPU para esses municípios (SNIS, 2019). Na Tabela 2, tem-se o resultado da análise estatística analítica de comparação da produção total de RSU na CPTR entre o período de 2018 a 2019, e considerando a sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso).

Tabela 2 – Teste de Kruskal-Wallis para comparação da produção total de RSU na CPTR durante 2018 a 2019 e a sazonalidade (período chuvoso e menos chuvoso)

Variável	Valores do teste	Probabilidade de significância de p	Conclusão do teste para $\alpha = 5\%$
Ano 2018 Ano 2019	H = 0,81 GL = 1 GRSU 2018 = 48 (mediana = 162,7) - 51,1, Z = 0,90 GRSU 2019 = 48 (mediana = 165,4) - 45,9, Z = -0,90	0,367 (N = 96;48,5)	H <sub>0</sub> não deve ser rejeitado
Período chuvoso e menos chuvoso (2018 – 2019 – 2020)	H = 0,71 GL = 1 Chuvoso = 64 (mediana = 162,7) - 59,9, Z = -0,84 Menos Chuvoso = 60 (mediana = 170,7) - 65,3, Z = 0,84	0,398 (N = 124;62,5)	H <sub>0</sub> não deve ser rejeitado

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

De acordo com os valores de p observados na Tabela 2, cujos valores de p foram sempre maiores que  $\alpha$ , verifica-se que não há evidências para rejeição da hipótese nula (H<sub>0</sub>), neste caso, conclui-se que durante o período de 2018 e de 2019 e de alterações climáticas (período chuvoso e menos chuvoso) ocorridos na RMB, a geração RSU destinados a CPTR de Marituba (PA) teve comportamento equivalente. O fato de não haver diferença significativa na geração total de RSU (t/d) destinados a CPTR de Marituba (PA), provavelmente pode ser atribuído a manutenção da equiparidade na linha temporal (dia a dia) e espacial (ano a ano) do fluxo (t/d) gerado pela PMA, PMB, PMM e



GG-RSU e tratado no aterro sanitário de Marituba, já que a variabilidade no período estudado se manteve em 4,36% ( $CV = DP/\bar{X}$ ) segundo dados Tabela 2 ( $\Sigma CPTR-RSUR$ ).

### **3.2 ASPECTO QUALITATIVO DE RSU NOS MUNICÍPIOS DE ANANINDEUA, BELÉM E MARITUBA**

Na Figura 4 são apresentados, respectivamente, os gráficos distribuição percentual da composição gravimétrica investigada para RSU envolvendo os municípios de Ananindeua, Belém, Marituba e CPTR de Marituba (PA).

Os dados da composição gravimétrica realizada para Ananindeua, Belém e Marituba em termos de número de categorias de RSU quanto a segregação dos RSU, indicam a identificação de 13; 13; e, 19, respectivamente. Em todos os trabalhos realizados a fração de ROB é a predominante, variando de 42,4% (Figura 4a) até 51,2% (Figura 3b), a variabilidade no conteúdo orgânico está relacionada ao porte do município, número de roteiros de coleta, estrato social (padrão de classe baixa, média baixa-média alta e misto), sazonalidade (chuvoso e menos chuvoso).

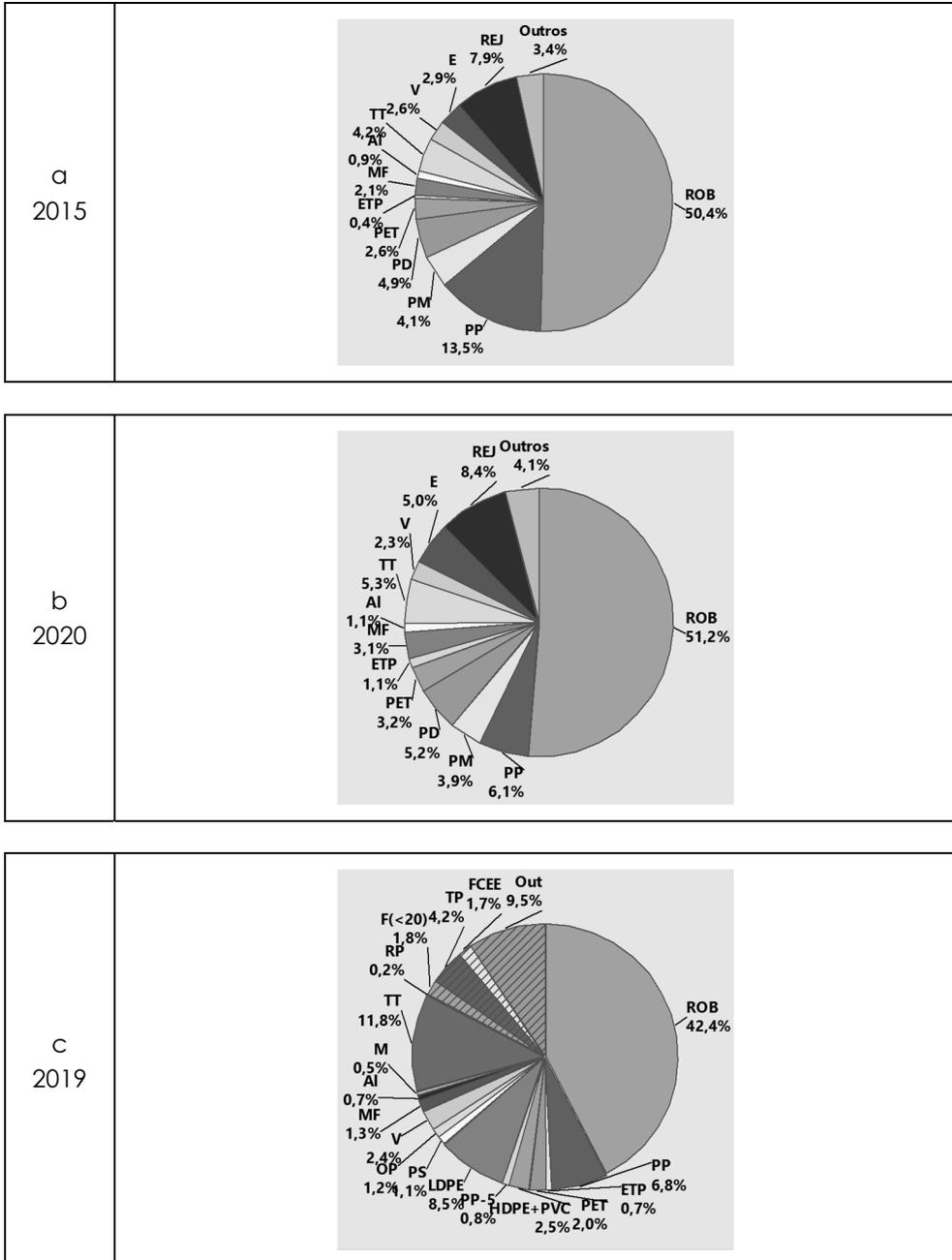
Outro importante item a ser observado na composição gravimétrica da Figura 4 se refere ao potencial de materiais destinados a reciclagem e/ou logística reversa, cujo cenário em termos médio, seria de  $30,77\% \pm 6,31\%$  ( $n = 3$ ) para Ananindeua (Figura 4a),  $26,01\% \pm 3,05\%$  ( $n = 20$ ) para Belém (Figura 4b) e de  $28,51\% \pm 1,25\%$  ( $n = 5$ ) Marituba (Figura 4c).

A análise dos dados do potencial de materiais destinados à reciclagem e/ou logística reversa nos revela que entre os municípios avaliados, Ananindeua tem 1,18% e 1,07%, respectivamente, maior potencial registrado por Belém e Marituba. Em linhas gerais, os valores obtidos nesses municípios são equiparáveis.

Contudo, tais caracterizações gravimétricas de RSU ocorreram em distintos momentos do tempo, situação essa que deve ser observada com atenção, além do fato que a não há uniformidade nos componentes investigados decorrente da aplicação de diferentes metodologias adotadas na composição gravimétrica pode levar a interpretações não realísticas, sendo prudente nessa situação se utilizar o menor valor para adoção de situação desfavorável quanto a implantação de unidade de processamento de matérias recicláveis para a Região Metropolitana de Belém (RMB), envolvendo os três municípios.



Figura 4 – Principais categorias de materiais encontrados na caracterização gravimétrica de RSU de Ananindeua (a.2015), Belém (b.2020) e Marituba (c.2019)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Ao confrontarmos, os dados médios da fração de materiais reciclados e/ou logística reversa obtidos nesse estudo, com os dados nacionais do Brasil (PLANARES, 2022), que são da ordem de 30% percebe-se proximidade entre tais valores, distinto do observado por Carneiro (2006) para a cidade de Ananindeua, cujo cenário na época indicava valor médio de  $40,49\% \pm 5,37\%$  ( $n = 8$ ), revelando assim uma provável alteração temporal nesse conjunto de categoria de resíduos, que pode ser decorrente do desvio da coleta convencional para a coleta seletiva ou, ainda, a substituição de matérias-primas em processos produtivos referentes ao ciclo de produção de tais materiais.

Com relação, ao potencial de materiais inertes (rejeitos e/ou baixo potencial econômico para a reciclagem) o panorama, em termos médios, é o seguinte:

- ♦  $15,13\% \pm 2,77\%$  ( $n = 3$ ) para Ananindeua (Figura 4a);
- ♦  $18,71\% \pm 4,08\%$  ( $n = 20$ ) para Belém (Figura 4b); e,
- ♦  $19,44\% \pm 1,88\%$  ( $n = 05$ ) para Marituba (Figura 4c).

Para esse grupo de materiais os valores em questão obtidos nos três municípios sugerem, a princípio, convergência, necessitando para etapa futura de tomada de decisão, investigação quanto a possibilidade de recuperação energética de resíduos sólidos e/ou destinação desses em aterro sanitário de rejeito, caso não se identifique tal capacidade.

Nas Tabelas 3, 4 e 5 pode-se observar os intervalos de confiança (IC) realizados por categoria de materiais, para os municípios de Ananindeua, Belém e Marituba, de modo a se visualizar a amplitude dessas frações.

Ao se analisar tais resultados da presente avaliação estatística de inferência, esses mostram claramente que quanto maior o número de campanhas realizadas para identificação do percentual dos RSU nesses municípios, maior é o nível de confiança atingido para o IC obtido, sendo observado o seguinte ordenamento crescente  $PMB > PMM > PMA$ .



Tabela 3 – Resumo do intervalo de confiança (IC) para composição gravimétrica do município de Ananindeua

ANANINDEUA					
Tipo de RSU	N	Mediana [%]	Confiança atingida [%]	Intervalo de Confiança (IC)	
				Inferior [%]	Superior [%]
Papel/papelão (PP)	3	13,00	75,00	6,40	17,30
Plástico mole (PM)	3	3,90	75,00	3,50	5,50
Plástico duro (PD)	3	4,70	75,00	3,60	5,10
PET/PP	3	2,50	75,00	2,50	3,70
Embalagem Tetra Pak® (ETP – longa vida)	3	0,40	75,00	0,40	0,70
Metais ferrosos (MF)	3	2,00	75,00	1,60	3,20
Alumínio (Al)	3	0,90	75,00	0,80	1,60
Tecidos/trapos (TT)	3	4,00	75,00	3,40	7,90
Vidros	3	2,50	75,00	2,20	4,30
Resíduos orgânicos biodegradáveis (ROB = restos de alimentos)	3	48,40	75,00	46,30	57,20
Entulho	3	2,80	75,00	1,20	3,20
Rejeitos	3	7,60	75,00	7,00	8,30
Outros	3	3,30	75,00	2,90	4,20

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 4 – Resumo do intervalo de confiança (IC)  
para composição gravimétrica do município de Belém

<b>BELÉM</b>					
<b>Tipo de RSU</b>	<b>N</b>	<b>Mediana [%]</b>	<b>Confiança atingida [%]</b>	<b>Intervalo de Confiança (IC)</b>	
				<b>Inferior [%]</b>	<b>Superior [%]</b>
Papel/papelão (PP)	20	6,01	95,00	5,43	6,73
Plástico mole (PM)	20	3,55	95,00	2,96	4,37
Plástico duro (PD)	20	5,26	95,00	4,64	5,86
PET/PP	20	3,11	95,00	2,64	3,70
Embalagem Tetra Pak® (ETP – longa vida)	20	1,06	95,00	0,87	1,27
Metais ferrosos (MF)	20	2,82	95,00	2,30	3,62
Alumínio (Al)	20	1,04	95,00	0,88	1,33
Tecidos/trapos (TT)	20	4,77	95,00	4,20	5,60
Vidros	20	2,25	95,00	1,80	2,77
Resíduos orgânicos biodegradáveis (ROB = restos de alimentos)	20	51,25	95,00	49,09	53,46
Entulho	20	5,00	95,00	3,66	6,35
Rejeitos	20	8,44	95,00	7,32	9,59
Outros	20	4,07	95,00	3,27	4,89

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 5 – Resumo do intervalo de confiança (IC) para composição gravimétrica do município de Marituba

MARITUBA					
Tipo de RSU	N	Mediana [%]	Confiança atingida [%]	Intervalo de Confiança (IC)	
				Inferior [%]	Superior [%]
Papel/papelão (PP)	5	6,73	93,75	6,30	7,78
PET/PP	5	1,94	93,75	1,81	2,46
Embalagens PEAD + PVC	5	2,63	93,75	1,84	3,29
PP_5 (= Embalagens de polipropileno)	5	0,66	93,75	0,63	0,99
LDPE (= Filme plástico PEAB)	5	8,67	93,75	6,35	10,37
PS (= Isopor)	5	0,86	93,75	0,76	2,02
Outros plásticos	5	0,95	93,75	0,81	2,05
Embalagem Tetra Pak® (ETP – longa vida)	5	0,66	93,75	0,51	0,92
Metais ferrosos (MF)	5	1,35	93,75	0,92	1,67
Alumínio (Al)	5	0,58	93,75	0,52	1,17
Tecidos/trapos (TT)	5	11,06	93,75	9,85	14,77
Vidros	5	2,53	93,75	1,45	3,16
Madeira	5	0,41	93,75	0,10	0,90
Resíduos perigosos	5	0,11	93,75	0,00	0,55
Finos (< 20 mm)	5	1,97	93,75	0,99	2,55
FCEE (= Fios, cabos de eletricidade, eletrônicos)	5	2,11	93,75	0,00	2,32
TP (= Papel higiênico)	5	5,09	93,75	2,45	5,45
Resíduos orgânicos biodegradáveis (ROB = restos de alimentos)	5	42,11	93,75	41,63	44,47
Outros	5	8,07	93,75	6,66	12,80

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Diante dessa constatação da necessidade em se ter a devida confiabilidade estatística para composição gravimétrica de RSU, sugere-se que o número de amostras compatível com o universo da pesquisa, siga a orientação:

- ♦ *População < 200.000 habitantes*: cinco amostras, no mínimo, para gravimetria de RSU;
- ♦ *População > 200.000 habitantes*: dez amostras, no mínimo, para gravimetria de RSU.

Tal orientação pode ser alterada, dependendo, entre outros fatores, dos objetivos da caracterização gravimétrica de RSU e dos recursos (humanos, materiais e financeiros) disponíveis. Contudo, não se pode negligenciar a validade de tal ensaio, pois cada vez mais o conhecimento sobre os distintos materiais envolvidos nesse ensaio, irá fazer a diferença para a adoção de uma rota tecnológica de tratamento e/ou destinação de RSU fundamentada na sustentabilidade econômica e na proteção ambiental.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Com base nos resultados do presente trabalho foram obtidas as seguintes conclusões:

- ♦ Em termos quantitativos a CPTR de Marituba (PA) operou com média de  $1330,3 \pm 58,1$  t/dia, tendo se observado valores médios da geração *per capita* de RSU destinados a CPTR de Marituba (PA) de 0,48 kg/hab.d-PMA, 0,63 kg/hab.d-PMB e 0,43 kg/hab.d-PMM, sendo o município de Belém responsável por demandar de 69,5% a 70,9% da massa de RSU para o tratamento e disposição final adequada;
- ♦ Os dados quantitativos também revelaram que ao se estimar a população equivalente para os GG-RSU (a partir do valor médio de 0,51 kg/hab.d, obtém-se valor médio de 145.662 hab, o qual propicia na geração de RSU o seguinte ordenamento crescente PMB > PMA > GG-RSU > PMM;
- ♦ A composição gravimétrica realizada para Ananindeua, Belém e Marituba revelou que a fração devido ao conteúdo orgânico é a predominante entre os distintos tipos de materiais segregados, e que essa varia de 42,4% (mínimo) até 51,2% (máximo) e que a sua variabilidade está relacionada ao porte do município, número de roteiros de coleta, estrato social (padrão de classe baixa, média baixa-média alta e misto), sazonalidade (chuvoso e menos chuvoso);



- ♦ Em média  $28,43\% \pm 3,54\%$  dos RSU gerados por Ananindeua, Belém e Marituba se constitui de material com potencial de ser reciclado e/ou entrar numa rota de logística reversa. Enquanto, que  $17,76\% \pm 2,91\%$  se refere a materiais inertes (rejeitos e/ou baixo potencial econômico para a reciclagem);
- ♦ A análise de intervalo de confiança (IC) demonstrou ser uma ferramenta importante para se obter a confiabilidade quanto a obtenção e validação da composição gravimétrica de RSU, sendo obtido, níveis de confiança de 75,0% para Ananindeua, 93,75% para Marituba e de 95% para Belém.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP) e ao Ministério Público do Pará (MPPA) pelo acordo firmado junto ao TAC-Processo nº 0801228-09.2017814.01333, que permitiu desenvolver na área de resíduos sólidos na Região Metropolitana de Belém o estudo intitulado "*Monitoramento das atividades decorrentes do plano emergencial na área da CPTR de Marituba (PA) para ações do tratamento do lixiviado e de emissão de gases*" durante o período de 2018 a 2021, e que possibilitou a realização do presente artigo.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 22 set. 2022.

ANANINDEUA. [Prefeitura Municipal]. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Ananindeua (PA)**. Ananindeua: Secretaria Municipal de Serviços Urbanos (SEURB), Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE), dezembro 2015.

BELÉM. [Prefeitura Municipal]. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém (PA)**. Relatório 3.2 – Diagnóstico e Propostas Regionais Revisão 2. Belém (PA), 2020.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 11 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 06 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 05 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 04 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços



técnicos especializados. D.O.U. de 16.07.2020, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

CARNEIRO, Paulo Fernando Norat. **Caracterização e avaliação da potencialidade econômica da coleta seletiva e reciclagem dos resíduos sólidos domiciliares gerados nos municípios de Belém e Ananindeua - PA**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Instituto de Tecnologia (ITEC), Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006. Disponível em: <http://www.repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/1899>. Acesso em: 12 out. 2022.

FERNANDES, Giovanna Loiola; SANTOS, Ivan Felipe Silva; SILVA, Hellen Luisa Castro e; BARROS, Regina Mambeli. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, 67-77, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200210>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ZRswbT3dZ9ryJFWBGtmhXmr/>. Acesso em: 31 maio 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/calendario.shtm>. Acesso em: 12 jan. 2022.

IMBIRIBA, Breno C. de O.; RAMOS, Jade Rebeqa de S.; SILVA, Renato de Sousa; CATTANIO, José. Henrique; COUTO, Luciano Louzada do; MITSCHHEIN, Thomas A. Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon. **Waste Management**, v. 101, p. 28-34, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19306087>. Acesso em: 12 ago. 2022.

JUNQUEIRA, Henrique Santos; MEDEIROS, Diego Lima; COHIM, Eduardo. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos de Feira de Santana: demanda energética e pegada de carbono. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 125-139, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200358>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/9svxKWtCWDJb36b5rdbkHwb>. Acesso em: 31 maio 2022.

LEITE, Carlos Henrique Pereira; MOITA NETO, José Machado; BEZERRA, Ana Keuly Luz. Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 1041-1047, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210311>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/c9q3cL4bMT4L4KP7zCMxzCP/>. Acesso em: 31 out. 2022.

MARITUBA. [Prefeitura Municipal]. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) de Marituba (PA)**. Relatório do Plano PGIRS – Documento consolidado, Marituba (PA), 2019.

MARITUBA. [Prefeitura Municipal]. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Marituba (PA)**. Produto 3 – Diagnóstico do Saneamento Básico, Contrato nº 01-0102018/6 – PMM-TP-SEPLAN. Curitiba: EnvEx Engenharia e Consultoria, 2019.

MENDONÇA, Neyson Martins; RUSSO, Mário Augusto Tavares; PENNER, Giovanni Chaves; ALMEIDA, Hélio da Silva; ASSUNÇÃO, Maurilo André da Cunha; BRANDAO, Isaque Wilkson de Sousa; SILVA, Rafael Haruo Yoshida; PEREIRA, Filipe Castro; SANTOS, Filipe Vilhena dos; MACHADO, Paulo Christian de Freitas Machado; MARTINS, Rubens Takeji Aoki Araujo; GONCALVES, Moisés Marçal. **Relatório Final do Estudo “Monitoramento das atividades decorrentes do plano emergencial na área da CPTR de Marituba (PA) para ações do tratamento do**



**lixiviado e de emissão de gases"**. Belém (PA): Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP), 2021.

MENEZES, Rosana Oliveira; CASTRO, Samuel Rodrigues; SILVA, Jonathas Batista Gonçalves; TEIXEIRA, Gisele Pereira; SILVA, Marco Aurélio Miguel. Análise estatística da caracterização gravimétrica de resíduos sólidos domiciliares: estudo de caso do município de Juiz de Fora, Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 271-282. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019177437>. Disponível: <https://www.scielo.br/j/esa/a/gvKmZhyHR9V9WKC3QyRr7FS>. Acesso em: 11 jun. 2019.

PLANARES – **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. [Coordenação de André Luiz Felisberto França *et al.*] Brasília, DF: MMA/SQA – Ministério do Meio Ambiente / Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf](https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

RUSSO, Mário Augusto Tavares; MENDONÇA, Neyson Martins; BÍSCARO FILHO, Mário Henrique de Lima; DELFINO, Ismail Bastos; MARINHEIRO, Luis Antônio Paulo Martins; PEREIRA, Manuel Fernando Paulo; PENNER, Giovanni Chaves; ALMEIDA, Hélio da Silva; ALENCAR JÚNIOR, Júlio Augusto de; ASSUNÇÃO, Maurilo André da Cunha; GONCALVES, Moisés Marçal. **Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica, Social e Ambiental Comparativa, de alternativas para a gestão dos Resíduos Sólidos de Marituba para os próximos 20 anos, na forma isolada ou em consórcio de municípios da Região Metropolitana de Belém (RMB), para apoio à tomada de decisão**. Belém: Fundação de Amparo e Desenvolvimento da Pesquisa (FADESP), 2019.

SILVA, Rodrigo Cândido Passos da; COSTA, Amanda Rodrigues Santos; EL-DEIR, Soraya Giovanetti; JUCÁ, José Fernando Thomé. Setorização de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares por técnicas multivariadas: estudo de caso da cidade do Recife, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 821-832, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522020200205>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/TWWTLKSDgpDcJZmjV7rBCDM>. Acesso em: 11 abr. 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Série Histórica de Manejo de Resíduos Sólidos (2002 a 2019)**. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), 2019. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 15 out. 2022.

TORRES, Vitor Alvarenga; LANGE, Liséte Celina. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valoração energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 25-30, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220210221>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/txchYmR58KSfRMSqT59Kkvb/>. Acesso em: 20 out. 2022.



# PLATAFORMA DE *E-LEARNING* “*TEACH4WASTE*” PARA O DESENVOLVIMENTO DE CAPACIDADES NA GESTÃO DE RESÍDUOS

## *E-LEARNING PLATFORM “TEACH4WASTE” FOR CAPACITY BUILDING IN WASTE MANAGEMENT*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

PFEIFFER, Andrea; FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Plataforma de e-learning “teach4waste” para o desenvolvimento de capacidades na gestão de resíduos. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Andrea Pfeiffer**

Engenheira ambiental, obteve seu mestrado em 2015. De 2013 a 2022 ela trabalhou como assistente de pesquisa na Technische Universität Braunschweig no Instituto de Engenharia Hidráulica, Departamento de Gerenciamento de Resíduos e Recursos.

E-mail: andrea.pfeiffer@tu-bs.de

### **Klaus Fricke**

Professor e Doutor em engenharia. Consultor em gestão de resíduos sólidos e recursos com atividades de projetos nacionais e internacionais. Atuou como *Chief Executive Officer* (CEO) e sócio da *Ingenieurgesellschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH*, com equipe de setenta empregados em escritórios na Alemanha, Reino Unido e Luxemburgo. Foi o inventor da coleta seletiva de orgânicos na Alemanha em projeto desenvolvido na cidade de Witzenhausen, em 1983. Atuou no planejamento e implementação de mais de sessenta plantas de compostagem e biodigestão e, ainda, mais de vinte plantas de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). Atuou, por 25 anos, como Diretor do Departamento de Gestão de Resíduos e Recursos na *Technische Universität Braunschweig* (TUBS), tendo como foco de suas atividades a internacionalização da gestão sustentável de resíduos, especialmente no campo da biotecnologia. Com mais de quarenta anos de experiência, é autor em mais de 250 publicações.

E-mail: klaus.fricke@tu-bs.de

### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). *Master in Business Administration* (MBA) em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ); *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID);



e; *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico). Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos temáticos para o PLAN\$AB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: [christiane@terramelhor.com.br](mailto:christiane@terramelhor.com.br)

## RESUMO

A plataforma moodle Teach4Waste (<https://teach4waste.com/>) foi desenvolvida pela Technische Universität Braunschweig em parceria com a Rede Virtual Brasil-Alemanha, para promover a internacionalização do ensino e o estabelecimento de cooperações voltadas para a formação de recursos humanos para a inovação, por meio de cursos ofertados em programas de pós-graduação, a partir de modelo de aplicação à distância. O intuito dessa iniciativa é o nivelamento de informações atualizadas, disponíveis tanto no meio acadêmico quanto no mercado, através da expansão de material bibliográfico e do aprimoramento de grade curricular. Neste sentido, a Teach4Waste disponibiliza conteúdos da área de gestão de resíduos sólidos com alto impacto na redução de gases de efeito estufa. Esses materiais poderão dar suporte no desenvolvimento de projetos de pesquisa aplicada introduzidos em larga escala, servindo de ferramenta de integração entre o setor acadêmico, público e privado. Dessa forma, a plataforma se abre, portanto, as portas para a inovação e a cooperação internacional, por meio de acesso democrático às informações mais atualizadas, com intuito de garantir a universalização da gestão sustentável de resíduos sólidos para toda a sociedade.

Palavras-chave: Plataforma digital. Capacidades. Resíduos. Clima. Gestão sustentável.

## ABSTRACT

The Teach4Waste moodle platform (<https://teach4waste.com/>) was developed by Technische Universität Braunschweig in partnership with the Virtual Network Brazil-Germany, to promote the internationalization of education and the establishment of cooperation for the training of human resources for innovation, through courses offered in graduate programs, from a distance learning model. The purpose of this initiative is the leveling of updated information, available both in the academic environment and in the market, through the expansion of bibliographic material and the improvement of the curricular grid. In this sense, Teach4Waste provides content from the area of solid waste management with high impact on GHG reduction. These materials can support the development of applied research projects introduced on a large scale, serving as a tool for integration between the academic, public and private sector, opening the doors for innovation and international cooperation, through democratic access to the most up-to-date information, in order to ensure the universalization of sustainable solid waste management for the whole society.

Keywords: Digital Platform. Capacities. Waste. Climate. Sustainable management.



## 1 SITUAÇÃO INICIAL

O gerenciamento sustentável de resíduos e recursos é um pré-requisito essencial para o fornecimento futuro de recursos. Com 8 a 12% do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE), o setor de gestão de resíduos e recursos tem um potencial muito alto de mitigação de GEE, especialmente em países em desenvolvimento e emergentes (Fricke; Pereira, 2015). O setor de gestão de resíduos e recursos desempenha, naturalmente, um papel fundamental no combate ao lixo marinho. Os países em desenvolvimento e as economias emergentes também têm um potencial de desenvolvimento muito elevado nesta área problemática.

Os desafios descritos podem ser enfrentados desenvolvendo e implementando a gestão sustentável de resíduos e recursos. Especialmente nos países em desenvolvimento e emergentes, há uma pressão extraordinariamente alta para agir neste sentido, tanto em termos do escopo quanto do prazo para a implementação das medidas.

Estão disponíveis sistemas e tecnologias para a gestão sustentável de resíduos e recursos para países em desenvolvimento e emergentes – com exceção das adaptações necessárias. O pessoal qualificado, por outro lado, como pré-requisito obrigatório para o desenvolvimento e implementação bem-sucedida, não está suficientemente disponível na maioria dos casos. Isto inclui todos os níveis de ação, desde a elaboração de políticas e tomada de decisões até o planejamento, construção e operação da planta, o financiamento, a estrutura legal para licenciamento e monitoramento, bem como a utilização e comercialização dos produtos ou matérias-primas secundárias que podem ser produzidas. A área de pesquisa e desenvolvimento também é afetada, como base para o desenvolvimento e fornecimento de soluções adaptadas. Por último, mas não menos importante, faltam os pré-requisitos para criar uma ampla consciência ambiental na sociedade através de medidas educacionais direcionadas para o desenvolvimento sustentável.

A provisão precoce de pessoal qualificado é vista como um pré-requisito para a introdução bem-sucedida da gestão sustentável de resíduos. A transferência de *know-how* desempenha, portanto, um papel fundamental na transferência de tecnologia de sucesso. Sem pessoal adequadamente qualificado, o gerenciamento apropriado de resíduos não pode ser praticado, mesmo com a melhor tecnologia disponível. A



experiência na implementação de uma gestão de resíduos ambientalmente correta e com economia de recursos nos países em desenvolvimento e nos países recém-industrializados mostra que o foco muitas vezes é quase exclusivamente nos aspectos organizacionais e técnicos. A capacitação geralmente desempenha apenas um papel subordinado.

Com poucas exceções, a área temática de gestão de resíduos e recursos só existe de forma limitada nos currículos das instituições educacionais dos países em desenvolvimento e emergentes; isto inclui tanto o setor universitário quanto o não universitário. O ensino e a formação profissional, como o "sistema dual" alemão, que interliga estreitamente a escola de local de aprendizagem (teoria) e a empresa (prática), também não é conhecido. Os materiais didáticos, se disponíveis, geralmente têm o clássico "caráter de livro de texto", ou seja, são em grande parte livres de "valores empíricos da prática" disponíveis.

Uma alta demanda por estratégias de treinamento direcionadas para o setor de gerenciamento de resíduos é derivada, flanqueada pelo fornecimento de ferramentas e processos de ensino e aprendizagem apoiados pela mídia.

Outro aspecto que caracteriza o contexto do ensino e da aprendizagem é o rápido desenvolvimento de inovações e o fluxo sempre crescente de informações que dele depende. Conseqüentemente, a vida de trabalho moderna não é mais determinada pelo capital, pelas matérias-primas e pela produção de mão de obra pura das pessoas. O conhecimento deve ser entendido como um recurso igualmente importante para os processos de produção (Kade; Seitter, 2003).

Neste contexto, pode-se observar que inovações estão sendo produzidas constantemente, o que, às vezes, também influencia os sistemas já existentes. A pura acumulação de conhecimento antes de entrar na vida profissional, como ainda era praticável no passado, não é mais apropriada hoje em dia. Ao contrário, é necessária a aprendizagem ao longo da vida de acordo com as necessidades individuais (Kraemer; Müller, 2001).

A tarefa-chave do futuro é, portanto, gerenciar de forma otimizada o conhecimento dos recursos. Entretanto, a simples disponibilização de informações ainda não é uma gestão do conhecimento, pois o conhecimento só pode surgir a partir de modelos e números abstratos ao compreender as inter-relações e



dependências. Se este conhecimento leva a uma mudança de comportamento, por exemplo, na otimização de processos, isto corresponde à definição de aprendizagem de acordo com Anderson (Kiesel; Koch, 2012). Sob estas condições, deve ser possível apresentar o conhecimento de uma maneira fácil de entender, expressá-lo com precisão e, acima de tudo, mantê-lo atualizado. Caso contrário, a gestão eficaz do conhecimento não pode ser alcançada a longo prazo.

## 2 RECURSOS EDUCACIONAIS ABERTOS

A educação é um direito humano e a chave para o desenvolvimento individual e social. Um dos objetivos mais importantes da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco) é, portanto, a participação de todas as pessoas na educação de alta qualidade. A educação para todos e o acesso global cada vez mais importante à informação e ao conhecimento são blocos centrais de construção das sociedades modernas do conhecimento, que a Unesco quer promover.

Ao mesmo tempo, a proteção da propriedade intelectual com o objetivo de salvaguardar a criatividade como uma área central da cultura é uma preocupação importante. Hoje, a Internet permite o acesso à informação em todo o mundo e a qualquer momento. Ela oferece novas possibilidades para o intercâmbio de conhecimentos e o desenvolvimento colaborativo do conhecimento, que também estão sendo cada vez mais utilizados na educação os "Recursos Educacionais Abertos" (OER = *Open Educational Resources*): Os criadores de materiais educacionais os tornam disponíveis sob uma licença aberta, permitindo aos usuários acessar, usar, editar e compartilhar os materiais gratuitamente, com poucas ou nenhuma restrição. Estes materiais variam de planilhas para aulas escolares e livros didáticos a cursos completos em uma universidade com materiais em vídeo e áudio (Bernecker, 2013).

O primeiro Congresso Mundial da Unesco sobre Recursos Educacionais Abertos foi realizado em 2012. A declaração final, a "Declaração de Paris sobre a OER", convida os Estados membros da Unesco a promover a criação e o uso de materiais educacionais abertamente licenciados.

O acesso aberto a materiais educacionais oferece uma grande oportunidade para promover a educação e o conhecimento para todas as pessoas. O objetivo é reduzir as sérias restrições ao acesso de muitas pessoas à educação em todo o mundo. Além disso, a



qualidade da educação também pode se beneficiar se as licenças abertas permitirem o desenvolvimento conjunto de recursos educacionais.

Entretanto, ainda há muitas questões fundamentais, por exemplo, sobre a garantia de qualidade da OER, sobre sua capacidade de descoberta e sobre modelos de financiamento que sejam sustentáveis a longo prazo. Além disso, o complexo campo da OER deve ser considerado de forma diferenciada, dependendo do nível e da área de educação. Um exame minucioso do tema é necessário para poder utilizar o potencial da OER para a promoção da educação e do conhecimento.

### 3 CONCEITO *TEACH4WASTE*

O projeto "*teach4waste*" descrito neste artigo serve como um componente de "capacitação" para a implementação da gestão sustentável de resíduos para países em desenvolvimento e emergentes, mas também para países europeus que estão menos desenvolvidos em termos de gestão de resíduos. O núcleo do projeto é a plataforma de *e-learning teach4waste*, uma unidade interativa de treinamento e informação multimídia para o setor de gestão de resíduos e recursos. Adota a estratégia de Recursos Educacionais Abertos e pretende contribuir para isso.

#### 3.1 E-LEARNING

O *e-learning* abrange todas as formas de aprendizagem nas quais os meios digitais são usados para a apresentação e transmissão de materiais de aprendizagem, mas, também, para melhorar a comunicação entre professores e alunos (Kerres; Preußler, 2012). Assim, a prática já comum de disponibilizar roteiros e *slides* de palestras via *websites* de institutos individuais ou sistemas centrais de gerenciamento de aprendizagem também se insere na área de *e-learning*. Este é apenas um primeiro passo para o setor de ensino ou treinamento eletrônico. O caráter de apoio está claramente em primeiro plano aqui, pois estas ofertas são projetadas para complementar os clássicos eventos presenciais na forma de seminários ou palestras. A função do componente de apoio dos eventos no local também deve continuar a ser usada dentro da estrutura do *teach4waste*.

O fornecimento de materiais didáticos e de aprendizagem utilizáveis de forma autônoma sobre o tema da gestão sustentável de resíduos desempenha um papel importante, especialmente para a capacitação em países em desenvolvimento e emergentes, uma vez



que as instalações educacionais adequadas são frequentemente limitadas ou só podem ser alcançadas com esforço razoável.

O objetivo do *teach4waste* é, portanto, fornecer uma introdução ao autoestudo conduzido intrinsecamente e o passo para dar aulas para outros. Através das informações *on-line* gratuitas disponíveis, todos os interessados devem poder se beneficiar do *teach4waste*. Isto significa que o treinamento ou a educação superior é possível mesmo sem as instituições educacionais clássicas, possivelmente com restrições de admissão e grande esforço logístico. O aspecto da melhoria da comunicação entre professores e alunos pode ser levado em conta por meio de serviços de mensagens baseados em plataformas, fóruns e horas de consulta em formato de bate-papo.

Os usuários podem aprender o conteúdo em seu próprio ritmo e repetir certos tópicos conforme necessário. Além disso, a aquisição de conhecimentos no contexto digital é mais interativa do que em estudos de literatura pura. Através da integração de hipertextos, vídeos e gravações de som, o usuário é repetidamente solicitado a clicar independentemente e, além das impressões visuais abstratas, também pode experimentar estímulos visuais e auditivos vívidos. Aqui, o aprendiz é acomodado em termos de estabelecer o foco de seus próprios interesses (Zwerenz, 2008).

### 3.2 ABORDAGENS PEDAGÓGICAS E DIDÁTICAS

Segundo Schoop e Anders (2001), o bom ensino se baseia em três pilares: simplicidade, brevidade e consistência:

- ♦ **Simples:** o conteúdo deve ser apresentado da forma mais simples possível sem cair na banalidade ou omitir detalhes relevantes.
- ♦ **Em resumo:** a descrição concisa dos fatos e contextos sem perder a visão focalizada do assunto e divagando em trivialidades.
- ♦ **Consistentes:** fatos e conexões devem ser desenvolvidos com rigor e *links* para outros tópicos precisam de atenção especial para evitar tanto repetições desnecessárias quanto grandes lacunas na compreensão.

Além destas regras básicas, o conhecimento sobre diferentes formas de aprendizagem, objetivos de aprendizagem, bem como uma análise sólida do grupo alvo, é essencial. Basicamente, duas formas de aprendizagem podem ser distinguidas uma da outra. Uma é a aprendizagem formal em instituições educacionais e a outra é a aprendizagem informal.



O **aprendizado formal** ocorre sempre no contexto de instituições educacionais, como as universidades. O aprendiz pretende adquirir novas habilidades, ele age intencionalmente. O professor acompanha este processo e prepara o respectivo conteúdo de acordo com os princípios da didática. A habilidade a ser adquirida é claramente formulada em uma tarefa correspondente e finalmente validada em uma situação de exame correspondente. Isto, também, resulta em uma motivação maioritariamente extrínseca. O exame fornece o incentivo para ser recompensado pelos melhores resultados possíveis ou para evitar sanções por maus resultados (Fölsch, 2010). Em contraste a isto, trata-se da **aprendizagem informal**, fora das instituições educacionais. A característica decisiva aqui é que o aprendizado ocorre sem uma tarefa explícita (Fölsch, 2010). O aluno se motiva inicialmente por interesse próprio e entusiasmo pelo respectivo tópico, ele está intrinsecamente motivado. Os sucessos de aprendizagem já alcançados e ainda a curiosidade insatisfeita sobre mais detalhes formam o incentivo para que o aluno continue aprendendo. *Teach4waste* é voltado para o uso de ambas as formas de aprendizagem.

Não apenas a estrutura de aprendizagem determina a forma na qual o conteúdo é apresentado, mas também o objetivo de aprendizagem. De acordo com Bloom, estes podem ser decompostos da seguinte forma. Distinguem-se três dimensões, que são ainda subdivididas em níveis horizontais. Assim, os objetivos de aprendizagem podem conter uma tarefa cognitiva, afetiva ou psicomotora (Walzik, 2015).

Com o *teach4waste*, o foco está principalmente nos objetivos de aprendizagem cognitiva:

- ◆ Saber;
- ◆ Compreender;
- ◆ Aplicar;
- ◆ Analisar;
- ◆ Mesclar (síntese);
- ◆ Avaliar (avaliação).

Partindo da base de conhecimentos especializados, as conexões podem ser reconhecidas, o que finalmente leva à aplicação. A aplicação segura do conhecimento permite ao aprendiz analisar novas situações ou ligar diferentes teorias e finalmente ser capaz de fazer uma avaliação, também sob novas condições de fronteira. Estes seis objetivos de aprendizagem cognitiva são diretamente interdependentes; sem conhecimento, os processos não podem ser compreendidos ou mesmo analisados.



Objetivos afetivos exigem um aumento de competência em suas próprias ações. Assim, na primeira etapa, o aprendiz deve prestar atenção ao assunto e observá-lo. Em outras palavras, a consciência de um tópico deve ser despertada. Com base nisso, são ensinadas as reações apropriadas e a avaliação dos padrões de comportamento. Somente quando esta capacidade está presente, um sistema de valores estruturado pode ser construído e o aprendiz pode encontrar sua própria realização nisto. Dentro da estrutura do *teach4waste*, as metas de aprendizagem afetiva só podem ser promovidas a longo prazo e não diretamente, mas muito mais através do desenvolvimento de uma atitude. Entretanto, isto também pode se estender diretamente às disciplinas adjacentes à gestão sustentável de resíduos.

Os objetivos de aprendizagem psicomotora relacionados com a aprendizagem de habilidades físicas não podem e não devem ser cobertos pela plataforma de *e-learning teach4waste*. Para isso, são necessários eventos presenciais, tais como "workshops práticos", que também se dirigiram apenas aos alunos que trabalham na prática.

### 3.3 GRUPO ALVO E CAMPO DE APLICAÇÃO

O grupo alvo para o *teach4waste* é amplo. No entanto, mediante um exame mais atento, três grupos podem ser identificados. Além daqueles que devem ser informados, os alunos formam o maior grupo, seguidos por aqueles que estarão ensinando no futuro. As pessoas a serem informadas não têm nenhuma ou muito pouca experiência na gestão de resíduos. Sua motivação para aprender é intrínseca, eles aprendem por entusiasmo com o tema. Pode-se supor que a leitura de textos muito longos com muitos termos técnicos terá um efeito dissuasor. Entretanto, qualquer forma interativa de apresentação pode despertar a curiosidade deles.

Em contraste, os aprendizes são predominantemente motivados de forma extrínseca, a aquisição de conhecimentos para qualificação adicional direcionada está em primeiro plano, juntamente com a motivação para o autorrealização. Este grupo já tem uma compreensão básica da gestão de resíduos e atribui particular importância à interconexão do conteúdo, bem como uma apresentação detalhada, que é, no entanto, reduzida ao essencial para a aplicação na profissão. O aprendiz precisa de uma rápida visão geral com a possibilidade de consolidação seletiva em áreas temáticas individualmente relevantes.

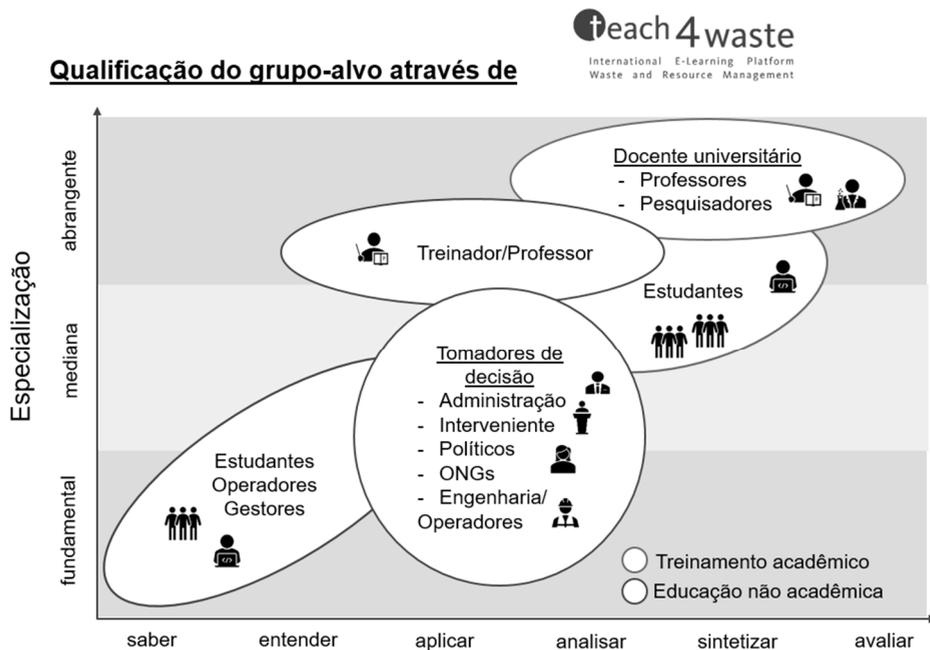
Os professores já possuem um amplo conhecimento prévio e devem ser apoiados na implementação de seu próprio ensino através



do fornecimento dos materiais. A motivação pode ser descrita principalmente como intrínseca. A transmissão do próprio conhecimento do assunto está em primeiro plano. A motivação extrínseca só está presente no caso de trabalho pelo empregador ou remuneração para completar com sucesso os alunos. Este grupo-alvo deve ser fornecido com uma ampla gama de materiais de forma clara, com os quais pontos focais individuais podem ser definidos ou com os quais elaborações próprias também podem ser incorporadas com esforço gerenciável.

A Figura 1 visualiza os representantes dos diferentes grupos-alvo no portfólio de competência cognitiva acima do nível de conhecimento do assunto. De acordo com estes três grupos-alvo, emerge que tanto a informação como o material didático e didático são necessários.

Figura 1 – Qualificação do grupo-alvo



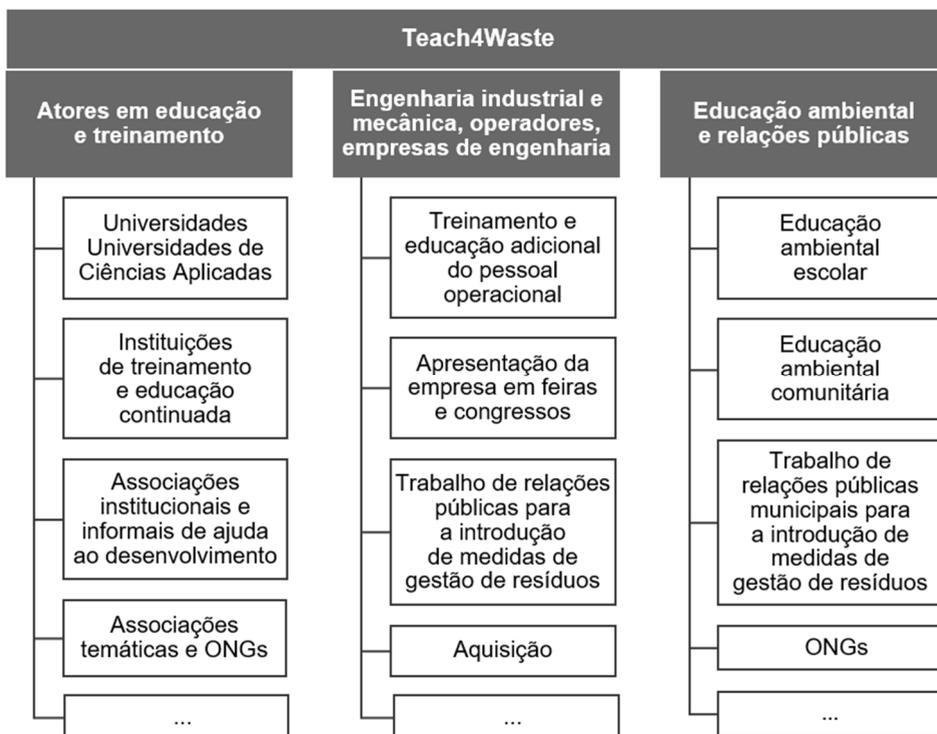
A taxonomia cognitiva da Bloom de objetivos de aprendizagem

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A Figura 2 mostra as áreas de utilização e aplicação.



Figura 2 – Usuários e áreas de aplicação do teach4waste



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O intuito dessa iniciativa é o nivelamento de informações atualizadas, disponíveis tanto no meio acadêmico quanto no mercado, através da expansão de material bibliográfico e do aprimoramento de grade curricular.

### 3.4 REQUISITOS DE MATERIAL

De acordo com os três grupos-alvo identificados, os requisitos para o material foram trabalhados.

Isto resulta em material informativo para o consumidor intrinsecamente motivado que deve ser condensado ao essencial, fácil de entender e, sobretudo, descritivo. Com pouco tempo e esforço de aprendizagem, deve ser fornecida uma visão geral bem fundamentada do tópico e uma explicação dos termos técnicos relevantes utilizados. A fim de promover o efeito de aprendizagem, exemplos concisos, assim como formas de apresentação que podem ser experimentadas, podem dar uma contribuição significativa. Acima



de tudo, um *design* interativo do *website*, que pode ser experimentado intuitivamente, desperta ou mantém a curiosidade para um maior envolvimento com a gestão sustentável de resíduos.

As necessidades dos alunos vão claramente além das dos consumidores. Aqui, uma visão geral e a explicação dos termos técnicos não são mais suficientes. Ao contrário, materiais mais detalhados e, principalmente, contextualmente ligados são necessários para o aluno, de modo que não apenas o primeiro nível das metas de aprendizagem cognitiva (o conhecimento factual) seja criado, mas também as metas de aprendizagem que, até e incluindo a competência de avaliação, podem ser alcançadas.

Partindo desta base, o *teach4waste* pode então, também, alcançar uma sensibilização de conexões e dependências com outras áreas temáticas e alcançar metas de aprendizado afetivo através disto. Ao contrário dos consumidores, as exigências sobre a elaboração criativa dos conteúdos são secundárias no caso de alunos consistentemente motivados de forma extrínseca, já que seu próprio sucesso se reflete no resultado do exame e não no engajamento direto com o material. No entanto, um conteúdo bem preparado torna o processo de aprendizagem mais atraente e pode idealmente despertar a motivação intrínseca no indivíduo.

O grupo alvo de professores tem a exigência de receber um bom material de formação. Especialmente no contexto do *ensino à distância* e dos programas de *treinamento de instrutores* baseados na *web*, os materiais autoexplicativos são essenciais.

Além disso, referências à literatura que vão além do clássico material didático são um importante alicerce para a transferência de conteúdo tecnicamente qualificada e metodologicamente confiável no futuro. Ao criar os materiais para os três grupos-alvo ao mesmo tempo, é possível alcançar um nível muito alto de consistência. Isto tem a vantagem de que os docentes de programas anteriores de treinamento de instrutores em particular já estão familiarizados com o material, tornando o passo de aprendiz a docente muito mais fácil.

### 3.5 FORMAS DE PREPARAÇÃO DO CONTEÚDO

Antes de tudo, é a forma clássica de mídia do texto. Em princípio, qualquer assunto pode ser apresentado como um texto. Entretanto, as conveniências da disponibilidade digital e as ferramentas não devem ser dispensadas. Os chamados *hyperlinks* são usados nos textos *on-line*. No *teach4waste*, estas palavras visualmente



destacadas no texto podem levar a dois resultados diferentes quando clicadas. Por um lado, os termos técnicos são explicados em uma janela *pop-up* e, por outro lado, são criados *links* para os respectivos cursos aprofundados, que servem para uma navegação intuitiva e orientada por interesses.

A explicação dos termos técnicos por meio de janelas *pop-up* tem vantagens para todos os usuários: Os menos educados em gestão de resíduos são confirmados em sua curiosidade e aprendem imediatamente como interagir com a plataforma. Para os usuários já instruídos, por outro lado, eles têm a vantagem de que o fluxo de leitura não é perturbado pela repetição, o que, neste caso, é desnecessário em sua maioria. O enriquecimento dos textos com ilustrações, diagramas e Tabelas tem o objetivo de esclarecer ou resumir em pontos apropriados.

De acordo com as explicações da taxonomia objetiva do aprendizado, o aprendiz deve ser capacitado em todos os níveis, desde o conhecimento puro até a avaliação das medidas de gerenciamento de resíduos. Além disso, o *teach4waste* estabeleceu o objetivo de longo prazo de também transmitir valores afetivos ao aprendiz, para que novas soluções adaptadas de gerenciamento de resíduos possam ser geradas pela observação da situação inicial em combinação com o conhecimento especializado aprendido.

O uso combinado de sequências de vídeo e animação pode fortalecer ainda mais o reconhecimento entre os elementos de planejamento e a implementação prática. O uso de material de vídeo embutido diretamente no ponto relevante do texto é ideal para esta finalidade. Para questões complexas, as animações têm vantagens decisivas sobre os vídeos em termos de simplificação. Além disso, estudos de caso e simulações colocam a própria competência de ação em foco.

Através do uso de outros elementos interativos, o usuário é encorajado a agir. Eles são encorajados a descobrir as coisas por conta própria, clicando nelas. Esta mudança de mídia é intencional a fim de manter a capacidade do usuário de se concentrar durante um período de tempo mais longo e ligar o conteúdo de aprendizado com diferentes impressões perceptuais.

Com relação à educação e treinamento, o aprendiz trabalha a partir da motivação de uma confirmação de sucesso. Dentro da estrutura da plataforma *e-learning*, testes com a emissão de



certificados, por exemplo, podem ser usados para verificar o sucesso do aprendizado. Aqui, no entanto, deve ser feita novamente referência à taxonomia do objetivo de aprendizado de Bloom. Assim, a aprendizagem ou o comportamento só é alterado até que o respectivo objetivo de aprendizagem seja alcançado. Isto coloca exigências no material de aprendizagem e exame, porque somente o que foi ensinado antes pode ser examinado.

Por um lado, isto diz respeito ao nível de detalhe do conteúdo e, por outro lado, à forma como o conteúdo é preparado. Para o *teach4waste*, pequenos questionários são fornecidos no final das unidades para autoteste do que foi aprendido. Estes questionários são exclusivamente perguntas fechadas com uma solução clara, para que o usuário receba um *feedback* qualificado sobre seu nível atual de conhecimento. Além disso, no caso de respostas erradas, há a possibilidade de deixar o aprendiz trabalhar para a solução correta com textos explicativos curtos. A limitação a perguntas fechadas e inequívocas é necessária para as fases de autoaprendizagem, pois o usuário não tem oportunidade imediata de esclarecimento individual, por exemplo, em conversas com especialistas. Se soluções abertas ou mesmo ambíguas fossem usadas neste ponto, haveria o perigo de tirar a alegria de aprender, especialmente de alunos intrinsecamente motivados, através de momentos de frustração.

Naturalmente, o grupo alvo de professores tem acesso a todas as formas de apresentação já expostas. Além disso, são oferecidos conjuntos de *slides* prontos para os respectivos tópicos. A familiaridade com o material didático garante segurança para os palestrantes e, portanto, deve ser vista como um apoio importante no caminho de aluno a palestrante.

Ao contrário das perguntas dos questionários, há perguntas abertas no final dos *slides*. Estes servem para refletir sobre os conceitos e contextos essenciais, em parte a partir de novos pontos de vista. Isto incentiva um engajamento mais profundo com o tema. Ao utilizar estas perguntas abertas, é aconselhável dar ao aprendiz uma oportunidade para o intercâmbio profissional. Nos cursos presenciais, isto é inerente ao sistema através da presença do aluno e do professor no mesmo local. No caso de treinamento *on-line*, os canais de comunicação devem ser discutidos previamente, seja por e-mail, diretamente ao conferencista, ou no fórum, em troca com todo o grupo de aprendizagem. Neste contexto, é aconselhável apresentar de forma transparente as condições estruturais (em que prazo e de que forma o



feedback pode ser esperado), especialmente no caso de intercâmbio via e-mail. Além disso, estão planejados *downloads* de mídia. A principal característica aqui é a versão impressa dos textos *on-line*, de modo que o conteúdo também esteja disponível *off-line*. Além disso, são fornecidas Tabelas gerais, formulários e referências a outras fontes de literatura para facilitar a introdução a um maior desenvolvimento do tópico.

A navegação nos cursos individuais foi projetada de tal forma que os ícones das mídias disponíveis (versão impressa, vídeo, *quizzes*, *slides* de apresentação, material extra) são listados diretamente sob o título e podem ser selecionados diretamente através deles. O Quadro 1 lista os ícones correspondentes com a atribuição dos formulários de mídia armazenados em cada caso.

Quadro 1 – Ícones e mídia depositada para navegação rápida

Ícone	Meio depositado
	Conjunto de <i>slides</i> de apresentação com exercícios integrados e perguntas abertas para reflexão
	Vídeo/Animação
	Versão impressa do texto <i>on-line</i>
	Outras recomendações de literatura
	Questionários para a fase de autoaprendizagem

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).



Desta forma, os usuários têm a opção de trabalhar o tema completamente desde o início ou apenas dar uma olhada em uma das mídias. Esta visita aérea aos cursos pode ser usada para obter uma visão geral, bem como para validar se os interesses próprios são levados em conta neste curso. Ao utilizar a plataforma individualmente, é possível oferecer o conteúdo em diferentes profundidades de acordo com o grupo alvo.

A partir disto, a desvantagem evitável de um grupo alvo muito grande e diversificado também pode ser transformada em uma vantagem. Porque o desenvolvimento direcionado e simultâneo do conteúdo em diferentes níveis de detalhe cria um nível extremamente alto de consistência nos materiais, ao mesmo tempo. Isto tem um efeito positivo, especialmente na área de programas de treinamento de treinadores.

### 3.6 REQUISITOS DE INFRAESTRUTURA

O *Moodle Learning Management System (LMS)* forma a base da infraestrutura de *e-learning* baseada na *web*. É um *software* de código aberto instalado em um servidor *web* que suporta o fornecimento e uso de conteúdo de aprendizagem e fornece ferramentas para o trabalho cooperativo e administração de usuários. O *Moodle LMS* é, portanto, um *software* social que, além da pura transferência de informações, também serve significativamente à comunicação e colaboração humana (Kerres; Preußler, 2012).

O *Moodle* tem as seguintes características essenciais para LMS:

- Uma administração de usuários (*login* com criptografia);
- Um gerenciamento de cursos (cursos, gerenciamento de conteúdo, gerenciamento de arquivos);
- Uma atribuição de papéis e direitos com direitos diferenciados;
- Ferramentas de comunicação (*chat*, fóruns) e ferramentas de aprendizagem (quadro branco, caderno, anotações, calendário etc.);
- A apresentação do conteúdo do curso, objetos de aprendizagem e mídia em um navegador compatível com a rede.

Para a gestão dos usuários, é importante que um administrador supervisione as contas dos usuários. Suas tarefas são: atribuir nomes de usuários; fazer alterações na conta ou excluí-la. Ao atribuir uma conta de usuário, deve-se observar que ela é protegida por uma senha. Isto determina quais direitos o usuário tem. Além de uma administração de usuários, também deve ser criada uma administração de cursos. Todos



os procedimentos administrativos relativos às ofertas de cursos devem ser levados em consideração. Deve ser dada especial atenção a um sistema fácil de usar que pode ser facilmente expandido para incluir outros módulos de assuntos. Um projeto claro dos cursos oferecidos e seu planejamento e implementação, assim como a atualização eficiente dos conteúdos em termos de tempo, promovem a funcionalidade.

O conteúdo do ensino pode ser livremente projetado por instrutores, conferencistas e professores nas chamadas salas de cursos e intuitivamente editado sem maiores conhecimentos prévios. Isto facilita a apresentação de textos, imagens, vídeos, arquivos de som e animações (com uma escolha livre de formato). Além disso, *links* para outros *sites* e livros podem ser adicionados. Os alunos têm uma visão geral das diferentes categorias que contêm os respectivos cursos na página inicial. Lá, o conteúdo dos diferentes cursos pode ser acompanhado, mas também consumido de forma independente, de diferentes maneiras.

O *Moodle* também é projetado para o diálogo entre treinadores e alunos, por um lado, e entre treinadores de instrutores, por outro. Deve ser feita uma menção especial à função de chat e fórum. É apoiado o trabalho em rede internacional e a formação de grupos. Além disso, é possível uma expansão contínua do conteúdo do ensino por todos os participantes, por exemplo, criando e expandindo um léxico vinculado ("Wiki").

Também é possível testar o conteúdo do ensino na forma de testes com diferentes tipos de perguntas. Além disso, o programa possui ferramentas de infraestrutura como módulos de votação e pesquisa e um glossário de projetos cruzados. Graças à ampla gama de módulos de *design* da *Moodle*, este programa oferece uma entrada fácil no mundo do *e-learning* com um esforço de manutenção gerenciável para os responsáveis.

Além das funções mencionadas, o *Moodle* também pode ser usado para criar lições, o que significa segmentar o conteúdo em pequenas seções com uma questão de compreensão que só libera o próximo segmento se ele tiver sido processado corretamente. A estrutura de uma oficina também é concebível desta forma, na qual vários participantes trabalham juntos em uma questão e alcançam uma solução otimizada através do *feedback* entre si. Há uma função de mensageiro para o intercâmbio individual entre duas pessoas. Isto



assegura a base para uma comunicação abrangente em todos os níveis via *Messenger*, *chat* e fórum.

O sistema *Moodle* já está no mercado há dez anos. Atualmente, cerca de 70.000 instituições como universidades, empresas e escolas em 200 países diferentes utilizam o *Moodle* como um sistema de gestão de aprendizagem. O *software* é particularmente popular nos EUA, mas também está sendo usado na Ásia e na Europa com crescimento constante. Devido ao simples princípio "*plug and play*" ao estabelecer o conteúdo, não são de se esperar restrições em termos de diversidade linguística. O número de usuários fala a favor deste *software*, pois qualquer problema que possa surgir pode ser resolvido rapidamente através da cooperação de outros operadores. Devido à longa presença deste *software* no mercado, todas as interfaces para aprendizado independente de tempo e localização já foram desenvolvidas. Assim, é possível trabalhar com um computador pessoal (PC), *tablet* ou *smartphone*.

Além de atender aos requisitos atuais, as explicações supramencionadas também mostram o uso potencial deste LMS para questões futuras.

Além disso, o *plug-in* de código aberto H5P foi instalado no *teach4waste* para exibir conteúdo interativo autocriado no *Moodle*. H5P é um *software* gratuito e de código aberto para a criação de conteúdo interativo (aprendizagem) para a web. Este H5P também tem *web design* responsivo (RWD = *Responsive Web Design*), para que o conteúdo possa ser exibido em um *laptop*, *tablet* ou *smartphone*. Além disso, o conteúdo pode ser exportado individualmente e assim, também, compartilhado com outros, que por sua vez podem processar estes arquivos com o H5P. Isto é particularmente bem-vindo no contexto do uso como Recursos Educacionais Abertos (OER), de acordo com o princípio orientador da Unesco.

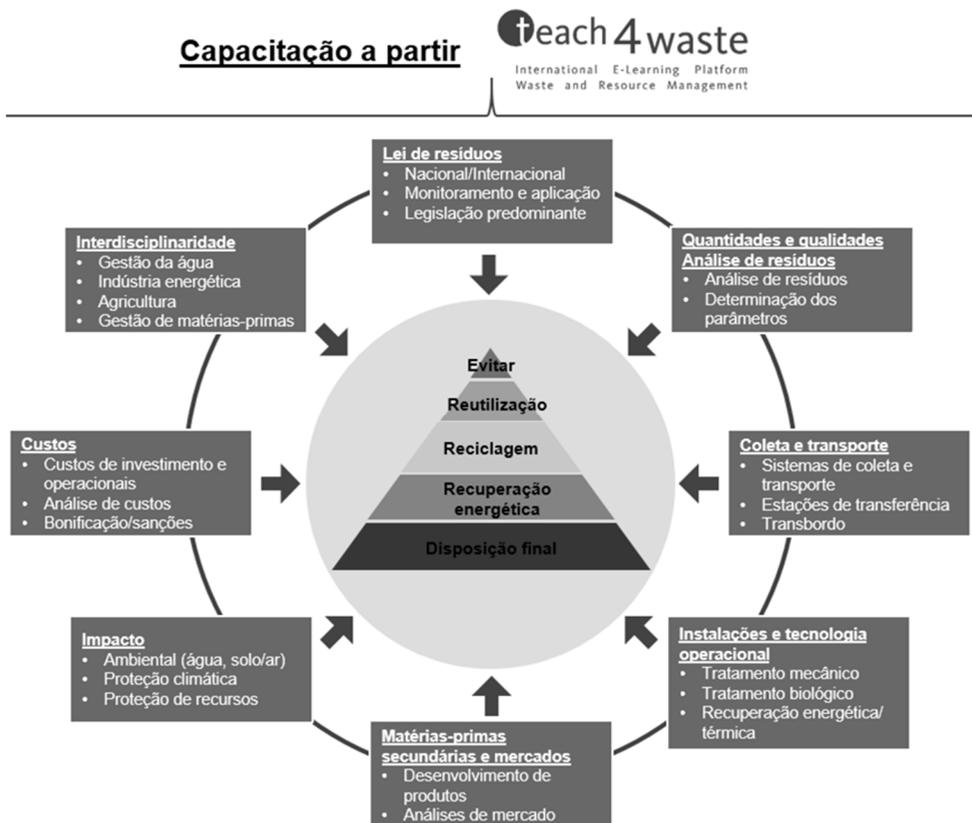
### 3.7 ORIENTAÇÃO DO CONTEÚDO

A Figura 3 esboça o conceito geral para o desenvolvimento de capacidades através do *teach4waste*. O conteúdo individual do aprendizado está alinhado com os estágios da hierarquia de resíduos. São estabelecidos *links* para setores fora do gerenciamento de resíduos, por exemplo, para águas residuais, energia e agricultura.

De acordo com a semântica no *Moodle*, as áreas temáticas são equivalentes à **categoria de designação**.



Figura 3 – Orientação temática do *teach4waste*



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O Quadro 2 mostra as categorias que agora foram em grande parte concluídas no *teach4waste*. Estes estão atualmente em fase de teste ou no *loop* de avaliação. Os componentes da primeira fase de expansão estão disponíveis a partir de abril de 2020.

No processamento do conteúdo, pessoas e instituições com experiência na área estiveram e estão envolvidas (ver Quadro 2). Isto, também, inclui empresas do setor de gerenciamento de resíduos, tais como fabricantes de plantas, fornecedores de processos e empresas de engenharia. *Teach4waste* se beneficia não apenas de seu *know-how*, mas também do extenso material de apresentação e demonstração, muitas vezes executado profissionalmente. Em troca, o *teach4waste* fornece assim indiretamente uma plataforma publicitária. Por exemplo, na categoria de biotecnologia, as várias tecnologias de processo são explicadas com a ajuda de imagens, animações e vídeos das empresas



Doppstadt, Eggersmann, Strabag, Sutco e UTV. Na categoria de aterro sanitário, por exemplo, a empresa Naue está incluída.

Quadro 2 – Categorias de *teach4waste* da primeira e segunda fase de expansão

<b>Categorias estágio de expansão 1</b>	<b>Parceiros de execução e cooperação</b>
Analítica (material, química, física, biológica)	AuR* e M. Kern, M. RauBen (Instituto Witzhausen)
Coleta e transporte	AuR
Tecnologias de processamento e classificação	AuR
Reciclagem, por exemplo: PPK, plásticos, vidro, têxteis, metais	AuR
Biotecnologias – compostagem e fermentação de resíduos orgânicos e verdes	AuR e W. Bidlingmaier, C. Springer
Coprocessamento da indústria de cimento	H. Baier, WhiteLabel-TandemProjects e. U. e AuR
Aterro Sanitário	AuR e F. Kölsch (Engenharia Geotécnica e Ambiental)
Tratamento do ar de exaustão	C. Cuhls (HS-Magdeburg-Stendal) e AuR
Tratamento de águas residuais e lodos	N. Dichtl (Instituto de Gestão Urbana da Água, TU BS)
Gerenciamento de resíduos Alemanha	AuR
Gerenciamento internacional de resíduos	AuR e W. Bidlingmaier
Setor informal	AuR
Sustentabilidade	AuR
Gestão de resíduos e clima	G. Dehoust, A. Möck, S. Otto, W. Bullach (Öko-Institut e. V. ) e AuR
Ninhada Marinha	AuR e N. Dichtl

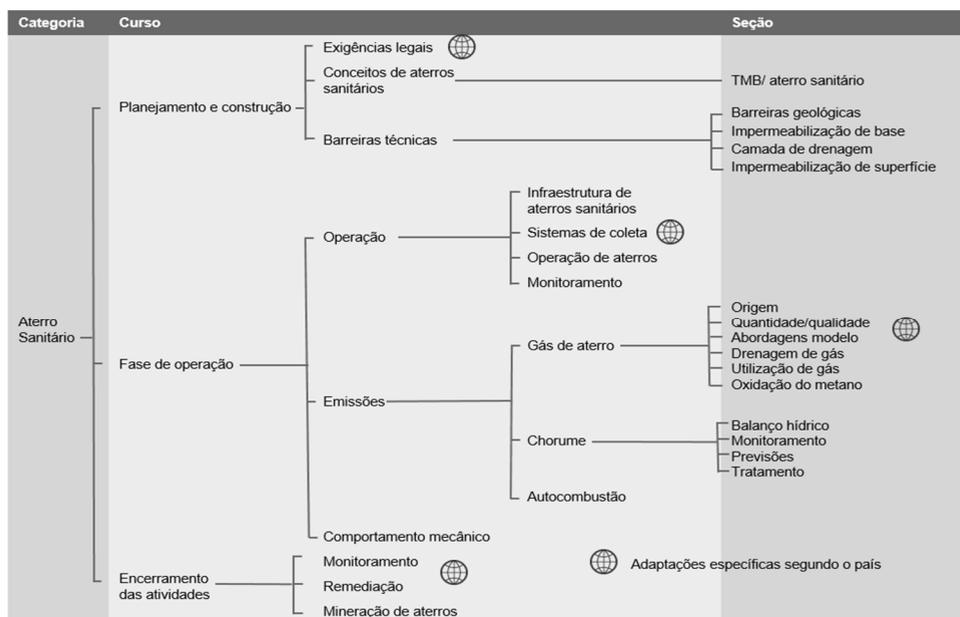


<b>Categorias estágio de expansão 2</b>	<b>Parceiros de execução e cooperação</b>
Gestão de recursos	M. Faulstich (TU Clausthal)
Tratamento de resíduos térmicos	
Tratamento mecânico-biológico de resíduos	AuR
Metais e minerais	D. Goldmann (TU Clausthal)
Mineração urbana (Mineração)	D. Goldmann (TU Clausthal)
Economia	AuR, Instituto Witzenhausen
Remediação de locais contaminados	AuR
Lei de resíduos e licenciamento	
Gestão de resíduos e ajuda ao desenvolvimento	AuR

\*Chair of Waste and Resource Management at TU Braunschweig.

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 4 – Especificação da categoria do aterro sanitário



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



O exemplo de aterro sanitário mostra a estrutura de uma categoria em cursos e seções. A discriminação mostra o escopo das categorias em sua amplitude e profundidade. De acordo com sua sequência cronológica, as primeiras subcategorias de diversificação são o planejamento e a construção, a fase operacional em si, o fim da colocação até uma desmontagem opcional (Figura 4).

Existem extensas interações com outras categorias, tais como a área temática do ar de exaustão e águas residuais.

### 3.8 APLICAÇÃO INTERNACIONAL

Todas as unidades de ensino e aprendizagem estão disponíveis em alemão e inglês. A versão em português está atualmente em construção. A estrutura das respectivas categorias é projetada de tal forma que fatores e conteúdos específicos do país, fornecidos por organizações parceiras locais, possam ser integrados. Por exemplo, como parte de um projeto da Iniciativa Climática Internacional (ICI) no Brasil, o material didático *teach4waste* das universidades parceiras brasileiras está sendo complementado com o conteúdo específico do país. O objetivo é integrar ou expandir a área temática de gestão de resíduos e recursos nos cursos de estudo existentes nessas universidades parceiras. Nos próximos anos, está previsto expandir a aplicação do *teach4waste* para outros países. A base para isto é Exceed, um programa do Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD = *Deutscher Akademischer Austauschdienst*) que apoia o desenvolvimento de capacidades em países em desenvolvimento e emergentes, entre outras coisas.

### 3.9 AVALIAÇÃO E FEEDBACK

A avaliação até agora das aplicações universitárias e não universitárias da plataforma *teach4waste* tem sido positiva.

Os seguintes desejos foram formulados:

- ◆ Conclusão das áreas temáticas o mais rápido possível;
- ◆ Integração dos princípios básicos, questões e abordagens específicas de cada país;
- ◆ Testes de acompanhamento de projeto dos componentes do conteúdo em alunos;
- ◆ Palestras e apresentações pela Internet;
- ◆ Fornecimento de um manual do usuário;
- ◆ Adição de outros idiomas.



Os resultados comentados evidenciam a necessidade de melhoria contínua do conteúdo da plataforma e a necessidade de uma permanente interação com o mercado.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A plataforma Teach4Waste disponibiliza conteúdo da área de gestão de resíduos sólidos com alto impacto na redução de GEE com o propósito de dar suporte no desenvolvimento de projetos de pesquisa aplicada introduzidos em larga escala, servindo de ferramenta de integração entre o setor acadêmico, público e privado.

Uma plataforma digital deve garantir um desenvolvimento dinâmico. Dessa forma, o objetivo é completar as áreas temáticas o mais rápido possível e acrescentar outros idiomas. Além disso, princípios, questões e soluções específicas de cada país devem ser desenvolvidos e integrados no *teach4waste*. Isto serve sobretudo para ganhar parceiros internacionais como base para uma cooperação que vai além do desenvolvimento de capacidades.

Também estão planejadas melhorias técnicas, tais como displays 360°, códigos QR e aplicações de realidade aumentada/virtual. Isto também inclui a ativação do *chat* e dos fóruns.

Para os próximos anos, a manutenção do *teach4waste* e sua expansão está assegurada. A longo prazo, entretanto, a questão de como o *teach4waste* será organizado e financiado deve ser respondida.

Isto posto, a plataforma abre, portanto, as portas para a inovação e a cooperação internacional, por meio de acesso democrático às informações mais atualizadas, com intuito de garantir a universalização da gestão sustentável de resíduos sólidos para toda a sociedade.

## REFERÊNCIAS

- BERNECKER, Roland. **Was sind open educational resources?** Bonn: Deutsche UNESCO-Kommission, 2013. Disponível em: [https://www.unesco.de/sites/default/files/2018-04/Was\\_sind\\_OER\\_\\_cc.pdf](https://www.unesco.de/sites/default/files/2018-04/Was_sind_OER__cc.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- FÖLSCH, Thomas. **Kompetenzentwicklung und Demografie.** (Schriftenreihe Personal- und Organisationsentwicklung, 9). Kassel: Kassel Univ. Press, 2010. Disponível em: <https://www.fachportal-paedagogik.de/literatur/vollanzeige.html?Fid=923518>. Acesso em: 12 out. 2022.
- FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Tecnologias Ambientais: ferramentas para a valorização de resíduos sólidos urbanos. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aginaldo; BAGNATI, Marius. (coord.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos:** transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil. Braunschweig:



Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <http://grsu.blogspot.com/2017/02/32.html>. Acesso em: 22 nov. 2022.

KADE, Jochen; SEITTER, Wolfgang. Von der Wissensvermittlung zur pädagogischen Kommunikation. Theoretische Perspektiven und empirische Befunde. **Zeitschrift für Erziehungswissenschaft**, v. 6, n. 4, p. 603-618, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11618-003-0060-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11618-003-0060-z>. Acesso em: 12 out. 2022.

KERRES, Michael; PREUSSLER, Annabell. Mediendidaktik. In: BRONBERGER, Konrad (koord.). **Enzyklopädie Erziehungswissenschaft On-line**: EEO. Weinheim: Juventa, 2012. DOI: <https://doi.org/10.3262/EEO18120258>. Disponível em: [https://www.beltz.de/fachmedien/erziehungswissenschaft/enzyklopaedie\\_erziehungswissenschaft\\_online\\_eeo/fachgebiet/15-medienpaedagogik.html](https://www.beltz.de/fachmedien/erziehungswissenschaft/enzyklopaedie_erziehungswissenschaft_online_eeo/fachgebiet/15-medienpaedagogik.html). Acesso em: 12 out. 2022.

KIESEL, Andrea; KOCH, Iring. **Lernen**: Grundlagen der Lernpsychologie. (Basiswissen Psychologie). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-531-93455-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-531-93455-6>. Acesso em: 12 out. 2022.

KRAEMER, Wolfgang; MÜLLER, Michael W. Corporate Universities und E-Learning. Personalentwicklung und lebenslanges Lernen. Strategien – Lösungen – Perspektiven. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2001. *On-line* verfügbar unter DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-05672-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-663-05672-0>. Acesso em: 12 out. 2022.

SCHOOP, Eric; ANDERS, Andrea. Strukturierte Aufbereitung von Inhalten für eine Wissensvermittlung über multiple Medien. *Wirtschaftsinformatik*, v. 43, n. 1, p. 47-55, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03250781>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03250781>. Acesso em: 12 out. 2022.

WALZIK, Sebastian. **Lernzieltaxonomie nach Anderson & Krathwohl**. 02.10.2015. Disponível em: <https://dbs.lin.ruhr-uni-bochum.de/lehreladen/planung-durch-fuehrung-kompetenzorientierter-lehre/kompetenz-pruefen/lernzieltaxonomien/>. Acesso em: 08 ago. 2017.

ZWERENZ, Karlheinz. E-Learning-Szenarien für die Statistik-Ausbildung: Virtuelle Hochschule und Live-E-Learning. **AStA Wirtschafts- und Sozialstatistisches Archiv**, v. 2, n. 1-2, p. 165-174, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11943-008-0039-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11943-008-0039-6>. Acesso em: 12 out. 2022.



**CENTRO DE EXCELÊNCIA EM COOPERAÇÃO PARA O  
DESENVOLVIMENTO – GESTÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA  
NOS PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO – EXCEED-SWINDON**

***EXCELLENCE CENTRE FOR DEVELOPMENT COOPERATION –  
SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT IN DEVELOPING  
COUNTRIES – EXCEED-SWINDON***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

HAARSTRICK, Andreas. Centro de Excelência em Cooperação para o Desenvolvimento – Gestão Sustentável da Água nos Países em Desenvolvimento – Exceed-SWINDON. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

**Andreas Haarstrick**

Graduado em Química e Doutor em Engenharia de Bioprocessos. Especialista em biodegradação de componentes orgânicos em esgoto e resíduos. Professor de Engenharia Ambiental e de Bioprocessos, Technische Universität Braunschweig (desde 2006). Coordenador do Programa de Cooperação Internacional Exceed-SWINDON para gerenciamento sustentável de recursos hídricos em países em desenvolvimento (desde 2012).

E-mail: a.haarstrick@tu-braunschweig.de

**RESUMO**

A sociedade global tem se deparado com a urgência de mudanças de longo alcance na economia, no meio ambiente, no clima e na sociedade. Muitos países – especialmente no alocados no hemisfério Sul – terão que embarcar em uma nova e desafiadora jornada para o futuro. À luz das mudanças climáticas, este caminho futuro consistirá, em particular, dos problemas hídricos e das consequências econômicas, ecológicas e sociais resultantes. Isto não é uma invocação infundada de cenários catastróficos, mas uma análise baseada em fatos de todos os dados coletados até agora e os modelos baseados neles. O momento é propício para uma cooperação global pois a escassez de água está consistentemente classificada entre os maiores riscos globais para os formuladores de políticas, empresas e sociedade. Basta perceber que o consumo global de água doce aumentou seis vezes nos últimos cem anos e continuou a aumentar a uma taxa de cerca de 1% ao ano desde os anos 1980. Muito deste aumento é devido a uma combinação de crescimento populacional, desenvolvimento econômico, uso agrícola, mudança de hábitos de consumo e mudanças climáticas. Isto demonstra que há uma necessidade urgente de um diálogo contínuo para que os processos de transformação necessários na sociedade e na economia possam ocorrer e



uma economia caracterizada pela sustentabilidade e orientada para a proteção ambiental possa ser alcançada por meio de medidas que promovam a sensibilização e capacitação da sociedade.

Palavras-chave: Gestão sustentável da água. Mudança climática. Educação superior. Interface ciência-política. Política.

## ABSTRACT

The world is at the gateway to far-reaching changes in the economy, environment, climate and society. Many countries – especially in the global South – will have to embark on a further and already difficult journey into the future. In the light of climate change, this future path will consist in particular of water problems and the resulting economic, ecological and social consequences. This is not a baseless invocation of doomsday scenarios, but a fact-based analysis of all the data collected so far and the models based on it. The time is ripe for global and honest cooperation and not for nationalism or ideologically motivated world leadership roles. Without honest cooperation on eye-level, the Anthropocene will be very soon only be a blink of an eye on the geological time scale – for sure. Based on the project activities, this article takes up the aspect of the water issue and the need for social upheaval and increased good education of people worldwide, and ends by asking: how is the way forward?

Keywords: Sustainable Water management. Climate change. Higher education. Science-policy interface.

## 1 INTRODUÇÃO

Exceed SWINDON (*Excellence Centre for Development Cooperation – Sustainable Water Management in Developing Countries*) é um projeto de capacitação através de educação superior e de pesquisa em conjunto. O projeto teve início em 2009 na Technische Universität Braunschweig (TUBS), sendo um dos cinco projetos que recebeu financiamento para uma segunda etapa de cinco anos a partir de 2015 pelo Ministério Alemão de Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ = *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung*) e pelo Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico (DAAD = *Deutscher Akademischer Austauschdienst*). Projetos pioneiros de pesquisa e cooperação acadêmica com parceiros de quatro redes regionais, América Latina, Oriente Médio e Norte da África (*Mena = Middle East and North Africa*), África Sub-sahariana e Sudeste Asiático, foram desenvolvidos com foco em soluções sustentáveis e transferíveis a partir de desafios relacionados com a preservação da água em cada região. Estes projetos abrangem, entre outros, água em regiões áridas e semiáridas, uso de águas residuais recuperadas para irrigação, secas e enchentes, água e saúde, e água e mudança climática.



Com base na rede global formada por 51 universidades, o Centro de Excelência em Braunschweig se concentra no fortalecimento de capacidades nos países em desenvolvimento através do treinamento e do trabalho em rede entre especialistas. Uma universidade representa e coordena cada rede regional, enquanto a Technische Universität Braunschweig coordena medidas transregionais. O objetivo da Exceed-SWINDON é desenvolver competências e conhecimentos sobre gestão sustentável da água e transferi-los para futuros especialistas e tomadores de decisão nos países parceiros, para que eles possam moldar os processos de evolução tecnológica e econômica, com base no crescimento populacional e na mudança climática. O projeto também inspira e promove os membros da Exceed-Swindon a serem uma comunidade internacional de profissionais acadêmicos e orientados para a prática, estudantes graduados preocupados com a água, funcionando como uma fonte global de conhecimento.

Neste contexto, o projeto Exceed-Swindon estabeleceu parcerias através de sua rede regional latino-americana com o PROTEGEER, um projeto financiado pelo BMU como parte da Iniciativa Climática Internacional (IKI = *Internationale Klimaschutzinitiative*).

## **2 VISÃO E MISSÃO**

A necessidade de melhorar a gestão dos recursos hídricos é particularmente crítica para áreas que sofrem de escassez crônica ou recorrente de água (onde a demanda excede os suprimentos sustentáveis, ou onde os suprimentos são comprometidos pela poluição, degradação do solo ou outros fenômenos). A necessidade de melhorar a acessibilidade existe em todos os tipos de regimes hidrológicos, mesmo em locais de relativa abundância de água. As barreiras para melhorar a acessibilidade são frequentemente de natureza social e/ou econômica. Contra este pano de fundo, estruturas de governança sustentável são inevitáveis. Elas devem garantir uma alocação justa e equitativa dos recursos hídricos para todos.

### **2.1 PERSPECTIVAS FUTURAS DA GESTÃO SUSTENTÁVEL DA ÁGUA NAS REGIÕES DA REDE EXCEED-SWINDON**

A rede Exceed-SWINDON consiste em quatro regiões (quatro redes regionais) que incluem a América Latina (LA), Oriente Médio e Norte da África (Mena), Sudeste Asiático (SEA), e África Subsaariana (SSA). O que estamos vendo hoje é que as diferentes regiões lutam com desafios particulares para fornecer serviços de água e saneamento seguros, acessíveis e sustentáveis para todos.



A **região do Mena** é a região com maior estresse hídrico do mundo. O total de recursos hídricos renováveis para a média mundial é de 7.453 m<sup>3</sup> por pessoa por ano, enquanto nesta região é de apenas 736 m<sup>3</sup> por pessoa por ano com base nos últimos dados disponíveis da Aquastat (FAO, [2018]). Já é aparente que a escassez de água numa base *per capita* tem aumentado e continuará a aumentar devido ao crescimento populacional e à mudança climática. Estas tendências contribuíram para o aumento do esgotamento das águas subterrâneas, a perda de terras aráveis para a produção agrícola e o movimento de pessoas quando os recursos hídricos são insuficientes para apoiar a saúde, o bem-estar e a subsistência. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS = WHO = World Health Organization) e o Fundo de Emergência Internacional das Nações Unidas para a Infância (UNICEF = United Nations International Children's Emergency Fund) em toda a região Mena e Árabe, cerca de 51 milhões de pessoas (ou 9% da população total) não dispunham de um serviço básico de água potável em 2015 (WHO/UNICEF, 2019).

Enquanto prevalecerem os conflitos armados e religiosos na região, a esperança por uma gestão sustentável da água onde há infraestrutura que permita o acesso universal à água potável, ainda é um desafio. Além disso, os desastres naturais ligados aos impactos da mudança climática resultaram no deslocamento de mais de 240.000 pessoas em toda a região árabe em 2016, a grande maioria delas nos países menos desenvolvidos árabes (98%): 123.000 no Sudão, 70.000 na Somália e 36.000 no Iêmen (UN-ESCWA/IOM, 2018). O acesso pacífico e o uso inteligente dos recursos hídricos são de fato um desafio, mas salva vidas e traz esperança para o abastecimento futuro de água, infraestrutura e saneamento.

A **região do SEA** é afetada principalmente por desastres causados por enchentes e secas. O Banco Asiático de Desenvolvimento (ADB = Asian Development Bank) informou que 48 países da região são qualificados como inseguros devido à baixa disponibilidade de água e extração insustentável de águas subterrâneas, e sete dos quinze países com as maiores extrações anuais estimadas de águas subterrâneas estão na Ásia e no Pacífico (ADB, 2016). Semelhante aos países do Mena, o aumento da demanda de irrigação para a agricultura levou a um grave estresse hídrico subterrâneo em algumas áreas, especialmente na planície do norte da China e no noroeste da Índia. Além disso, os altos níveis de poluição da água pioram a situação em termos de disponibilidade de água potável, causada pelas alarmantes taxas de águas residuais não tratadas lançadas em corpos de água de superfície. A situação é



agravada por altos níveis de poluição química na água oriunda das drenagens superficiais (UN-ESCAP, 2010).

Nas bacias do Ganges e do Mekong, as altas concentrações de compostos arsênicos estão agravando cada vez mais a qualidade das águas subterrâneas. Os desafios para a gestão sustentável da água são enormes. Isto se torna claro quando se observa o rápido crescimento da população urbana da região na maioria dos países asiáticos, que mais do que dobrou desde 1950, e por isso os problemas que as cidades enfrentam para desenvolver uma infraestrutura adequada são uma tarefa do século para acompanhar o aumento das necessidades de água e saneamento. Olhando para as áreas rurais nas regiões asiáticas, com longas práticas insustentáveis e acesso desigual à água de irrigação, o impacto na produtividade agrícola e na redução da pobreza é devastador e leva cada vez mais à perda de meios de subsistência, a maioria da população rural pobre é dependente da agricultura. Assim, o conceito de segurança da água está ganhando importância não apenas na Ásia. O conceito contribui para melhorar a resiliência dos serviços de água e saneamento e é a chave para otimizar e garantir o acesso à água limpa em um futuro climaticamente incerto, ao mesmo tempo em que fornece à agência governamental informações realistas para enganos feitos sob medida.

Apesar dos governos dos **países latino-americanos** terem reconhecido, há décadas, a importância do abastecimento de água e saneamento como fator vital para a preservação e melhoria da saúde, milhões de pessoas na região ainda estão sem uma fonte adequada de água potável, enquanto ainda sofrem a ausência de instalações seguras e decentes para a disposição dos esgotos. De acordo com a WHO/UNICEF (2017), em 2015, 65% da população da América Latina e do Caribe tinha acesso a serviços de água potável administrados com segurança, mas apenas 22% tinha acesso aos serviços de saneamento administrados com segurança. No mesmo ano, 96% usaram pelo menos um serviço básico de água e 86% pelo menos um serviço de saneamento básico. Isto significa que na região há cerca de 25 milhões de pessoas sem acesso a um serviço básico de água e 222 milhões sem serviços gerenciados com segurança de água potável. Mesmo dentro de alguns países, existem grandes diferenças entre as regiões administrativas em água e saneamento, que podem variar de 20% a 30% (UNICEF, 2016).

Em algumas dessas regiões administrativas, parte da população não tem acesso nem mesmo aos serviços básicos de água e saneamento. Isto força a população a adotar soluções alternativas



como poços individuais ilegais e não controlados, conexões ilegais com a rede de água, vendedores de água, ou levar água diretamente de rios, lagos e outros corpos de água poluídos; e para o saneamento: latrinas e defecação a céu aberto. Estas chamadas soluções estão associadas aos riscos significativos à saúde e, no caso do saneamento, são uma das principais fontes de poluição da água.

A fim de realizar o fornecimento de serviços de abastecimento de água e saneamento e para atender até certo ponto ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS-6 = SDG-6 = Sustainable Development Goal 6), alguns princípios básicos mínimos devem se tornar realidade:

- ♦ A prestação eficiente de serviços deve ser realizada agora;
- ♦ Diminuir o custo da prestação de serviços;
- ♦ Estruturas reguladoras eficazes, governança, controle institucional e cultura política e a vontade de fazê-lo;
- ♦ Seriedade e diligência no desenvolvimento, aplicação e cumprimento de regulamentos e estruturas institucionais e em suas decisões;
- ♦ Vontade política de recuperar o papel tradicional de financiar investimentos em abastecimento de água e saneamento, particularmente com o objetivo de estender a cobertura aos grupos de baixa renda. A este respeito, o estabelecimento de prioridades políticas é extremamente importante.

Neste contexto, estruturas políticas e econômicas integrativas são um pré-requisito para alcançar a viabilidade econômica, com o envolvimento e responsabilidade dos municípios e grupos sociais relevantes, que muitas vezes carecem dos recursos e incentivos necessários para administrar efetivamente a complexidade dos processos envolvidos na prestação de serviços, particularmente no setor de água.

Na **região da África Subsaariana**, a falta de infraestrutura de gestão de água (escassez econômica de água), tanto em termos de armazenamento e fornecimento, como para melhorar os serviços de água potável e saneamento, desempenha um papel direto na persistência da pobreza (FAO, 2016).

Os processos de mudança climática, que influenciam negativamente os padrões de precipitação e temperatura, colocam em risco a disponibilidade de água, a produtividade agrícola e o equilíbrio dos ecossistemas em quase todas as regiões da África Subsaariana. Desafios adicionais para a gestão sustentável da água



surtem da crescente população, que deverá atingir 1,3 bilhões, de um total de 2,2 bilhões em todo o mundo, até 2050. Um aspecto adicional, que está ligado ao desafio mencionado, diz respeito à educação. Enquanto se estima que 85% dos professores do ensino fundamental no mundo inteiro foram treinados em 2016, a proporção para a África Subsaariana foi de apenas 61% (ONU, 2018). Se a igualdade de oportunidades, educação e treinamento adequados forem garantidos, a contribuição intelectual que poderia vir desta população em crescimento poderia ajudar a África a entrar no caminho para alcançar o ODS-6. Uma educação ampla e de qualidade junto à elite acadêmica é um pré-requisito básico para a estabilização econômica e política e para a superação da pobreza em massa. Enquanto os governos continuarem a ignorar isto e não provocarem nenhuma mudança concreta, a situação desastrosa de muitos estados da África Subsaariana definitivamente não mudará.

Ao contrário de todos os sinais negativos atuais, iniciativas positivas e soluções promissoras e participativas foram implementadas em todas as regiões da rede, particularmente no que diz respeito a gestão de águas onde países como Costa Rica, Ruanda, Quênia, Tailândia e Vietnã servem de exemplos.

## **2.2 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – O PAPEL DO ENSINO SUPERIOR, DA PESQUISA E DA SOCIEDADE**

Na medida que nos aproximamos do século XXI, uma série de grandes desafios são enfrentados pela sociedade. A globalização do comércio, da produção e das comunicações criou um mundo altamente interconectado. No entanto, as desigualdades sociais permanecem se intensificando.

É imperativo que o ensino superior seja um elemento civilizacional importante que contribua com soluções para os problemas existentes e inove para evitar problemas no futuro.

Seja no âmbito econômico, político ou social, espera-se que o ensino superior colabore para elevar a qualidade de vida em geral, em todo o mundo. Para cumprir eficazmente seu papel e manter a excelência, o ensino superior deve se tornar muito mais internacionalizado; deve integrar uma dimensão internacional e intercultural em suas funções de ensino, pesquisa e serviços.

A preparação de futuros líderes e cidadãos para um mundo altamente interdependente requer um sistema de ensino superior onde a internacionalização promova a diversidade cultural e fomente a compreensão intercultural, o respeito e a tolerância entre os povos. Tal



internacionalização do ensino superior contribui para construir mais do que blocos regionais economicamente competitivos e politicamente poderosos; representa um compromisso com a solidariedade internacional, a segurança humana e ajuda a construir um clima de paz global.

Os avanços tecnológicos nas comunicações são instrumentos poderosos que podem servir para promover a internacionalização do ensino superior e para democratizar o acesso às oportunidades. Entretanto, na medida em que o acesso às novas tecnologias da informação permanece desigualmente distribuído no mundo, os efeitos colaterais adversos de seu uso generalizado podem ameaçar a diversidade cultural e ampliar as lacunas na produção, disseminação e apropriação do conhecimento.

Pessoal altamente instruído e pesquisa nos mais altos níveis são essenciais para um desenvolvimento cada vez mais baseado no conhecimento. A internacionalização e a cooperação internacional podem servir para melhorar o ensino superior, aumentando a eficiência no ensino e na aprendizagem, bem como na pesquisa, através de esforços compartilhados e ações conjuntas.

Steven Sterling, Professor de Educação em Sustentabilidade (Centre for Sustainable Futures, Plymouth University, Reino Unido) destacou que o ensino superior não é mais uma preparação para um futuro estável assumido, mas sim um alimento de potencial individual e coletivo para viver bem e habilmente em um mundo já complexo e volátil, rumo à melhoria humana e planetária.

Tão poderosa pode ser a educação (superior), tanto este poder depende da realidade e da estrutura política e econômica disponíveis. O baixo nível educacional de alguns países em desenvolvimento é causado por instituições econômicas que não conseguem criar incentivos para os pais educarem seus filhos e por instituições políticas que não conseguem induzir o governo a construir, financiar e apoiar escolas e os desejos dos pais e das crianças. O preço que estas nações pagam pela baixa educação de sua população e pela falta de mercados inclusivos é alto. Eles falham em mobilizar seu talento nascente. Eles têm muitos "Bill Gates" potenciais e talvez um ou dois "Albert Einstein" que agora trabalham como agricultores pobres e sem instrução, sendo coagidos a fazer o que não querem fazer ou sendo recrutados para o exército, porque nunca tiveram a oportunidade de realizar sua vocação na vida.

A capacidade das instituições políticas e econômicas de utilizar o potencial dos mercados inclusivos, incentivar inovações



tecnológicas, investir em pessoas e mobilizar os talentos e habilidades de um grande número de indivíduos é fundamental para o crescimento econômico e o bem-estar de uma nação.

Uma estrutura econômica inclusiva abre caminho para o estabelecimento de novos mercados, que não apenas dão às pessoas liberdade para buscar na vida as vocações que melhor se adaptam a seus talentos, mas também proporcionam um campo de igualdade que lhes dá a oportunidade de fazer isso. Aqueles que têm boas ideias poderão iniciar negócios, os trabalhadores tenderão a ir para atividades onde sua produtividade seja maior e as empresas menos eficientes poderão ser substituídas por outras mais eficientes. Capacitar talentos e pessoas para serem criativas precisa de boas ideias e liberdade. Uma vez uma voz africana disse que “o problema com a África é que aqueles que estão no poder não têm ideias e aqueles que têm ideias não têm poder”.

As economias inclusivas abrem o caminho para a tecnologia e a educação. O crescimento econômico sustentado é quase sempre acompanhado por melhorias tecnológicas que permitem que pessoas, terrenos e capital existente (edifícios, máquinas etc.) se tornem mais produtivos. Este processo pode ser realizado por instituições econômicas que incentivem a propriedade privada, mantenham contratos, criem condições de igualdade e incentivem e permitam a entrada de novos negócios que possam incentivar o aparecimento de novas tecnologias.

Em contraste com as economias inclusivas, as economias extrativas (que vemos em muitos países em desenvolvimento) e as instituições políticas concentram o poder nas mãos de uma elite. As instituições econômicas são frequentemente estruturadas por essa elite para extrair recursos do resto da sociedade. Assim, as instituições econômicas extrativistas acompanham naturalmente as instituições políticas extrativistas. As instituições políticas inclusivas, por outro lado, conferindo amplo poder, tenderiam a desenraizar as instituições econômicas que expropriam os recursos de muitos, erguem barreiras de entrada e suprimem o funcionamento dos mercados de modo que apenas poucos se beneficiem.

As pessoas que sofrem com a situação política e econômica extrativa não podem esperar que os governantes absolutistas mudem voluntariamente as instituições políticas e redistribuam o poder na sociedade. A única maneira de mudar essas instituições políticas é forçar a elite a criar instituições mais pluralistas e deixar a sociedade entrar numa “diversidade social” que engloba o diálogo livre dos



grupos sociais, o estabelecimento de grupos sociais livres que estão envolvidos no processo de formação de opinião social. Este tipo de diversidade social cria estabilidade social e é capaz de combater a desestabilização e o declínio social. O desenvolvimento sustentável encontra terreno fértil neste ambiente.

### **2.3 O QUE A EDUCAÇÃO SUPERIOR E A CIÊNCIA PODEM CONTRIBUIR PARA A SOCIEDADE E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL?**

É certamente um fato que a educação e as pesquisas têm uma grande responsabilidade na sociedade. É, por assim dizer, a garantia do desenvolvimento econômico e da prosperidade de um país. Abordar estas questões representa um grande desafio que exige o esforço ativo e colaborativo de todos os setores da sociedade, e uma clara consciência do papel central da educação. Os elementos essenciais da educação são conhecimentos, habilidades e atitudes que ajudam adultos, crianças, alunos, estudantes/pesquisadores a se tornarem plenamente informados através de um fluxo aberto de ideias. Os estudantes devem ser capacitados a usar a reflexão crítica e a análise para avaliar ideias, problemas e políticas. Eles precisam desenvolver uma preocupação pelo bem-estar dos outros, pelo bem comum e pela dignidade e direitos dos indivíduos e minorias. Neste ponto, a responsabilidade dos professores, pesquisadores vem à tona. É necessária mais pesquisa sobre o desenvolvimento de uma abordagem da educação que ajude os estudantes a se tornarem cidadãos ativos e críticos em um mundo desafiador e em mudança.

Em vista do mundo em rápida mudança que afeta tanto as esferas social e política quanto as esferas econômica e ambiental – é importante que a pesquisa seja ainda mais interdisciplinar do que no passado. Isto se aplica não apenas à pesquisa básica, mas também, em particular, à pesquisa orientada para a prática.

Iowa (2009) definiu a pesquisa de um ponto de vista lógico como um exame deliberado, avanço na pesquisa, avaliação, pronto para criar um fato ou informação generalizável. A pesquisa também implica em uma busca de atualidades – respostas a perguntas e soluções a problemas. Além disso, a pesquisa também deve levar em conta sua responsabilidade social, ou seja, a forma pela qual ela fornece análises de risco baseadas em evidências claras e contribui para melhorias concretas que afetam o bem-estar, a saúde e o uso sustentável dos recursos e, em última instância, a funcionalidade e a proteção ambiental.



Neste contexto, a pesquisa está estreitamente interligada com os objetivos de desenvolvimento sustentável e é corresponsável pela realização dos objetivos. No entanto, o que deve ser desconsiderado é que os ODS são um marco necessário, mas não suficiente, para o desenvolvimento sustentável global. A busca humana é cumprir as ODS até 2030, depois continuar a atendê-las, em um mundo cada vez mais populoso até 2050; e além, fazê-lo dentro do espaço operacional seguro de um planeta estável e resiliente. Em uma palavra, o desenvolvimento sustentável global é um mundo que se transforma para atender às ODS dentro das fronteiras planetárias. Isto implicará profundas transformações nas sociedades do mundo. A consulta global entre todas as nações combinada com os últimos avanços na ciência do sistema terrestre (expressa, por exemplo, através do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC = *Intergovernmental Panel on Climate Change*) e da Plataforma Intergovernamental de Políticas Científicas sobre Biodiversidade e Serviços Ecosistêmicos (IPBES = *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*), fornece à humanidade, pela primeira vez, um roteiro claro para um futuro desejado, próspero, equitativo e ambientalmente sustentável para todas as espécies vivas, e para todo o planeta.

As transformações para o desenvolvimento sustentável implicam profundas mudanças estruturais, profundas reformas das instituições, mudanças nos mapas e normas mentais, mudanças nos padrões de comportamento humano, ampla sensibilização e mobilização, a adoção de uma abordagem de sistemas complexos adaptativos às questões de sustentabilidade e a resolução de problemas sem precedentes. As transformações abordadas são exequíveis. A chave é aumentar as taxas de economia nacional em alguns pontos percentuais da renda nacional e investir a economia incremental em prioridades como energia sem carbono, escolas de alta qualidade, melhores sistemas de saúde, conservação e restauração ambiental, instituições de boa governança e iniciativas de cooperação global para alavancar a dinâmica em direção à implementação das ODS. A este respeito, economias inclusivas e sistemas políticos, bem como sociedades livres, são uma boa base para a transformação.

Como parte do sistema e do processo, a ciência e a pesquisa não devem fugir de suas responsabilidades. Aqui, a voz da razão e da racionalidade é exigida. A ciência e a pesquisa têm um papel específico, bem como uma variedade de funções em benefício de nossa sociedade: criar novos conhecimentos, melhorar a educação e



umentar a qualidade de nossas vidas. A ciência deve responder às necessidades da sociedade e aos desafios globais.

O entendimento público e o engajamento com a ciência, e a participação dos cidadãos, inclusive através da popularização da ciência, são essenciais para equipar os cidadãos para fazer escolhas pessoais e profissionais bem embasadas. Os governos precisam tomar decisões a partir de informações científicas de qualidade sobre questões como saúde e agricultura, e os parlamentos precisam legislar sobre questões sociais que necessitem dos conhecimentos científicos mais recentes. Os governos nacionais precisam entender a ciência por trás dos grandes desafios globais, tais como mudança climática, saúde dos oceanos, perda de biodiversidade e preservação da água doce.

Para enfrentar os desafios do desenvolvimento sustentável, entre outros, tanto os governos quanto os cidadãos devem entender a linguagem da ciência e devem se tornar cientificamente alfabetizados. Por outro lado, os cientistas devem compreender os problemas que os formuladores de políticas enfrentam e esforçar-se para tornar os resultados de suas pesquisas relevantes e compreensíveis para a sociedade.

As sociedades modernas muitas vezes se vangloriam por seu progresso científico, enquanto paradoxalmente, os cientistas muitas vezes lutam para comunicar suas pesquisas. Tal comunicação é dificultada por vários fatores. A ciência é inerentemente complexa e o jargão científico tende a torná-la ainda mais difícil de ser entendida, faltam meios de comunicação com a sociedade e o progresso nas carreiras científicas frequentemente promove o mérito acadêmico em vez de contribuir para a sociedade. Além disso, os tomadores de decisão muitas vezes ignoram os conselhos técnicos fornecidos pelos cientistas.

Então, como os cientistas podem alcançar outros componentes da sociedade? A ciência cidadã (envolvimento de grupos sociais) poderia ser um exemplo de estratégia para engajar cidadãos comuns na ciência e destina-se a produzir mais resultados dirigidos ao público em geral, com vocabulário simples e objetivo, reforçar a colaboração entre o público e os institutos de pesquisa e responder objetivamente aos problemas das pessoas. Estas iniciativas envolvem cientistas e não cientistas em projetos que lidam com questões do mundo real. O *feedback* e a compreensão do cidadão comum são essenciais para melhorar a ciência e para proteger o meio ambiente. Entretanto, a comunicação entre cientistas, gerentes e formuladores de políticas ainda representa um grande desafio.



## 2.4 COMO A INTERFACE CIÊNCIA-POLÍTICA PODE AJUDAR?

Às vezes, não é viável para a ciência disponibilizar soluções devido a limitação de dados e à capacidade dos pesquisadores. A ciência e a coprodução política são um modelo que pode equilibrar essas limitações. A coprodução efetiva é uma verdadeira parceria entre cientistas e formuladores de políticas. O processo de coprodução é contínuo, geralmente altamente interativo e flexível, exigindo confiança mútua, respeito, participação e compromisso tanto dos pesquisadores quanto dos formuladores de políticas.

Embora grande parte da literatura disponível se concentre na produção de conhecimento, em muitos contextos as necessidades dos políticos e tomadores de decisão não são bem atendidas. Em relação à interface ciência-política, existe uma dinâmica entre a pesquisa orientada para a oferta e a pesquisa orientada para a demanda. Enquanto a pesquisa sobre a interface ciência-política mostra que a pesquisa orientada pela demanda tende a ser mais relevante para o desenvolvimento de políticas do que a pesquisa orientada pela oferta. Sarkki *et al.* (2014) reconhecem que a pesquisa que é simplesmente fornecida pode ser relevante para as exigências da política e pode criar uma demanda para a pesquisa.

As interfaces político-científicas são mais eficazes quando sua credibilidade, relevância e legitimidade são aumentadas. O nível de cada atributo pode variar para cada interface ciência-política, com base no contexto de uma determinada situação. Como resultado, podem ocorrer *trade-offs* e sinergias entre os três atributos e os atores envolvidos no processo podem interpretar os resultados de forma diferente (Sarkki *et al.*, 2014). Portanto, sempre que possível, a comunicação entre formuladores de políticas e cientistas deve ocorrer com frequência e no início de um ciclo político. Pesquisadores e formuladores de políticas devem comunicar seus valores e necessidades uns aos outros, a fim de estabelecer uma compreensão mútua das exigências políticas.

As organizações de fronteira foram identificadas por alguns pesquisadores como atores importantes na interface ciência-política. As organizações de fronteira como instituições que convergem política e ciência, são identificadas geralmente pela formalidade de seus papéis e estão focadas em facilitar a atividade dentro da interface político-científica. As organizações de fronteira, por assim dizer, empregam especialistas, conhecidos como intérpretes, intermediários ou mediadores, de ambos os lados da interface ciência-política para



intermediar as ligações entre conselheiros ou formuladores de políticas e cientistas.

Uma ótima interface ciência-política é aquela que negocia entre os diversos valores das partes interessadas e promove uma comunicação eficaz e a coprodução de informações entre a ciência e os atores políticos. Aqui, a ciência informa a política através de tomadas de decisão baseadas em evidências, e os formuladores de políticas podem informar os pesquisadores sobre suas necessidades em vigor.

Tornou-se um fato inevitável que os problemas globais relacionados aos recursos hídricos são generalizados e, além disso, representam um problema existencial para mais de 1,5 bilhões de pessoas. Os problemas relacionados à água afetam as relações políticas, a saúde pública, a agricultura, o desenvolvimento e o meio ambiente. Exemplos particularmente importantes (Colwell, 2002) podem estar relacionados a rios transfronteiriços, uso excessivo dos recursos hídricos, falta de acesso à água potável, falta de instalações sanitárias adequadas, gestão insuficiente da água para reutilização e reciclagem de águas residuais industriais e municipais ou aumento das necessidades de água em ambientes de abastecimento inadequado.

A longo prazo, a mudança climática e o crescimento demográfico irão acentuar ainda mais os problemas relacionados com os recursos hídricos em muitas regiões do mundo. Em vista deste contexto e para atender aos problemas da educação acadêmica e das habilidades em gestão sustentável da água no século 21, a demanda indispensável é conceituar um currículo integrado entre as disciplinas, mas também esforços interdisciplinares de pesquisa conjunta para atender à complexidade das questões hídricas.

Estima-se que quase 89% da população mundial teve acesso a uma fonte de água potável melhorada em 2012. No entanto, mais de 750 milhões de pessoas ainda não têm acesso a uma fonte melhorada de água potável. Além disso, um terço da humanidade não possui instalações sanitárias ou sistemas de eliminação de águas residuais. Além disso, devido ao crescimento mundial da população, à urbanização e à industrialização de antigas áreas rurais, a demanda por recursos hídricos tem crescido e se tornado cada vez mais poluente. Conseqüentemente, cada vez menos água estará disponível para outros fins, tais como água potável, piscicultura ou irrigação. A "água" está inegavelmente no centro da agenda de desenvolvimento pós-2015 que, portanto, coloca forte ênfase na proteção ambiental e na sustentabilidade. Isto posto, fica evidenciado o potencial de estabelecer cooperações que promovam o uso sustentável da água.



As oportunidades para cooperação são múltiplas, assim como as disciplinas acadêmicas que devem abordar de forma transversal as Metas de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com especial atenção à ODS 6.

Deste modo, tem-se como foco da cooperação no âmbito da pesquisa atividades de gestão e gerenciamento para evitar a superexploração dos recursos e a contaminação das reservas de água, utilizando conceitos adaptados às necessidades das regiões.

Para implementar estes conceitos nas referidas regiões, e para aumentar as medidas de aceitação tomadas dentro dos respectivos grupos culturais, conceitos e ferramentas de treinamento socioeconômico têm que ser aprimorados. Além do envolvimento de parceiros interdisciplinares e tecnológicos, é inevitável conseguir a participação das autoridades locais, indústrias, organizações não governamentais (ONG) e formuladores de políticas nos projetos de pesquisa, a fim de melhorar a assertividade nos programas de treinamento e garantir os resultados esperados.

### **3 O CAMINHO PARA O FUTURO – DESENVOLVIMENTO INTEGRADOR**

A disponibilidade de água pode ser vista como uma função de duas características distintas, mas inseparáveis. A primeira está relacionada ao abastecimento de água, que corresponde aos volumes de água que podem ser retirados de forma sustentável de fontes superficiais e sub-superficiais, bem como de fontes não convencionais. Isto inclui dessalinização da água do mar, reutilização e reciclagem da água, e coleta de água da chuva e névoa. O aumento da eficiência do uso da água em todos os principais setores de uso de água (agricultura, energia, indústria e municipal/doméstico) também pode contribuir muito para diminuir a demanda geral e, assim, possibilitar o suprimento de água para outros usuários, incluindo ecossistemas. A segunda diz respeito à acessibilidade, que envolve o transporte de água da fonte e sua disponibilização a diferentes usuários em quantidades suficientes e com a qualidade apropriada para o uso pretendido.

Os mecanismos de alocação de recursos hídricos podem ser estabelecidos para alcançar diferentes objetivos de política socioeconômica, tais como a salvaguarda da segurança alimentar e/ou energética, ou para promover o crescimento industrial, contudo a garantia de que água suficiente esteja disponível (e de qualidade adequada) para atender às necessidades humanas básicas de todos



(tanto para fins domésticos quanto de subsistência) deve ser uma prioridade garantida.

Entretanto, muitas vezes, as ligações entre a água e decisões mais amplas relativas à segurança alimentar e energética, crises humanitárias, desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental muitas vezes permanecem irreconhecíveis ou mal compreendidas. A intensificação de eventos extremos, a degradação ambiental (incluindo a diminuição da disponibilidade e qualidade da água), o crescimento populacional, a rápida urbanização, padrões insustentáveis e injustos de produção e consumo (dentro e entre países), conflitos reais e potenciais, e fluxos migratórios sem precedentes estão entre as pressões interligadas enfrentadas pela humanidade, atingindo aqueles em situações vulneráveis.

Avançar e progredir ao mesmo tempo exige uma renegociação das relações de poder em todos os níveis, participação equitativa e representação de todos os grupos, bem como novas parcerias a fim de transformar os processos econômicos, sociais e políticos que orientam a gestão dos recursos hídricos e impulsionam o fornecimento de serviços de abastecimento de água e saneamento seguros e acessíveis. Neste contexto, a priorização correta do governo e seu apoio ativo, assim como a consciência comum na sociedade majoritária, são a base para uma verdadeira mudança e melhoria das condições de vida.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Todos os tópicos abordados no texto têm a água como referência central e provavelmente pode-se dizer sem contradição que a humanidade já está em uma verdadeira crise de água.

A escassez de água está consistentemente classificada entre os maiores riscos globais para os formuladores de políticas, empresas e sociedade. Verifica-se que os riscos significativos da insegurança hídrica ameaçam a reputação, as licenças operacionais e a segurança da cadeia de abastecimento, assim como a estabilidade financeira nacional. Basta perceber que o consumo global de água doce aumentou seis vezes nos últimos cem anos e continuou a aumentar a uma taxa de cerca de 1% ao ano desde os anos 1980. Muito deste aumento é devido a uma combinação de crescimento populacional, desenvolvimento econômico, uso agrícola, mudança de hábitos de consumo e mudanças climáticas.

Aumentar a população urbana, mudar os estilos de vida e a industrialização, garantir a qualidade da água e o acesso à água limpa



e ao saneamento, bem como à água para irrigação, é mais importante do que nunca. Como os recursos de água doce estão ameaçados pela crescente expansão urbana, particularmente nos países em desenvolvimento, precisamos nos concentrar tanto na conservação dos recursos de água doce quanto no investimento em tecnologias inovadoras, baratas e energeticamente eficientes para tratar e reciclar as águas residuais domésticas e industriais. A recarga e recuperação de águas subterrâneas sempre que possível pode ser útil para mitigar a salinização e o armazenamento, especialmente em áreas costeiras.

A necessidade urgente de cooperação global entre Estados-nação soberanos mencionada no texto é mais uma vez enfatizada aqui. Trata-se de nada mais do que cooperação conjunta e implementação de novas transferências de tecnologia para resolver problemas ambientais e climáticos. Há uma necessidade urgente de um diálogo contínuo para que os processos de transformação necessários na sociedade e na economia possam ocorrer e uma economia caracterizada pela sustentabilidade e orientada para a proteção ambiental possa ser alcançada.

A vontade de fazer deve ser a força motriz final. Basicamente, não temos escolha a não ser desejar uma mudança positiva.

## REFERÊNCIAS

ADB – Asian Development Bank. **ADB Annual Report 2016**. DOI: <http://dx.doi.org/10.22617/FLS178712>. Disponível em: <https://www.adb.org/documents/adb-annual-report-2016>. Acesso em: 12 out. 2022.

COLWELL, Rita R. A Global Thirst for Safe Water: The Case of Cholera. **The Office of Legislative and Public Affairs**, Washington DC, 703, 292-8070, 2002. Disponível em: <https://www.nsf.gov/news/speeches/colwell/rc020125abel.htm>. Acesso em: 12 out. 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture. **Water use**. [2018]. Disponível em: [www.fao.org/nr/water/aquastat/water\\_use/index.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm). Acesso em: 12 out. 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of Food And Agriculture – Climate Change, Agriculture and Food Security**. Roma: FAO, 2016. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6030e/i6030e.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

IOWA, State University. **Institutional Review Board Research Requiring IRB Review**. February, 2008-2009, 2009.

SARKKI, Simo; NIEMELÄ, Jari; TINCH, Rob; HOVE, Sybille van den; WATT, Allan; YOUNG, Juliette. Balancing credibility, relevance and legitimacy: A critical assessment of trade-offs in science-policy interfaces. **Science and Public Policy**, v. 41, n. 2, p. 194-206, April 2014. DOI: <https://doi.org/10.1093/scipol/sct046>. Disponível em: <https://academic.oup.com/spp/article-abstract/41/2/194/1693910>. Acesso em: 12 out. 2022.



UN – United Nations. **The Sustainable Development Goals Report 2018**. 20.06.2018. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/publications/the-sustainable-development-goals-report-2018.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

UN-ESCAP – United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. **Economic and Social Survey of Asia and the Pacific 2010: Year-end Update – Maintaining Growth Amid Global Uncertainty**. 2010. Disponível em: <https://www.unescap.org/sites/default/files/publications/YearendUpdate2010.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

UN-ESCWA/IOM – United Nations Economic and Social Commission for Western Asia / International Organization for Migration **2017 Situation Report on International Migration** – Migration in the Arab Region and the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2018. Disponível em: <https://www.unescwa.org/sites/default/files/pubs/pdf/2017-situation-report-international-migration-english.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

UNICEF – United Nations Children's Fund. **A fair chance for every child** – The State of the World's Children 2016. New York: Unicef, June 2016. Disponível em: [https://www.unicef.org/media/50076/file/UNICEF\\_SOWC\\_2016-ENG.pdf](https://www.unicef.org/media/50076/file/UNICEF_SOWC_2016-ENG.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

WHO/UNICEF – World Health Organization / United Nations Children's Fund. **2017 Annual Report WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP)**. New York: WHO/Unicef, 2017. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/who/unicef-joint-monitoring-program-water-supply-sanitation-and-hygiene-jmp-2017> e <https://washdata.org/report/jmp-2017-annual-report>. Acesso em: 12 out. 2022.

WHO/UNICEF – World Health Organization / United Nations Children's Fund. **2018 Annual Report For every child, every right**. New York: WHO/Unicef, June 2019. Disponível em: <https://www.unicef.org/reports/annual-report-2018>. Acesso em: 12 out. 2022.



# **SUSTENTABILIDADE NO ENSINO SUPERIOR: EXTENSÃO E FORMAÇÃO NA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**

## ***SUSTAINABILITY IN HIGHER EDUCATION: EXTENSION AND TRAINING IN PROFESSIONAL AND TECHNOLOGICAL EDUCATION***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

MALACARNE, Robson; SILVA, Fábio Lippi; MACHADO, Michel Mott; BIZERRIL, Marcelo Ximenes Aguiar. Sustentabilidade no ensino superior: extensão e formação na educação profissional e tecnológica. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Robson Malacarne**

Professor do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Humanidade, Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes). Doutor em Administração de Empresas (Universidade Presbiteriana Mackenzie), com pós-doutorado em Desconstrução e Desenvolvimento Sustentável (Universidade de Coimbra, Portugal).

E-mail: robson.malacarne@ifes.edu.br

### **Fábio Lippi Silva**

Professor da Faculdade de Tecnologia de São Sebastião (Fatec São Sebastião). Mestre em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (Ceeteps).

E-mail: fabio.silva277@fatec.sp.gov.br

### **Michel Mott Machado**

Professor do Mestrado em Gestão e Desenvolvimento da Educação Profissional, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (Ceeteps). Doutor em Administração de Empresas (Universidade Presbiteriana Mackenzie), com Pós-Doutorado em Business and Society (York University, Canadá).

E-mail: michel.machado@cpspos.sp.gov.br

### **Marcelo Ximenes Aguiar Bizerril**

Professor do Programa de Pós-Graduação em Educação em Ciências, Universidade de Brasília (UnB). Doutor em Ecologia (UnB), com Pós-Doutorado em Políticas do Ensino Superior (Universidade de Aveiro, Portugal).

E-mail: bizerril@unb.br

## **RESUMO**

Este artigo parte do reconhecimento das complexas relações entre as instituições de ensino superior (IES) e a sociedade, o que requer pensar sobre



a extensão e a responsabilidade social da educação superior. Neste contexto, as IES devem possuir responsabilidades sobre o seu ambiente interno e externo, o que inclui a ideia de sustentabilidade no ensino superior. Portanto, tem-se por objetivo aqui discutir sobre como a extensão pode contribuir com o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade na educação profissional e tecnológica (EPT). Para alcançar o objetivo proposto, desenvolveu-se uma pesquisa descritiva, bibliográfica e documental, de natureza qualitativa, tendo como objeto o Programa Agência de Economia Criativa Experimental (Agecx). Com vistas às práticas reconhecidas como socioambientalmente competentes, se faz necessária a criação de espaços educacionais e mecanismos de aprendizagem transformadores, e que tenham por foco a construção de competências para a sustentabilidade, assim como o desenvolvimento da capacidade humana no trabalho. A EPT possui singularidades que podem favorecer a prática da extensão como suplementar ao ensino e a pesquisa, assim como complementar / constitutiva do processo de aprendizagem, sendo que este entendimento pode auxiliar o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade. Do ponto de vista das complementaridades/complementaridades relacionadas à prática extensionista, o Programa Agecx apresenta: (i) Foco na ação e na prática; (ii) Acolhida de questões éticas, culturais, econômicas, ambientais e sociais no percurso formativo; (iii) Desenvolvimento de projetos e vivências que valorizam as singularidades locais e territoriais; (iv) Rede de competências e saberes compartilhados; (v) Laboratório de Economia Criativa Experimental (LabECX). Entende-se que as visões sobre as singularidades da EPT e de complementaridades / complementaridades da extensão, podem oferecer caminhos de reflexão para que uma proposta metodológica da extensão considere laboratórios, formação de redes e projetos de intervenção territorial como estratégia para engajar os atores participantes, de modo a construir uma experiência viva no processo formativo.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Ensino Superior. Educação Profissional e Tecnológica. Extensão. Competências para a Sustentabilidade.

## ABSTRACT

This article starts from the recognition of the complex relationships between higher education institutions (HEI) and society, which requires thinking about the extension and social responsibility of higher education. In this context, HEIs must have responsibilities over their internal and external environment, which includes the idea of sustainability in higher education. Therefore, the objective here is to discuss how the extension can contribute to the development of competencies for sustainability in Professional and Technological Education (PTE). To reach the proposed objective, descriptive, bibliographic, and documentary research was developed, of a qualitative nature, having as its object the Experimental Creative Economy Agency Program (Agecx). With a view to practices recognized as socio-environmentally competent, it is necessary to create educational spaces and transformative learning mechanisms that focus on building skills for sustainability, as well as the development of human capacity at work. The PTE has singularities that can



favor the practice of extension as a supplement to teaching and research, as well as complementary / constitutive of the learning process, and this understanding can help the development of competencies for sustainability. From the point of view of the supplementary / complementary aspects related to the extensionist practice, the Agecx Program presents: (i) Focus on action and practice; (ii) Acceptance of ethical, cultural, economic, environmental, and social issues in the training course; (iii) Development of projects and experiences that value local and territorial singularities; (iv) Network of shared skills and knowledge; (v) Experimental Creative Economy Laboratory (LabECX). It is understood that the views on the singularities of the PTE and supplementary / extension complementarities can offer avenues of reflection so that a methodological proposal of extension considers laboratories, formation of networks, and territorial intervention projects as a strategy to engage the participating actors, to build a living experience in the formative process.

Keywords: Sustainability. Higher education. Professional and Technological Education. Extension. Competencies for Sustainability.

## 1 INTRODUÇÃO

Parte-se de um olhar para o reconhecimento da relevância da missão acadêmica e dos valores da educação superior, desde o ponto de vista do ensino, da pesquisa científica e tecnológica, da extensão (Marcovitch, 2017), bem como da profissionalização dos seus estudantes (Machado, 2021; Machado *et al.*, 2021). Nesta direção, é importante refletir na vinculação das Instituições de Ensino Superior (IES) com o seu entorno socioeconômico, assim como na responsabilidade social da educação superior (RSES) (Silva; Foligno; Machado, 2021).

Refletir sobre as complexas relações entre universidade e sociedade (RUS) (Gimenez; Bonacelli, 2021; Gimenez *et al.*, 2019; Machado, 2021; Machado *et al.*, 2021), entre outros aspectos, demanda um olhar sobre as IES a partir das consequências das suas ações na dinâmica social, interna e externamente à organização educacional. Esta proposição parte do pressuposto de que as organizações – o que inclui as educacionais – são, simultaneamente, produtos e produtoras da sociedade (Jaime; Lúcio, 2017), de modo que são responsáveis por seus atos, uma vez que influenciam e promovem mudanças sociais (Teixeira; Zaccareli, 2008).

Nesse sentido, a sustentabilidade tem sido uma das áreas de atividade da responsabilidade social das organizações (Blowfield; Murray, 2008). No caso do ensino superior, as instituições têm tido essa responsabilidade aumentada, no sentido de atender a demanda de formação de cidadãos comprometidos com a transição das sociedades atuais para as sociedades sustentáveis (González-Gaudiano; Meira-Carrea; Martínez-Fernández, 2015). Para tal é preciso



que as IES sejam modelos de sustentabilidade e que incluam a sustentabilidade nos currículos, de forma a promover uma série de capacidades necessárias e articuladas com a cidadania ambiental (Cortese, 2003).

Com esse entendimento, tem-se como relevante o papel da RSES (Calderón, 2005; Calderón; Gomes; Borges, 2016; Calderón; Pedro; Vargas, 2011; Martí-Noguera; Licandro; Gaete-Quezada, 2018; Vallaeys, 2006), assim como da extensão universitária (Calderón; Pessanha; Soares, 2007; Foligno *et al.*, 2021; Foligno; Silva; Machado, 2022; Tavares; Freitas, 2016). Nesta linha, considera-se que a educação profissional tecnológica de graduação deve estar incluída neste debate (Machado, 2021; Machado; Foligno; Silva, 2022; Machado; Prados, 2018; Machado; Prados; Martino, 2016; 2018), pois, conforme afirma Peterossi (2014), é necessário refletir sobre as funções das instituições de ensino da educação profissional e tecnológica (EPT).

A problemática do meio ambiente emergiu como fenômeno politicamente significativo no início dos anos 1970 (com a Conferência de Estocolmo) (Hogan; Vieira, 1995). Apesar disto, a questão da mudança ambiental global – com seus riscos acelerados e aprofundados pelas ações antropogênicas – é um tema que se impõe dramaticamente neste século inicial do terceiro milênio (Birch *et al.*, 2017; Marcovitch, 2012). Se assim é, as IES também devem possuir responsabilidades sobre o seu ambiente interno e externo, o que inclui, portanto, a ideia de sustentabilidade no ensino superior (Bizerril *et al.*, 2018; Rohrich; Takahashi, 2019; 2020; Silva; Bizerril, 2021), bem como as práticas correspondentes ao desempenho de sustentabilidade das IES, em suas várias dimensões, que passam pela educação, pesquisa, extensão, gestão dentre outras (Lozano *et al.*, 2015).

Duas dessas dimensões são de interesse mais direto no presente artigo, quais sejam: a educação e a extensão, sobretudo, no que diz respeito às suas contribuições para a formação de competências para a sustentabilidade na EPT.

Essa questão se apresenta de maneira relevante, pois ainda pouca atenção tem sido dada à sustentabilidade na educação profissional tecnológica de graduação no Brasil (Bizerril *et al.*, 2018; Borges *et al.*, 2013; Rohrich; Takahashi, 2019). Portanto, o objetivo central deste artigo é discutir sobre como a extensão pode contribuir com o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade na EPT. Para alcançar o objetivo proposto, foi realizada uma pesquisa descritiva, bibliográfica e documental, de natureza qualitativa (Godoy, 1995a; 1995b), tendo como objeto o Programa Agência de Economia Criativa Experimental (Agecx) (Ifes, 2022).



Para fundamentar as análises e reflexões debatidas neste artigo, procurou-se discutir sobre os cursos superiores de tecnologia (CST) e a formação do tecnólogo, a extensão universitária, a sustentabilidade no ensino superior e as competências para a sustentabilidade.

## **2 EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, EXTENSÃO E COMPETÊNCIAS PARA A SUSTENTABILIDADE**

As práticas extensionistas, articuladas com o ensino e a pesquisa, são essenciais para que os estudantes da EPT sejam capazes de refletir sobre o exercício de suas profissões e de compreender criticamente os impactos do uso de tecnologias na sociedade. Este capítulo traz o debate e as reflexões sobre o papel e a importância da extensão na EPT para o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade nos futuros profissionais.

### **2.1 EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA, OS CURSOS SUPERIORES DE TECNOLOGIA E A FORMAÇÃO DO TECNÓLOGO**

A EPT no Brasil é definida como a modalidade educacional que perpassa todos os níveis da educação e se volta à preparação para o exercício de profissões, com objetivo de contribuir para a inserção dos estudantes no mundo do trabalho e para a vida em sociedade. Os instrumentos legais que a estabelecem, levam em conta a noção de formação integral do ser humano, sobretudo, por meio do desenvolvimento de habilidades e competências com vistas ao exercício pleno da cidadania e à formação de profissionais que atuem de maneira ética e responsável, na perspectiva de contribuir para o desenvolvimento sustentável (Lei nº 9.394/1996).

São princípios da EPT, entre outros, a articulação com o setor produtivo, a integração entre educação e prática social, a articulação com o desenvolvimento socioeconômico e os arranjos produtivos locais, de maneira que os processos e práticas formativas voltem-se para um mundo em constante transformação e possibilitem a construção de conhecimentos e competências profissionais exigidas pelo desenvolvimento tecnológico e pelas demandas sociais, econômicas e ambientais. De tal modo, nota-se que a EPT se constitui, também, no sentido de oferecer meios para que o educando desenvolva a capacidade de aprender e se desenvolver de maneira permanente e ao longo de toda a vida (Delors *et al.*, 2012; Resolução CNE/CP nº 1/2021).

Observa-se que devido às influências dos avanços tecnológicos sobre as formas de trabalho, as profissões e sobre a



própria educação, assim como as mudanças econômicas advindas destes avanços, as IES são direcionadas a dialogarem constantemente com os setores produtivos e sociais, no sentido de promoverem projetos de inovação, pesquisas científico-tecnológicas e práticas educativas em ambientes que vão além do espaço acadêmico (Favretto; Moretto, 2013; Manfredi, 2016; Pegorini, 2020).

Esses espaços educativos ampliados, que se estabelecem por meio da relação com a sociedade, possibilitam que as práticas educativas se desenvolvam a partir da troca de saberes e experiências, interesses e necessidades, que levam à construção do conhecimento pluriversitário, ou seja, aquele que se constrói e se estabelece de maneira contextual, e que tem sua produção organizada à medida que pode ou é aplicado (Santos, 2011). Dessa forma, o educando passa a compreender que pode intervir na sua realidade, e desenvolve senso de responsabilidade a partir do momento que entende que suas ações têm importância e impacto na sociedade (Resolução CNE/CP nº 1/2021).

Isso conduz ao entendimento de que os processos de ensino-aprendizagem baseados em atividades que tenham o olhar para os anseios da sociedade, indicam que a educação tecnológica ultrapassa os limites dos interesses do mercado profissional e vai de encontro aos interesses além da academia, o que contribui com a qualidade da formação profissional e leva a IES a contribuir com o desenvolvimento social e sustentável (Favretto; Moretto, 2013; Pegorini, 2020; Resolução CNE/CP nº 1/2021).

Especificamente sobre a educação superior no nível de graduação, a EPT se efetiva por meio dos Cursos Superiores de Tecnologia (CST), que buscam incentivar a produção e a inovação científica e tecnológica, e propiciar a compreensão e a avaliação dos impactos sociais da incorporação de novas tecnologias (Resolução CNE/CP nº 1/2021). Os CST tendem a propiciar uma formação sintonizada com as necessidades econômicas (Manfredi, 2016). Porém, ao passo que as empresas buscam trabalhadores qualificados para lidar com as novas tecnologias e, ao mesmo tempo, habilitados a (re)aprender ao longo da vida (Delors *et al.*, 2012), pensa-se não ser incoerente a noção de que a EPT tem se tornado cada vez mais estratégica à formação de profissionais capazes de contribuir com a pesquisa, a inovação tecnológica e social (Machado; Prados; Martino, 2016), tendo a sustentabilidade como aspecto destacado na sua atuação no mundo do trabalho, mas também no dia a dia como cidadãos.



Entende-se, assim, que as IES devem centrar seus CST em formações mais abrangentes, pautadas pela articulação entre o ensino, a pesquisa e a extensão, nas quais a prática extensionista se faz essencial para o alinhamento entre as instituições de ensino e a sociedade, além de ser facilitadora para a formação de profissionais críticos de suas ações na sociedade (Machado; Prados; Martino, 2016; Oliveira; Freire; Batista, 2020).

## 2.2 EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA

A extensão universitária é a principal ponte entre a universidade e as necessidades reais da sociedade, e é desenvolvida por meio de projetos, cursos e intervenções diversas. Valorizada tardiamente na Europa como terceira missão (Marhl; Pausits, 2011), a extensão é reconhecida na América Latina como um compromisso social do ensino superior desde a Reforma de Córdoba, ocorrida em 1918 na Universidade de Córdoba, Argentina (Gomez; Corte; Rosso, 2019). No Brasil, a extensão tem seus conceitos, formas de efetivação e importância para a formação dos estudantes sendo debatidos desde as primeiras experiências extensionistas na década de 1910. No entanto, apesar de ter sido definida como uma das três funções universitárias pela Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (CF) – que determina que as universidades devem obedecer aos princípios da indissociabilidade entre ensino, pesquisa e extensão – apenas em 2018 suas diretrizes foram instituídas em lei, pela Resolução CNE/CES nº 7/2018, que estabelece as Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira (DCEU).

As DCEU, que cunharam o termo 'Extensão na Educação Superior Brasileira', antes designada como 'Extensão Universitária', determinam a integração desta importante função acadêmica à matriz curricular dos cursos superiores, o que passou a ser conhecido como 'curricularização da extensão'. Além disso, as DCEU estabilizam o conceito e direcionam as práticas extensionistas em pilares como: interação dialógica da comunidade acadêmica com a sociedade; formação integral e cidadã dos estudantes; diálogo construtivo e promoção de mudanças na IES e na sociedade; articulação ensino/extensão/pesquisa; contribuição ao enfrentamento das questões da sociedade brasileira (Resolução CNE/CES nº 7/2018; Mello; Neto; Petrillo, 2020; Gavira; Gimenez; Bonacelli, 2020).

A partir das DCEU, a extensão passa a ser definida como a atividade que se integra à matriz curricular, que se articula permanentemente com o ensino e a pesquisa, e promove a interação



transformadora entre as IES e a sociedade, por meio da produção e aplicação de conhecimentos (Resolução CNE/CES nº 7/2018).

Ao se constituir como a dimensão do ensino superior responsável por construir a relação dialógica de troca de saberes, conhecimentos e experiências entre a comunidade acadêmica, a interna e a externa, a extensão se sustenta na ideia de criar pontes com a sociedade para que a comunidade interna amplie sua visão, ao direcionar ensino e pesquisa, e a teoria e a prática para problemas reais, o que possibilita ao educando construir o saber no contexto social, em vivências adquiridas a partir de diálogo e discussões que se efetivam além dos muros da IES (Tavares; Freitas, 2016).

Dessa forma, articulada ao ensino e à pesquisa, ao passo que promove a transformação da comunidade onde a IES está inserida, a extensão contribui para que o ensino superior cumpra sua missão de produzir conhecimento pluriversitário (Machado; Foligno; Silva, 2022; Resolução CNE/CES nº 7/2018; Santos, 2011).

Nesse sentido, a extensão se constitui como oportunidade e ferramenta para a transformação social, pois assume papel de função formativa, que integra a teoria ensinada em sala de aula à realidade do aluno, colocando-o em contato direto com a comunidade externa, a partir de questões reais, concretas e práticas (Gavira; Gimenez; Bonacelli, 2020; Silva, 2020).

Portanto, é importante reconhecer o papel desta função acadêmica para que as IES se mantenham relevantes no processo formativo dos estudantes diante das inúmeras possibilidades de acesso à informação e de formação nos dias de hoje (Delors *et al.*, 2012). Pois, ao se articular com o ensino e a pesquisa, a extensão permite repensar e contextualizar as práticas educativas no espaço e no tempo, retroalimentar as funções acadêmicas e oxigenar a vida universitária como consequência do contato da IES com a comunidade (Forproex, 2012).

As ações extensionistas possibilitam que o aluno desenvolva relações com os outros e com o mundo exterior à escola, permitindo que o indivíduo construa seu próprio conhecimento e aprenda a aplicá-lo (Delors *et al.*, 2012). Esse “choque” com a realidade, possibilita ao discente contextualizar a aquisição/construção do conhecimento científico e tecnológico com questões éticas, culturais, econômicas, ambientais e sociais que o cercam (Jezine; 2004).

O princípio da articulação do tripé acadêmico (ensino – pesquisa – extensão) veio para reafirmar a extensão como processo educativo, o que pressupõe “que as ações de extensão adquirem



maior efetividade se estiverem vinculadas ao processo de formação de pessoas (Ensino) e de geração de conhecimento (Pesquisa)” (Forproex, 2012, p. 32).

Ao se articular com o ensino, a extensão possibilita ampliar os espaços de aprendizagem para além da sala de aula e torna o estudante protagonista da sua formação técnica e cidadã, participante ativo no processo de construção e compartilhamento do conhecimento. Ao se articular com a pesquisa, permite que os novos conhecimentos sejam construídos por meio de estudos que se estabelecem pelo diálogo da academia com a comunidade. Dessa forma, a articulação das três funções acadêmicas promove a transformação social da região e dos sujeitos envolvidos, além de contribuir para a democratização do conhecimento produzido (Corrêa, 2003; Forproex, 2012; Resolução nº CNE/CES 7/2018).

Nessa mesma linha de pensamento, Oliveira, Freire e Batista (2020) observam que a extensão permite a concepção de educação que transcenda a sala de aula e desperte no educando sensibilidade para questões humanísticas, sociais e ambientais, de maneira que é imperioso pensar em ações que não desassociam a formação humana e profissional.

Além disso, contribui para que a educação superior realize a tarefa de preparar os alunos para além do exercício de suas profissões, pois possibilita o envolvimento com situações que favorecem o enriquecimento pessoal, de forma a promover a educação de um trabalhador produtivo emancipado, apto a atuar de maneira crítica e consciente, em defesa da vida digna e de uma sociedade justa. No entanto, a IES deve estar aberta à colaboração externa, para se estabelecer como local de estudo aberto a todos, que promove a formação integral do estudante, ou seja, a formação humana e profissional (Batista, 2012; Delors *et al.*, 2012; Tavares; Freitas, 2016).

Ao participar de ações extensionistas e se confrontar com a realidade, muitas vezes dura e desfavorável ao próximo (ou de si próprio), o estudante é levado a refletir e a se colocar como parte do problema e da solução, e desenvolve espírito social responsável. Assim, a articulação ensino – pesquisa – extensão se faz essencial para uma formação acadêmica emancipadora, que desperte o potencial dos indivíduos pela formação do senso crítico, ético, democrático e reflexivo no educando, que passa a se enxergar como agente transformador, em favor da construção de uma sociedade melhor (Silva; Fonseca, 2018).



### 2.3 DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

A extensão na educação profissional e tecnológica pode se constituir como oportunidade para o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade (DCpS). Entretanto, para alcançar esse intuito, é necessário ficar atento a algumas questões socioambientais e metodológicas que perpassam o percurso formativo dos discentes.

A globalização, os avanços tecnológicos e a necessidade de se produzir mais com o menor impacto ambiental possível, direcionam as IES a terem de considerar em suas ações, princípios de educação para o desenvolvimento sustentável, com o intuito de capacitar as pessoas para adquirir conhecimento não apenas para o exercício de profissões, mas que tenham capacidade de refletir sobre os efeitos e lidar com complexidade do comportamento e das tomadas de decisões necessárias em uma perspectiva global, orientada para o futuro e com responsabilidade social e ambiental (Barth *et al.*, 2007; Lozano *et al.*, 2021).

Neste sentido, parte-se da ideia de sustentabilidade para o desenvolvimento de competências na formação do tecnólogo, pois entende-se que se trata de uma visão mais holística e crítica dos problemas socioambientais (Bizerril; Rosa; Carvalho, 2018; Bizerril *et al.*, 2018; Segalàs *et al.*, 2012; Silva; Bizerril, 2021).

Lambrechts *et al.* (2013) colabora com essa discussão na medida em que pesquisa a inserção da temática da sustentabilidade nos cursos de administração na Bélgica, os autores concluem que as competências relacionadas à orientação para o futuro, ao compromisso pessoal e à ação sustentável estão praticamente ausentes nos programas. A orientação para o futuro consiste na capacidade de o sujeito perceber a relação de suas ações no presente com os impactos sociais e ambientais no futuro, o compromisso pessoal envolve a necessidade de mudança individual para alcançar resultados institucionais, enquanto o compromisso com a ação compreende a prática como exigência para a transformação social e ambiental. Sugere-se a revisão dos currículos para a inserção e integração dessas competências nos programas dos cursos (Lambrechts *et al.*, 2013).

Esta ausência também é percebida nos cursos de engenharia por Hanning *et al.* (2012), que analisou o conteúdo de setenta cursos na Suécia comparando-os com a expectativa de representantes de dezesseis indústrias, observou-se que as empresas exigem uma ampla



gama de competências para a sustentabilidade. No entanto, a pesquisa demonstra que tanto os alunos quanto as organizações se mostram insatisfeitos com a formação oferecida pela faculdade, visto que a prática cotidiana no trabalho demonstra que os alunos não estão capacitados para responder às demandas de sustentabilidade exigidas pela sociedade e pelo poder público. Em estudo similar, com uma amostra de quinhentos estudantes de engenharia em diversos países da Europa, Segalàs *et al.* (2012) identificou a prevalência de uma visão estreita de sustentabilidade, focada apenas nos aspectos tecnológicos enquanto são ignorados os aspectos sociais e outros que compõem uma necessária abordagem mais complexa das questões socioambientais e da sustentabilidade.

Nesse sentido, Ferreira, Lopes e Morais (2006) afirmam que os indivíduos só serão capazes de lidar com as questões ambientais se estiverem envolvidos em ações concretas que os preparem para lidar com a complexidade do desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, o desenvolvimento de competências pessoais, interpessoais, sociais e técnicas para a sustentabilidade ocorre por meio da prática de uma visão holística e integrada dos problemas e das soluções, sendo a educação voltada para ação um caminho privilegiado para a mudança na maneira de pensar e agir dos sujeitos.

Ferreira, Lopes e Morais (2006) justificam essas afirmações por meio do estudo do projeto EMAS@SCHOOL, desenvolvido na Escola Superior Agrária de Coimbra, no qual os sujeitos foram envolvidos na implantação de um Sistema de Gestão Ambiental por meio de uma metodologia que buscou:

- ♦ Estimular uma aprendizagem profunda e holística;
- ♦ Desenvolver a capacidade de pensar de forma holística;
- ♦ Desenvolver competências práticas, voltadas para ação;
- ♦ Desenvolver competências interpessoais;
- ♦ Desenvolver capacidade de inter-relação.

A discussão de Wiek, Withycombe e Redman (2011) é convergente com as observações de Ferreira, Lopes e Morais (2006) no que tange à necessidade de os alunos serem preparados para planejar, realizar e participar da pesquisa sobre sustentabilidade, que deve ser focada na ação e na prática de solução de problemas. Por meio de uma pesquisa a respeito das publicações na área os autores identificaram cinco competências-chave que devem ser consideradas neste processo:

- ♦ Competência do pensamento sistêmico (valores e sistemas sociais);



- ♦ Competência normativa (ética e justiça);
- ♦ Competência antecipatória (cenários e visões);
- ♦ Competência estratégica (viabilidade e eficiência); e,
- ♦ Competência interpessoal (liderança e cooperação).

Como proposta de melhoria da pesquisa nesta área, sugere-se o desenvolvimento de justificativas teóricas para cada competência, busca de evidências empíricas e aprofundamento do conhecimento metodológico.

Ao se analisarem os pressupostos das abordagens de DCpS expostos até aqui, observa-se que há perspectivas mais pragmáticas e funcionais, que se dedicam a pensar como alinhar as ações dos sujeitos às diretrizes de sustentabilidade estabelecidas pelas empresas. Outros autores, no entanto, compreendem os discursos de DCpS a partir de uma perspectiva mais holística e crítica, e discutem como a incorporação da sustentabilidade pode colaborar para a construção de uma nova forma de pensar e agir no mundo, a partir dos princípios do desenvolvimento sustentável, o que coloca o debate numa perspectiva mais ideológica e política.

Todavia, a leitura de competências pode dificultar essa perspectiva emancipadora quando lida a partir de um enfoque funcionalista ignorando outras traduções como a interpretativista e a societal. A leitura funcionalista reduz a competência e a capacidade de gerenciar e responder a ferramentas de gestão, com indicadores que medem resultados e ignoram a aprendizagem do processo. A perspectiva interpretativa e societal por sua vez entende e acolhe a complexidade da sociedade e busca modos de preparar os sujeitos para responder às questões socioambientais que se apresentam, marcados pelas imprevisibilidades.

Acolher as questões socioambientais no percurso de desenvolvimento de competências passa por ler a sustentabilidade além dos indicadores. Neste sentido, o propósito deste trabalho é, a partir de uma leitura das ações do programa de Extensão Agência de Economia Criativa Experimental (Agecx), compreender como a extensão contribui para o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade na educação profissional e tecnológica?

Entende-se como necessária a criação de espaços educacionais e mecanismos de aprendizagem transformadores, dedicadas à construção de competências focadas na sustentabilidade, para promover o desenvolvimento da capacidade humana no trabalho, no nível individual e coletivo, no sentido de



responder à pressão dos movimentos da sociedade civil, dos governos, dos organismos internacionais como a ONU, por práticas reconhecidas como socioambientalmente competentes (Brunstein *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2019).

### **3 UM OLHAR PARA A PRÁTICA EXTENSIONISTA: AS VIVÊNCIAS DO PROGRAMA AGÊNCIA DE ECONOMIA CRIATIVA EXPERIMENTAL**

A Agência de Economia Criativa Experimental (Agecx) é um Programa de Extensão do Campus Viana do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) com o objetivo de acolher, dar suporte metodológico e desenvolver ações com coletivos nos territórios do Espírito Santo (ES).

O Ifes é uma instituição de educação profissional e tecnológica e possui 23 *campi*, com participação ativa no desenvolvimento socioambiental do ES. Como ação institucional do Ifes, o Programa Agecx acolhe coletivos culturais que desenvolvem ações comunitárias nos territórios no entorno dos *campi*, bem como aproxima os coletivos dos núcleos e programas do Instituto (Núcleo de Arte e Cultura, Incubadora, Núcleo de Estudos Afro-brasileiros e Indígenas, Núcleo de Educação Ambiental, Laboratórios etc.). Duas estratégias são propostas pela Agecx com intuito de desenvolver competências para a sustentabilidade nos atores que participam de suas ações (discentes e professores). Uma iniciativa é a Rede de Competências e Saberes Compartilhados e a outra estratégia é o Laboratório de Economia Criativa Experimental (LabECX).

A Rede de Competências e Saberes Compartilhados é a rede proposta pela Agecx aos coletivos interessados em participar de suas ações. Prevê encontros e seminários para colaborar com a identificação e sistematização de metodologias e com a estruturação de projetos, estimulando a ação colaborativa (entre coletivos e entre coletivos e instituições) para potencialização dos seus resultados. Para participar da Rede, os coletivos devem se inscrever em edital de fluxo contínuo disponibilizado pelo Ifes. Cada coletivo é tratado de forma singular. De acordo com suas afinidades com temas geradores propostos pelas unidades do Ifes e sua localização, há também a oportunidade de participar de encontros e capacitações, bem como de atuarem como oficinairos nas ações da Agecx, compartilhando seus saberes e experiências com outros coletivos nos territórios.

Os Laboratórios de Economia Criativa Experimental, por sua vez, são espaços de vivência e experimentação (físicos ou não) que integram a abordagem em economia criativa do Núcleo



Interinstitucional de Estudos e Pesquisas em Desconstrução, Economia Criativa e Sustentabilidade (Núcleo Poiein). A metodologia proposta visa produzir compreensões complementares e suplementares sobre o papel da criatividade no desenvolvimento de competências, a partir de referenciais que considerem as singularidades dos indivíduos, dos coletivos e dos territórios, entendendo suas questões históricas, ancestrais, sociais, culturais, ambientais, econômicas, entre outras. Nesse sentido, os coletivos são considerados agentes fundamentais para as noções de sustentabilidade, desenvolvimento territorial, entre outros discursos que envolvem a questão socioambiental. No presente estudo optou-se por expor as experiências e metodologias de desenvolvimento de competências para a sustentabilidade do Coletivo Conscientiza Piapitangui.

O propósito do Coletivo é mobilizar pessoas em torno de questões ambientais concretas. O grupo surgiu a partir do incômodo com o turismo predatório no Vale das Cachoeiras, em Viana-ES, com alta geração de resíduos durante as visitas. O coletivo é um ator que mobiliza o Laboratório de Economia Criativa Experimental no Ifes Viana e no território do Vale das Cachoeiras. Entre as ações realizadas, destacam-se os projetos de mutirão ambiental que envolve ações educativas e de conscientização sobre o corpo hídrico. Outra ação proposta pelo Coletivo foi o Jardim dos Sonhos, dinâmica pedagógica que envolveu a comunidade escolar do Ifes Viana associando o processo de plantar sementes com o projeto de vida dos atores envolvidos.

A participação de discentes e docentes nas ações propostas pelo Coletivo constitui oportunidade de desenvolvimento de competências para a sustentabilidade, visto que a estratégia metodológica adotada envolve vivências em iniciativas que visam responder a questões territoriais e locais. Tal leitura vai ao encontro de Ferreira, Lopes e Morais (2006), já que as experimentações estimulam uma aprendizagem profunda e favorecem as competências práticas, voltadas para a ação.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A educação profissional e tecnológica possui singularidades que oferecem brechas que favorecem a prática da extensão como algo complementar ao ensino e a pesquisa. Além da complementaridade, o que se verifica é a leitura da extensão como algo constituinte do processo de aprendizagem. Essa característica favorece o desenvolvimento de competências para a sustentabilidade



quando considera alguns fatores que merecem ser evidenciados. No Quadro 1 esses elementos são destacados.

Quadro 1 – Complementaridades e complementaridades da extensão

Categoria	Perspectivas	Complementaridades e Suplementaridades
Extensão	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Articulação ensino – extensão – pesquisa; contribuição ao enfrentamento das questões da sociedade brasileira (Resolução CNE/CES nº 7/2018; Mello; Neto; Petrillo, 2020; Gavira; Gimenez; Bonacelli, 2020);</li> <li>▪ Contextualizar a aquisição / construção do conhecimento científico e tecnológico com questões éticas, culturais, econômicas, ambientais e sociais que o cercam (Jezine; 2004).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Foco na ação e na prática;</li> <li>▪ Acolhida de questões éticas, culturais, econômicas, ambientais e sociais no percurso formativo;</li> </ul>
Competência	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wiek, Withycombe e Redman (2011) e Ferreira, Lopes e Morais (2006) defendem que os alunos sejam preparados para planejar, realizar e participar da pesquisa sobre sustentabilidade, que deve ser focada na ação e na prática de solução de problemas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desenvolvimento de projetos e vivências que valorizam as singularidades locais e territoriais;</li> </ul>
Agecx	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ A metodologia proposta visa produzir compreensões complementares e suplementares sobre o papel da criatividade no desenvolvimento de competências, a partir de referenciais que considerem as singularidades dos indivíduos, dos coletivos e dos territórios, entendendo suas questões históricas, ancestrais, sociais, culturais, ambientais, econômicas, entre outras.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rede de Competências e Saberes Compartilhados e a outra estratégia é o Laboratório de Economia Criativa Experimental (LabECX).</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).



Ao analisar as perspectivas e discussões em torno da extensão e da trajetória de desenvolvimento de competências para a sustentabilidade observa-se complementaridades e suplementaridades. Isso oferece caminhos de reflexão para que uma proposta metodológica da extensão na educação profissional e tecnológica considere laboratórios, formação de redes e projetos de intervenção territorial como estratégia para engajar os atores participantes, de modo a tornar a extensão como uma experiência viva no processo formativo.

Como oportunidade de aprofundamento em pesquisas futuras sugere-se um estudo longitudinal que possa detalhar, com a realização de entrevistas e rodas de conversas, quais as dificuldades enfrentadas na realização dos projetos. Com essa estratégia de pesquisa também seria possível a sistematização de um produto educacional que possibilitasse a replicação da experiência, considerando as singularidades de cada território.

## REFERÊNCIAS

- BARTH, Matthias; GODEMANN, Jasmin; RIECKMANN, Marco; STOLTENBERG, Ute. Developing key competencies for sustainable development in higher education. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 8, n. 4, p. 416-430, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/14676370710823582>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/233518501\\_Developing\\_Key\\_Competencies\\_for\\_Sustainable\\_Development\\_in\\_Higher\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/233518501_Developing_Key_Competencies_for_Sustainable_Development_in_Higher_Education). Acesso em: 28 ago. 2022.
- BATISTA, Sueli Soares dos Santos. Educação profissional e tecnológica: politécnica e emancipação. In: ALMEIDA, Ivanete Bellucci P. de; BATISTA, Sueli Soares dos Santos. (Org.). **Educação Tecnológica: reflexões, teorias e práticas**. Jundiaí: Paco Editorial, 2012. p. 27-38.
- BIRCH, Kean; PEACOCK, Mark; WELLEN, Richard; HOSSEIN, Caroline Shenaz; SCOTT, Sonya; SALAZAR, Alberto. Global environmental change. [cap. 9]. In: BIRCH, Kean; PEACOCK, Mark; WELLEN, Richard; HOSSEIN, Caroline Shenaz; SCOTT, Sonya; SALAZAR, Alberto (ed.). **Business and Society: A critical introduction**. London, UK: Zed Books, 2017.
- BIZERRIL, Marcelo Ximenes Aguiar; ROSA, Maria João; CARVALHO, Teresa. Construindo uma universidade sustentável: uma discussão baseada no caso de uma universidade portuguesa. **Avaliação**, Campinas; Sorocaba, SP, v. 23, n. 2, p. 424-447, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1414-40772018000200009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aval/a/GX4wV7LqXcgnh3FFJd68Lbf/>. Acesso em: 28 ago. 2022.
- BIZERRIL, Marcelo Ximenes Aguiar; ROSA, Maria João; CARVALHO, Teresa; PEDROSA, J. Sustainability in higher education: A review of contributions from Portuguese Speaking Countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 601-612, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.048>. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Sustainability-In-Higher-Education%3A-A->



Review-Of-Bizerril-Rosa/be049a54b68aa08d66e1a775b11fedc15fe8ffa6. Acesso em: 28 ago. 2022.

BLOWFIELD, Michael; MURRAY, Alan. **Corporate responsibility: A critical introduction**. New York, NY: Oxford University Press, 2008.

BORGES, Aurélio Ferreira; REZENDE, José Luiz Pereira de; BORGES, Luís Antônio Coimbra; BORÉM, Rosângela Alves Tristão; MACEDO, Renato Luiz Grisi; BORGES, Maria dos Anjos Cunha Silva. Análise da gestão ambiental nos Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 177-184, abr./jun. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000200001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/jj/cerne/a/B9BcXnGR8hMfyyzYwFCyrzb/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. D.O.U. de 05.10.1988, p. nº 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Lei nº 9.394**, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. D.O.U. de 23.12.1996, p. nº 27833. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9394.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm). Acesso em: 12 ago. 2020.

BRASIL. **Resolução CNE/CES nº 7**, de 18 de dezembro de 2018. Estabelece as Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira e regimenta o disposto na Meta 12.7 da Lei nº 13.005/2014, que aprova o Plano Nacional de Educação – PNE 2014-2024 e dá outras providências. Brasília: Ministério da Educação / Conselho Nacional de Educação / Câmara de Educação Superior, 2018. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/component/content/article?id=62611>. [http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com\\_docman&view=download&alias=104251-rces007-18&category\\_slug=dezembro-2018-pdf&Itemid=30192](http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=104251-rces007-18&category_slug=dezembro-2018-pdf&Itemid=30192). Acesso em: 24 de ago. 2020.

BRASIL. **Resolução CNE/CP nº 1**, de 5 de janeiro de 2021. Define as Diretrizes Curriculares Nacionais Gerais para a Educação Profissional e Tecnológica. Brasília: Ministério da Educação, 2021. D.O.U. de 06.01.2021, Edição: 3, Seção: 1, p. 19. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cne/cp-n-1-de-5-de-janeiro-de-2021-297767578>. Acesso em: 28 ago. 2022.

BRUNSTEIN, Janette; JAIME, Pedro; CURTI, Denise Pereira; D'ANGELO, Marcia Juliana; MAINARDES, Emerson Wagner. Assessment and evaluation of higher education in business management: an analysis of a Brazilian case in the light of social learning theory for sustainability. **Assessment and Evaluation in Higher Education**, v. 40, n. 6, p. 833-854. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/02602938.2015.1041096>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02602938.2015.1041096>. Acesso em: 28 ago. 2022.

CALDERÓN, Adolfo Ignacio. Responsabilidade social: desafios à gestão universitária. **Estudos: Revista da Associação Brasileira de Mantenedores do Ensino Superior**, Brasília, DF, v. 23, n. 34, p. 13-27, 2005. Disponível em: [https://www.academia.edu/5531797/CALDER%C3%93N\\_A\\_I\\_Responsabilidade\\_social\\_desafios\\_%C3%A0\\_gest%C3%A3o\\_universit%C3%A1ria\\_Estudos\\_Bras%C3%ADlia\\_Bras%C3%ADlia\\_v\\_34\\_p\\_19\\_27\\_2005](https://www.academia.edu/5531797/CALDER%C3%93N_A_I_Responsabilidade_social_desafios_%C3%A0_gest%C3%A3o_universit%C3%A1ria_Estudos_Bras%C3%ADlia_Bras%C3%ADlia_v_34_p_19_27_2005). Acesso em: 28 ago. 2022.

CALDERÓN, Adolfo Ignacio; GOMES, Cleber Fernando; BORGES, Regilson Maciel. Responsabilidade social da educação superior: mapeamento e tendências temáticas da produção científica brasileira (1990-2011). **Revista Brasileira de Educação**, v. 21, n. 66, p. 653-679, jul./set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-24782016216634>. Disponível em: <https://www.scielo.br/jj/rbedu/a/9BLqTf5DT3pdfRr3Kn4FXN/>. Acesso em: 28 ago. 2022.



CALDERÓN, Adolfo Ignacio; PEDRO, Rodrigo Fornalski; VARGAS, Maria Caroline. Responsabilidade social da educação superior: a metamorfose do discurso da UNESCO em foco. **Interface – Comunicação, Saúde, Educação**, Botucatu, v. 15, n. 39, p. 1185-1198, out./dez. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1414-32832011000400017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ics/a/BM36SLyvDzJKsQMSxDYLZVm/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

CALDERÓN, Adolfo Ignacio; PESSANHA, João Alexandre O.; SOARES, Vera Lúcia p. C. **Educação superior**: construindo a extensão universitária nas IES particulares. São Paulo: Xamã, 2007.

CORRÊA, Edson José. Extensão universitária, política institucional e inclusão social. **Revista Brasileira de Extensão Universitária**, v. 1, n. 1, p. 12-15, jul./dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.36661/2358-0399.2003v1i1.864>. Disponível em: <https://periodicos.uffs.edu.br/index.php/RBEU/article/view/864>. Acesso em: 28 ago. 2022.

CORTESE, Anthony D. The critical role of higher education in creating a sustainable future: Higher education can serve as a model of sustainability by fully integrating all aspects of campus life. **Planning for Higher Education**, v. 31, n. 3, p. 15-22. 2003. Disponível em: <https://redcampussustainable.cl/wp-content/uploads/2018/03/6-CorteseCriticalRoleOfHE.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

DELORS, Jacques; AL-MUFTI, In'am; AMAGI, Isao; CARNEIRO, Roberto; CHUNG, Fay; GEREMEK, Bronislaw; GORHAM, William; KORNHAUSER, Aleksandra; MANLEY, Michael; QUERO, Marisela Padrón; SAVANÉ, Marie-Angélique; SINGH, Karan; STAVENHAGEN, Rodolfo; SUHR, Myong Won; NANZHAO, Zhou. **Educação um tesouro a descobrir**. Relatório para a UNESCO da Comissão Internacional sobre Educação para o Século XXI. 7. ed. São Paulo: Cortez / Unesco / MEC, 2012. Disponível em: [http://dhnet.org.br/dados/relatorios/a\\_pdf/r\\_unesco\\_educ\\_tesouro\\_descobrir.pdf](http://dhnet.org.br/dados/relatorios/a_pdf/r_unesco_educ_tesouro_descobrir.pdf). Acesso em: 28 ago. 2022.

FAVRETTO, Juliana; MORETTO, Cleide Fátima. Os cursos superiores de tecnologia no contexto de expansão da educação superior no Brasil: a retomada da ênfase na educação profissional. **Educação & Sociedade**, Campinas, v. 34, n. 123, p. 407-424, abr./jun. 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/873/87328002005.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

FERREIRA, Antonio J. D.; LOPES, Marta A. R.; MORAIS, Jaime p. F. Environmental management and audit schemes implementation as an educational tool for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 9-11, p. 973-982, feb. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jclepro.2006.01.003>. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-5594d4d2-564e-3cc5-8f80-5dde7a98696a>. Acesso em: 28 ago. 2022.

FOLIGNO, Adriane Zangiacomo; SILVA, Fábio Lippi; CUNHA, Dyane Guedes; MACHADO, Michel Mott. Extensão: fundamentos teóricos para uma abordagem na Educação Profissional e Tecnológica. XVI SIMPÓSIO DOS PROGRAMAS DE MESTRADO PROFISSIONAL, SIMPROFI – Produção de Conhecimento em Programas de Mestrado e Doutorado Profissionais: Experiências e Desafios, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo – SP, Brasil, 24 e 25 de novembro, 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/356508550\\_Extensao\\_fundamentos\\_teoricos\\_para\\_uma\\_abordagem\\_na\\_Educacao\\_Profissional\\_e\\_Tecnologica](https://www.researchgate.net/publication/356508550_Extensao_fundamentos_teoricos_para_uma_abordagem_na_Educacao_Profissional_e_Tecnologica). Acesso em: 28 ago. 2022.

FOLIGNO, Adriane Zangiacomo; SILVA, Fábio Lippi; MACHADO, Michel Mott. Extensão universitária: estudo bibliométrico da produção científica brasileira (2010-2020). **Revista Fatec Zona Sul – Refas**, v. 8, n. 3, p. 19-33, fev. 2021. Disponível



em: <http://revistarefas.com.br/index.php/RevFATECZS/article/view/498/0>. Acesso em: 28 ago. 2022.

FORPROEX – Fórum de Pró-Reitores de Extensão das Universidades Públicas Brasileiras. **Política Nacional de Extensão Universitária (PNEU)**. Manaus: Forproex, 2012. Disponível em: <https://proex.ufsc.br/files/2016/04/Pol%C3%ADtica-Nacional-de-Extens%C3%A3o-Universit%C3%A1ria-e-book.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GAVIRA, Muriel de Oliveira; GIMENEZ, Ana Maria Nunes; BONACELLI, Maria Beatriz Machado. Proposta de um sistema de avaliação da integração ensino e extensão: um guia para universidades públicas brasileiras. **Avaliação: Revista da Avaliação da Educação Superior**, v. 25, n. 2, p. 395-415, jul. 2020. Disponível em: <https://periodicos.uniso.br/avaliacao/article/view/4026>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GIMENEZ, Ana Maria Nunes; BONACELLI, Maria Beatriz Machado. A terminological study about university-society relations: third mission, socioeconomic surroundings and the evolution of the role of academia. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 17, n. 46, p. 1-21, jan./mar. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rt.v17n46.11641>. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rt/article/view/11641>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GIMENEZ, Ana Maria Nunes; GAVIRA, Muriel de Oliveira; PALLONE, Simone; BONACELLI, Maria Beatriz Machado. Avaliação da relação universidade-sociedade: o caso da Unicamp em perspectiva nacional e internacional. ALTEC 2019: XVIII Congreso Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica At: Universidad Pontificia Bolivariana (Medellín, Colombia). **Revista Debates sobre Innovación**, v. 3, n. 2, p. 1-14, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/342392712\\_Avaliacao\\_da\\_relacao\\_universidade-sociedade\\_o\\_caso\\_da\\_Unicamp\\_em\\_perspectiva\\_nacional\\_e\\_internacional](https://www.researchgate.net/publication/342392712_Avaliacao_da_relacao_universidade-sociedade_o_caso_da_Unicamp_em_perspectiva_nacional_e_internacional). Acesso em: 28 ago. 2022.

GODOY, Arilda Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **RAE – Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 2, p. 57-63, mar./abr. 1995a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-75901995000200008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rae/a/wf9CgwXVjplFVgpnkCgnc/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GODOY, Arilda Schmidt. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. **RAE – Revista de Administração de Empresas**, v. 35, n. 3, p. 20-29, mai./jun. 1995b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-75901995000300004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rae/a/ZX4cTGrqYfVhr7LvVyDBgdb/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GOMEZ, Simone da Rosa Messina; CORTE, Marilene Gabriel Dalla; ROSSO, Gabriela Paim. A Reforma de Córdoba e a educação superior: institucionalização da extensão universitária no Brasil. **Revista Internacional de Educação Superior**, Campinas, SP, v. 5, p. e019020, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/riesup.v5i0.8653655>. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/riesup/article/view/8653655>. Acesso em: 28 ago. 2022.

GONZÁLEZ-GAUDIANO, Edgar J.; MEIRA-CARTEA, Pablo Ángel; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, Cynthia n. **Sustentabilidad y Universidad**: retos, ritos y posibles rutas. **Revista de la Educación Superior**, v. 3, n. 175, p. 69-93, 2015. Disponível em: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-27602015000300004&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-27602015000300004&lng=es&nrm=iso). Acesso em: 28 ago. 2022.

HANNING, Andreas; ABELSSON, Anna Priem; LUNDQVIST, Ulrika; SVANSTRÖM, Magdalena. Are we educating engineers for sustainability? Comparison between obtained competences and Swedish industry's needs. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 13, n. 3, p. 305-320, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1108/14676371211242607>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/235317706\\_Are\\_we\\_educating\\_engineers\\_for\\_sustainability\\_](https://www.researchgate.net/publication/235317706_Are_we_educating_engineers_for_sustainability_)



Comparison\_between\_obtained\_competences\_and\_Swedish\_industry's\_needs. Acesso em: 28 ago. 2022.

HOGAN, Daniel Joseph; VIEIRA, Paulo F. Introdução. In HOGAN, Daniel Joseph; VIEIRA, Paulo F. (Orgs.). **Dilemas socioambientais e desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 1995.

IFES – Instituto Federal do Espírito Santo. Hub Criativo Virtual realiza oficinas com coletivos em territórios do Espírito Santo. Ifes, 2022. Disponível em: <https://ifes.edu.br/images/stories/clipping/2022/05-maio/05-27-secult-es.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

JAIME, Pedro; LÚCIO, Fred. **Sociologia das organizações**: conceitos, relatos e casos. São Paulo: Cengage, 2017.

JEZINE, Edineide. As práticas curriculares e a extensão universitária. **Anais do II Congresso Brasileiro de Extensão Universitária**, Belo Horizonte, 12 a 15 de setembro de 2004. Disponível em: <https://www.ufmg.br/congrent/Gestao/Gestao12.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

LAMBRECHTS, Wim; MULÀ, Ingrid; CEULEMANS, Kim; MOLDEREZ, Ingrid; GAEREMYNCK, Veerle. The integration of competences for sustainable development in higher education: An analysis of bachelor programs in management. **Journal of Cleaner Production**, 48, p. 65-73, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.034>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/257408688\\_The\\_integration\\_of\\_competences\\_for\\_sustainable\\_development\\_in\\_higher\\_education\\_An\\_analysis\\_of\\_bachelor\\_programs\\_in\\_management](https://www.researchgate.net/publication/257408688_The_integration_of_competences_for_sustainable_development_in_higher_education_An_analysis_of_bachelor_programs_in_management). Acesso em: 28 ago. 2022.

LOZANO, Rodrigo; BARREIRO-GEN, Maria; PIETIKÄINEN, Janna; GAGO-CORTES, Carmen; FAVI, Claudio; MUNGUIA, Maria Teresa Jimenez; MONUS, Ferenc; SIMÃO, João; BENAYAS, Javier; DESHA, Cheryl; BOSTANCI, Sevket; DJEKIC, Ilija; MONEVA, Jose Mariano; SÁENZ, Orlando; AWUZIE, Bankole; GLADYSZ, Bartłomiej. Adopting sustainability competence-based education in academic disciplines: Insights from 13 higher education institutions. **Sustainable Development**, v. 30, n. 4, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.2253>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sd.2253>. Acesso em: 28 ago. 2022.

LOZANO, Rodrigo; CEULEMANS, Kim; ALONSO-ALMEIDA, Mar; HUISINGH, Donald; LOZANO, Francisco J.; WAAS, Tom; LAMBRECHTS, Wim; LUKMAN, Rebeka; HUGÉ, Jean. A review of commitment and implementation of sustainable development in higher education: results from a worldwide survey. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 1-18, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.048>. Disponível em: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5469199>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MACHADO, Michel Mott. Responsabilidade social da educação superior, extensão e relacionamento IES – sociedade: diálogo com a Educação Profissional e Tecnológica. **VII CBEO – Congresso Brasileiro de Estudos Organizacionais**, Sociedade Brasileira de Estudos Organizacionais – SBEO, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 21 a 24 de setembro de 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.29327/145290.1-2>. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/viicbeo2020/386563-responsabilidade-social-da-educacao-superior-extensao-e-relacionamento-ies-sociedade--dialogo-com-a-educacao-pro/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MACHADO, Michel Mott; FOLIGNO, Adriane Zangiacomo; SILVA, Fábio Lippi. **Extensão e responsabilidade social da educação superior**: a educação profissional de nível tecnológico em foco. In MARTINS, Tânia Barbosa; BATISTA,



Sueli Soares dos Santos. (org.). *Concepções e práticas nas políticas educacionais: o ensino superior e a formação técnica e tecnológica*. São Paulo: Metodista, 2022.

MACHADO, Michel Mott; PRADOS, Rosália Maria Netto. As Faculdades de Tecnologia do Estado de São Paulo e a responsabilidade social no ensino superior de graduação tecnológica. **Revista Eletrônica de Tecnologia e Cultura**, v. 22, p. 41-49, 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/331356796\\_As\\_Faculdades\\_de\\_Tecnologia\\_do\\_Estado\\_de\\_Sao\\_Paulo\\_e\\_a\\_Responsabilidade\\_Social\\_no\\_Ensino\\_Superior\\_de\\_Graduacao\\_Tecnologica](https://www.researchgate.net/publication/331356796_As_Faculdades_de_Tecnologia_do_Estado_de_Sao_Paulo_e_a_Responsabilidade_Social_no_Ensino_Superior_de_Graduacao_Tecnologica). Acesso em: 28 ago. 2022.

MACHADO, Michel Mott; PRADOS, Rosália Maria Netto; MARTINO, Mariluci Alves. A educação profissional e tecnológica e a prática extensionista: algumas reflexões. **Revista Eletrônica de Tecnologia e Cultura – RETC**, v. 19, p. 120-129, out. 2016. Disponível em: <https://retc.fatecjd.edu.br/edicoesretc/19ed.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MACHADO, Michel Mott; PRADOS, Rosália Maria Netto; MARTINO, Mariluci A. A extensão e a Educação Profissional e Tecnológica no Centro Paula Souza: realizações, desafios e oportunidades. In: FREIRE, Emerson; VERONA, Juliana Augusta; BATISTA, Sueli Soares dos Santos. (org.). **Educação Profissional e Tecnológica: extensão e cultura**. Jundiaí, SP: Paco Editorial, 2018.

MACHADO, Michel Mott; SILVA, Fábio Lippi; FOLIGNO, Adriane Zangiacomo; CUNHA, Dyane Guedes; SANTOS, Stenio Pinheiro dos. Organização e gestão de sistemas e unidades de ensino e relacionamento IES-sociedade: Educação de nível tecnológico em foco. **11ª Conferência FORGES – A Cooperação no Ensino Superior dos Países e Regiões de Língua Portuguesa perante os Desafios Globais**, Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal – Portugal, Instituto Politécnico de Macau, Macau – China, 22 a 26 de novembro, 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/356528927\\_ORGANIZACAO\\_E\\_GESTAO\\_DE\\_SISTEMAS\\_E\\_UNIDADES\\_DE\\_ENSINO\\_E\\_RELACIONAMENTO\\_IES-SOCIEDADE\\_EDUCACAO\\_PROFSSIONAL\\_DE\\_NIVEL\\_TECNOLOGICO\\_EM\\_FOCO](https://www.researchgate.net/publication/356528927_ORGANIZACAO_E_GESTAO_DE_SISTEMAS_E_UNIDADES_DE_ENSINO_E_RELACIONAMENTO_IES-SOCIEDADE_EDUCACAO_PROFSSIONAL_DE_NIVEL_TECNOLOGICO_EM_FOCO). Acesso em: 28 ago. 2022.

MANFREDI, Sílvia Maria. **Educação Profissional no Brasil: atores e cenários ao longo da história**. Jundiaí: Paco Editorial, 2016.

MARCOVITCH, Jacques. (org.). A missão acadêmica e seus valores. In MARCOVITCH, J. (Org.). **Universidade em movimento: memória de uma crise**. São Paulo: Com-Arte, Fapesp, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/9788571661325>. Disponível em: <https://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/view/141/119/607>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MARCOVITCH, Jacques. **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012.

MARHL, Marko; PAUSITS, Attila. Third mission indicators for new ranking methodologies. **Evaluation in Higher Education**, v. 5, n. 1, p. 43-64. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.15393/j5.art.2013.1949>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/274937286\\_Third\\_mission\\_indicators\\_for\\_new\\_ranking\\_methodologies](https://www.researchgate.net/publication/274937286_Third_mission_indicators_for_new_ranking_methodologies). Acesso em: 28 ago. 2022.

MARTÍ-NOGUERA, Juan José; LICANDRO, Óscar; GAETE-QUEZADA, Ricardo. La responsabilidad social de la educación superior como bien común: concepto y desafíos. **RESU – Revista de la Educación Superior**, Ciudad de México, v. 47, n. 186, p. 1-22, jun. 2018. Disponível em: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=50185-27602018000200001&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=50185-27602018000200001&lng=es&nrm=iso). Acesso em: 28 ago. 2022.



MELLO, Cleyson de Moraes; NETO, José Rogério Moura de Almeida; PETRILLO, Regina Pentagna. **Curricularização da Extensão Universitária**: teoria e prática. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2020.

OLIVEIRA, Priscila Santos; FREIRE, Emerson; BATISTA, Sueli Soares dos Santos. Cursos superiores de tecnologia, extensão e cultura. **Revista Humanidades e Inovação**, Educação formal e não formal, cultura e currículo I, v. 7, n. 6, p. 19-33, 2020. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/2585>. Acesso em: 28 ago. 2022.

PEGORINI, Diana Gurgel. Fundamentos da educação profissional: política, legislação e história. Curitiba: InterSaberes, 2020.

PETEROSI, Helena Gemignani. **Subsídios ao estudo da Educação Profissional Tecnológica**. São Paulo: CEETEPS, 2014.

RIBEIRO, Tatiana Soares Viana; CORTESE, Tatiana Tucunduva Philippi; KNISS, Cláudia Terezinha; CONTI, Diego de Melo. What Is the Role of Indicators as a Governance Tool to Help Cities Become More Sustainable? **Revista de Administração da UFSM**, v. 12, n. 3, p. 580-593, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1983465935207>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reaufsm/article/view/35207>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ROHRICH, Sandra S.; TAKAHASHI, Adriana Roseli Wünsch. Aprendizagem organizacional e práticas ambientalmente sustentáveis em instituições de ensino superior: um estudo sobre o Canadá e o Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 15, p. 387-402, 2020. DOI: [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071528](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071528). Disponível em: <http://revista.ecogestao.brasil.net/v7n15/v07n15a28a.html>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ROHRICH, Sandra Simm; TAKAHASHI, Adriana Roseli Wünsch. Sustentabilidade ambiental em Instituições de Ensino Superior, um estudo bibliométrico sobre as publicações nacionais. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 26, n. 2, e2861, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-530X2861-19>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/TzcyKHqQnPBMvNkkP3fNkfD/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SANTOS, Boaventura de Sousa. **A Universidade no Século XXI**: para uma reforma democrática e emancipatória da Universidade. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2011. Disponível em: <https://www.ces.uc.pt/bss/documentos/auniversidadedosecXXI.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SEGALÁS, Jordi; MULDER, Karel Frits; FERRER-BALAS, Didac. What do EESD "experts" think sustainability is? Which pedagogy is suitable to learn it? Results from interviews and Cmaps analysis gathered at EESD 2008. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 13, n. 3, p. 293-304, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/14676371211242599>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/243464043\\_What\\_do\\_EESD\\_experts\\_think\\_sustainability\\_is\\_Which\\_pedagogy\\_is\\_suitable\\_to\\_learn\\_it\\_Results\\_from\\_interviews\\_and\\_Cmaps\\_analysis\\_gathered\\_at\\_EESD\\_2008](https://www.researchgate.net/publication/243464043_What_do_EESD_experts_think_sustainability_is_Which_pedagogy_is_suitable_to_learn_it_Results_from_interviews_and_Cmaps_analysis_gathered_at_EESD_2008). Acesso em: 28 ago. 2022.

SILVA, Fábio Lippi; FOLIGNO, Adriane Zangiacomo; MACHADO, Michel Mott. Responsabilidade social da educação superior: estudo bibliométrica da produção científica brasileira (2010-2019). **Revista Humanidades e Inovação**, v. 8, n. 54, p. 307-321, dec. 2021. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/humanidadeseinovacao/article/view/4947>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SILVA, Nayara de Paula Martins; BIZERRIL, Marcelo Ximenes Aguiar. Construindo uma universidade sustentável a partir da compreensão da sustentabilidade. **Revista FORGES – Fórum da Gestão do Ensino Superior nos Países e Regiões de**

**Língua Portuguesa**, v. 7, n. 2, p. 128-151, 2021. Disponível em: <https://www.revistaforges.pt/index.php/revista/article/view/186>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SILVA, Rafael A.; FONSECA, Thiago S. A. Ensino-pesquisa-extensão: um tripé manco. In FREIRE, Emerson; VERONA, Juliana Augusta; BATISTA, Sueli Soares dos Santos. (org.). **Educação profissional e tecnológica**: extensão e cultura. Jundiaí, SP: Paco Editorial, 2018.

SILVA, Wagner Pires da. Extensão universitária: um conceito em construção.

**Revista Extensão & Sociedade**, v. 11, n. 2, p. 21-32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21680/2178-6054.2020v11n2ID22491>. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/extensaoesociedade/article/view/22491>. Acesso em: 28 ago. 2022.

TAVARES, Christiane Andrade Regis; FREITAS, Katia Siqueira de. **Extensão universitária**: O patinho feio da academia? Jundiaí: Paco Editorial, 2016.

TEIXEIRA, Maria Luisa M.; ZACCARELLI, Laura M. Os desafios da atuação socialmente responsável. In HANASHIRO, Darcy Mitiko Mori; TEIXEIRA, Maria Luisa Mendes; ZACCARELLI, Laura Menegon. (org.). **Gestão do fator humano**: uma visão baseada em stakeholders. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2008.

UN – United Nations. **Conferência de Estocolmo**. 5-16 June 1972. Disponível em: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/NL7/300/05/IMG/NL730005.pdf?OpenElement>. Acesso em: 28 ago. 2022.

VALLAEYS, François. Que significa responsabilidade social universitária? **Estudos Revista da Associação Brasileira de Mantenedoras de Ensino Superior**, Brasília, DF, v. 24, n. 6, p. 35-55, 2006.

WIEK, Arnim; KEELER, Lauren Withycombe; REDMAN, Charles L. Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development.

**Research System for Sustainability Science**, United Nations University, v. 6, p. 203-218, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11625-011-0132-6>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/220040512\\_Key\\_Competencies\\_in\\_Sustainability\\_a\\_Reference\\_Framework\\_for\\_Academic\\_Program\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/220040512_Key_Competencies_in_Sustainability_a_Reference_Framework_for_Academic_Program_Development). Acesso em: 28 ago. 2022.





# ECONOMIA CIRCULAR APLICADA AOS RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

## *CIRCULAR ECONOMY APPLIED TO E-WASTE*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

CARVALHO, Tereza Cristina Melo de Brito; FERREIRA, Vivian Fernandes Marinho. Economia circular aplicada aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho**

Professora Associada Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). Coordenadora do Laboratório de Sustentabilidade / Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LASSU/PCS/EPUSP).

E-mail: terezacarvalho@usp.br

### **Vivian Fernandes Marinho Ferreira**

Coordenadora de Projetos – Instituto Amazônia 4.0.

E-mail: vivian.fmf@gmail.com

## **RESUMO**

A Economia Circular vem sendo apontada como uma via de saída para a redução do grande volume de resíduos gerados nos mais diversos setores da sociedade. Esse artigo explora a aplicação dos seus princípios na gestão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). É discutido o caso de uso do Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR) que tem contribuído não somente com a redução de resíduos e proteção do meio ambiente, mas também com a inclusão digital por meio da produção de computadores de segunda mão que atende à demanda de comunidades de baixa renda. De modo semelhante, no setor privado destacam-se empresas que fazem o pré-processamento desse tipo de resíduos e remanufaturam equipamentos de informática, corroborando que é possível criar modelos de negócios rentáveis e que sejam responsáveis socioambientalmente.

Palavras-chave: REEE. Economia Circular. CEDIR. Resíduos Sólidos. PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos).

## **ABSTRACT**

The Circular Economy has been identified to reduce the large volume of waste generated in various sectors of society. This article explores the application of



its principles in the management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). It discusses the use case of the Center for the Disposal of Information Technology Waste (CEDIR), which has contributed not only to the reduction of waste and protection of the environment, but also to digital inclusion through the production of second hand computers that meet the demand of low-income communities. Similarly, in the private sector there are companies that pre-process this type of waste and remanufacture IT equipment, proving that it is possible to create profitable business models that are socially and environmentally responsible.

Keywords: WEEE. e-waste. Circular Economy. CEDIR. Solid Waste. PNRS (National Policy for Solid Waste).

## 1 INTRODUÇÃO

Por fazerem parte da vida da sociedade moderna, o consumo de equipamentos eletroeletrônicos tem crescido no mundo todo. A Tabela 1 mostra a base ativa e venda anual de microcomputadores, telefones e TVs no mundo e no Brasil, segundo pesquisa realizada por Meirelles (2022). A base ativa tem crescido em taxas variáveis desde 1989, enquanto a venda anual teve uma queda entre 2013 (22 milhões) e 2020 (11 milhões), e a partir de 2020 retoma o crescimento. Hoje, cada brasileiro possui 2,1 dispositivos digitais e 1,1 *smartphone*.

Tabela 1 – Estatística de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil e no Mundo

Tipo EE	Base Ativa (Milhões)			Venda Anual (Milhões)		
	Micro*	Fones	TVs	Micro*	Fones	TVs
Mundo	6.640	9.800	7.700	400	500	400
Brasil	205	268	268	14	44	14

\* Micro = Desktops, Notebooks e Tablets.

Fonte: Meirelles (2022).

Esses equipamentos têm um tempo de vida médio, que varia de três a sete anos. Após esse período, o uso desses equipamentos é descontinuado por perda de funcionalidade, obsolescência programada ou percebida – Obsolescência programada é o nome que se dá à estratégia de mercado que estimula o consumo repetitivo por meio da redução do tempo de vida útil de um produto (ASSUMPCÃO, 2017, p. 19). E daí o que fazemos com os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) descartados?



Hoje, no mercado nacional de REEE de uso doméstico, somente 1% dos equipamentos eletroeletrônicos tem uma destinação adequada. Tem-se como meta estabelecida pelo Decreto nº 10.240/2020 que esse valor deve ser 17% em 2025 (Green Eletron, [2022]).

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O mundo gera anualmente por volta de 59 milhões de toneladas de REEE. No Brasil, estima-se que **2,14 milhões de toneladas** destes resíduos são descartadas por ano, sendo 10% na área de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação). São gerados 10,2 Kg de REEE *per capita* (Forti *et al.*, 2020).

Na medida que a aquisição de bens de informática continua crescendo, o volume de equipamentos descartados no final de seu ciclo de vida tende também a crescer, estimando-se que em 2030 serão geradas cerca de 75 milhões de toneladas de REEE no mundo (Forti *et al.*, 2020).

Neste cenário, questiona-se se a Economia Circular é uma solução para a reduzir a geração de REEE e promover seu retorno para diferentes cadeias produtivas.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste artigo é discutir como os princípios de Economia Circular podem ser aplicados no setor de REEE, quais são as vantagens e desafios a serem enfrentados.

Como objetivos específicos, tem-se:

- ♦ Trazer estudos de casos bem-sucedidos, que ilustram resultados reais da aplicação dos princípios de Economia Circular no setor de REEE. Tais estudos de caso incluem o Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR, [2020]) do setor público e a empresa Reurbi do setor privado.
- ♦ Mostrar por meio desses estudos de casos como varia o retorno financeiro entre reuso, remanufatura e reciclagem.
- ♦ Identificar como os equipamentos de reuso ou remanufaturados podem impactar a sociedade, nas dimensões econômica, social e ambiental.

Tais objetivos direcionaram o desenvolvimento deste artigo, cuja organização é descrita na próxima seção.



### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO ARTIGO

Esse artigo está organizado em cinco seções. Essa primeira seção traz a introdução contendo a motivação e os objetivos do artigo. A seção 2 categoriza os Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE), considerando a classificação internacional definida pela International Telecommunication Union (ITU) e a classificação adotada no Brasil. A seção 3 mostra como os princípios de Economia Circular podem ser aplicados aos REEE em termos de reuso, remanufatura e reciclagem. A seção 4 apresenta estudos de caso da aplicação de princípios de Economia Circular no tratamento de REEE, nos setores público e privado. No setor público, é exemplificado o caso do CEDIR na Universidade de São Paulo (USP), descrevendo-se seu modo de operação. No setor privado, é discutido o caso da empresa Reurbi, que também produz equipamentos de segunda mão com foco no Terceiro Setor. A seção 5 mostra os principais resultados colhidos desta análise do panorama do tratamento de REEE no Brasil e no mundo.

## 2 EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Os Equipamentos Eletroeletrônicos recebem duas classificações: uma internacional definida pela ITU e outra nacional definida pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee). Ambas são sintetizadas nas próximas subseções.

### 2.1 CATEGORIZAÇÃO INTERNACIONAL

Segundo o ITU, os equipamentos eletroeletrônicos estão classificados nas seguintes categorias (Baldé *et al.*, 2022; Forti *et al.*, 2020):

- ♦ **Categoria 1 – Equipamentos de troca de temperatura:** inclui equipamentos de resfriamento/aquecimento e refrigeração, tais como: ar condicionado, aquecedores, geladeiras e freezers.
- ♦ **Categoria 2 – Telas e monitores:** tem-se como exemplos típicos: televisores, monitores, *laptops*, *notebooks* e *tablets*.
- ♦ **Categoria 3 – Lâmpadas:** cobre diversos tipos de lâmpadas, como: lâmpadas fluorescentes, de alta descarga elétrica e LEDs.
- ♦ **Categoria 4 – Equipamentos grandes:** inclui equipamentos eletroeletrônicos e eletrodomésticos de grande porte, tais como: máquinas de lavar, secadoras, impressoras grandes, fotocopiadoras, painéis fotovoltaicos.
- ♦ **Categoria 5 – Equipamentos pequenos:** inclui equipamentos eletroeletrônicos de pequeno porte e eletrodomésticos portáteis



como: aspiradores, forno de micro-ondas, equipamentos de ventilação, torradeiras, barbeadores, aparelhos de rádio, câmeras de vídeos, brinquedos eletrônicos, ferramentas elétricas, dispositivos médicos pequenos, entre outros.

- ♦ **Categoria 6 – Equipamentos de TI e Telecomunicação:** inclui equipamentos de informática e telecomunicações, tais como: celulares, telefones, computadores, impressoras, equipamentos de rede como roteadores e *switches*.

Aqui vale ressaltar que as estatísticas internacionais, especialmente aquelas publicadas pela Organização das Nações Unidas (ONU), empregam essa classificação. Daí a importância de a incluirmos neste artigo.

## 2.2 CATEGORIZAÇÃO BRASILEIRA

No Brasil, os equipamentos eletroeletrônicos são classificados segundo as seguintes linhas:

- ♦ **Linha Marrom** – inclui televisores e monitores de tubo, televisores e monitores de plasma/LCD [*Liquid Crystal Display* = Tela de Cristal Líquido], DVD/VHS [*Digital Video Disc* = Disco de Vídeo Digital / *Video Home System* = Sistema Doméstico de Vídeo], produtos de áudio. Essa linha é representada pela Abinee ([2022]).
- ♦ **Linha Verde** – inclui equipamentos de informática, como *desktops*, *notebooks*, impressoras e aparelhos celulares. Essa linha é representada pela Abinee ([2022]).
- ♦ **Linha Branca** – inclui eletrodomésticos de grande porte como: geladeiras, refrigeradores e congeladores, fogões, lava-roupas, e ar condicionados. Essa linha é representada pela Eletros ([2022]).
- ♦ **Linha Azul** – inclui eletrodomésticos de pequeno porte portáteis, como: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos e furadeiras. Essa linha é representada pela Abinee ([2022]).

A Abinee e Eletros representam fabricantes das diversas linhas de equipamentos eletroeletrônicos e, também, são responsáveis pela implantação do Sistema de Logística Reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, segundo Decreto nº 10.240, assinado em fevereiro de 2020. Para esse fim, a Abinee criou a Green Eletron, gestora da logística reversa das linhas marrom, verde e azul (Green Eletron, [2022]). As ações da Eletros nesta direção ainda estão incipientes.

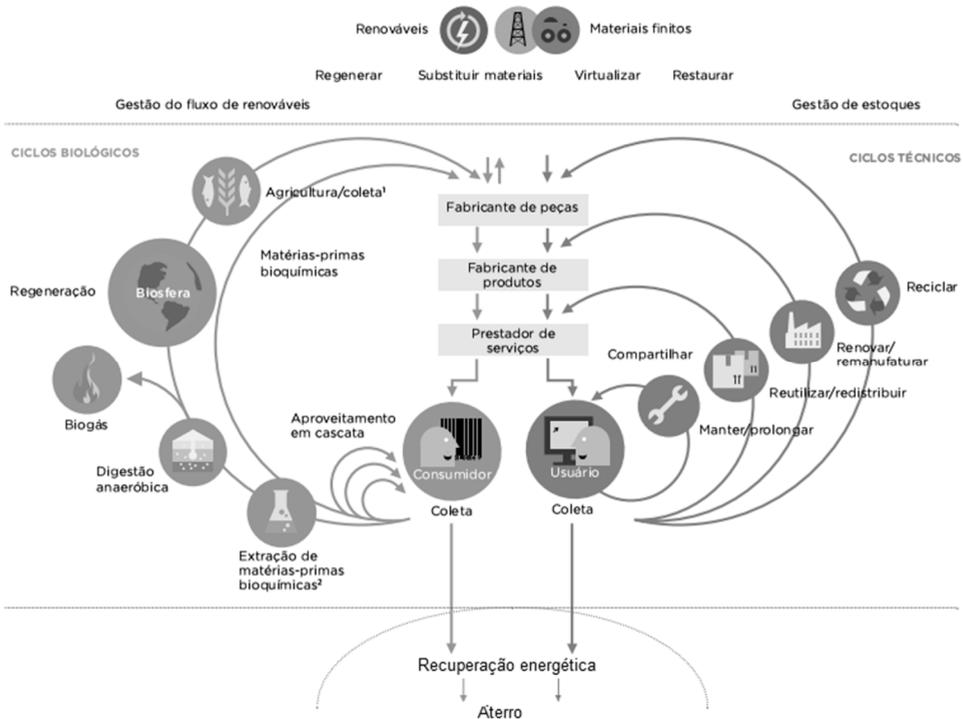
No escopo deste artigo, são tratadas, principalmente, questões referentes a equipamentos da linha verde.



### 3 ECONOMIA CIRCULAR APLICADA AOS RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

Dentro dos princípios de Economia Circular aplicada a REEE, pode-se ter reuso, remanufatura, reciclagem e mineração urbana. Na Figura 1, tem-se o conhecido diagrama de “borboleta” da Economia Circular, desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur (EMF, 2017).

Figura 1 – Diagrama de Sistemas de Economia Circular



Fonte: Fundação Ellen MacArthur (EMF, 2017).

Esse diagrama define dois ciclos:

- ♦ **Nutrientes biológicos**, destinados a reentrar na biosfera de forma segura e construir um capital natural.
- ♦ **Nutrientes técnicos**, projetados para circular em alta qualidade sem entrar na biosfera.

Os REEE enquadram-se nos nutrientes técnicos e podem passar pelos processos de reuso, remanufatura e reciclagem.



### 3.1 REUSO

No reuso de equipamentos eletroeletrônicos, mais especificamente da linha verde, incluem-se os seguintes casos:

- ♦ Conserto de equipamentos para manter ou prolongar seu ciclo de vida. Isso pode implicar na substituição de componentes desses equipamentos. Como exemplo, pode-se citar um computador cuja tela do monitor quebrou. A solução é a substituição da tela.
- ♦ Ampliação da capacidade do equipamento. Pode-se considerar a capacidade de processamento, armazenamento e interfaces de entrada/saída. Assim, para um computador, pode-se substituir o processador da placa mãe por um mais rápido (a substituição de processador não é sempre possível. Muitas vezes o processador é soldado na placa.), colocar mais pentes de memória (memória primária) ou substituir seu disco por outro com maior capacidade (memória secundária). Pode-se também substituir a placa de rede de comunicação por outra com maior capacidade de transmissão.

Esses dois casos são representados na Figura 1 pelos dois círculos mais internos dos ciclos técnicos.

### 3.2 REMANUFATURA

Na remanufatura, considera-se que não existe um equipamento com possibilidade de conserto ou ampliação de sua capacidade para reuso, mas existem dois ou mais equipamentos com alguns componentes que funcionam bem. Neste caso, são aproveitados os componentes que funcionam bem de diversos equipamentos para montar um único equipamento remanufaturado.

Pode-se supor o exemplo, onde existam três computadores funcionando parcialmente: Computador 1 – tem uma placa mãe com processador rápido, mas tem pouca memória e disco rígido com baixa capacidade; Computador 2 – sua placa mãe pifou, mas possui pentes de memória e disco rígido que podem ser empregados para ampliar a capacidade do Computador 1; e, por último, Computador 3 – está bastante danificado, pois sofreu uma sobretensão, mas a sua carcaça e seu teclado são muito modernos e bonitos. Um novo computador pode ser montado empregando, então, os componentes desses três computadores originais.

Esse é o caso do terceiro ciclo técnico da Figura 1.



### 3.3 RECICLAGEM

Por último, temos o caso da reciclagem. Um equipamento eletroeletrônico vai para reciclagem quando não houve possibilidade de reuso e nem remanufatura. No exemplo dado de remanufatura, vamos enviar para reciclagem o disco rígido do Computador 1, a placa mãe do Computador 2 e todas as peças do Computador 3 com exceção da carcaça e teclado.

Para enviar para reciclagem é necessário fazer um pré-processamento dos resíduos, isto é, separá-los por tipo de material: placas de circuito impresso; plástico; metais ferrosos; metais não ferrosos; cabos entre outros. Quanto melhor separados estiverem, melhor valorizados serão os resíduos.

Desses resíduos, o que vale mais são as placas de circuito impresso. Existem as placas leves (por exemplo, placa mãe dos computadores) e as placas pesadas (por exemplo, placa da fonte de alimentação). As placas leves têm melhor valor no mercado, pois, em geral, possuem mais metais preciosos como ouro, prata, platina e cobre. Essas placas são encaminhadas para os processos de mineração urbana.

A reciclagem é representada na Figura 1 pelo círculo mais externo dos ciclos técnicos.

### 3.4 MINERAÇÃO URBANA

A mineração urbana neste contexto corresponde às atividades de extração de metais das placas de circuito impresso. Em Forti *et al.* (2020) é mostrada uma Tabela periódica, destacando-se os metais preciosos, os metais críticos e os metais não críticos. Quanto mais elevado o nível de concentração dos metais, mais fácil é sua extração (Xavier; Ottoni, 2021).

No caso de metais preciosos, os principais incluem Ouro (Au), Prata (Ag), Cobre (Cu), Platina (Pt) e Paládio (Pd). Segundo Forti *et al.* (2020), em uma tonelada de REEE, tem-se 280g de ouro, o que é considerada uma concentração alta. Exemplos de metais críticos, usados em ligas metálicas, o Índio (In) e Germânio (Ge) são difíceis de serem recuperados, pois são empregados de modo disperso nas placas e outros componentes.

A Figura 2 mostra os fluxos globais de importação e exportação de REEE.



Figura 2 – Fluxos Globais de Importação e Exportação de REEE



Fonte: Baldé *et al.* (2022).

É importante mencionar que são poucos locais no mundo que possuem tecnologia para recuperação de metais. Assim, existe uma migração de REEE, em especial de placas de circuito impresso, entre países que não possuem fundições com capacidade de extração de metais preciosos (e.g., platina, ouro, prata, entre outros) para países que possuem tais fundições.

No mundo, são poucas as fundições existentes: na Europa (Bélgica), na Ásia (Cingapura), na América do Norte (México), entre outros.

O Brasil é um dos países exportadores de placas de circuitos impressos, pois não há no país instalações dessas fundições que possam atender à demanda local. Vale observar que 34% das placas de circuito impresso do mundo são recicladas (Baldé *et al.*, 2022).

#### 4 CASOS DE USO

Nesta seção, são apresentados casos de uso dos setores público e privado, que envolvem a aplicação das premissas de Economia Circular no tratamento de REEE.



## 4.1 SETOR PÚBLICO

No setor público, destaca-se o Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR), que foi inaugurado em dezembro de 2009 com propósito de garantir a destinação correta dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos de Tecnologia da Informação e Comunicação da Universidade de São Paulo (USP) e público em geral. O CEDIR é um centro pioneiro em universidades públicas e privadas. Iniciativas similares foram identificadas na época somente em empresas do setor privado.

### 4.1.1 Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática – CEDIR

A concepção do CEDIR partiu de pesquisas realizadas por um grupo de pesquisadores da USP e do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e de funcionários do Centro de Computação Eletrônica (CCE) da USP. Essa pesquisa envolveu cerca de trinta visitas de campo a empresas de reciclagem de materiais presentes nos REEE, como plástico, metais ferrosos e não ferrosos, cabos, placas de circuito impresso. Essas visitas foram essenciais para se compreender melhor a importância da separação correta dos materiais dos REEE, o que direcionou a concepção do CEDIR (Carvalho, 2018).

O CEDIR ocupa, hoje, um galpão com uma área aproximada de 360 m<sup>2</sup>. Dispõe de acesso para carga e descarga de resíduos e seu espaço foi organizado para realizar coleta, triagem, reparo, remanufatura e destinação correta dos resíduos eletroeletrônicos recebidos.

No início de sua operação, em dezembro de 2009, o CEDIR só recebia equipamentos da comunidade da USP. Em abril de 2010, foi aberto para receber equipamentos do público em geral, voltado para pessoas físicas e, em março de 2017, também, para pessoas jurídicas. Para tanto, os interessados fazem um agendamento, especificando o montante e os tipos de equipamentos eletroeletrônicos a serem entregues. Esta informação é usada para compor o termo de doação que deve ser assinado pelo responsável pela entrega do material no CEDIR.

O CEDIR recebeu diversos prêmios por seu pioneirismo e inovação, incluindo: Prêmio Mário Covas 2009 – Categoria Inovação pelo projeto do CEDIR; Prêmio InfoExame 2010 – Iniciativa Verde – CEDIR; Prêmio Mário Covas 2011 – Categoria Inovação pelo projeto Eco-Eleto; e, Prêmio von Martius – Sustentabilidade e Tecnologia, 2013.

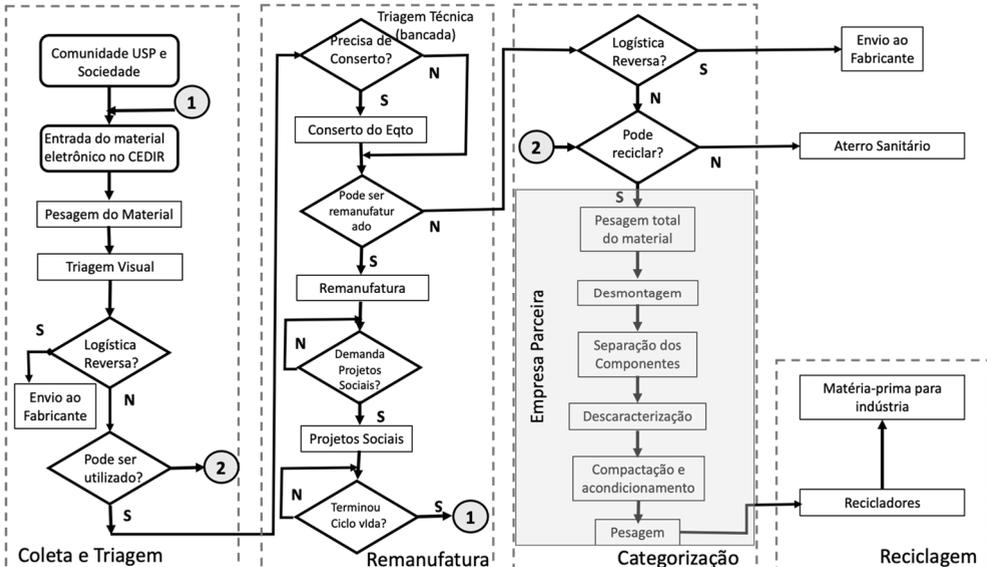


#### 4.1.1.1 Modo de Operação

O **modo de operação** básico do CEDIR pode ser descrito seguindo as seguintes atividades:

- ◆ Recepcionar os equipamentos eletrônicos obsoletos da USP, que estejam despatrimoniados, e de pessoas físicas e jurídicas da sociedade em geral.
- ◆ Efetuar triagem verificando-se a possibilidade de reutilização. Nem sempre é possível utilizar o equipamento, mas às vezes somente alguns de seus componentes (por exemplo, fonte de alimentação, memória, disco rígidos e outros). Esses componentes ficam armazenados para uso na remanufatura de outros equipamentos.
- ◆ Consertar equipamentos eletroeletrônicos que possam ser reutilizados.
- ◆ Separar e classificar os inservíveis conforme composição, ou seja, plásticos, metais, placas eletrônicas, cabos etc.
- ◆ Armazenar o material até o seu recolhimento por empresas recicladoras devidamente credenciadas e certificadas.

Figura 3 – Fluxograma de Operação do Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR)



Fonte: Adaptação de Carvalho (2018).

A Figura 3 mostra o fluxo de operação do CEDIR, constituído de quatro etapas principais:



- ♦ **Coleta e Triagem:** Esta etapa é responsável pela coleta e triagem dos componentes e equipamentos eletroeletrônicos da comunidade USP e do público em geral, pessoas físicas e jurídicas. Todo o material recebido é primeiramente pesado e passa por uma triagem visual para verificar: se deve ser encaminhado para logística reversa; ou se pode ser reutilizado ou não. Se puder ser reutilizado, é encaminhado para a etapa de **remanufatura** e se não puder, passa para a etapa de **categorização**. Se a opção for logística reversa, o bem é retornado para o seu fabricante. Isso, hoje, acontece para os casos de cartuchos de tinta e monitores (CRT, LCD ou LED) de alguns fabricantes.
- ♦ **Remanufatura:** Os componentes e equipamentos triados e encaminhados para remanufatura são testados para checar sua operacionalidade. Se for detectado algum problema, verifica-se a possibilidade de reparo. Se estiver funcionando normalmente, verifica-se a possibilidade de introduzir melhorias, por exemplo, o aumento da capacidade de memória tanto primária quanto secundária de um microcomputador. É importante enfatizar que as memórias e discos são “zerados” e limpos fisicamente para evitar o vazamento de informações do seu antigo dono. Os equipamentos considerados operacionais são, então, encaminhados para reuso dentro da própria universidade, por escolas públicas, projetos sociais e Organizações Não Governamentais (ONGs) credenciadas junto à USP. Caso não haja possibilidade de reaproveitamento desses equipamentos, estes são encaminhados para a etapa de **categorização** ou devolvidos **a seu fabricante de origem** por meio de **logística reversa**.
- ♦ **Categorização:** Nesta etapa é realizado o pré-processamento do resíduo coletado, que inclui as atividades de **pesagem**, **desmontagem** (por exemplo, de um computador), **separação** de seus componentes (por exemplo, placas-mãe, placas de fonte de alimentação, peças metálicas e peças plásticas), **descaracterização** desses componentes (por exemplo, microperfuração de discos descartados para evitar a recuperação indevida de suas informações), **compactação e acondicionamento** desses componentes em sacos de ráfia para facilitar seu transporte e, por último, **pesagem por tipo de material**. Todo material pesado é encaminhado para a etapa de reciclagem. Atualmente, devido ao número reduzido de funcionários do CEDIR, esta etapa é realizada por empresa parceira. Dizemos, então, que o equipamento é encaminhado “no estado” para a empresa.



- ♦ **Reciclagem:** Os componentes separados e descaracterizados na etapa anterior são encaminhados a indústrias de reciclagem para seu tratamento. As empresas de reciclagem devem ser credenciadas pela USP, sendo que o credenciamento inclui a apresentação de certificações exigidas pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) ou Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e na maioria das vezes envolve, também, a visita às dependências da própria empresa para vistoria e conhecimento sobre os processos envolvidos. Esse procedimento visa à destinação ambientalmente correta e atende à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010 e ao Decreto nº 7.404/2010, que a regulamenta.

Essa etapa, também, é hoje efetuada pela empresa parceira que recebeu o equipamento no estado.

Os equipamentos e componentes que não puderem ser reutilizados, reciclados ou devolvidos ao seu fabricante por meio de logística reversa serão encaminhados para o aterro sanitário. Vale observar que desde a sua criação o CEDIR nunca teve que enviar nenhum tipo de material para aterro sanitário, que do ponto de vista ambiental é uma operação indesejável.

#### **4.1.1.2 Visão Geral das Ações**

A Figura 3 resume as ações do CEDIR nos diversos aspectos da Sustentabilidade, descritos a seguir.

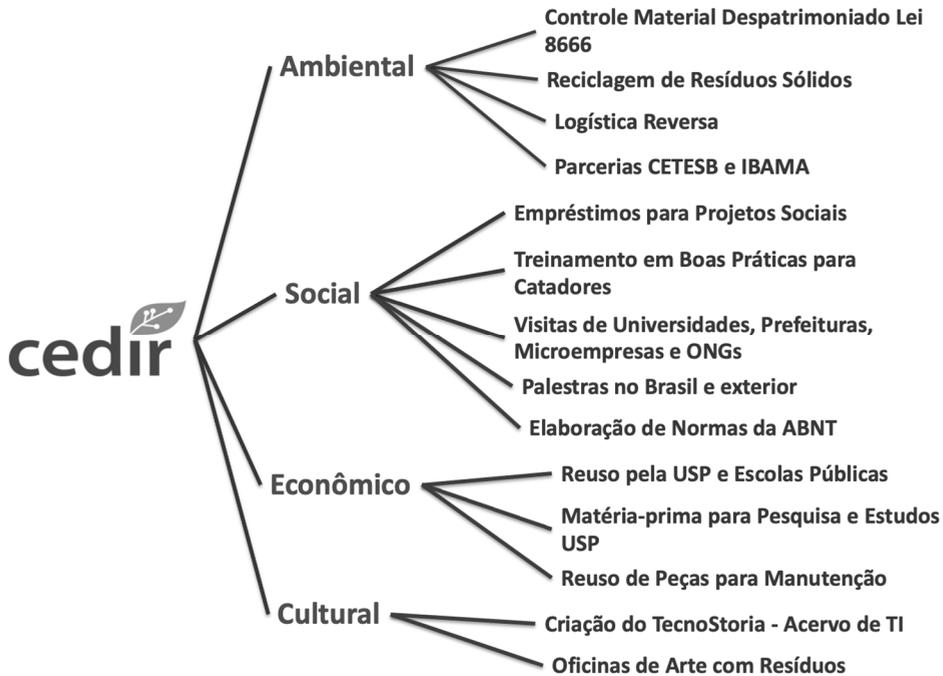
##### **Aspectos ambientais**

O CEDIR foi concebido para realizar o tratamento de resíduos eletroeletrônicos, evitando que fossem descartados de modo inadequado e provocando a contaminação do meio ambiente em virtude do grande volume de substâncias tóxicas presentes nos seus componentes. Por exemplo, no caso do monitor de CRT, pode-se ter de três a quatro kg de chumbo, que é um metal pesado e causa danos para o sistema nervoso.

Esse tratamento previa a desmontagem dos equipamentos, com a separação dos seus diversos componentes segundo o material empregado, por exemplo, plástico, metal ferroso e não ferroso, placas leves e pesadas, entre outros. Cada tipo de material é estocado até que se atinja o volume requerido pelas empresas de reciclagem (por exemplo, no caso de plástico, o volume mínimo requerido pelas empresas é de 300 kg) para retirada.



Figura 3 – Atuação de CEDIR nas diversas dimensões de Sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Carvalho (2018).

Em virtude da Lei nº 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), algumas empresas já estão se responsabilizando pela logística reversa dos equipamentos inservíveis de sua fabricação. Tais empresas retiram os seus equipamentos no CEDIR e realizam o seu descarte correto.

No início de sua operação, o CEDIR contou com o suporte da CETESB e do IBAMA no sentido de definir suas atividades básicas sem infringir boas práticas relacionadas ao meio ambiente. Como exemplo, pode-se citar a desmontagem de tubos de raios catódicos (CRTs), descontinuada por sugestão destas instituições devido à vulnerabilidade dos tubos, que têm grande probabilidade de quebra no manuseio e transporte, sendo inclusive suscetíveis à explosão. Para suprir essa demanda de soluções para transporte de tubos CRT foram desenvolvidos estudos e pesquisas por pesquisadores do Laboratório de Sustentabilidade (LASSU) do Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais (PCS) da Escola Politécnica da USP (EPUSP) e técnicos do CEDIR para conceber uma embalagem especial



usada no transporte desses tubos, que foi patenteada junto à Agência de Inovação da USP (Carvalho; Xavier; Frade, 2014).

### **Aspectos sociais**

O CEDIR recebe muitos equipamentos em condições de reuso, por isso introduzimos a atividade de recuperação de equipamentos para empréstimos para projetos sociais de entidades filantrópicas e escolas públicas e projetos de prefeituras com poucos recursos de informática, credenciadas junto à USP.

Além disso, realiza outras atividades, como a apresentação de palestras em diversos tipos de fórum e a realização de visitas monitoradas, onde são explicadas as diferentes fases de sua operação. As visitas monitoradas têm contado com a presença de alunos e professores de São Paulo, de outros estados e de outros países, com a presença de gestores de meio ambiente em órgãos municipais, estaduais e federais, e com a presença de microempresários interessados em atuar no mesmo ramo e empresas que estão enfrentando o desafio de conformidade à Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Ainda em relação a ações sociais, o LASSU em parceria com o CEDIR e o Instituto GEA, com patrocínio do Programa Cidadania e Desenvolvimento da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras), desenvolveu o projeto Eco-Eleto (Portela, 2015). O objetivo principal deste projeto foi realizar o treinamento de catadores de material reciclável em microinformática básica e no tratamento de resíduos de informática, visando evitar a contaminação dos catadores e do meio ambiente em virtude do manuseio errôneo destes resíduos e orientá-los sobre o processo de desmontagem e agregação de material oriundo de tais resíduos, com fins de maximizar o retorno financeiro obtido com a sua venda. O programa formou ao todo 155 catadores, cada qual com 60 horas de curso teórico e prático. O sucesso desse projeto levou a sua recondução com a inclusão de cursos de remanufatura no período de 2014-2016. Na mesma linha, a Caixa Econômica Federal (CEF) financiou o projeto, "Descarte Legal", em que foram treinadas cooperativas de catadores de material reciclável em quinze cidades brasileiras, nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste.

O CEDIR coopera também com o Programa Paideia Pró-Profissão em Tecnologia da Informação fornecendo computadores remanufaturados para serem usados em aulas práticas de programação computacional. Mais informações serão fornecidas nas subseções seguintes.



Por último, a equipe do CEDIR participou e colaborou na elaboração de normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como a ABNT NBR 16156:2013, em parceria com o Centro de Tecnologia Renato Archer (CTI) de Campinas.

### **Aspectos econômicos**

Os equipamentos recebidos no CEDIR que são consertados ou reformados têm sido emprestados e destinados a unidades da própria USP, no caso de necessidades temporárias, como em eventos com disponibilização de acesso e uso de Internet e de salas de aluno ou de professores. Além disso, escolas públicas de 1º e 2º graus com recursos limitados têm solicitado os computadores do CEDIR para uso em sala de aula, viabilizando o contato e a aprendizagem de crianças em como operar um computador e seus programas. Essa prática foi reforçada no período de pandemia quando as crianças passaram a ter aulas remotamente.

Os componentes de computadores desmontados são requisitados, também, pelos órgãos da USP responsáveis pela manutenção de sistemas computacionais como peças de reposição usadas no reparo de computadores quebrados. A aquisição de tais peças no mercado não é simples por se tratar muitas vezes de componentes descontinuados e seu custo é normalmente alto devido à pouca oferta.

Professores e pesquisadores também procuram, no CEDIR, peças que possam ser usadas nos seus experimentos e pesquisas. Esse é o caso do uso de motores de disco rígido na montagem de robôs e de ímãs na montagem de fontes de alimentação.

### **Aspectos culturais**

O CEDIR tem recebido peças com anos de fabricação diversos, algumas raridades que mereciam espaço num Acervo de Tecnologia ou Informática. No período de 2010-2016 foram coletadas ao todo 500 peças. A partir dessas peças, o LASSU criou uma mostra intitulada “Do computador de mesa ao computador de Bolso”, inaugurada em novembro de 2017, que pode ser visitada pelo público em geral mediante agendamento.

Além disso, o CEDIR já sediou oficinas de *design*, empregando resíduos de informática. Em 2012, recebemos o famoso *designer* finlandês Ilka Suppanen, que coordenou uma oficina de *design* aberta ao público, na qual se utilizaram peças do CEDIR.



### 4.1.2 Programa Paideia

O Programa Paideia Pró-Profissão em Tecnologia da Informação (Paideia, [2022]) tem como objetivo capacitar jovens de baixa renda da faixa etária de 15 a 18 anos, que estejam cursando 2º ou 3º ano do Ensino Médio [antigo 2º grau] ou tenham o Ensino Médio completo, em microinformática, visando aumentar sua empregabilidade.

Foi criado em 2017 e já tem cinco turmas formadas (2017, 2018, 2019, 2020, duas turmas 2021). Em 2021, em função da COVID, foram criadas duas turmas: uma presencial e outra *on-line*.

A primeira turma de 2017 teve quinze alunos formados e quatro desistentes. Nesta turma, pudemos observar que a principal dificuldade dos alunos era em lógica matemática. Essa constatação gerou algumas ações. A primeira foi a implantação em caráter experimental de uma disciplina de música computacional, pois sabe-se que o aprendizado de música auxilia os alunos no aprendizado de matemática. A segunda envolveu o estabelecimento de uma parceria com a ONG Passos Mágicos, especializada no ensino de Português e Matemática para jovens de escola pública da região de Embu Guaçu. Como resultado, no ano de 2018 tivemos 52 alunos matriculados e 43 que concluíram o programa com sucesso.

De 2018 em diante, permanecemos com a parceria com a ONG Passos Mágicos. Assim, 50% de alunos de cada turma eram de Embu Guaçu. No ano de 2019, tivemos 40 alunos matriculados, mas somente 23 concluíram o programa com sucesso.

Em 2020, eclodiu a COVID na nossa segunda semana de aula da nossa quarta turma. Daí, decidiu-se oferecer o Programa Paideia no formato digital, *on-line* no modo síncrono (modo síncrono significa que as aulas têm um horário pré-fixado e neste horário o professor ministra uma aula expositiva ou de atividades práticas em tempo real). Essas aulas são gravadas para posterior revisão de conteúdo pelos alunos. No primeiro módulo (cada módulo dura aproximadamente seis semanas), tudo correu bem. A partir do segundo módulo, quando se iniciaram as disciplinas de programação, percebeu-se uma grande dificuldade dos alunos de acompanharem o curso. Fazendo um levantamento junto aos alunos, foi detectado que o problema mais crítico era que a maioria dos alunos acessavam as aulas pelo celular o que dificultava o acompanhamento, principalmente, das aulas de programação. Além disso, no caso de diversas famílias, o celular era compartilhado entre diversos de seus membros.



Como resultado dessa constatação, foi identificada a possibilidade de se conseguir computadores de reuso ou remanufatura por meio do CEDIR para serem emprestados para os jovens do Programa Paideia.

Essa ação mudou totalmente o aproveitamento das disciplinas do Programa Paideia pelos alunos, conforme indicam diversos testemunhos dados por eles mesmos. Segue o testemunho de uma aluna da Turma de 2021:

*"Hoje foi meu primeiro dia no computador, foi simplesmente maravilhoso, pois fiquei um ano inteiro vendo aulas em celular, e era muito cansativo. Mas graças ao Paideia deu tudo certo e até as aulas da escola foram mais produtivas."* (Aluna do Programa Paideia, Turma de 2021)

Assim, o Programa Paideia, originalmente presencial, passou a ser oferecido *on-line* no modo síncrono. Daí, foi detectada uma nova oportunidade, a de expandir o programa Paideia para outros estados do Brasil no formato *on-line*. Criamos, então, no 2º semestre de 2021 o Programa Paideia Digital Pró-Profissão em Tecnologia da Informação. Identificou-se, também, uma alta demanda de mercado por programadores Java e, em 2022, foi criado o Programa Paideia Pró-Profissão em Java.

A criação do Paideia Digital trouxe como desafio adicional a disponibilização de computadores para jovens espalhados pelo Brasil. O CEDIR tem alcance somente na cidade de São Paulo. Para tanto, expandimos nossa parceria com a empresa Reurbi, que atua de modo similar ao CEDIR em todo território nacional. Alguns computadores têm sido emprestados a jovens de outro estado via Reurbi.

Aqui vale explicar que os computadores são emprestados para os alunos, porque hoje temos uma demanda maior de computadores do que a taxa que conseguimos viabilizar o reuso de um computador de segunda mão ou a remanufatura de um novo.

## 4.2 SETOR PRIVADO

No setor privado, destaca-se a empresa Reurbi, que realiza pré-processamento de REEE, tendo como base os princípios de Economia Circular e priorizando o reuso e a remanufatura.

Reurbi é uma empresa do Sistema B (Sistema B reúne empresas com propósito e tem associado ao seu modelo de negócio iniciativas socioambientais), que foi criada em 2012. Atua no mercado Business to Business (B2B), ou seja, atende à demanda de empresas (Souza;



Bremgartner, 2016). A Reurbi faz a logística reversa de equipamentos das linhas verde e marrom em todo Brasil. Os equipamentos coletados passam por uma triagem para verificar se podem ser reusados ou reconicionados, totalmente ou parcialmente. Em caso negativo, esses equipamentos são desmontados e seus diversos componentes são classificados e separados por tipo de material, como por exemplo: placa de circuito impresso leve ou pesada, plástico, metais e outros. Cada tipo de resíduo é, então, encaminhado para reciclagem por uma empresa especializada.

Figura 4 – Operação Reurbi



Fonte: Reurbi ([2022]).

A Figura 4 resume as atividades da Reurbi.



Os equipamentos selecionados para reuso e recondição passam por testes e formatação. Se for necessário, é feita a ampliação da capacidade das memórias primária e secundária do equipamento (por exemplo, computador). Para estender seu ciclo de vida, geralmente é substituída sua fonte de alimentação. Os equipamentos consertados e recondição são comercializados como equipamentos de segunda mão tanto para ONGs com foco socioambiental como em pontos comerciais com a marca RESET.

O diferencial da Reurbi é que os equipamentos descartados para reuso, recondição ou reciclagem são monetizados em equipamentos de segunda mão encaminhados para projetos sociais. Assim, uma empresa que opte por descartar com a Reurbi atende às premissas de Environmental, social and corporate Governance (ESG).

Vale, ainda, observar que é feito o inventário do material coletado antes e depois do seu processamento, de modo que as empresas têm visibilidade sobre a destinação dos equipamentos entregues à Reurbi.

Segundo Reurbi ([2022]), desde a sua criação, 1.600 toneladas de REEE já foram coletadas, inventariadas e destinadas de forma ambientalmente correta; 25.000 equipamentos foram recondição e foram atendidos 130 projetos sociais com 2.100 computadores recondição.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo apresenta resultados importantes em relação à aplicação de Economia Circular no setor de Equipamentos Eletroeletrônicos.

Quase 99% de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos da linha verde, podem ser reusados, remanufaturados ou reciclados. Casos raros, como fitas cassetes são destinados para aterro sanitário. Isso deve-se ao alto custo de separação de metais pesados, como o cromo, do filme da fita.

A prática de reuso e remanufatura com a extensão do ciclo de vida dos equipamentos é mais vantajosa do que a reciclagem. Isso pode ser mensurado pelo valor dos materiais: um computador de segunda mão produzido a partir de remanufatura ou recuperado para reuso vale na faixa de R\$ 50,00 a R\$ 90,00/quilo enquanto a matéria-prima de REEE para reciclagem vale em média na faixa de R\$ 3,00 a R\$ 7,00/quilo. Além de ganhos econômicos, existem ganhos ambientais e sociais discutidos em seguida.



O reuso e a remanufatura de equipamentos para produção de um equipamento de segunda mão tem se mostrado uma alternativa de grande importância para inclusão digital de jovens e adultos tanto na fase escolar como de trabalho. Como exemplo, pode-se citar o caso do CEDIR que emprestou computadores de segunda mão para alunos de baixa renda da USP e de programas voltados para essa comunidade oferecidos pela própria USP (por exemplo, Programa Paideia). Dentro desta mesma linha, a Reurbi, produz equipamentos de segunda mão para atender à demanda da população de menor poder aquisitivo, que neste período pós-pandemia, passou a assistir aulas e trabalhar remotamente (Barbosa, 2022).

O material mais valioso do REEE são as placas de circuito impresso, devido à existência de metais preciosos, como ouro, prata, platina e cobre. Contudo, poucos países têm tecnologia para a extração desses metais, havendo fluxo de placas para esses países. Hoje, 34% das placas são recicladas. A Economia Circular aplicada neste caso ainda é restrita.

## REFERÊNCIAS

- ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Site institucional**. [2022]. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/>. Acesso em: 22 out. 2022.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16156:2013** – Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos — Requisitos para atividade de manufatura reversa. [Esta Norma estabelece requisitos para proteção ao meio ambiente e para o controle dos riscos de segurança e saúde no trabalho na atividade de manufatura reversa de resíduos eletroeletrônicos]. São Paulo: ABNT, 2013.
- ASSUMPÇÃO, Lia. **Obsolescência programada, práticas de consumo e design:** uma sondagem sobre bens de consumo. 2017. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16134/tde-11012018-123754/pt-br.php>. Acesso em: 22 out. 2022.
- BALDÉ, Cornelis Peter; D'ANGELO, Elena; LUDA, Vittoria Cortemiglia; DEUBZER, Otmar; KUEHR, Ruediger. **Global Transboundary E-waste Flows Monitor 2022**. Nations University (UNU)/ United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), Bonn, Germany, 2022. Disponível em: [https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/06/Global-TBM\\_webversion\\_june\\_2\\_pages.pdf](https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/06/Global-TBM_webversion_june_2_pages.pdf). Acesso em: 29 out. 2022.
- BARBOSA, Alexandre F. (coord.) **Painel TIC Covid-19:** Pesquisa on-line com usuários de Internet no Brasil. 4. ed. Cultura, Comércio Eletrônico, Serviços Públicos On-line, Telessaúde, Ensino Remoto e Teletrabalho. Pesquisas Cetic.br. São Paulo, 2022. Disponível em: [https://www.nic.br/media/docs/publicacoes/2/20220404170927/painel\\_tic\\_covid19\\_4edicao\\_livro%20eletronico.pdf](https://www.nic.br/media/docs/publicacoes/2/20220404170927/painel_tic_covid19_4edicao_livro%20eletronico.pdf). Acesso em: 22 out. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 10.240**, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e



seus componentes de uso doméstico. D.O.U. de 13.02.2020, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/D10240.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10240.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

CARVALHO, Tereza Cristina Melo de Brito; XAVIER, Lúcia Helena; FRADE, Neuci Bicov. **Dispositivo de transporte de cinescópios**. 2013, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR102013001096. Título: "DISPOSITIVO DE TRANSPORTE DE CINESCÓPIOS". Instituição de registro: INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depositante(s): Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho; Neuci Bicov Frade; Lucia Helena Xavier. Universidade de São Paulo, Depósito: 16.01.2013; Concessão: 01.01.2014.

CARVALHO, Tereza Cristina Melo de Brito. Os benefícios e os desafios de Economia Circular aplicada ao setor de equipamentos eletroeletrônicos. In: PERIN, Edson. (coord.). **Economia Circular: um modelo que dá impulso à economia, gera empregos e protege o meio ambiente**. São Paulo: NetPress Books, 2018, p. 169-190.

CEDIR – Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática. USP, Superintendência de Gestão Ambiental, [2020]. Disponível em: <http://www.sga.usp.br/centro-de-descarte-e-reuso-de-residuos-de-informatica-cedir/>. Acesso em: 22 out. 2022.

ELETROS. Associação Nacional de Fabricantes de Produtos Eletroeletrônicos. **Site institucional**. [2022]. Disponível em: <https://eletros.org.br/>. Acesso em: 22 out. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Circular Consumer Electronics: An initial exploration**. Fundação Ellen MacArthur, 2017. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-consumer-electronics-an-initial-exploration>. Acesso em: 06 nov. 2022.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential**. United Nations University/United Nations Institute for Training and Research – co-hosted Scycle Programme, International Telecommunication Union & International Solid Waste Association, Bonn/Geneva/Rotterdam. 2020. Disponível em: [https://ewaste.monitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM\\_2020\\_def\\_july1\\_low.pdf](https://ewaste.monitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf) Acesso em: 29 out. 2022.

GREEN ELETRON. **Gestora de Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos**. [2022]. Disponível em: <https://www.greeneletron.org.br/sobre>. Acesso em: 22 out. 2022.

MEIRELLES, Fernando de Souza. **Pesquisa Anual do Uso de TI – Tecnologia da Informação nas Empresas**. Escola de Administração de Empresas de São Paulo (EAESP), 33. ed. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas – FGV, 2022. Disponível em:



[https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u68/fgvcia\\_pes\\_ti\\_2022\\_-\\_relatorio.pdf](https://eaesp.fgv.br/sites/eaesp.fgv.br/files/u68/fgvcia_pes_ti_2022_-_relatorio.pdf). Acesso em: 07 nov. 2022.

PAIDEIA. **Programa Pró-profissão em Tecnologia da Informação**. São Paulo: USP, Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, [2022]. Disponível em: <http://www.lassu.usp.br/paideia/>. Acesso em: 06 nov. 2022.

PORTELA, F. **O catador eletrônico**. São Paulo: Loqüi, 2015. Disponível em: <https://institutogea.org.br/publicacoes/livros/livro-o-catador-eletronico/>. Acesso em: 22 out. 2022.

REURBI – Recicladora Urbana. **Impacto Positivo agregando valor ao seu descarte**. [2022]. Disponível em: <https://reurbi.com.br/impacto-positivo-meio-ambiente/>. Acesso em: 08 nov. 2022.

SOUZA, Bruna; BREMGARTNER, Vitor. **Evolução das modalidades B2B e B2C em e-business no Brasil**. CONASUM – IV Congresso de Administração do Sul do Mato Grosso. Universidade Federal do Mato Grosso, 13-15 dez. 2016. Disponível em: <https://eventosacademicos.ufmt.br/index.php/CONASUM/IV-Conasum/paper/viewFile/786/299>. Acesso em: 22 nov. 2022.

XAVIER, Lúcia Helena da Silva Maciel; OTTONI, Marianna de Souza Oliveira (org.). **Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 2021. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2483>. Acesso em: 08 nov. 2022.





# SOLUÇÕES CIRCULARES E RESÍDUOS SÓLIDOS: AS PROPOSTAS DO PROGRAMA *FINEP STARTUP*

## *CIRCULAR SOLUTIONS AND SOLID WASTE: THE PROPOSALS OF THE FINEP STARTUP PROGRAM*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

VALE, Henrique Vasquez Féteira do. Soluções circulares e resíduos sólidos: as propostas do programa Finep Startup. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Henrique Vasquez Féteira do Vale**

Doutor em engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense. Analista da Finep e atualmente gerente do Departamento de Química, Metalurgia e Materiais.

E-mail: hvasquez@finep.gov.br

## **RESUMO**

O presente estudo tem como objetivo explorar a relação das propostas de investimento de empresas recebidas pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) no programa “*Finep Startup*” com tema de economia circular, e mais em especial, com o tópico de resíduos sólidos. Introduzimos uma breve discussão conceitual sobre economia circular, resíduos sólidos, seus aspectos tecnológicos e a necessidade do financiamento público nesses temas, buscando traçar a relação existente entre esses tópicos. Esclarecemos a importância do apoio público a pesquisa, desenvolvimento e inovação e como este pode ser um catalisador para a economia circular. Traçamos um breve histórico da atuação da Finep em programas voltados para a economia circular e sustentabilidade de forma geral e nos aprofundamos na evolução dos instrumentos de apoio para *startups*. Apresentamos o programa “*Finep Startup*” e com base em diferentes modelos conceituais, sugerimos e aplicamos uma tipologia para classificar as propostas orientadas para economia circular e para o tema de resíduos sólidos. Encontramos que a maior parte dos investimentos solicitados foram voltados para eficiência energética, energia solar e mais especificamente no tópico de resíduos sólidos, reciclagem, *softwares* e sistemas para a logística reversa. De forma geral, as propostas foram mais voltadas para as etapas de recuperação dos materiais no final do seu ciclo de vida, em detrimento de estratégias mais ligadas ao *design* dos produtos e a manutenção de seu valor durante o ciclo de vida.

Palavras-chave: Economia Circular. Resíduos Sólidos. Tecnologia. *Startups*. Financiamento.



## ABSTRACT

The present study aims to explore the relationship of investment proposals from companies received by Financier of Studies and Projects (Finep) in the "Finep Startup" program with a circular economy theme, and in particular, with the topic of solid waste. We introduce a brief conceptual discussion on circular economy, solid waste, its technological aspects and the need for public funding in these themes, seeking to trace the relationship between these topics. We clarify the importance of public support for research, development and innovation and how this can be a catalyst for the circular economy. We trace a brief history of Finep's performance in programs aimed at the circular economy and sustainability in general and we delve deeper into the evolution of support instruments for startups. We present the "Finep Startup" program and, based on different conceptual models, we suggest and apply a typology to classify proposals oriented towards circular economy and the theme of solid waste. We found that most of the investments requested were focused on energy efficiency, solar energy and more specifically on the topic of solid waste, recycling and software and systems for reverse logistics. In general, the proposals were more focused on the recovery stages of materials at the end of their life cycle, to the detriment of strategies more linked to the design of products and the maintenance of their value during the life cycle.

Keywords: Circular Economy. Solid Waste. Technology. Startups. Financing.

## 1 INTRODUÇÃO

No modelo econômico vigente, o bens e produtos têm seu valor esgotado e são descartados após a sua utilização, caracterizando um consumo linear. O paradigma atual que sustenta a economia linear de extrair-produzir-consumir e descartar ("*take-make-consume and dispose*") seria a premissa que os recursos naturais são abundantes, facilmente acessíveis e de descarte barato (Comissão Europeia, 2014). Porém, a Economia Circular (EC) tem despontado como uma alternativa a este paradigma, empregando uma visão sistêmica em relação a preservação e regeneração do capital natural, manutenção da utilidade e valor dos produtos e materiais, a eliminação de desperdícios e a minimização de externalidades negativas.

Essa mudança de paradigma requer novas perspectivas em diversas camadas, tais quais de governança, relacionamento entre diferentes atores (empresas, governo, sociedade civil), regulação, novos modelos de negócios entre outras. Destaca-se também, que como catalisadores da Economia Circular estão o acesso a linhas de financiamento e o desenvolvimento de políticas de suporte à inovação (CNI, 2018).

Uma dimensão importante e urgente da transição para uma economia circular no país é a questão do gerenciamento dos resíduos sólidos. No Brasil, historicamente o setor é marcado pela ineficiência na oferta deste serviço. Segundo o SNIS (2020), somente 2,85% da massa dos



resíduos sólidos urbanos tem sua coleta realizada de forma seletiva, enquanto que pelo menos 26,6% têm sua disposição final inadequada, em aterros controlados ou lixões. Algumas causas comumente atribuídas a este quadro perpassam pelas incertezas institucionais que envolvem o setor, falta de capacitação técnica e a ausência de programas de incentivos a investimentos (Pimentel; Assalie; Machado, 2017).

Do ponto de vista da inovação, este setor tende a ter um baixo dinamismo tecnológico. Ainda que os investimentos no aprimoramento dos processos atuais ou no desenvolvimento de novas rotas tecnológicas possam trazer grandes externalidades socioeconômicas positivas, o setor inova fortemente em função da minimização de custos, das tecnologias apresentadas por fornecedores e pelas pressões ambientais crescentemente impostas. Ou seja, a pauta tecnológica tende a ser mais reativa e conservadora.

Diante disto, é preciso considerar que o investimento público em inovação pode atuar como um acelerador da transição para economia circular e na modernização e difusão das tecnologias de gerenciamento dos resíduos sólidos empregadas no país. Uma das formas de conduzir esse processo é através de programas de investimento e fomento público a *startups*, que podem impactar na criação de novos empregos, eficiência do mercado, no desenvolvimento de novas tecnologias e na aceleração de mudanças estruturais na economia (Roncaratti, 2018). Tais empresas *startups* têm como característica a capacidade e assumir altos riscos no desenvolvimento de soluções inéditas, que podem ser altamente escaláveis.

Assim, é fundamental construir uma compreensão mais clara sobre a relação atual do ecossistema de *startups* no Brasil e com tema de economia circular, e em mais especial, com o tópico de resíduos sólidos. A partir desse entendimento, é possível aprimorar as formas do apoio público para a inovação no setor bem como identificar oportunidades para o setor privado atuar com novas soluções e tecnologias.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste tópico, buscamos lançar luz sobre os principais conceitos a respeito da economia circular e como esta pode ser abordada. Também traçamos uma breve visão da dinâmica tecnológica para a gestão dos resíduos sólidos. Além disso, traçamos algumas considerações para o financiamento da inovação nestes temas, especialmente no tocante àquele realizado pelo apoio público.



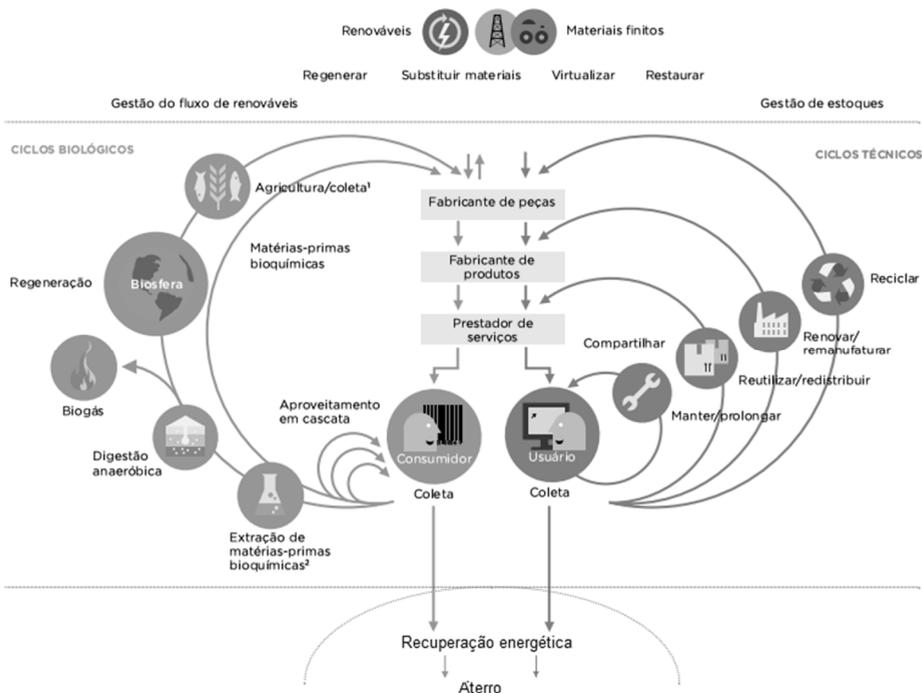
## 2.1 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular, envolve aspectos industriais e sociais buscando a sustentabilidade como objetivo através de uma cultura que preza pelo fim do desperdício (De Los Rios; Charnley, 2017). A Fundação Ellen MacArthur (EMF, 2013) aponta que a EC se sustenta nos seguintes pilares:

- i) Preservar e restaurar o capital natural;
- ii) Otimizar a produção de recursos mantendo um alto grau de sua utilidade e circulação em cascata; e,
- iii) Promover a eficácia do sistema removendo dos projetos fatores que trarão externalidades negativas.

Desta forma, a EC seria regenerativa por princípio, na medida em que substitui o conceito de fim-de-vida por restauração, promove o uso de energias renováveis, a eliminação do uso de elementos tóxicos e contaminantes, além da eliminação do desperdício através de um *design* superior dos materiais, produtos, sistemas e modelos de negócios.

Figura 1 – Fluxos de materiais: ciclo técnico e ciclo biológico



Fonte: Fundação Ellen MacArthur (EMF, 2017).



A Figura 1 esquematiza tais princípios, encadeando em um “diagrama de borboleta” os fluxos de materiais circulando por um ciclo técnico e um biológico.

Nesta lógica, o valor dos produtos, materiais e recursos são mantidos na economia o maior tempo possível, minimizando os desperdícios e contribuindo para uma economia competitiva, de baixo carbono e eficiente em recursos. Conceitualmente, a EC não é inteiramente nova, pois guarda similaridades e se vale de características de outras ideologias tais qual a Ecologia Industrial, Economia de *Performance*, Biomimetismo e produção do berço ao berço ou “cradle-to-cradle” (McDonough; Braungart, 2001).

Em uma abordagem mais analítica em relação ao fluxo dos materiais, ressalta-se que tanto a academia como aqueles profissionais atuantes na economia circular costumam utilizar modelos do tipo “R” que expandem a ideia dos 3Rs – “Reduzir, Reutilizar e Reciclar” – no intuito de decodificar as diferentes dimensões da EC, passando por 6Rs – “Repensar, Recusar, Reduzir, Reutilizar, Reparar, Reciclar” – (Sihvonen; Ritola, 2015) ou até 9Rs – “Recusar, Repensar, Reduzir, Reutilizar, Reparar, Remodelar, Remanufaturar, Reciclar, Recuperar” – (Kirchherr *et al.*, 2017; Potting *et al.*, 2017).

Figura 2 – Modelo Conceitual 9Rs

Circular ↑ Aumento da Circularidade ↓ Linear	Uso e manufatura mais inteligentes	R0 Recusar	Recusar produto ou material, oferecendo a sua função por outros meios
		R1 Repensar	Repensar a utilização dos materiais e produtos
		R2 Reduzir	Aumentar a eficiência da manufatura e utilização, diminuindo o consumo de materiais e recursos
	Ciclo de uso do produto e de suas partes estendido	R3 Reutilizar	Prolongar a utilização pelo reuso do produto em sua função original
		R4 Reparar	Reparar para manter a utilidade e função original
		R5 Remodelar	Restaurar e atualizar
		R6 Remanufaturar	Manufaturar um produto novo aproveitando partes de produtos já utilizados
		R7 Novo Propósito	Proporcionar nova função para o produto ou suas partes
	Aproveitamento de materiais	R8 Reciclar	Processar para recuperar materiais
R9 Recuperar		Recuperar energia	

Fonte: Adaptado de Kirchherr *et al.* (2017).



Essa abordagem hierarquizada permite organizar, discutir e classificar diferentes ações circulares possíveis. A Figura 2 esquematiza o nível de circularidade de cada elemento operacional dentro da abordagem do 9R.

Um erro recorrente é resumir a economia circular à reciclagem. Essa atividade deve ser entendida como uma das últimas alternativas ao material disponível, já que, dentro do paradigma da economia circular, é preferível projetar o produto para que seja durável, de fácil manutenção, reparável, reutilizável e até remodelável. É possível observar que o modelo 9R busca dimensionar estas demais abordagens, para além da reciclagem.

A mudança de paradigma em favor da EC traz desafios significativos para diversas áreas, a exemplo da ciência dos materiais, engenharia de processos, *design* de serviços, ciências comportamentais e também para a legislação a elas aplicada. Não obstante, é possível destacar diversas iniciativas da indústria no sentido da circularidade. Dentre elas podemos citar o segmento de carros compartilhados da Audi (2015), o remodelamento de equipamentos médicos de segunda mão da Philips (2014) e o *leasing* de aparelhos móveis da Nokia. Diversos outros segmentos industriais / áreas de conhecimento já despontam com a aplicação dos conceitos de EC: mineração urbana de lixo eletrônico, cadeias de suprimento, compras públicas, construção civil, redução das emissões de carbono, tecnologias digitais, bioeconomia, indústria de alimentos, plásticos e energia.

A aplicação de tecnologias de sensores e conectividade, por exemplo, permite a quantificação e caracterização dos recursos secundários (recursos já utilizados, porém reaproveitáveis) em tempo real. Com isto é possível ajustar de forma eficiente os processos de reciclagem em relação à eficiência energética, à presença de contaminantes e à qualidade do produto final. A combinação de *big-data*, *machine-learning* e simulação pode ser usada para a otimização da cadeia de suprimentos, considerando tanto os recursos primários e os secundários na logística tradicional ou reversa. Tais ferramentas habilitam o potencial econômico da EC, na medida em que mapeiam e relacionam as perdas, os custos, as disponibilidades dos materiais (e qualidade destes) e os fatores de recuperação.

O financiamento a EC também desponta como uma nova oportunidade em tendência crescente. Recentemente, há aumento significativo na criação de instrumentos de dívida e investimento orientados para a EC, lançados por atores conhecidos, como



BlackRock, Credit Suisse e Goldman Sachs, Barclays, BNP Paribas, HSBC, ING, Morgan Stanley e outros. A partir de 2020, investimentos em fundos de ações públicas com a EC como foco ao menos parcial aumentaram seis vezes, de US\$ 0,3 bilhão para mais de US\$ 2 bilhões (EMF, 2020).

## 2.2 DINÂMICA TECNOLÓGICA PARA RESÍDUOS SÓLIDOS

As externalidades dos investimentos no gerenciamento dos resíduos sólidos são inegáveis. A Organização Mundial da Saúde (OMS), por exemplo, preconiza que para cada dólar investido em saneamento, em todas suas dimensões, recupera-se 4,3 dólares em função de economicidades no sistema de saúde, aumento da produtividade e oportunidade de novos investimentos (WHO; UN-Water, 2014). Em relação ao regime tecnológico em que está inserido, o setor de resíduos sólidos pode ser entendido como dominado pelos fornecedores e intensivo em escala. Ou seja, o setor integra tecnologias e absorve inovações desenvolvidas pelos fabricantes de insumos e equipamentos, considerando fortemente custos e sem necessariamente internalizar aprendizado tecnológico nas atividades internas da empresa, de modo que é incomum para as empresas que atuam como operadoras desse serviço, por exemplo, possuírem departamento exclusivo para Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (Pavitt, 1984).

Ainda assim, o planejamento e operação dos projetos e sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos são complexos e, dada a grande escala de operação, as novas tecnologias são introduzidas paulatinamente. Esse regime também sofre forte influência das pressões ambientais crescentes, considerando que a sociedade cobra cada vez mais modelos de gestão, práticas e tecnologias que assegurem a sustentabilidade ambiental e melhoria contínua. Dessa forma, o aprimoramento das tecnologias é no sentido de mitigação de impactos e de racionalização de recursos.

A escolha das rotas tecnológicas para o setor, bem como sua associação com outras, deve contemplar diversos critérios, tais quais:

- ♦ Técnicos (características dos resíduos, geografia regional, urbanização);
- ♦ Ambientais (área, emissões, efluentes e legislação);
- ♦ Econômicos (viabilidade, investimento e custo de operação); e,
- ♦ Políticos e Sociais (geração de emprego, renda e inclusão).



Diante disto, trata-se de decisão que muitas vezes apresenta objetivos conflitantes e critérios ambíguos e contraditórios (Lima *et al.*, 2014). Define-se rota tecnológica como “o conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos desde a sua geração até a sua disposição final, envolvendo circuitos de coleta de resíduos de forma indiferenciada e diferenciada e contemplando tecnologias de tratamento dos resíduos com ou sem valorização energética” (Jucá *et al.*, 2014).

Em relação a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a Lei nº 12.305/2010 traz como princípio a necessidade de um olhar sistêmico na gestão dos resíduos sólidos, considerando a variável tecnológica junto da ambiental, social, cultural, econômica e de saúde pública. A PNRS, também, aborda os aspectos tecnológicos como fator determinante daquilo que será classificado como rejeito (resíduos para o qual não há processo tecnológico de tratamento ou recuperação disponível ou viável). Além disto, aponta dentre seus instrumentos atualização do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), fundo do qual a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) é secretária executiva.

Essa complexidade também é defendida por Pereira (2014) que estabelece que:

[...] a escolha de rota tecnológica para a gestão sustentável dos resíduos sólidos domiciliares, formado por um complexo mosaico que abarca desde ações de planejamento, escolhas tecnológicas, práticas de monitoramento, capacidades operacionais, ajustes econômicos e legais, bem como a sensibilização da comunidade e inclusão social, todas amparadas através da instituição de política pública que promova a preservação dos recursos naturais e a proteção do clima (Pereira, 2010).

Assim entendemos que no tocante ao tema de resíduos sólidos não é possível debater a aplicação das tecnologias disponíveis de forma isolada. É preciso considerar também aspectos sociais, culturais, legais e políticos, além da capacidade de gestão e colaboração dos atores públicos e privados.

### **2.3 FINANCIAMENTO PÚBLICO**

O investimento na atividade de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), principalmente sobre o prisma do financiador, traz uma série de desafios ligados às características intrínsecas de tal atividade, tais quais os longos prazos para obtenção de retorno, incertezas, problemas informacionais e intangibilidade do capital



intelectual (Bakker, 2013). Então, considerando o papel da atividade de PD&I como promotora de crescimento econômico, vale destacar os desafios ao investimento nessa atividade, inclusive no contexto das políticas públicas. Neste sentido, destacam-se os trabalhos de Nelson (1959) e Arrow (1962), os quais sistematizam esses desafios e defendem a necessidade de subsídios públicos para suportar tais atividades.

Para Stiglitz (1993) o objetivo do apoio governamental para a atividade de pesquisa, desenvolvimento e inovação é contribuir na superação do *funding gap*, ou seja, alocar recursos naqueles projetos de elevado retorno social, porém de elevado risco e diminuto retorno privado, situação que cria uma lacuna para o investimento. Para Mazzucato (2015), no que tange aos desafios ao financiamento do desenvolvimento tecnológico, o estado deve ir além de prover meios para a superação das falhas de mercado e atuar de forma estratégica, conformando condições para o desenvolvimento econômico e social propiciado pela inovação.

O desenvolvimento de soluções circulares, inclusive aquelas para os resíduos sólidos, deve considerar mais do que somente os riscos tecnológicos envolvidos (risco de a solução não ter sucesso técnico), pois é preciso observar sistemicamente os aspectos relativos ao modelo de negócios, engajamento e papel de diversas partes interessadas, cadeias de suprimento reversas e alternativas para manter o valor dos materiais ao longo do seu ciclo de uso. Assim, no financiamento para a economia circular, deve-se evitar o financiamento isolado da inovação, sem que haja uma visão sistêmica do ciclo de vida do produto e da colaboração entre os diversos atores da cadeia de produção e de sua utilização. Tal financiamento requer uma visão mais ampla da geração de valor, novos formatos de avaliação de risco, pensamento de longo prazo e esforço colaborativo, exigindo esforço de inovação para incorporar abordagens multissetoriais e criação de novos modelos de negócios.

Nesse contexto, as instituições financeiras e de fomento quando na execução de políticas públicas para financiar a economia circular devem lidar com diversos desafios, tais como desenvolver novas competências setoriais, engajar das lideranças, implementar a mensuração e padronização de métricas. Também é preciso que o governo forneça incentivos ao setor financeiro e uma política e estrutura legislativa propícia para acelerar essa abordagem sistemática, concreta e escalável para integrar os conceitos de EC em produtos e serviços financeiros. Assim, diante dos maiores investimentos em EC as instituições de financiamento assumem um maior papel no



reforço do vínculo entre eficiência de recursos e mudanças climáticas, pois a promoção da circularidade ajuda o setor a cumprir os compromissos climáticos e melhorar a gestão de riscos (UNEP, 2020).

Essa abordagem pode cumprir um papel especial em relação ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, pois as dificuldades financeiras e de acesso a crédito para viabilizar investimentos nesse setor são bastante comuns, independentemente do porte dos municípios. Nos pequenos municípios, soma-se o problema da dificuldade de se obter escala para implantação de soluções e além de situações de baixa capacidade técnica. Já nos municípios maiores, é comum dificuldades na obtenção de licenciamento ambiental e implantação da coleta seletiva (Grisa; Capanema, 2018).

### 3 A ATUAÇÃO DA FINEP

A Finep é uma empresa pública cujo objetivo é apoiar estudos, projetos e programas de interesse para o desenvolvimento econômico, social, científico e tecnológico do País, tendo em vista as metas e prioridades setoriais estabelecidas nos planos do Governo Federal. A instituição é considerada um dos principais agentes atuantes no papel de banco de desenvolvimento para projetos de ciência, tecnologia e inovação tendo em vista a disponibilidade de diferentes linhas de apoio, específicos para os diversos agentes do sistema nacional de inovação, nas diferentes fases do desenvolvimento tecnológico, propiciando a articulação destes *players* e integração dos instrumentos de suporte financeiro.

Sua fundação se deu em 1965 enquanto fundo para financiamento de estudos prospectivos no âmbito da modernização de empresas e do desenvolvimento do estado. Em 1971, tornou-se a secretaria executiva do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) principal fundo de financiamento a programas e projetos de desenvolvimento científico e tecnológico até os dias atuais, com autonomia para a definição de prioridades na alocação dos recursos (Melo, 2009).

A Finep tem um abrangente histórico de programas de apoio a projetos de inovação em sustentabilidade. Nos últimos dez anos foram lançados editais que integravam diferentes instrumentos financeiros (financiamento não reembolsável, empréstimo e investimento direto) para apoio a empresas e universidades, todos contando com pelo menos uma linha de apoio orientada para projetos sustentáveis, vide os programas “Inova Sustentabilidade”, “Inova



Energia 2" e "Inova Mineral". Vale destacar que, em 2017, foi lançado o programa ERA-MIN, uma ação conjunta promovida pela União Europeia com outras organizações financiadoras de pesquisa, desenvolvimento e inovação na área de matérias-primas minerais e suas fontes secundárias, com enfoque na economia circular. Este foi o primeiro programa financeiro no Brasil de apoio à PD&I exclusivamente voltado para a Economia Circular. Esse quadro foi reforçado pelos editais de subvenção econômica de 2022, pois os programas abarcaram temas como biogás, mineração, energia e cidades inteligentes, disponibilizando R\$ 185 milhões de reais para apoio a projetos de P&D de empresas, todos com linhas de apoio considerando a economia circular. O apoio da Finep voltado especificamente para *Startups* e o perfil das propostas recebidas no tocante a EC e aos resíduos sólidos para este tipo de empresa, será abordado mais a diante.

### 3.1 APOIO A *STARTUPS*

Em 2000, a Finep passou a atuar de forma mais ativa no fomento a *startups* com o programa INOVAR. Este tinha como objetivo estimular a criação de novos fundos de capital de risco voltados para empresas nascentes de base tecnológica. Realizou isso atraindo investidores institucionais, especialmente os fundos de pensão, e disseminando as melhores práticas de análise para seleção de fundos de capital de risco. Neste contexto, foi estruturada a Incubadora de Fundos Inovar por meio de um consórcio entre Finep, Banco Interamericano de Desenvolvimento / Fundo Multilateral de Investimentos (BID/Fumim), Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae) e Fundação Petrobras de Seguridade Social (Petros), reunindo investidores para seleção e análise conjunta de fundos de capital de risco (Finep, 2011).

Entre as conquistas do programa INOVAR destacam-se: a participação na criação da Associação Brasileira de Private Equity e Venture Capital (ABVCAP) uma organização sem fins lucrativos que apoia o desenvolvimento da atividade de investimento de longo prazo no país relacionado a *private equity*, *venture capital* e capital semente; parcerias com fundos de pensão e agentes de fomento para fundos de investimento; e o estabelecimento de vários fóruns para reunir empresas iniciantes e investidores.

A partir de 2006 a Finep assumiu um crescente nas contratações e desembolsos apoiando projetos empresariais de



desenvolvimento tecnológico. A partir do mesmo ano, o FNDCT passou a ser utilizado como fonte na operação de empréstimos com tal finalidade. Em 2010, a Finep acessou linhas de financiamento com taxas subsidiadas pelo Tesouro Nacional, o Programa de Sustentação do Investimento – PSI (Finep, 2011).

Em 2013, o governo federal lançou o Plano Inova Empresa, a ser operado em pela Finep e pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) em parceria. Segundo Nyko *et al.* (2013), o plano buscava desafios tecnológicos em temas e setores estratégicos, por meio da integração dos instrumentos de apoio (empréstimos, recursos não reembolsáveis tanto para empresas como Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs), *equity* e o poder de compra do estado) e consolidação de arranjos entre empresas de diferentes portes e universidades. Até o final de 2014, haviam sido lançados os seguintes programas setoriais: Inova Petro; Inova Energia; Inova Agro; Inova Aerodefesa; Inova Telecom; Inova Sustentabilidade; Plano de Apoio Conjunto à Inovação Tecnológica Agrícola no Setor Sucroenergético (PAISS): Etanol 2ª geração; PAISS Agrícola, Infraestrutura; Inova Saúde (Fármacos e Equipamentos Médicos). Neste ano tal plano teve uma demanda de R\$ 98,7 bilhões envolvendo 2.715 empresas e 223 institutos de pesquisa, provendo um patamar de contratação em operações de crédito de R\$ 35,4 bilhões pela Finep e pelo BNDES (Finep, 2014) neste contexto.

Também em 2006, a Finep intensificou investimentos em empresas de base tecnológica mediante participação de capital de risco aportado diretamente pela Finep ou indiretamente através de parceria com Fundos de Investimentos Privados no Programa "Inovar Semente". Este foi lançado a partir da constatação de que havia escassez de capital semente, isto é, recursos para empresas inovadoras nas fases iniciais de seu crescimento. O programa teve como objetivo a capitalização de fundos, preferencialmente locais, voltados para o investimento de microempresas e empresas de pequeno porte inovadoras, com faturamento até R\$ 2,4 (Finep, 2006).

Já em 2009, é lançado o programa "Primeira Empresa Inovadora" (PRIME), o qual visou criar condições financeiras favoráveis para que um número significativo de empresas nascentes com alto valor agregado pudesse consolidar com sucesso seu desenvolvimento. O programa foi baseado em acordos de cooperação institucional entre a Finep e operadoras descentralizadas para atender a grande demanda de recursos das empresas iniciantes.



As empresas apoiadas recebiam recursos de Subvenção Econômica de R\$ 120 mil para custear recursos humanos qualificados e serviços de consultoria especializada em estudos de mercado, serviços jurídicos, financeiro, certificação e custos, entre outros, durante doze meses. Também participavam de um programa de formação em empreendedorismo e gestão de negócios especificamente concebido para o PRIME. Além disto, tornavam-se elegíveis para serem atendidas por outros programas da Finep, especialmente o programa INOVAR Semente.

### 3.2 FINEP STARTUP

O Programa *Finep Startup* foi criado tendo em vista o estágio de desenvolvimento das pequenas empresas de base tecnológica conhecido como conhecido como “Vale da Morte”. Trata-se de uma fase do crescimento da firma em que há necessidade de financiamento para avançar do desenvolvimento da inovação para a sua comercialização. Esse momento concentra os riscos tecnológicos no desenvolvimento da solução que ainda não gera receita em escala suficiente para se autofinanciar. Assim, configura um gap de capital que limita a capacidade de um *startup* de adquirir recursos financeiros suficientes necessários para sustentar as operações de negócios (por exemplo, produto/serviço desenvolvimento, comercialização, *marketing* etc.) e gerar receitas estáveis (Morales-Alonso *et al.*, 2019).

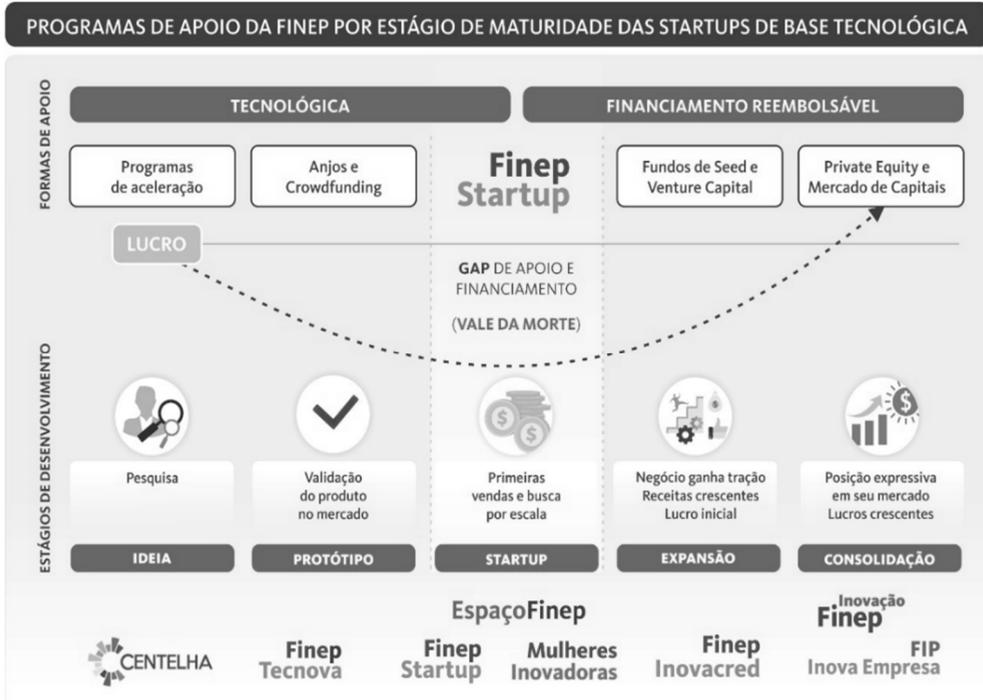
O programa tem como forma de apoio o investimento direto nas empresas, no qual a Finep aporta até R\$ 1,2 milhão mediante a um contrato de opção de compra de ações, que pode ser exercida no seu vencimento ou mediante a um evento de liquidez (captação e recursos da empresa junto a novos investidores ou sua incorporação / fusão com outras empresas). A iniciativa tem como público alvo *startups* inovadoras com faturamento entre R\$ 360 mil e R\$ 4.800.000,00 cujo, modelo de negócios, produto, processo ou serviço, estivesse, no mínimo, na fase de protótipo final, com provas de conceito ou testes bem-sucedidos e comprovados.

A seleção tem como parte dos seus critérios o posicionamento da empresa no mercado, a inovação proposta, qualificação da equipe, histórico de participação em outros programas de fomento e o envio de cartas de compromisso de investimento por investidores privados (Investidores-Anjo). A relevância deste último critério é se valer da capacidade do próprio mercado em selecionar bons investimentos, bem como alavancar recursos privados para o fomento. A Figura 3



sistematiza o modelo conceitual do programa, situando-o diante de outras formas de apoio existentes inclusive aquelas utilizadas pela própria Finep.

Figura 3 – Modelo Conceitual do Programa *Finep Startup*



Fonte: Finep (2022).

Seu lançamento foi realizado em 2017 e seguiu com a publicação de um total de três editais, cada um com duas rodadas de seleção. Ao todo, o programa atraiu 2.268 propostas: 869 no Edital de 2017, 817 no Edital de 2018 e 582 no Edital 2020. A demanda de capital apresentada pelas *startups* nas rodadas de investimentos somou a quantia de R\$ 2,1 bilhões, sendo que o programa atraiu mais de R\$ 80 milhões em investimentos privados, contabilizando as cartas de compromisso de investidores anjos. No tocante ao efetivo aporte de recursos, foram contratadas 29 empresas totalizando um patamar de investimentos aprovados de R\$ 28.576.077 pela Finep.

A Tabela 1 ilustra a posição da carteira de investimento do programa em 31 de dezembro de 2021.



Tabela 1 – Investimento do Programa *Finep Startup*, posição em 31.12.2021

Ano de Contratação	Número de Empresas Investidas	Investimento Aprovado (R\$)	Investimento Anjo (R\$)
2018	5	4.860.000	1.150.000
2019	13	12.840.077	2.150.000
2020	9	8.676.000	1.850.000
2021	2	2.200.000	301.000
Total	29	28.576.077	5.451.000

Fonte: Adaptado de Finep (2022).

Na sua estreia em 2017, pode-se afirmar que o programa foi tímido em relação aos temas elegíveis ligados a sustentabilidade. Em relação as linhas temáticas mais diretamente relacionadas com a economia circular, o primeiro edital contemplou somente os temas de monitoramento e perdas de água, geração de energia por fontes renováveis e mitigação de riscos e impactos ambientais da mineração e transformação mineral. Com o aperfeiçoamento do programa, a partir de 2018, este passou a considerar nomeadamente o tema de economia circular como um todo e o tema resíduos sólidos.

Em junho de 2022, o programa foi reformulado e passou a operar de forma contínua, ou seja, os candidatos interessados podem submeter propostas de investimento à Finep a qualquer momento, mediante a um regulamento, ou seja, sem a necessidade de aguardar pela publicação de editais. Atualmente, o *Finep Startup* apresenta diversas linhas temáticas que contribuem para a Economia Circular e uma melhor gestão dos resíduos sólidos, pois há uma linha temática de “Tecnologias para o Desenvolvimento Sustentável” que contempla os temas de cidades inteligentes e sustentáveis, energia renovável e eficiência energética, bioeconomia, tratamento da poluição e de resíduos sólidos, monitoramento, prevenção e recuperação de desastres naturais e ambientais e preservação ambiental.

### 3.2.1 Propostas em Economia Circular e Resíduos Sólidos

Buscamos examinar como que as propostas submetidas ao programa *Finep Startup* se relacionam com a economia circular (EC).



Para isso, propomos uma classificação específica para a EC, diferente das áreas temáticas originalmente estabelecidas no edital. O objetivo é contemplar amplamente a abrangência do tema implícitos a EC, em diferentes dimensões, que não considere somente o fluxo dos materiais, mas também outros tópicos mais sistêmicos, como a preservação e regeneração do capital natural e minimização de externalidades negativas. Inicialmente, determinou-se que propostas nos seguintes temas estariam diretamente relacionadas a Economia Circular: eficiência energética; fontes de energia renováveis; educação; mitigação de impactos; recuperação de áreas; e, monitoramento. Esses temas não são específicos a determinados setores nem fazem parte de uma hierarquia. Estão em uma perspectiva de premissas mais sistêmicas da Economia Circular (EMF, 2015).

Para classificar propostas que dialogassem mais com o fluxo e ciclo de vida dos materiais recorremos ao modelo 9R apresentado no referencial teórico deste estudo. Tal modelo tem como característica estabelecer uma hierarquia entre diferentes estratégias e abordagens possíveis no tocante ao ciclo de uso dos materiais. A própria PNRS e o Decreto nº 10.936/2022 que a regulamenta trazem, dentre suas diretrizes, uma ordem de prioridade, a saber: não geração de resíduos sólidos; redução; reutilização; reciclagem; tratamento; e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (art. 30).

Assim, nos valem do *framework* adotado por Kirchherr *et al.* (2017) para classificar as propostas submetidas aos editais do *Finep startup*. Para complementar, adicionamos uma dimensão inespecífica de “Softwares e Sistemas de Gerenciamento de Resíduos” para classificar as propostas que tratam de forma mais abrangente as soluções para a logística reversa dos resíduos, notadamente marcadas pelo desenvolvimento de *softwares* e sistemas, que não tratam especificamente de tecnologias de valoração, tratamento ou disposição.

Assim, analisamos as 2.268 propostas enviadas para as seis rodadas de seleção dos três editais do programa. Foram mapeadas 186 propostas que nos parâmetros estabelecidos foram consideradas aderentes na contribuição para uma economia circular, o que representa aproximadamente 8,2% da demanda recebida pela Finep nesse programa. A Tabela 2 informa o número de propostas recebidas em cada uma das dimensões estabelecidas.

Tabela 2 – Demanda em Economia Circular no Programa *Finep Startup*

Classificação	Nº de Propostas	% demanda	Classificação	Nº de Propostas	% demanda
R0 Recusar	11	5,91	Eficiência Energética	27	14,52
R1 Repensar	4	2,15	Solar	30	16,13
R2 Reduzir	18	9,68	Eólica	7	3,76
R3 Reutilizar	2	1,08	Outras Energias Renováveis	5	2,69
R7 Novo Propósito	1	0,54	Mitigação de Impactos	8	4,30
R8 Reciclar	33	17,74	Monitoramento Ambiental	5	2,69
R9 Recuperar Energia	11	5,91	Educação Ambiental	4	2,15
Softwares e Sistemas de Gerenciamento	17	9,14	Recuperação de Áreas Degradadas	3	1,61

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A demanda de propostas em Reciclagem – R8 (17,74%) foi a mais expressiva, seguida de Energia Solar (16,3%) e Eficiência Energética (14,52%). Em linhas gerais, essas propostas se basearam em tecnologias relativamente mais conhecidas. Uma possível causa do grande número de propostas em energia solar e eficiência energética decorre do fato de tratar de projetos em que normalmente o retorno econômico é menos arriscado, mais fácil de estimar e costumam gerar valor rapidamente. As soluções em Energia Eólica (3,76%) foram muito menos expressivas que as em Energia Solar, o que pode ser reflexo de um mercado e cadeia de fornecedores mais concentrado. Em uma primeira leitura esse resultado pode sugerir uma abordagem mais conservadora dos empreendedores de *startups* em relação ao tema de economia circular.



Tabela 3 – Perfil das Propostas para Resíduos Sólidos

<b>Classificação</b>	<b>Nº de Prop.</b>	<b>% demanda</b>	<b>Perfil das Propostas</b>
R0 Recusar	4	6,6%	São inovações de produto, essencialmente a aplicação de novos plásticos biodegradáveis e de fontes renováveis, substituídos os plásticos de origem fóssil.
R7 Novo Propósito	1	1,6%	Utensílios domésticos e objetos decorativos elaborado a partir do corpo de garrafas de vidro usadas.
R8 Reciclar	29	47,5%	Destas, dezenove consistem em inovações de processo: Rotas tecnológicas para a reciclagem de embalagens plásticas pós-consumo, processos de aceleração da compostagem, descontaminação de resíduos sem utilização de água e recuperação de metais nobres de resíduos eletroeletrônicos. Dez consistiram em inovações de produtos diversos elaborados partir dos plásticos reciclados e soluções em equipamentos para reciclagem.
R9 Recuperar Energia	10	16,4%	Destas, oito trataram do aprimoramento das rotas tecnológicas para produção de biogás, processos de pirólise e gaseificação, sendo inovação de processo. Duas eram o desenvolvimento de pellets para energia a partir de resíduos orgânicos.
Softwares e Sistemas de Gerenciamento	16	26,2%	Plataformas e soluções de tecnologia de informação que buscam integrar as etapas, atores e processos no gerenciamento do RSU.
Educação	1	1,6%	Educação ambiental com foco em geração de renda em comunidades
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>100%</b>	

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).



As propostas de Redução – R2 e *Softwares e Sistemas de Gerenciamento de Resíduos* também tiveram uma demanda expressiva (respectivamente 9,68% e 9,14%). As primeiras tratam-se sobretudo de projetos de eficiência na produção e entrega dos recursos e produtos, tais quais evitar perdas de água e conservar melhor os alimentos e materiais perecíveis na cadeia de suprimentos. Em relação aos *Softwares e Sistemas de Gerenciamento* todas as propostas consistiam em plataformas e soluções de tecnologia de informação que buscam integrar as etapas, atores e processos. Quase todas diziam respeito para soluções para resíduos sólidos urbanos.

Menos significativas foram as propostas relativas a: Recusar – R0 (5,91%), marcada pelo *redesign* de produtos substituindo matérias-primas fósseis por renováveis; Repensar – R1 (2,15%) marcada por propostas em economia compartilhada; e, Recuperação Energética – R9 (5,91%), que ficou focada no aprimoramento das rotas tecnológicas para produção de biogás, processos de pirólise e gaseificação.

Ainda nas dimensões do 9R as abordagens ligadas a extensão do ciclo de vida do produto e suas partes foram as menos demandadas. Foram submetidas somente duas propostas de Reuso – R3 (1,08%) e uma de Novo Propósito – R7 (0,54%). Não foram encontradas propostas relativas as dimensões de Reparar – R4, Remodelar – R5 e Remanufaturar – R6.

Por fim, foram poucas as propostas em Mitigação de Impactos (4,30%), Monitoramento Ambiental (2,69%), Educação Ambiental (2,15%) e Recuperação de Áreas Degradadas (1,61%), ou seja, as mais ligadas a proteção e regeneração do capital natural e engajamento do capital social. Essas propostas dizem respeito principalmente a monitoramento de águas, efluentes e florestas, e mitigação de impactos / regeneração de áreas degradadas por atividades industriais.

Dentre esse mapeamento das propostas aderentes a EC, preparamos um recorte mais específico considerando somente aquelas voltadas exclusivamente para o desenvolvimento de soluções para Resíduos Sólidos, resultando no exame de 61 propostas.

Destaca-se que a maior parte das propostas se concentrou em soluções para a Reciclagem – R8 (47,5%); *Softwares e Sistemas de Gerenciamento* (26,2%) e Recuperação Energética – R9 (16,4%); ou seja, inovações mais voltadas ao aproveitamento do material e sua logística reversa após o seu ciclo de uso. Esse perfil de proposta está alinhado com a noção que setor no Brasil ainda está mais voltado para soluções que buscam resolver o problema do valor perdido dos



materiais com os baixos índices de coleta seletiva e reciclagem bem como altos índices de disposição final inadequada.

Por fim, ressalta-se que do recorte apresentado, de propostas aderentes a EC e resíduos sólidos, houve somente uma empresa efetivamente investida pela Finep. Trata-se da empresa Polen – Logística Reversa de Embalagens. A empresa propõe “um *marketplace on-line* B2B que conecta empresas que geram resíduos com empresas que utilizam este tipo de material como matéria-prima”, além de soluções para pagamentos, contratação de transportes, seguros e certificação ambiental.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição para a economia circular se traduz como uma oportunidade de conciliar o desenvolvimento econômico com o sustentável e também de estabelecer cadeia de produção mais resilientes, com menores riscos de suprimento e mais comprometidas com a agenda climática. Como contrapartida implica em uma mudança de paradigma que demanda a mudança do olhar e postura das empresas, consumidores e formuladores de políticas públicas.

É interessante destacar que o conceito de economia circular, bem como as suas práticas, foi refinado e é fortemente adotado pelas empresas e política pública em boa parte dos países europeus. Em linhas gerais, os países da Europa apresentam uma dependência de matérias-primas e recursos naturais. Do ponto de vista dos resíduos sólidos, buscam minimizar a sua geração, maximizar a reciclagem e encerrar as práticas de aterro sanitário.

O cenário brasileiro contrasta com este quadro, dada a ausência de políticas amplas, integradas e consistentes para EC no país, empresas ainda em estágio inicial quanto a práticas circulares. Por outro lado, há riqueza em recursos naturais e necessidade de ampliar o acesso aos aterros sanitários em substituição a disposição irregular em lixões e aterros controlados. Essa situação, não diminui a importância da EC para o Brasil, pelo contrário, a torna urgente, contudo deixando mais em aberto quais contornos e abordagens a economia circular pode assumir.

Com base no que foi exposto nesse capítulo, fica claro que a transição para uma economia circular no Brasil dialoga diretamente com a necessidade de trazer novos contornos ao setor de resíduos sólidos. Soluções ligadas a reciclagem e logística reversa são fundamentais, contudo não podemos resumir circularidade a somente as ações que consideram os materiais somente sem seu ciclo de vida.



Em relação ao apoio público, destaca-se a abrangência do programa *Finep Startup*, que nas suas seis rodadas de seleção entre 2017 e 2020, recebeu 2.268 propostas e uma demanda de investimento maior que R\$ 2 bilhões. Ao longo de sua execução o programa refinou seus temas, e passou a explicitar mais especificamente tópicos da economia circular e o tema de resíduos sólidos. Até o início de 2022, 29 empresas foram investidas e, dentre elas, uma atuante em economia circular. Atualmente o programa segue operando em fluxo contínuo e recebendo propostas.

Ao examinarmos a demanda dessas propostas em nossos temas de interesse nos deparamos com o desafio de classificar em que medida as soluções são aderentes a economia circular, dada a abrangência do conceito. Nesse sentido, a tipologia proposta funcionou de modo satisfatório contribuindo para uma compreensão do papel dos *startups* no Brasil diante da economia circular e dos resíduos sólidos. Sugerimos o aprofundamento desse estudo para compreender melhor como foi o desempenho dessas propostas na avaliação da Finep, já que somente uma empresa foi investida, com uma solução em *software* e sistemas de gerenciamento apresentada para a logística reversa de resíduos.

## REFERÊNCIAS

- ARROW, Kenneth Joseph. Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention. In: NELSON, Richard. **The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1962. p. 609-625. DOI: <https://doi.org/10.1515/9781400879762-024>. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9781400879762-024/html>. Acesso em: 12 out. 2022.
- AUDI. Audi Business Innovation GmbH. **Audi Unite**. 2015.
- BAKKER, Gerben. Money for nothing: How firms have financed R&D projects since the Industrial Revolution. **Research Policy**, v. 42, n. 10, p. 1793-1814, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.07.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004873331300156X>. Acesso em: 12 out. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 10.936**, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm). Acesso em: 12 out. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 12 out. 2022.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Economia circular: o uso eficiente dos recursos**. (Propostas da indústria eleições 2018, v. 12). Brasília: CNI, 2018. Disponível em: [https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/af/70/af702005-4cc5-47eb-a240-174387e4a9ea/economia\\_circular\\_web.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/af/70/af702005-4cc5-47eb-a240-174387e4a9ea/economia_circular_web.pdf). Acesso em: 08 set. 2022.



COMISSÃO EUROPEIA. Bruxelas. COM (2014) 398 final. **Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comitê Econômico e Social Europeu e ao Comitê das Regiões para uma economia circular**: programa para acabar com os resíduos na Europa. 2014. Disponível em: [https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy\\_pt](https://ec.europa.eu/commission/priorities/jobs-growth-and-investment/towards-circular-economy_pt). Acesso em: 03 set. 2022.

DE LOS RIOS, Irel Carolina; CHARNLEY, Fiona J. S. Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of *design*. **Journal of Cleaner Production**, n. 160, p. 109-122, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.130>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616317619>. Acesso em: 12 out. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Circular Consumer Electronics**: An initial exploration. Fundação Ellen MacArthur, 2017. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-consumer-electronics-an-initial-exploration>. Acesso em: 06 nov. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Financiamento da Economia Circular**. Aproveitando a oportunidade. Resumo Executivo. 2020. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Financiamento-da-economia-circular-Resumo-Executivo.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Growth within**: a circular economy vision for a competitive Europe. 2015. Disponível em: [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation\\_Growth-Within\\_July15.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/EllenMacArthurFoundation_Growth-Within_July15.pdf). Acesso em: 08 out. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Towards the Circular Economy**: Opportunities for the Consumer Goods Sector. Isle of Wight. Ellen MacArthur Foundation, England, 2013. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-2-opportunities-for-the-consumer-goods>. Acesso em: 10 out. 2022.

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. **Relatório de Gestão do exercício 2006**. Rio de Janeiro: Finep / Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, 2006. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/images/a-finep/transparencia/relatorios/relatorios-de-gestao/2006/relatorio\\_gestao\\_finep\\_2006.pdf](http://www.finep.gov.br/images/a-finep/transparencia/relatorios/relatorios-de-gestao/2006/relatorio_gestao_finep_2006.pdf). Acesso em: 10 out. 2022.

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. **Relatório de Gestão do exercício 2010**. Rio de Janeiro: Finep / Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, 2011. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/images/a-finep/transparencia/relatorios/relatorios-de-gestao/2010/relatorio\\_gestao\\_finep\\_2010.pdf](http://www.finep.gov.br/images/a-finep/transparencia/relatorios/relatorios-de-gestao/2010/relatorio_gestao_finep_2010.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. **Relatório de Gestão do exercício 2014**. Rio de Janeiro: Finep / Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, 2014. Disponível em: [http://www.finep.gov.br/images/a-finep/transparencia/relatorios/relatorios-de-gestao/2014/2015-06-29\\_Relatorio\\_de\\_Gestao\\_FINEP\\_2014\\_RD-CF-CA-TCU.pdf](http://www.finep.gov.br/images/a-finep/transparencia/relatorios/relatorios-de-gestao/2014/2015-06-29_Relatorio_de_Gestao_FINEP_2014_RD-CF-CA-TCU.pdf). Acesso em: 10 out. 2022.

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. **Relatório de Gestão do exercício 2021**. Rio de Janeiro: Finep / Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, 2022. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/transparencia-finep/relatorios-do-fndct/relatorios-de-gestao?layout=filtros>. Acesso em: 10 out. 2022.

GRISA, Daniela Cristina; CAPANEMA, Luciana Xavier de Lemos. Resíduos sólidos In: PUGA, Fernando Pimentel; CASTRO, Lavinia Barros de (Org.). **Visão 2035: Brasil, país desenvolvido**: agendas setoriais para alcance da meta. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, p. 415-438, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/16284>. Acesso em 15 out. 2022.

JUCÁ, José Fernando Tomé; LIMA, José Dantas; MARIANO, Maria Odete Holanda; FIRMO, Alessandra Lee Barbosa; LIMA Danuza Gusmão de Andrade; LUCENA,



Luciana de Figueiredo Lopes; FARIAS, Paulo Ricardo Rocha; CARVALHO JUNIOR, Francisco Humberto; CARVALHO, Eraldo Henriques; FERREIRA, João Alberto; REICHERT, Geraldo Antônio. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Jaboatão dos Guararapes**: Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014. Disponível em: <http://www.grs-ufpe.com.br/publicacoes/?sect=32>. Acesso em: 12 out. 2022.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marco. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302835>. Acesso em: 12 out. 2022.

LIMA, José Dantas; JUCÁ, José Fernando Tomé; REICHERT, Geraldo Antônio; FIRMO Alessandra Lee Barbosa. Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 33-42, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522014000100004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/sC4KVwDdTbs95vG7HR3sYnC/>. Acesso em: 12 out. 2022.

MAZZUCATO, Mariana. Innovation Systems: From Fixing Market Failures to Creating Markets. Forum: Which Industrial Policy Does Europe Need? **Intereconomics**, v. 50, n. 3, p. 120-155, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.21874/rsp.v66i4.1303>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/310465935\\_Innovation\\_Systems\\_From\\_Fixing\\_Market\\_Failures\\_to\\_Creating\\_Markets](https://www.researchgate.net/publication/310465935_Innovation_Systems_From_Fixing_Market_Failures_to_Creating_Markets). Acesso em: 12 out. 2022.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. The next industrial revolution. In: CHARTER, Martin; TISCHNER, Ursula. **Sustainable Solutions: Developing products and services for the future**, 2001. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781351282482>. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9781351282482/sustainable-solutions-martin-charter-ursula-fischner>. Acesso em: 12 out. 2022.

MELO, Luiz Martins. Financiamento à Inovação no Brasil: análise da aplicação dos recursos do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) de 1967 a 2006. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 8, n. 1, p. 87-120, 2009. DOI: <https://doi.org/10.20396/rbi.v8i1.8648976>. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/rbi/article/view/8648976>. Acesso em: 12 out. 2022.

MORALES-ALONSO, Gustavo; VILA, Guzmán A.; LEMUS-AGUILAR, Isaac; HIDALGO, Antonio. Data retrieval from online social media networks for defining business angels' profile. **Journal of Enterprising Communities: People and Places in the Global Economy**, v. 14, n. 1, p. 57-75, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1108/JEC-10-2019-0095>. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JEC-10-2019-0095/full/html>. Acesso em: 12 out. 2022.

NELSON, Richard R. The Simple Economics of Basic Scientific Research. **Journal of Political Economy**, v. 67, p. 297-306, 1959. DOI: <http://dx.doi.org/10.1086/258177>. Disponível em: [https://econpapers.repec.org/article/ucpjpolec/v\\_3a67\\_3ay\\_3a1959\\_3ap\\_3a297.htm](https://econpapers.repec.org/article/ucpjpolec/v_3a67_3ay_3a1959_3ap_3a297.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

NYKO, Diego; VALENTE, Marcelo Soares; DUNHAM, Fabricio Brollo; MILANEZ, Artur Yabe; COSTA, Letícia Magalhães da; PEREIRA, Felipe dos Santos; TANAKA, Alexandre Kiyoshi Ramos; RODRIGUES, Alexandre Velloso Pereira. Planos de fomento estruturado podem ser mecanismos mais eficientes de política industrial? Uma discussão à luz da experiência do PAISS e seus resultados. **BNDDES Setorial**, v. 38, p. 55-78, 2013. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2987/3/BS%2038%20planos%20de%20fomento\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2987/3/BS%2038%20planos%20de%20fomento_P.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.



PAVITT, Keith. Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. **Research Policy**, v. 13, n. 6, p. 343-374, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(84\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(84)90018-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0048733384900180>. Acesso em: 12 out. 2022.

PEREIRA, Christiane. **Rota tecnológica para a gestão sustentável de resíduos sólidos domiciliares**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Especialização) – Curso de Pós-Graduação em Direito Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/50612>. Acesso em: 12 out. 2022.

PHILIPS. **Rethinking the Future: Our Transition towards a Circular Economy**. Corporate press release. Koninklijke Philips N.V. 2014. Disponível em: [https://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/Campaigns/CA20151021\\_Teamсит\\_e\\_Decommission/CA20151021\\_CO\\_001-AAA-circular-economy-brochure.pdf](https://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/Campaigns/CA20151021_Teamсит_e_Decommission/CA20151021_CO_001-AAA-circular-economy-brochure.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

PIMENTEL, Leticia Barbosa; ASSALIE, Jorge Luiz Sellin; MACHADO, Francesca Munia. Panoramas setoriais 2030: saneamento. In: BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. **Panoramas setoriais 2030: desafios e oportunidades para o Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2017, p. 191-203. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14214/2/PanoramasSetoriais-2030.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

POTTING, José; HEKKERT, Marko; WORRELI, Ernst; HANEMAAIJER, Aldert. Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Netherlands Environmental Assessment Agency. 2017. Disponível em: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

RONCARATTI, Luanna Sant'anna. Difusão e inovação em políticas públicas no Brasil: uma análise comparativa dos programas de incentivos a *startups*. 2018. 211 f. Tese (Doutorado em Ciência Política) – Programa de Pós-Graduação em Ciência Política, Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/34840>. Acesso em: 12 out. 2022.

SIHVONEN, Siru; RITOLA, Tuomas. Conceptualizing ReX for aggregating end-of-life strategies in product development. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 639-644, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115000293>. Acesso em: 12 out. 2022.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2020**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento / Ministério do Desenvolvimento Regional – SNS/MDR, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-dosnis/diagnosticos/agua-e-esgotos>. Acesso em: 12 out. 2022.

STIGLITZ, Joseph E. **The role of the state in financial markets** (English). Washington, D.C.: World Bank Group. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/239281468741290885/The-role-of-the-state-in-financial-markets>. Acesso em: 10 out. 2022.

UNEP – Finance Initiative. **Financing Circularity: Demystifying Finance for Circular Economies**. 2020. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/financing-circularity-demystifying-finance-circular-economy>. Acesso em: 12 out. 2022.

WHO – World Health Organization; UN-Water. UN-water global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2014 report: investing in water and sanitation: increasing access, reducing inequalities. World Health Organization, 2014. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/139735>. Acesso em: 12 out. 2022.



# PANORAMA DA LOGÍSTICA REVERSA DO ÓLEO USADO OU CONTAMINADO (OLUC) NO BRASIL

## *OVERVIEW OF THE REVERSE LOGISTICS OF USED OR CONTAMINATED OIL (OLUC) IN BRAZIL*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

ALTSCHUL, Joyce Sholl; NOVO, Jean Marcel de Faria; ROMANEL, Celso. Panorama da logística reversa do óleo usado ou contaminado (OLUC) no Brasil. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Interseletorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Joyce Sholl Altschul**

Mestrado Profissional em Engenharia Urbana e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

E-mail: joysholl@gmail.com

### **Jean Marcel de Faria Novo**

Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro.

E-mail: jeanmfn@gmail.com

### **Celso Romanel**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

E-mail: celso.romanel@gmail.com

## **RESUMO**

O objetivo deste artigo é analisar como o Governo Federal Brasileiro utiliza mecanismos de governança para monitorar o desempenho da logística reversa de óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC). A partir do arcabouço legal e da revisão da literatura sobre gestão de resíduos sólidos, investigou-se como a regulamentação e fiscalização da coleta e rerrefinamento do OLUC são realizadas em cada fase do processo de logística reversa. A responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do OLUC enfrenta desafios para avançar na regeneração dos sistemas naturais, um dos princípios básicos da economia circular. Os custos de coleta, armazenamento e transporte são integralmente assumidos pelos produtores ou importadores de óleos lubrificantes. Para a governança pública, há necessidade de maior capacidade operacional da burocracia governamental, bem como acesso a dados e informações confiáveis sobre o controle do volume de OLUC comercializado e seu destino final. Tendo em vista a educação ambiental como instrumento para conscientizar os indivíduos sobre as responsabilidades



do consumo e descarte de óleos lubrificantes, é proposto um método mais transparente para estabelecer metas de coleta, indicando que 58% do óleo lubrificante comercializado no país é coletável.

Palavras-chave: Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado. OLUC. Logística Reversa. Governança Pública. Rerrefino.

## ABSTRACT

The objective of this paper is to analyze how the Brazilian federal government uses governance mechanisms to monitor the performance of reverse logistics for used or contaminated lubricating oil (OLUC). From the legal framework and literature review on solid waste management, it was investigated how the regulation and inspection of the collection and re-refining of OLUC are performed in each phase of the reverse logistics process. The shared responsibility for the OLUC lifecycle faces challenges to make progress in the regeneration of natural systems, one of the main principles of the circular economy. The costs of collection, storage and transport are fully assumed by the producers or importers of lubricating oils. For the public governance, there is a need of greater operational capacity of the government bureaucracy as well as access to reliable data and information on the control of the volume of OLUC commercialized and its final destination. Bearing in mind the environmental education as a tool to develop individuals' awareness of the responsibilities for what they consume and discard, a more transparent method to establish collection targets is proposed, which indicates that 58% of the lubricating oil sold in the country is collectable.

Keywords: Used or Contaminated Lubricating Oil. OLUC. Reverse Logistics. Public Governance. Re-refining.

## 1 INTRODUÇÃO

Tecnologias e processos produtivos que geram poucos resíduos favorecem a sustentabilidade ao contribuírem com o equilíbrio na relação entre desenvolvimento e meio ambiente, especialmente quando rompem com o modelo linear baseado em extração, transformação e descarte, passando a operar orientados pela utilização racional dos recursos naturais pautados pelos princípios da economia circular.

A contabilidade econômico-ambiental estaria mais equilibrada se em lugar do desperdício houvesse retorno de produtos usados aos processos produtivos. No Brasil, que em 2019 produziu a média de 0,99 kg/dia *per capita* (SNIS, 2020, p. 86) de resíduos sólidos domiciliares, essa conta está longe da ideal, pois 97% de bens de consumo chegam ao fim das suas vidas úteis como material descartado e somente 3% servem de matéria-prima para geração de novos produtos (Xavier, 2017).

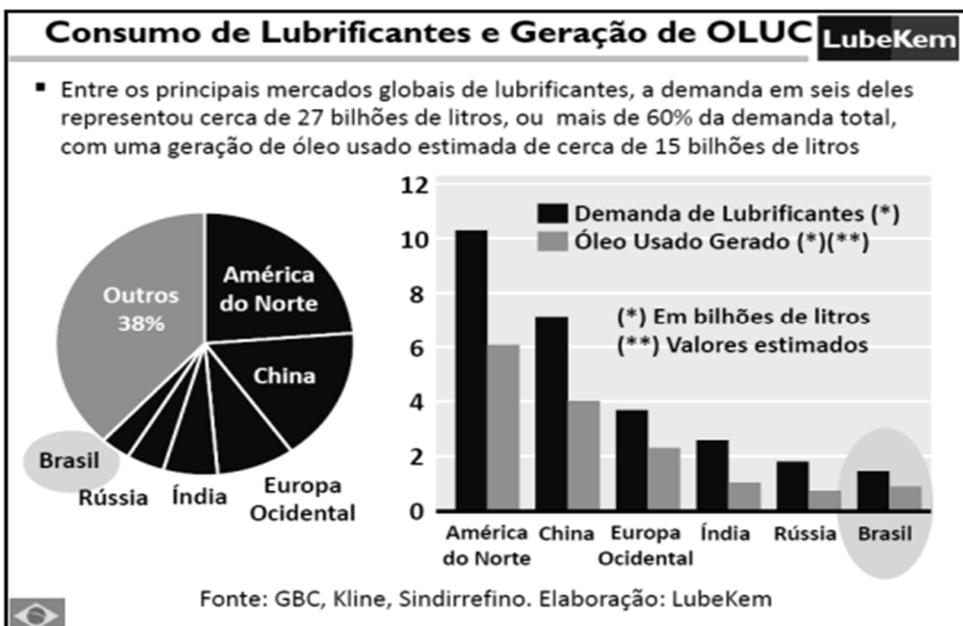
Esse quadro desanimador é reflexo de práticas baseadas no modo de produção capitalista consolidada a partir da segunda

metade do século XVIII, considerando a natureza como uma fonte de recursos inesgotável para os hábitos de consumo da sociedade. Após cerca de duzentos anos de desperdício que Baudrillard (1995) considerou “uma forma de loucura e de demência, já que o homem estaria queimando suas reservas e comprometendo, através de práticas irracionais, as próprias condições de sobrevivência”, a questão ambiental passou a ser mais seriamente tratada, inicialmente como um debate entre as correntes ambientalistas e desenvolvimentistas.

Conforme Sachs (1993), a escolha não deve ser entre desenvolvimento ou meio ambiente, mas “entre formas de desenvolvimento sensíveis ou insensíveis à gestão ambiental”. Quando se pensa em sustentabilidade, devemos ter uma visão holística e não apenas focar na gestão de recursos naturais (Sachs, 2011).

Hoje, o conceito de desenvolvimento sustentável está incluído nas pautas de políticas públicas baseadas no tripé econômico, ambiental e social. Em um contexto de mobilização da sociedade, do Poder Público e da ciência para o desenvolvimento sustentável, a logística reversa apresenta-se como uma das alternativas para o gerenciamento dos resíduos sólidos, como estabelece o artigo 3º da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010).

Figura 1 – Consumo de óleo lubrificante e geração de OLUC



Fonte: Françolin (2018, p. 66).



No caso do óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC), a convergência de ciência e tecnologia vem ao encontro das necessidades econômicas e da preservação do meio ambiente e apresenta soluções para a reciclagem do óleo em larga escala. A logística reversa do OLUC consiste em coleta, armazenamento, retirada, transporte e alienação do óleo para a inserção em novo ciclo de vida (Françolin, 2018). A preocupação com esse ciclo de vida é global, considerando o consumo de óleos lubrificantes e o volume gerado de OLUC conforme dados da Figura 1.

A coleta e reciclagem do OLUC é uma atividade prioritária para a gestão ambiental, essencial aos interesses da coletividade e considerada de utilidade pública (Resoluções ANP nº 19/2009 e nº 20/2009).

O rerefino é o único destino admitido pela Resolução Conama nº 362/2005 e pela Lei nº 12.305/2010, artigo 33, da Política Nacional de Resíduos Sólidos, não podendo ser descartado no meio ambiente, nem queimado, nem destinado a aterros sanitários.

## **2 ÓLEO LUBRIFICANTE USADO OU CONTAMINADO (OLUC)**

O primeiro vestígio de lubrificação foi encontrado nas rodas de carros de faraós do antigo Egito (gordura de boi ou carneiro). Durante a revolução industrial da segunda metade do século XVIII, com a mecanização da indústria e dos transportes, muito se aprendeu sobre lubrificação, e com a extração de petróleo, a partir de 1850, teve início a utilização do óleo mineral como lubrificante, substituindo com vantagens aqueles de origem animal ou vegetal.

Para máquinas de combustão interna, os óleos de origem animal não são bons lubrificantes, pois formam ácidos gordurosos que causam corrosão quando expostos a altas temperaturas, enquanto que os óleos vegetais, apesar das boas qualidades lubrificantes, têm a estrutura química alterada após longos períodos de operação.

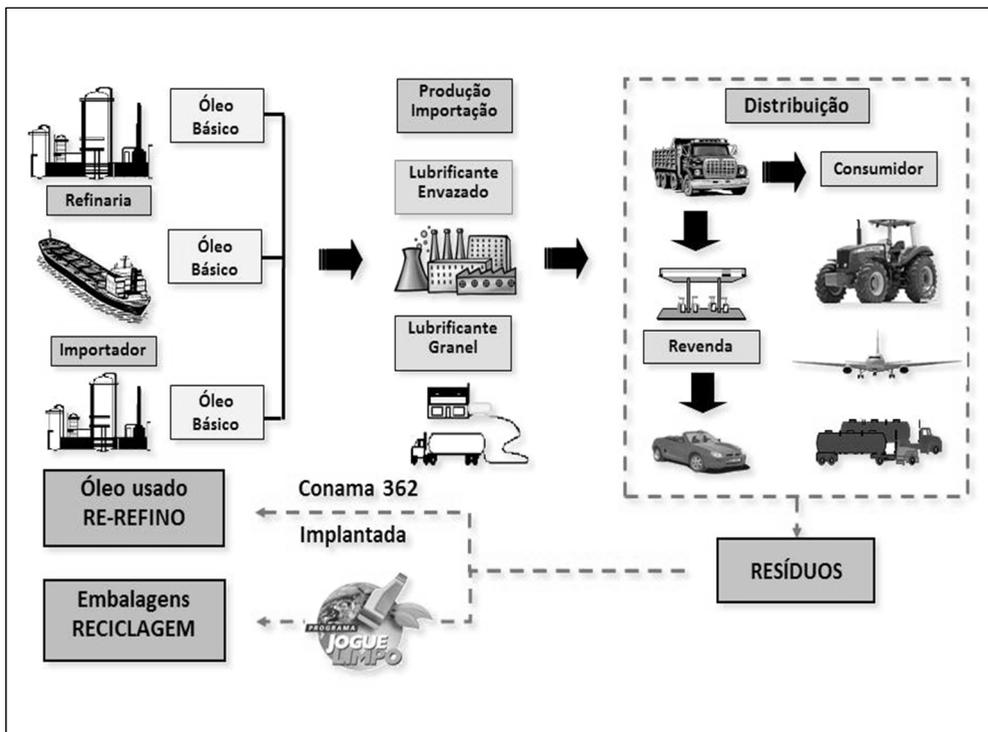
### **2.1 CICLO DO ÓLEO LUBRIFICANTE**

O principal componente de um óleo lubrificante é o óleo básico, que normalmente corresponde de 80% a 90% do volume do produto acabado (Sohn, 2018). Óleos básicos podem ser minerais ou sintéticos; os minerais são produzidos diretamente do refino do petróleo leve e os sintéticos por meio de reações químicas a partir de produtos extraídos do petróleo. Os óleos minerais são mais baratos e praticamente todo óleo básico consumido no Brasil é de origem mineral.

O petróleo é um óleo cru e sua densidade determina o valor, sendo o petróleo leve mais valioso que o pesado. O petróleo extraído da Bacia do Recôncavo, na Bahia, é pesado enquanto que o petróleo da Bacia de Campos possui densidade média e o petróleo da camada do pré-sal é leve (CBIE, 2019).

De acordo com Lisboa (2021), a composição da produção brasileira de petróleo em dezembro de 2020 era 2,8% do tipo leve, 91,3% médio e 5,9% pesado. Do petróleo leve, são produzidos de 7 a 8% de óleo básico, enquanto que do petróleo pesado apenas 2% e a custos mais elevados. O país produz cerca de 50% das necessidades nacionais de óleo básico mediante a importação de petróleo leve. Os outros 50% vêm de importação de óleo básico (30 a 32%) e do rerrefino do OLUC (18 a 20%). A indústria de rerrefino responde por cerca de 27% da capacidade total de produção de óleo básico no Brasil segundo Françolin (2018).

Figura 2 – Ciclo do óleo lubrificante



Fonte: IJL (2022) e Sindirrefino ([2022]).

Com o uso, o óleo lubrificante se deteriora ou é contaminado, perdendo suas propriedades, devendo ser substituído para garantir o



bom funcionamento de motores e equipamentos. Assim surge o óleo lubrificante usado ou contaminado, conhecido popularmente como óleo queimado, que é um resíduo classificado como perigoso (Classe I) que deve ser obrigatoriamente coletado e encaminhado para uma usina de rerrefino (Resolução Conama nº 362/2005 e a Lei nº 12.305/2010).

O rerrefino descontamina o OLUC e resgata todas as propriedades do óleo básico, sendo utilizado várias vezes como matéria-prima na produção do óleo lubrificante. O rerrefino extrai do OLUC uma matéria-prima com qualidade melhor do que no primeiro refino, atendendo às especificações técnicas estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e gerando uma quantidade pequena de resíduos. A cada 100 barris de OLUC coletados, extraem-se 85 barris de óleo básico para a produção de óleo lubrificante. Por tais motivos, esse processo foi escolhido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, através da Resolução nº 362/2005, para ser o destino obrigatório dos óleos lubrificantes usados ou contaminados no país.

O OLUC deve ser coletado por empresas autorizadas pela ANP, rerrefinado e entregue como óleo básico para os produtores reiniciarem o novo ciclo. As embalagens são recolhidas por empresas e instituições que as destinam para reciclagem.

## **2.2 IMPACTOS DO DESCARTE INCORRETO E O USO ILEGAL DO OLUC**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR-10004:2004 – Resíduos Sólidos – classificação, estabelece que o óleo lubrificante usado ou contaminado é um resíduo perigoso por apresentar toxicidade.

O uso prolongado de um óleo lubrificante acaba resultando na sua deterioração parcial, formando compostos como ácidos orgânicos, compostos aromáticos polinucleares potencialmente carcinogênicos, resina e lacas (Resolução Conama nº 362/2005). Contém, também, vários elementos tóxicos, como cromo, cádmio, chumbo e arsênio, contaminantes bioacumulativos que permanecem no organismo humano e podem causar diversos problemas de saúde (Quadro 1).



Quadro 1 – Efeitos dos contaminantes do OLUC no organismo humano

<b>Chumbo</b>
Intoxicação aguda – dores abdominais; vômito; diarreia; oligúria; sensação de gosto metálico; colapso e coma.
Intoxicação crônica – perda de apetite; perda de peso; apatia; irritabilidade; anemia; danos nos sistemas nervoso, respiratório, digestivo, sanguíneo e aos ossos.
Cancerígeno para rins e sistema linfático.
Teratogênico (malformações nos fetos, ossos, rins e sistema cardiovascular).
Acumula principalmente nos ossos.
<b>Cádmio</b>
Intoxicação aguda – diarreia; dor de cabeça; dores musculares; dores no peito e nas pernas; salivação; sensação de gosto metálico; dores abdominais; tosse com saliva sangrenta; fraqueza; danos no fígado e falha renal.
Intoxicação crônica – perda de olfato, tosse, dispneia; perda de peso; irritabilidade; debilitação dos ossos; danos aos sistemas nervoso, respiratório, digestivo, sanguíneo e aos ossos.
Cancerígeno para pulmões e traqueia.
Acumula principalmente nos rins, ossos e fígado.
<b>Arsênio</b>
Intoxicação aguda – violenta gastroenterite; queimação no esôfago, diarreia sanguinolenta; vômito; queda da pressão sanguínea; suor sangrento; dispneia; edema pulmonar; delírio; convulsões e coma.
Intoxicação crônica – dermatite; escurecimento da pele; edema; nefrite crônica; cirrose hepática; perda de olfato; tosse; dispneia; perda de peso; irritabilidade; debilitação dos ossos; danos nos sistemas nervoso central, cardiovascular, respiratório, digestivo, sanguíneo e aos ossos.
Cancerígeno para pele, pulmões e fígado.



<b>Cromo</b>
O cromo hexavalente – Cr(VI) é extremamente tóxico diferentemente do cromo trivalente – Cr(III), que é essencial na potencialização da insulina. O Cr(VI) é gerado em processos a partir do Cr(III).
Intoxicação aguda – vertigem; sede intensa; dor abdominal; vômito; oligúria e anúria.
Intoxicação crônica – dermatite; edema de pele; ulceração nasal; conjuntivite; náuseas; vômito; perda de apetite; rápido crescimento do fígado.
Cancerígeno para pele; pulmões e fígado.

<b>Dioxinas</b>
Substâncias organocloradas, persistentes na natureza, extremamente tóxicas; carcinogênicas e teratogênicas.
Essas substâncias agressivas são geradas quando da queima do óleo lubrificante usado ou contaminado, o que é ilegal.
As várias dioxinas causam diversos efeitos danosos à saúde humana.
Apesar da variedade de sintomas, a título ilustrativo, é possível generalizar destacando que todas elas são cancerígenas para o sistema respiratório e causam vômito, dores e fraqueza muscular; falhas na pressão sanguínea; distúrbios cardíacos.

<b>Hidrocarbonetos Policíclicos (Polinucleares) Aromáticos</b>
Compostos caracterizados por possuírem dois ou mais anéis aromáticos, por exemplo: benzeno e condensados.
Tem longa persistência no ambiente.
Cancerígenos.
Quando resultantes da queima do óleo lubrificante, afetam os pulmões, o sistema reprodutor e o desenvolvimento do feto (teratogênico).

Fonte: Grupo de Monitoramento Permanente da Resolução Conama nº 362/2005 (GMP, 2011, p. 18-19).

Por conta desses efeitos nocivos, o OLUC deve ser manuseado, armazenado e destinado corretamente para evitar danos à saúde dos trabalhadores, da população em geral e ao meio ambiente. O OLUC deve ser armazenado até a sua coleta em recipientes plásticos, tambores de latão ou tanque, aéreo ou subterrâneo.



Independentemente da escolha, é fundamental a existência de uma bacia de contenção, de modo a evitar vazamentos em casos de acidente. Todos os trabalhadores envolvidos no processo devem ter equipamentos de proteção individual adequados, serem previamente treinados e informados sobre riscos, cuidados e procedimentos em situações de acidente.

O OLUC, também, é utilizado em diversas práticas populares não permitidas pela legislação. O Quadro 2, lista algumas utilizações com as respectivas consequências danosas.

Quadro 2 – Usos ilegais do OLUC

Uso Proibido	Consequência danosa
Queima como combustível (para caldeira, barco etc.)	Gera poluição atmosférica, com grande emissão de particulados e compostos nocivos, ocasionando prejuízo para a saúde pública e danos aos equipamentos nos quais foi utilizado (por exemplo: entope injetores, bombas de combustíveis e sistema de injeção; cria depósitos nos condutos, câmaras de combustão, válvulas etc.).
Adulteração de óleos lubrificantes acabados e óleo diesel	Gera um produto de baixa qualidade que não atende às especificações técnicas exigidas pela ANP, fraudando o consumidor e colocando os equipamentos em risco, podendo causar acidentes.
Uso como óleo desmoldante Formulação de graxas	Expõe trabalhadores a risco de intoxicação e doenças causadas pelos contaminantes existentes no OLUC.
Lubrificação de corrente de motosserra	Causa poluição ambiental porque o OLUC não tem propriedade de aderir à corrente da motosserra e acaba sendo borrifado quando o equipamento é acionado; pelo mesmo motivo, causa intoxicação aos trabalhadores, contaminação ambiental e danos ao equipamento; além disso, como o controle da venda de óleo lubrificante de corrente de motosserra é uma forma de controle do desmatamento ilegal, o uso do OLUC para este fim contribui com outro crime ambiental.
Impermeabilização de cercas, mourões, telhados, pisos e similares	Gera risco de intoxicações domésticas, com prejuízos para pessoas e animais, podendo afetar o meio ambiente (solo, lençol freático, pequenos corpos d'água) e até inutilizar temporariamente poços, cacimbas e similares.



Uso Proibido	Consequência danosa
Uso "veterinário" (tratamento de "bicheiras", vermífugos etc.)	Intoxicação do animal (eventualmente com morte, se ingerido), intoxicação dos trabalhadores, intoxicação doméstica.

Fonte: GMP (2011, p. 34-35).

O OLUC demora cerca de 300 anos para se decompor no ambiente (Viveiros, 2000) e o descarte irregular gera graves danos ambientais nos corpos hídricos e no solo. Sobre a lâmina d'água, um litro de OLUC forma uma camada que pode abranger cerca de 1.000 m<sup>2</sup>, diminuindo a tensão superficial da água e inibindo a fotossíntese e a respiração dos seres aeróbios. Quando lançado em rede de esgotos, afeta a eficiência de estações de tratamento (Silva *et al.*, 2014). Sua combustão gera gases nocivos ao meio ambiente e ao homem. Se descartado no solo, diminui a capacidade de filtração e troca iônica, matando a vegetação e os microrganismos e, ao atingir o lençol freático, contamina os poços de extração de água. Se queimado, polui o ar, gerando grande quantidade de particulados que penetram no sistema respiratório (Tsambe *et al.*, 2017).

Apenas 36% do óleo lubrificante comercializado no Brasil é coletado, e 30% desse montante é desviado para a queima como combustível em caldeiras de setores como olaria, tecelagens, fundições, lubrificantes de motosserras, entre outras utilizações ilegais (Figura 3). Infelizmente, ainda existem empresas clandestinas de coleta de OLUC que emitem certificados de coleta de OLUC falsos (Françolin, 2017).

### 2.3 LOGÍSTICA REVERSA DO OLUC NO BRASIL

A logística reversa é a área da logística que fecha o ciclo da logística empresarial, formado por: recursos e suprimentos em direção à empresa, produtos, serviços e bens na direção do mercado e o fluxo contrário sob a forma de produtos de pós-venda ou pós-consumo. A atividade da logística reversa está diretamente relacionada com a satisfação dos clientes (pós-venda) e com garantia de sustentabilidade empresarial (pós-consumo). As empresas com um bom processo de logística reversa se sobressaem no mercado, oferecendo ao cliente um serviço diferenciado e valorizado, consolidando sua imagem corporativa.

Segundo Couto e Lange (2017), há três motivações básicas que justificam a logística reversa: econômica, legal e ambiental. O fator econômico traz ganhos diretos para as empresas, reduzindo o uso de matéria-prima, agregando valor à recuperação e reduzindo o custo



do descarte. Indiretamente também antecipa ou impede ações legais, mantendo uma linha verde no processo que satisfaz a expectativa dos clientes pela redução dos impactos ambientais. Criar uma “imagem verde” da empresa, é importante elemento de *marketing* que aprimora as relações entre os fornecedores e clientes.

Um aspecto interessante na implantação de logística reversa no país é o social, já que é necessária a capacitação da mão de obra, tanto para a área de gestão quanto para a operação. Brito (2004) afirma que a relação entre logística reversa e empregos indica que as atividades de reciclagem geram de cinco a sete vezes mais empregos do que a incineração, e dez vezes mais do que a operação de aterros sanitários.

Tabela 1 – Coleta de OLUC no Brasil por região

Regiões	Unidades Federativas	Municípios	Municípios Atendidos
Centro Oeste	4	466	396
Nordeste	9	1.794	1.013
Norte	7	450	271
Sudeste	4	1.668	1.436
Sul	3	1.193	1.133
Total	27	5.571	4.249

Regiões	% de Municípios Atendidos	Empresas Coletoras	Unidades de Rerrefino
Centro Oeste	85,0	2	0
Nordeste	56,5	0	0
Norte	60,2	2	2
Sudeste	86,1	18	10
Sul	95,0	2	1
Total	76,3	24	13

Fonte: Elaborada pelos autores (2022)  
com dados de IBGE (2019) e ANP (2020b).

Ao examinar o desempenho da logística reversa do OLUC no Brasil, um dos pontos mais frágeis do processo é a distribuição geograficamente irregular das usinas rerrefinadoras, concentradas na



região sudeste. Atualmente, há apenas treze usinas, com duas delas situadas no Amazonas, uma no Rio Grande do Sul, uma no Rio de Janeiro, três em Minas Gerais e seis em São Paulo.

As regiões nordeste e centro-oeste não possuem nenhuma (Tabela 1), o que aumenta a possibilidade da ocorrência de impactos ambientais e onera a logística reversa do OLUC, com altos custos de transporte.

Em 2021, havia 24 empresas coletoras de OLUC em operação no país, que atuam basicamente junto a postos de serviços, oficinas, empresas concessionárias e garagens de grandes frotas de veículos. Nos municípios que não contam com o serviço regular de coleta de OLUC, o gerador deve armazenar o resíduo até atingir um volume razoável, e só então entrar em contato com um coletor autorizado.

Acordos setoriais foram criados para instrumentalizar a logística reversa, mas tão importante quanto implementá-la, é garantir que a finalidade dos acordos não seja desvirtuada para o atendimento de demandas diversas. O sistema implantado funciona através de atividades econômicas exercidas de forma independente por cada ator da cadeia.

No atual modelo, os produtores e importadores devem informar à ANP o volume de óleo lubrificante comercializado que, de posse destas informações, estabelece as metas mínimas para recolhimento. O coletor, por sua vez, deve emitir um certificado a cada coleta, para que a ANP tenha acesso ao volume coletado, bem como sobre o quanto do volume coletado foi entregue a cada rerrefinador. Ao receber o OLUC, o rerrefinador deve emitir um certificado de recebimento, informando a quais produtores ou importadores correspondem os volumes, como também para quem o óleo rerrefinado foi comercializado. Com este Sistema de Movimentações de Produto (SIMP), a ANP realiza o controle da logística reversa e das condutas dos agentes da cadeia, emitindo boletins mensais sobre o mercado brasileiro de lubrificantes. O sistema de logística reversa de OLUC se apresenta efetivamente controlado por monitoramento regular e transparente (Rocha, 2018).

A Resolução Conama nº 362/2005 definiu que os produtores e importadores têm que custear toda a coleta e destinação do OLUC. Há uma transferência desse custo para o consumidor, por meio do preço estabelecido para o produto novo. Segundo Sohn (2018), o que se verifica na prática é que os produtores e importadores custeiam apenas 25% dos custos de coleta, sendo que os 75% restantes ficam sob encargo dos rerrefinadores. A resistência dos produtores e



importadores em aumentar sua coparticipação no custeio da coleta, tem levado a administração pública a avaliar propostas de mecanismos de compensação financeira específicos. Dentre os sete fabricantes de óleos lubrificantes instalados no país (Shell, Petrobrás, Castrol, Mobil, Ipiranga, Texaco, Elf), apenas a empresa Ipiranga coloca no *website* informações sobre os impactos do descarte incorreto de OLUC. Em contrapartida, empresas no exterior, a divulgação sobre reciclagem de óleos é bastante mais comum.

Mercados ainda dependem de incentivos fiscais, medidas regulatórias e conscientização ambiental dos consumidores para que haja o crescimento na demanda por óleos lubrificantes que utilizem óleos básicos rerrefinados na sua composição. No Brasil, embora não haja incidência de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) sobre a coleta de OLUC, os estados da federação exigem o imposto integral sobre o produto reciclado, sem qualquer redução tributária.

### **3 A COLETA DE OLUC NO BRASIL**

A interação dos agentes envolvidos nas fases do fluxo reverso do OLUC em um ambiente de regulamentação e fiscalização exercido por agências federais e órgãos ambientais estaduais será analisada nesta seção.

O Estado possui alto grau de poder decisório, sendo o principal influenciador no funcionamento do sistema, pois detém a informatização dos controles de todos os processos (importação, impostos sobre compra e venda de produtos e, ainda, o licenciamento ambiental de usinas rerrefinadoras) mas, por outro lado, o gerador pessoa física (cidadão) praticamente não possui acesso a informações e tampouco recebe incentivos para retornar o OLUC para a cadeia produtiva. A capacidade de conjugar os interesses desses diversos agentes (públicos e privados), cooperando entre si, é, portanto, fator determinante para implementação de políticas públicas.

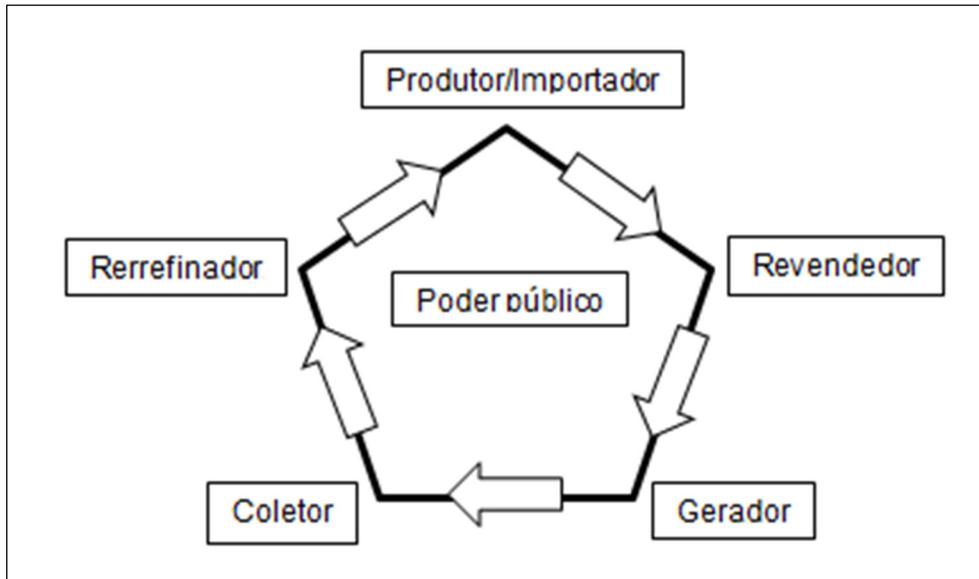
#### **3.1 OS AGENTES DO CICLO DO ÓLEO LUBRIFICANTE**

Os agentes que integram o ciclo do óleo lubrificante estão representados na Figura 4, com o Poder Público no papel central. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), Ministério de Meio Ambiente (MMA), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e Ministério de Minas e Energia (MME) são os órgãos que representam o Poder Público, controlam a produção,



comercialização e distribuição dos produtos, além de orientar e fiscalizar os demais agentes.

Figura 4 – Agentes do ciclo do óleo lubrificante



Fonte: Elaborada pelos autores (2022) com dados de GMP (2015)

As agências reguladoras e fiscalizadoras detêm informação sobre todos os processos, desde a importação de petróleo, passando pelos impostos cobrados sobre notas fiscais emitidas de compra e venda de produtos até o licenciamento ambiental das usinas rerrefinadoras. O interesse, porém, no processo de coleta fica restrito apenas à fiscalização, de modo que não haja desvios do OLUC para outros usos não permitidos pelas leis e resoluções do próprio governo.

Produtores e importadores são pessoas jurídicas que introduzem o óleo lubrificante acabado no mercado. Têm a obrigação legal de garantir e custear mensalmente a coleta da quantidade mínima de OLUC fixado pelo MMA e MME, e de informar aos consumidores geradores as respectivas obrigações e os riscos ambientais decorrentes do eventual descarte ilegal do resíduo.

São os agentes que efetivamente detêm o poder financeiro do processo pois remuneram os coletores de OLUC, com base nas metas estabelecidas pelo poder público. As metas de coleta de OLUC são estabelecidas através de Portaria Interministerial, como as que constam da Portaria Interministerial MME/MMA nº 475/2019 sobre as metas de 2020 a 2023. O interesse no processo de rerrefino é grande,



pois o material resultante do processo é matéria-prima para fabricação de óleo lubrificante, minimizando a importação do petróleo e gerando economia na produção.

Revendedores são aqueles que comercializam óleos lubrificantes no atacado ou no varejo, tais como postos de serviço, oficinas, supermercados, lojas de autopeças, atacadistas, entre outros. Não têm praticamente influência no processo de coleta do OLUC, já que não trabalham com esse produto, apenas com o óleo lubrificante acabado (OLAC). Se houvesse no mercado consumidor uma maior consciência ambiental, talvez os revendedores exibissem em suas prateleiras óleos combustíveis com alta porcentagem de óleo básico refinado, o que poderia aumentar o interesse geral pela coleta.

Geradores, pessoas físicas ou jurídicas, são os que produzem o OLUC direta ou indiretamente, como o dono do carro e o mecânico do veículo. São responsáveis por armazenar corretamente o material, e entregar o óleo para o revendedor ou para um coletor autorizado pela ANP. As pessoas jurídicas são obrigadas a receber e armazenar o OLUC, ter instalações adequadas e licenciadas pelo órgão ambiental para recolher e armazenar corretamente o óleo, manter registros para fins de fiscalização e exibir uma cópia do licenciamento pelo órgão ambiental para venda de óleo lubrificante acabado e do recolhimento do OLUC em local visível para o consumidor.

É importante diferenciar o gerador pessoa jurídica da pessoa física. As empresas geradoras conhecem as normas e as leis, sofrem fiscalização e são remuneradas pelo armazenamento e entrega do OLUC aos coletores. A remuneração recebida provavelmente não é o principal incentivador para as empresas, mas sim as multas que podem ser geradas quando houver fiscalização. Outro incentivo é que com a venda do OLUC para o coletor, o gerador não tem ônus com o descarte do material.

O gerador pessoa física, que compra o óleo lubrificante no mercado, não tem informação, nem incentivo para retornar o OLUC à cadeia produtiva. Desconhecendo o impacto poluidor, e sem informações sobre o descarte correto do material, pouco contribui no processo. Esse quadro pode ser modificado por meio de uma comunicação eficaz, incentivos financeiros e fortalecimento da conscientização ambiental dos cidadãos, o que certamente contribuiria para reduzir os desvios e usos incorretos do OLUC.

Coletores são pessoas jurídicas licenciadas pelo órgão ambiental do estado ou do município e autorizadas pela ANP para recolher o OLUC dos diversos pontos de geração e entregá-lo ao



rerrefinador. Para isso, devem emitir um certificado de coleta, documento regulamentado e controlado, com numeração única e progressiva. São agentes importantes do processo, com grau de influência abaixo apenas dos produtores e importadores, pois são responsáveis pelo financiamento da logística reversa do OLUC. Têm grande interesse no processo, pois coletar OLUC é a finalidade do seu negócio. Investem em métodos de comunicação diversos para informar aos geradores as melhores formas de armazenamento e a obrigatoriedade do recolhimento do OLUC, mas tipicamente essa comunicação ainda não atinge o gerador pessoa física.

O rerrefinador, licenciado perante o órgão ambiental competente e autorizado pela ANP, recebe do coletor o resíduo e emite o Certificado de Recebimento de OLUC (CRO), com cópia para o produtor e importador. Tem como obrigação remover os contaminantes do OLUC e produzir óleo lubrificante básico. Deve adotar uma política de geração mínima de resíduos descartados no processo de rerrefino. Têm alto grau de interesse no processo de coleta do OLUC, pois dependem desse material para que suas indústrias funcionem.

### 3.2 METAS E BALANÇO DE COLETA

Os dados consolidados da indústria de rerrefino mostram processos de coleta e rerrefino compatíveis com as metas estabelecidas pela MME/MMA, através das portarias interministeriais publicadas a cada quatro anos, conforme mostra Tabela 2 para os quadriênios (2016 – 2019) e (2020 – 2023), com base nas Portarias MME/MMA nº 100/2016 e nº 475/219, respectivamente.

Tabela 2 – Metas de coleta de OLUC (2016 – 2023)

Região	2016	2017	2018	2019
Norte	32%	33%	35%	36%
Nordeste	33%	34%	35%	36%
Centro-Oeste	36%	36%	37%	38%
Sudeste	42%	42%	42%	42%
Sul	38%	38%	39%	40%
Brasil	38,9%	39,2%	39,7%	40,1%



<b>Região</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>
Norte	37%	38%	39%	40%
Nordeste	37%	38%	39%	40%
Centro-Oeste	38%	39%	39%	40%
Sudeste	45%	48%	50%	52%
Sul	42%	45%	48%	50%
Brasil	42,0%	44,0%	45,5%	47,5%

Fonte: Elaborado pelos autores (2022) com dados da ANP (2020b).

Na Tabela 3, referente ao banco de coleta do OLUC em 2019, observa-se uma diferença entre o óleo comercializado (produzido no país e importado) e a base de cálculo, que é o óleo dispensado do cálculo. Essa diferença, em quase 250 milhões de litros, corresponde a 18% do óleo total comercializado.

Tabela 3 – Balanço da coleta de OLUC em 2019

	<b>Norte</b>	<b>Nordeste</b>	<b>Centro-Oeste</b>
<b>Comercializado [m³]</b>	104.829	179.760	143.151
<b>Dispensado [m³]</b>	11.057	13.327	10.747
<b>Base de cálculo [m³]</b>	93.772	166.433	132.404
<b>Meta Portaria 100/16 [%]</b>	36,0	36,0	38,0
<b>Meta [m³]</b>	33.758	59.916	50.314
<b>Coletado [m³]</b>	36.030	66.030	49.637
<b>Coletado [%]</b>	38,42	39,67	37,49
<b>Coletado Contratado [m³]</b>	35.173	60.753	51.672
<b>Coletado Contratado [%]</b>	37,51	36,50	39,03



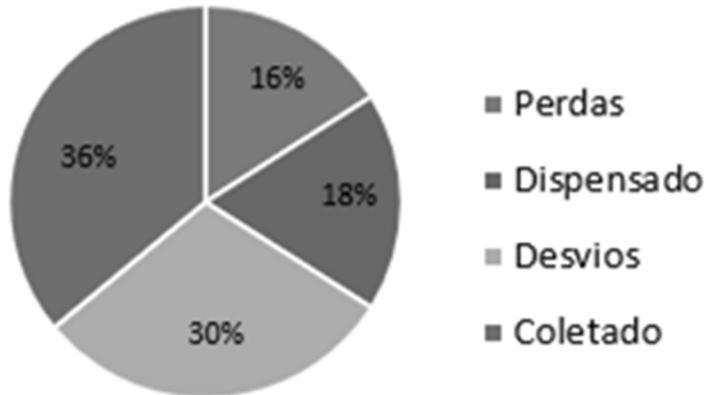
	<b>Sudeste</b>	<b>Sul</b>	<b>Brasil</b>
<b>Comercializado [m³]</b>	672.406	267,381	1.367.527
<b>Dispensado [m³]</b>	164.513	47.864	247.508
<b>Base de cálculo [m³]</b>	507.893	219.517	1.120.019
<b>Meta Portaria 100/16 [%]</b>	42,0	40,0	40,1
<b>Meta [m³]</b>	213.315	87.807	445.109
<b>Coletado [m³]</b>	232.108	105.315	489.120
<b>Coletado [%]</b>	45,70	47,98	43,67
<b>Coletado Contratado [m³]</b>	216.636	89.838	454.072
<b>Coletado Contratado [%]</b>	42,65	40,93	40,54

Fonte: Elaborado pelos autores (2022) com dados da ANP (2020b).

Os óleos dispensados no artigo 10 da Resolução Conama nº 362/2005 são os óleos lubrificantes acabados destinados à pulverização agrícola, para correntes de motosserra, óleos industriais que integram o produto final não gerando resíduos, para estampagem, em motores dois tempos, em sistemas selados que não exijam troca ou que impliquem em perda total do óleo, óleos solúveis, óleos fabricados à base de asfalto, óleos destinados à exportação e todo óleo lubrificante básico ou acabado comercializado entre as empresas produtoras, entre as empresas importadoras ou entre produtores e importadores, devidamente autorizados pela ANP.

Durante o processo de lubrificação industrial podem ocorrer vazamentos e na lubrificação dos motores automotivos é também comum a perda, quantidade que alcança em média 16%. Esses volumes somados correspondem a cerca de 34% de todo o lubrificante consumido no país. A geração de OLUC em relação ao volume comercializado deve então ser de 66%, o que pode ser chamada de quantidade de OLUC coletável.

Os números da Figura 3 mostram que só 36% do total de óleo comercializado (ou 55% do potencial de coleta) é efetivamente recolhido e que 30% do óleo comercializado (ou 45% do potencial de coleta) não é recuperado e sim desviado para utilizações ilegais.

Figura 3 – Destino do óleo lubrificante no Brasil em 2019 (1.367.527 m<sup>3</sup>)

Fonte: Elaborado pelos autores (2022) com dados da ANP (2020b).

Também não são claros os motivos porque as metas estabelecidas pelo MMA/MME são menores que a possibilidade real de coleta, mas provavelmente devem estar relacionados com gargalos logísticos, o custo do transporte, fiscalização deficiente, destinação ilegal e falta de conscientização da população.

A geração de OLUC no país deveria ser compatível com a média internacional, da ordem de 58% em relação ao volume do óleo lubrificante comercializado. Cada país procura soluções próprias para viabilizar e custear a logística reversa do OLUC e seu rerrefino, conforme a Tabela 4, onde se observa que há três tipos de ações que sustentam essa coleta:

- a) algum tipo de remuneração;
- b) existência de pontos de coleta voluntária;
- c) efetivo envolvimento do Poder Público no processo e divulgação de informação.

No Brasil, os coletores compram o OLUC dos geradores. Não há um preço estabelecido, pois entende-se que o valor pago é uma contribuição ao gerador pela boa guarda e conservação do produto. Se não houvesse essa contribuição, provavelmente uma menor quantidade de OLUC seria coletada. Essa contribuição depende do volume e da qualidade, assim como das distâncias entre o ponto de coleta e usinas rerrefinadoras. O que chama a atenção é o fato do coletor comprar o OLUC com seus recursos. A PNRS (Lei nº 12.305/2010) estabelece que os custos da coleta, armazenamento e transporte devem ser assumidos integralmente pelos produtores / importadores de



óleo lubrificante, pois o custo da coleta está embutido no valor do óleo lubrificante, pago pelo consumidor no ato da compra. Na realidade, o volume de OLUC coletado acima da meta é custeado pelos coletores.

Quadro 3 – Custeio da logística reversa do OLUC em alguns países

<b>País</b>	<b>Medidas Adotadas</b>
EUA	O gerador do óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) paga ao coletor pela coleta.
Canadá	O gerador do óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) paga ao coletor pela coleta.
Alemanha	Os pontos de venda de óleo lubrificante acabado (OLAC) devem ter um ponto de coleta de OLUC e de embalagens vazias. O preço do óleo coletado é geralmente inferior ao óleo usado para queima.
Áustria	Os pontos de venda de óleo lubrificante acabado (OLAC) devem ter um ponto de coleta de OLUC e de embalagens vazias.
França	A coleta é financiada por uma taxa sobre o óleo lubrificante acabado (OLAC), fiscalizada por uma agência ambiental. O preço do óleo coletado é geralmente inferior ao óleo usado para queima.
Itália	Os produtores remuneram os coletores.
Dinamarca	As autoridades locais são as responsáveis pela coleta do OLUC. Devem também disponibilizar locais de coleta.
Finlândia	As autoridades locais são as responsáveis pela coleta do OLUC. Devem também disponibilizar locais de coleta.

Fonte: Adaptado pelos autores (2022) de Streb, Cunha e Negrini (2004, p. 4305).

A série histórica de preços de combustíveis (ANP, 2020c) mostra que, em 2017, o preço médio do diesel no mercado nacional foi de R\$ 3,11/litro e os óleos combustíveis, R\$ 2,00/litro. A remuneração pela guarda do OLUC, paga pelos coletores aos geradores, foi de R\$ 0,60/litro, em média. Essa diferença pode também explicar os desvios e a destinação incorreta do OLUC.

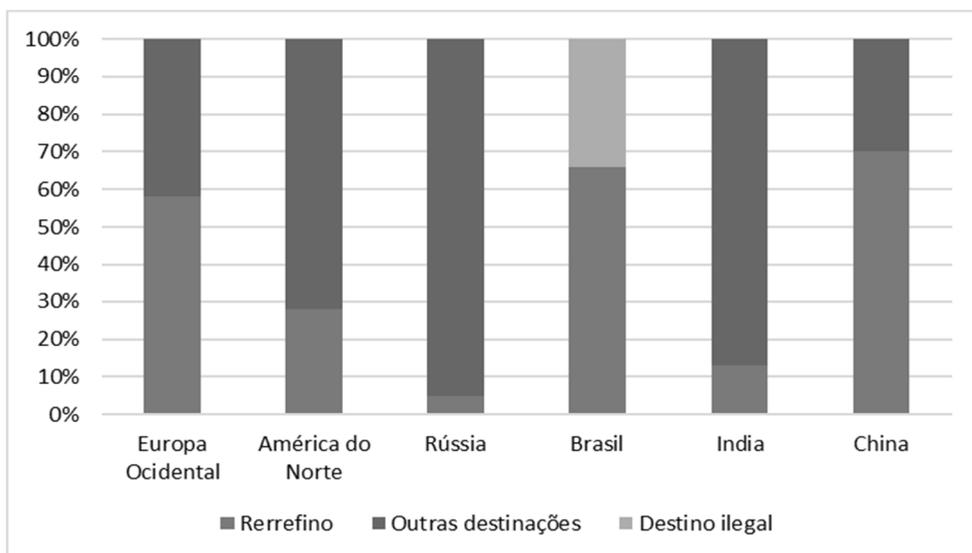
Em muitos países, parte do OLUC passa por processo de desmetalização para remoção de metais pesados devido aos aditivos adicionados ao óleo básico. Atendendo ao índice mínimo de teor de enxofre, o óleo desmetalizado pode então ser utilizado como combustível. No Brasil, combustão ou incineração não são



consideradas formas de reciclagem, sendo terminantemente proibidas de acordo com o artigo 13 da Resolução Conama nº 362/2005, já que geram gases residuais nocivos ao meio ambiente e à saúde pública.

Na Figura 5 são apresentadas duas classificações para a destinação do OLUC: rerrefino e combustíveis ou destinação ilegal. Como no Brasil não há desmetalização do OLUC, o volume que não é rerrefinado tem destino ilegal. Nos demais países, pode até ocorrer desvio, mas o OLUC é amplamente utilizado como combustível.

Figura 5 – Destinação estimada de OLUC em alguns países



Fonte: Elaborada pelos autores (2022) com dados de Françolin (2018).

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) definem *Indicadores Ambientais Nacionais*, dentre eles o *Percentual de Alcance da Meta estabelecida de Coleta de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados (OLUC) no Brasil*. Faz referência aos Objetivos da ONU – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS 12, 6 e 11. Esse indicador verifica o cumprimento das metas de coleta a partir das declarações das empresas produtoras e importadoras de óleo lubrificante acabado que são reguladas pela ANP e registradas no Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Naturais – CTF/APP, gerenciado pelo Ibama. Há duas variáveis nesse indicador: o percentual mínimo de coleta de OLUC estabelecido pela Portaria Interministerial e o efetivamente alcançado pelas empresas produtoras e importadoras.



Na página eletrônica da ANP, os dados são apresentados no Boletim de Lubrificantes e em planilhas, e são baseados nas declarações das empresas produtoras e importadoras de OLAC, e dos coletores e rerrefinadores de OLUC, através do Sistema de Movimentação de Produtos (SIMP) administrado pela ANP. Observa-se que as metas tendem ao crescimento, mas é necessário maior fiscalização governamental e conscientização ambiental da população.

### 3.3 MÉTODOS ATUAL E SUGERIDO PARA CÁLCULO DAS METAS DE COLETA

O custeio da coleta de OLUC é atualmente calculado tomando como base a diferença entre o volume total do óleo lubrificante produzido e o volume do óleo dispensado de coleta, e aplicando-se no resultado o percentual estabelecido pela Portaria Interministerial MME/MMA nº 475/2019. Utilizando os dados de 2019 (Tabela 4), a meta foi de 40,1% com o volume de coleta fixado em 449.128 m<sup>3</sup> (Tabela 5).

Tabela 4 – Método atual para cálculo das metas de coleta para o ano de 2019

	2019	m <sup>3</sup>
A	Óleo produzido	1.367.527
B	Óleo dispensado de coleta	247.508
C	Base de cálculo (A + B)	1.120.019
D	Meta (40,1% C)	449.128

Fonte: Elaborado pelos autores (2022) com dados de ANP (2020b).

Porém, no método de cálculo proposto na Tabela 5, sugerido neste trabalho, observa-se que o volume efetivamente coletado foi de 489.120 m<sup>3</sup>, o que representaria 43,7% do óleo produzido, acima da meta proposta para o ano de 2019. Utilizando novamente os dados de 2019, ao se subtrair do volume total do óleo lubrificante produzido, o volume do óleo dispensável de coleta e o volume correspondente às perdas normais do processo (cerca de 16%), resulta no volume de OLUC coletável.

Assim, ao estimar em 58% a meta de coleta, o país estaria mais alinhado com a média internacional (também de 58%), o que também evidenciaria os níveis de produtividade do setor.



Tabela 5 – Método proposto para cálculo das metas de coleta para o ano 2019

	2019	m <sup>3</sup>
A	Óleo produzido	1.367.527
B	Óleo dispensado de coleta (18%)	246.155
C	Perdas (16%)	273.505
D	Base de cálculo OLUC coletável (A – B – C)	847.867
E	Meta (58% D)	489.120

Fonte: Elaborada pelos autores (2022) com dados de ANP (2020b).

No método proposto, os coletores conseguiriam ser ressarcidos em valores mais próximos da realidade, diminuindo a margem de incerteza do volume de OLUC. As metas estabelecidas nas portarias interministeriais são as quantidades mínimas, e os coletores conseguem coletar um volume maior, mas que não são devidamente remunerados pela quantidade que ultrapassa a meta. Então, acontecem os desvios, com a atuação de coletores clandestinos que, sem pagar impostos ou taxas, revendem o OLUC mais barato para olarias, fundições e outras destinações ilegais.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece que o Estado, através de órgãos federais ou estaduais, fixa metas de coleta, controla e fiscaliza instalações e todos os procedimentos relacionados à implementação e operacionalização da logística reversa do OLUC. A PNRS atribui aos produtores, importadores, distribuidores e comerciantes de óleo lubrificante a responsabilidade pela estruturação e implementação dos sistemas de logística reversa do OLUC.

A compra do OLUC dos grandes geradores (oficinas, garagens etc.) é paga pelo coletor. Quanto maior o volume de óleo coletado numa região, melhor o custo-benefício do transporte até a usina rerefinadora. Os grandes geradores entendem que o valor recebido pelo OLUC armazenado é uma contribuição fruto da conscientização do poder poluidor desse resíduo. Porém, nesse processo, há um ator negligenciado: o pequeno gerador que compra óleo lubrificante a varejo, que troca o óleo de seus equipamentos ou veículos em casa e muitas vezes desconhece a capacidade poluidora do OLUC. Além de uma comunicação mais eficiente sobre os malefícios do descarte irregular, poderia haver uma revisão da política tributária fiscal do



produto reciclado, de modo a desonerar o valor do óleo lubrificante que utiliza o óleo básico rerrefinado na sua composição, já que os impostos e taxas foram já pagos na primeira utilização do material.

As atividades de coleta e rerrefino estão consolidadas no Brasil, com controle e acompanhamento dos processos em sistemas informatizados. O parque de rerrefino tem margem para o crescimento da atividade, mas é imperativo facilitar a entrada no mercado de novos coletores, reavaliar a distribuição geográfica das usinas rerrefinadoras, incentivar novas tecnologias de rerrefino com geração mínima de rejeitos e ampliar a educação ambiental para toda a população. Os benefícios sob pontos de vista social, ambiental e econômico seriam muitos: geração de empregos nas atividades de coleta e rerrefino, pesquisa de novas tecnologias de rerrefino, preservação de recursos naturais, proteção da saúde humana e da fauna pela redução de contaminação do ar, solo e água.

Neste trabalho é proposta uma mudança no cálculo das metas de coleta, que traria para mais próximo da realidade os valores de remuneração da coleta de OLUC. Propõe-se também que seja introduzida uma taxa de desconto no preço do óleo lubrificante para o consumidor, que seria compensada por um acréscimo no valor da compra do OLUC pelo coletor como remuneração pela boa guarda do OLUC no estabelecimento do revendedor. Se o consumidor optasse pela troca de óleo no local da compra, haveria um desconto no preço do OLUC correspondente ao retorno da taxa. Esse mecanismo de incentivo financeiro, além da educação ambiental, seria bastante eficiente para o consumidor entender que há apenas um único processo de reciclagem correta para o produto. Eventualmente, outros postos de coleta poderiam também ser criados, reduzindo ainda mais o descarte ilegal do OLUC.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Classificação**. 2004. Disponível em: <https://analiticaqmcredutos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2020.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Boletim da produção de petróleo e gás natural – 2020**. [Encarte de Consolidação da Produção – 2020]. Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Circulação Externa, nº 121, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-bmppgn/2020/boletim-12-2020.pdf>. Acesso em: 08 maio 2021.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Painel Dinâmico do Mercado Brasileiro de Lubrificantes**. 30.10.2020b. [Consulta em junho



2021]. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-do-abastecimento/painel-dinamico-do-mercado-brasileiro-de-lubrificantes>. Acesso em: 30 out. 2021.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Série histórica do levantamento de preços**. 08.09.2020c. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>. Acesso em: 07 ago. 2021.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Portaria ANP nº 125**, de 05 de agosto de 2002. Dispõe sobre os procedimentos de natureza preventiva a serem adotados no acompanhamento de obras com interferência em faixa de domínio de dutos de petróleo, seus derivados ou gás natural. D.O.U. de 06.08.2002. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/portaria-tecnica-n-125-2002-dispoe-sobre-os-procedimentos-de-natureza-preventiva-a-serem-adotados-no-acompanhamento-de-obras-com-interferencia-em-faixa-de-dominio-de-dutos-de-petroleo-seus-derivados-ou-gas-natural>. Acesso em: 07 ago. 2021.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 19**, de 18 de junho de 2009. Estabelece os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de rerrefino de óleo lubrificante usado ou contaminado, e a sua regulação. D.O.U. de 19.06.2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111864>. Acesso em: 07 ago. 2021.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 20**, de 18 de junho de 2009. Dispõe sobre os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de coleta de óleo lubrificante usado ou contaminado e a sua regulação. D.O.U. de 19.06.2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=111856>. Acesso em: 07 ago. 2021.

BAUDRILLARD, Jean. **A sociedade de consumo**. Lisboa, Portugal: Edições 70, 1995. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/613769/mod\\_resource/content/1/BAUDRILLARD\\_1995\\_A\\_sociedade\\_de\\_consumo.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/613769/mod_resource/content/1/BAUDRILLARD_1995_A_sociedade_de_consumo.pdf). Acesso em: 03 out. 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 3. Disponível em: [http://planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Portaria Interministerial MME/MMA nº 100**, de 08 de abril de 2016. Estabelece as metas de coleta de OLUC no quadriênio 2016-2019. Disponível em: [http://www.simepetro.com.br/wp-content/uploads/PORTARIA-INTERMINISTERIAL-MME-MMA-N-100-DE-08\\_04\\_2016.pdf](http://www.simepetro.com.br/wp-content/uploads/PORTARIA-INTERMINISTERIAL-MME-MMA-N-100-DE-08_04_2016.pdf). Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Portaria Interministerial MME/MMA nº 475**, de 19 de dezembro de 2019. Estabelece as metas de coleta de OLUC no quadriênio 2020-2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-interministeriais/portaria-interministerial-mme-mma-n-475-2019.pdf>. Acesso em: 22 set. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 362**, de 23 de junho de 2005. Dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=457](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=457). Acesso em: 22 set. 2022.

BRITO, Marisa p. de. **Managing Reverse Logistics or Reversing Logistics Management?** Tese (Doutorado) – Breda University of Applied Sciences, 2004. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/34742326\\_Managing\\_reverse\\_logistics\\_or\\_reversing\\_logistics\\_management](https://www.researchgate.net/publication/34742326_Managing_reverse_logistics_or_reversing_logistics_management). Acesso em: 19 out. 2020.



CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. **Qual a diferença entre petróleo leve e pesado?** 08 fev. 2019. Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/qual-a-diferenca-entre-petroleo-leve-e-pesado/>. Acesso em: 09 mar. 2021.

COUTO, Maria Claudia Lima; LANGE, Liséte Celina. Análise dos sistemas de logística reversa no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017149403>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/S5FHdbHp3ZV6kQHgmFfSSWF/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 22 set. 2022.

FRANÇOLIN, Walter. **A externalidade positiva da atividade de rerefino** – efeitos sociais, ambientais e econômicos. São Paulo: Sindirrefino, 2018. Disponível em: <https://static-sindirrefino-prod.s3.amazonaws.com/upload/arquivospara-download/00001887.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2021.

FRANÇOLIN, Walter. **Logística reversa dos óleos lubrificantes pós-consumo**. Campinas, SP: Fórum Brasil de Gestão Ambiental, 2017. Disponível em: <https://sindirrefino.org.br/eventos/realizados?forum-brasil-de-gestao-ambiental&id=8563>. Acesso em: 10 out. 2020.

GMP – Grupo de Monitoramento Permanente da Resolução Conama nº 362/2005. **Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados – Guia de Fiscalização**. São Paulo: Sindirrefino, 2015. Disponível em: [https://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos\\_lubrificantes/guia\\_de\\_fiscalizacao.pdf](https://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos_lubrificantes/guia_de_fiscalizacao.pdf). Acesso: 04 mar. 2021.

GMP – Grupo de Monitoramento Permanente da Resolução Conama nº 362/2005. **Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados – Guia Básico**. 2. ed. São Paulo: Associação de Proteção ao Meio Ambiente de Cianorte – APROMAC, 2011. Disponível em: <https://static-sindirrefino-prod.s3.amazonaws.com/upload/manuaisetreinamentos/00001500.pdf>. Acesso: 04 mar. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área territorial – Brasil, Grandes Regiões, Unidades da Federação e Municípios – 2019**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-area-dos-municipios.html?edicao=27729&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 04 set. 2020.

IJL – Instituto Jogue Limpo. Associação de empresas fabricantes ou importadoras de óleo lubrificante, responsável por realizar a logística reversa das embalagens de óleo lubrificante usadas. 2022. Disponível em: <https://www.joguelimpo.org.br>. Acesso em: 15 mar. 2022.

LISBOA, Vinícius. **Produção de petróleo no Brasil cresceu 5,5% em 2020** – De 2016 a 2020, produção atingiu 17,1%. Agência Brasil – Rio de Janeiro, Empresa Brasil de Comunicação – EBC, jun. 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-02/producao-nacional-de-petroleo-cresceu-55-em-2020>. Acesso em: 22 set. 2022.

LWART Lubrificantes. **Características da Logística Reversa e Refino**. 2021. Apresentação ppt (recebido por comunicação pessoal).

ROCHA, Bianca Maria Borges da. **A implementação da responsabilidade compartilhada por meio da logística reversa**: questionamento sobre a obrigatoriedade dos acordos setoriais a partir da experiência do setor de óleo lubrificante usado ou contaminado. 2018. Dissertação (Mestrado) – Escola de Direito do Rio de Janeiro da Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/27340/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20BIANCA%20MARIA%20BORGES%20DA%20ROCHA%20-%20FGV%20DIREITO%20RIO.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2021.



SACHS, Ignacy. **Estratégias de transição para o século XXI** – Desenvolvimento e Meio Ambiente. São Paulo: Studio Nobel/FUNDAP, 1993.

SACHS, Ignacy. **As cinco dimensões do ecodesenvolvimento**. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/128119/Sachs%20Ignacy%20dimensoes%20DS.pdf?sequence=27>. Acesso em: 10 out. 2020.

SILVA, Michel Almeida; RIBEIRO, Simone Nóbrega; CRISPIM, Diêgo Lima; ANDRADE SOBRINHO, Luiz Gualberto; FARIAS, Camilo Allyson Simões de. Avaliação do gerenciamento de resíduos de óleos lubrificantes e suas embalagens em oficinas mecânicas na cidade de Pombal – PB, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, PB, v. 9, n. 4, p. 53-58, 2014. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/3004>. Acesso em: 13 out. 2020.

SINDIRREFINO – Sindicato Nacional da Indústria do Refino de Óleos Minerais. Entidade de classe patronal. **Logística reversa do OLUC**. [2022]. Disponível em: <https://www.sindirrefino.org.br/rerrefino/logistica-reversa-oluc>. Acesso em: 08 nov. 2019.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019**. Brasília: Secretaria Nacional de Saneamento – SNS/ Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR, 2020. Disponível em: [http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico\\_RS2019.pdf](http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2019/Diagnostico_RS2019.pdf). Acesso em: 31 maio 2022.

SOHN, Hassan. **Gerenciamento de óleos lubrificantes usados ou contaminados: guia de fiscalização**. São Paulo: Sindirrefino, 2015. Disponível em: [http://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos\\_lubrificantes/guia\\_de\\_fiscalizacao.pdf](http://www.mprs.mp.br/media/areas/ambiente/arquivos/oleos_lubrificantes/guia_de_fiscalizacao.pdf). Acesso em: 10 fev. 2020.

SOHN, Hassan. **Relatório sobre a experiência do Brasil na gestão de óleos lubrificantes usados ou contaminados**. Curitiba, 2018. Disponível em: <http://www.basel.int/Countries/NationalReporting/Guidanceoninventoryofhazardouswastes/FollowuptoCOP13/tabid/8756/ctl/Download/mid/24425/Default.aspx?id=1&ObjID=20511>. Acesso em: 10 fev. 2020.

STREB, Cleci Schalemburger; CUNHA, Kamyla Borges da; NEGRINI, Valéria Simensato. **Reciclagem de Óleos Lubrificantes: solução ambiental, legal e econômica**. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Costão do Santinho, Florianópolis, Santa Catarina, 17 a 20 de outubro de 2004. Disponível em: <https://silo.tips/download/ict-2004-congresso-brasileiro-de-ciencia-e-tecnologia-em-residuos-e-desenvolvim-76#>. Acesso em: 10 mar. 2021.

TSAMBE, Malaquias Zildo Antônio; ALMEIDA, Cássio Florisbal de; LOHMANN, Gabriele; SANTIAGO, Mariana Ribeiro; CYBIS, Luiz Fernando de Abreu. Avaliação do sistema de gerenciamento de OLUC no Brasil. **Tecno-Lógica**, v. 21, n. 2, p. 75-79, 2017. DOI: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v21i2.7929>. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/7929>. Acesso em: 22 set. 2022.

VIVEIROS, Mariana. Cerca de 28 mil litros de óleo poluem SP por ano. **Folha de S.Paulo**, 06.08.2000. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u6713.shtml>. Acesso em: 25 de set. 2013.

XAVIER, Laécio Noronha. Reinterpretação conceitual do desenvolvimento sustentável em face do planejamento urbano e da economia circular. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 8, n. 1, p. 233-266, 2017. DOI: <https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v8i1.17691>. Disponível em: <https://periodicos.pucpr.br/direitoeconomico/article/view/17691>. Acesso em: 22 set. 2022.





# COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

## *RESIDUES DERIVED FUEL AND ITS CONTRIBUTION TO SUSTAINABLE URBAN SOLID WASTE MANAGEMENT*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

BAIER, Hubert; PEREIRA, Christiane. Combustível derivado de resíduos e sua contribuição para a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Hubert Baier**

Engenheiro de geociências e processos aplicados, gerente de coprocessamento da Holcim, Strabag DEUTAG, Dyckerhoff Cement, gerente de operação de planta de tratamento mecânico-biológico da Ecowest, cofundador da BGS e.V., membro dos comitês de normalização de coprocessamento da União Europeia e na Alemanha, remodelação e operação de Tratamento Mecânico Biológico.

E-mail: hubert.baier@wltip.eu

### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). *Master in Business Administration* (MBA) em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ); *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); e; *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico). Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos temáticos para o PLANSAB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: christiane@terramelhor.com.br

## RESUMO

Além da abordagem global de gerenciamento de resíduos para o coprocessamento de combustíveis alternativos derivados de resíduos (CDR), a primeira coisa a fazer é padronizar fundamentalmente a terminologia e seu conjunto de aplicação, pois a reconstrução de uma planta de pré-



processamento é mais econômica do que a reconstrução do processo do forno. Entretanto, os técnicos devem compreender as exigências do processo de queima de clínquer, os operadores de fornos devem saber como funciona o pré-tratamento e, finalmente, é vital que os fornecedores de equipamentos tenham uma compreensão básica de todas as partes envolvidas. Devido à tolerância do processo de forno, há muitos investimentos em projetos de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB) que inicialmente parecem ser completamente adequados e bem-sucedidos. Mas, à medida que taxa teórica de substituição térmica taxa de substituição térmica (TSR) aumenta, esta desconsideração pelas restrições químicas e físicas leva ao desastre financeiro, que infelizmente também joga nas mãos dos oponentes do coprocessamento e tenta a paciência do governo e dos bancos. A produção de cimento, que é um alvo muito popular na indústria de resíduos, é conhecida por operar um processo de conversão química muito caro e intensivo em energia, no qual combustíveis alternativos, suas cinzas e matérias-primas formam o clínquer precursor, respectivamente o cimento padronizado. Todos os combustíveis devem, portanto, ser compatíveis para este processo, para o produto e, por fim, para o controle da poluição do ar. Neste artigo, será mostrado como e por que anteriormente o potencial térmico dos resíduos, bem como a avaliação técnica do processo pirotécnico definem o equipamento subsequente da planta de pré-processamento e como as falhas típicas podem ser evitadas para uma melhor rentabilidade do negócio.

**Palavras-chave:** Condições econômicas. Capacidades. Produção de CDR customizada. Coprocessamento. Taxa de aterramento.

## ABSTRACT

In addition to the global waste management approach of co-processing of waste-derived alternative fuels (AFs), the first thing to do is to fundamentally standardize terminology and its mind set, because rebuilding a pre-processing plant is more cost-effective than rebuilding the kiln process. However, waste managers and conditioners must understand the requirements of the clinker burning process, kiln operators must know how pre-treating works, and finally, it is vital that hardware suppliers need to have a basic understanding of all sides involved. Because of the tolerance of the kiln process, there are many MBT project investments that initially appear to be completely adequate and successful. But, as TSR increases, this disregard for the chemical and physical constraints leads to financial disaster, which unfortunately also plays into the hands of the opponents of co-processing and tries the patience of the government and banks. Cement production, which is a very popular target in the waste industry, is known to operate a very costly and energy-intensive chemical conversion process in which alternative fuels, its ash and raw materials form the precursor clinker, respectively the standardized cement. All fuels must therefore be compatible for this process, the product and ultimately for air pollution control. In the following article, it will be shown how and why previously the thermal potential of the waste as well as the technical evaluation of the pyro-process defines the subsequent equipment of the pre-processing plant and how typical failures can be avoided successfully to earn money.



**Keywords:** Economical conditions. Capacities. Customized AF-production. Co-processing. Disposal fee.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria cimenteira europeia foi precoce em apontar que combustíveis alternativos derivados de resíduos (CDR) podem ser utilizados sem prejudicar seu processo, o produto e as emissões. Como resultado, ambos são agora alvo de estratégias nacionais de gerenciamento de resíduos e, infelizmente, atraem corretores globais de resíduos prometendo energia barata.

Agora globalmente, o gerenciamento local de resíduos está sendo transformado em uma estratégia nacional e sustentável de gerenciamento de resíduos, assim como a aplicação de direitos e obrigações legais, e o cumprimento do espírito da Convenção da Basileia.

Mas o coprocessamento não é a solução definitiva para eliminar todos os resíduos combustíveis, especialmente os plásticos, que agora poluem todo o nosso modo de vida em todos os lugares. Muitas vezes, é supervisionado que a indústria está produzindo cimento para um mercado flutuante e só pode fornecer seu piroprocessamento como parte da solução. Por exemplo, a uma taxa teórica de substituição térmica (TSR) de 100%, a indústria de cimento alemã, com sua demanda anual de energia de cerca de 94 milhões de GJ nos últimos dez anos, poderia utilizar apenas 14% da energia térmica total fornecida pelo conteúdo energético dos resíduos. Alguns resíduos, mesmo que tenham conteúdo energético elevado, devem ser evitados, e dessa forma utilizados por outros processos ou reciclados.

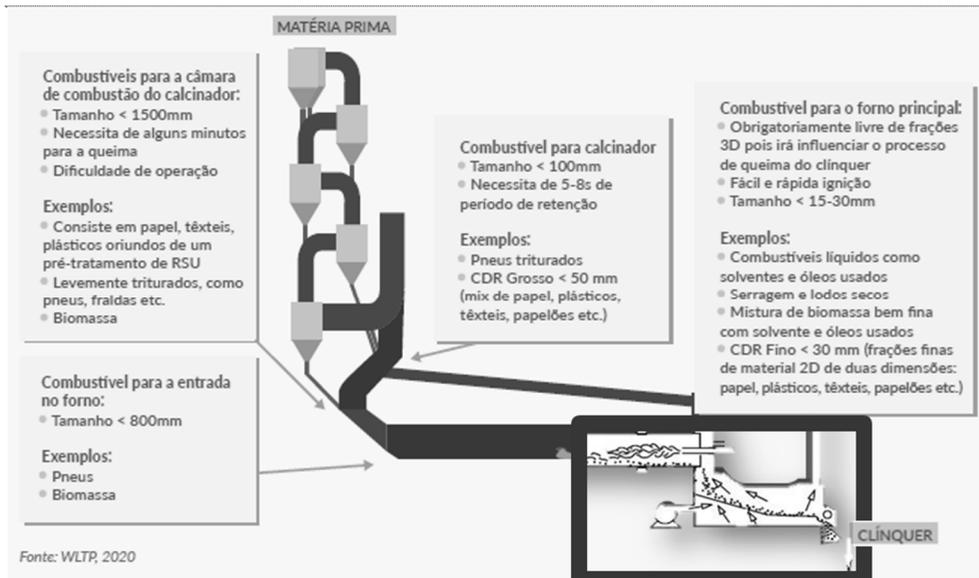
Vale esclarecer o aspecto da nomenclatura em razão da aplicabilidade dos diferentes tipos de CDRs, como segue:

- ◆ Fração altamente calórica (HCF = *High Calorific Fraction*) para uso direto na câmara de combustão (tais como HotDisk™ ou PREPOL™)
  - Tamanho do grão: < 300 mm
  - Poder calorífico superior: 20- 24 MJ/kg
  - Densidade: 0,3 – 0,5 t/m<sup>3</sup>
- ◆ Combustível Derivado de Resíduos (CDR = *RDF Residue Derived Fuel*) para calcinador
  - Tamanho do grão: 50 – 100 mm
  - Poder calorífico superior: 15 – 19 MJ/kg
  - Densidade: 0,2 – 0,4 t/m<sup>3</sup>



- ♦ Combustível Sólido Recuperado (SRF = *Solid Recovered Fuel*) para queimadores
  - Tamanho do grão: < 15 – 30 mm
  - Poder calorífico superior: a partir de 20 MJ/kg
  - Densidade: 0,1 – 0,25 t/m<sup>3</sup>

Figura 1 – Potencialidade de aplicação do CDR em planta cimenteira



Fonte: Adaptada pelos autores (2022) de WLTP (2020).

Assim, quando uma fábrica de cimento inicia o coprocessamento de CDRs, o processo de queima de clínquer oferece um processo de combustão suave para testes e erros. Isto, com algumas exceções, perdoa muitos dos erros operacionais e técnicos, e péssimas qualidades de CDR devido a sua baixa taxa de alimentação, as altas temperaturas e o excesso de cal. Portanto, o calcinador é também o ponto de partida mais popular para o uso de CDR de baixa qualidade. Mas, devido à concentração de oxigênio e ao tempo de queima, não é muito simples a partir do ponto do piroprocessamento e da emissão.

Em contraste, é mais fácil usar o SRF no queimador principal, onde as trilhas podem ser realizadas de forma muito econômica por uma simples estação de acoplamento e uma linha pneumática reta com um mínimo de arcos e joelhos. Entretanto, o SRF deve ter propriedades semelhantes a lignite, permitindo queimar logo e ter boas



trajetórias de partículas sem tocar o leito do clínquer e causar condições de queima redutivas.

Para garantir o processo de alta temperatura, contudo, o combustível alternativo deve ser baseado nas propriedades da lignite.

Tabela 1 – Parâmetros da lignite alemã

Parâmetro	%
Poder calorífico	21.800 kJ/kg
Carbono (C) <sup>[1]</sup>	25,2 – 28,8
Hidrogênio (H)	2
Oxigênio (O)	10 – 11,5
Nitrogênio (N)	0,2
Enxofre (S)	0,1 – 0,5
matéria volátil	46 – 48
Cinzas	2 – 20
Óxido de cálcio (CaO)	1,6 – 2
Dióxido de Silício / Silica (SiO <sub>2</sub> )	0,3 – 0,4
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,5 – 0,6
Óxido de ferro (III) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1 – 1,4

<sup>[1]</sup> A determinação isotópica pode ser usada para distinguir entre carbono fóssil e biogênico, que por sua vez é relevante para determinar as permissões de gases de efeito estufa.

Elementos residuais	ppm
As	0,2 – 2,5
Be	0,04 – 0,4
Pb	< 0,01 – 2,2
Cd	0,01 – 1,5
Cr	0,01 – 15
Ni	1 – 9,3
Hg	0,11 – 0,9
Tl	0,027 – 0,2
V	1 – 13



Elementos residuais	ppm
Zn	3,9 – 22

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Tabela 2 – Qualidade média SRF processada a partir de resíduos industriais e comerciais pré-selecionados

Parâmetro	%
Poder calorífico	21.800 – 32.200 kJ/kg
C <sup>[1]</sup>	n.d.
H	n.d.
O	n.d.
N	n.d.
S	0,1 – 0,8
matéria volátil	n.d.
Cinzas	9 – 39
CaO	n.d.
SiO <sub>2</sub>	n.d.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.d.
Cl	0,39 – 2,2
F	0,1 – 1,7

[1] A determinação isotópica pode ser usada para distinguir entre carbono fóssil e biogênico, que por sua vez é relevante para determinar as permissões de gases de efeito estufa.

Elementos residuais	ppm
As	0,68 – 15,32
Pb	27 – 4.406
Cd	0,75 – 162
Cr	19,10 – 187
Ni	5,41 – 1.622
Hg	0,09 – 1,62



Elementos residuais	ppm
Tl	0,23 – 1,96
V	2,17 – 164

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Tabela 3 – Qualidade média da SRF processada a partir da fração de alto poder calorífico dos resíduos urbanos

Parâmetro	%
Poder calorífico	16.700 – 25.700 kJ/kg
C <sup>1</sup>	48,2 – 54,1
H	7,3 – 8,5
O	32,5 – 34,1
N	0,76 – 1,35
S	0,1 – 1
matéria volátil	n.d.
Cinzas	13,6 – 46,7
CaO	26 – 32,1
SiO <sub>2</sub>	22,6 – 30,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,82 – 60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,26 – 6,75
Cl	0,8 – 4,3
F	0,02 – 0,09

Elementos residuais	ppm
As	0,48 – 7,33
Pb	131 – 30.176
Cd	2,1 – 55
Cr	82,73 – 3.029
Ni	14,19 – 3.658
Hg	0,28 – 3,39
Tl	0,18 – 5,90
V	5,19 -135

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Na Tabela 4, estão demonstrados, os critérios de entrada recalculados para combustíveis alternativos para coprocessamento em um processo seco com pré-aquecedor e calcinador sem afetar os valores-limite de emissão de acordo com a Diretiva 2000/76/CE sobre incineração de resíduos.

Tabela 4 – Critérios de entrada recalculados para combustíveis alternativos

Elemento (sem perda de brilho)	Concentração
CaO	Simples ou total ≥ 50 em peso .-%
SiO <sub>2</sub>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Mercúrio (Hg)	≤ 2 ppm DM
Cádmio (Cd)	≤ 50 ppm Dm
Tálio (Tl)	≤ 45 ppm DM
Outros elementos residuais não voláteis	≤ 20.000 ppm DM

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Até uma taxa de substituição térmica (TSR) de <50%, pode-se realmente falar de “co”-incineração em termos técnicos, bem como em termos de legislação de resíduos, enquanto que com um TSR ainda maior, o comportamento e a qualidade dos combustíveis alternativos dominam o piroprocessamento e, portanto, todo o processo de produção de cimento. Em outras palavras, quanto maior o TSR, mais precisamente o respectivo combustível alternativo tem que ser preparado e controlado.

## 2 OBSERVAÇÕES GERAIS SOBRE O USO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS NO CALCINADOR

Nos fornos rotativos modernos com calcinadores, apenas 40% da demanda de calor térmico é coberta pelo queimador da zona de sinterização, enquanto 60% é queimada a partir de um ou mais pontos do calcinador. Neste caso, o ar de combustão necessário é conduzido do resfriador de clínquer através de um duto de ar terciário e alimentado para o calcinador. Com relação à reação, a desacidificação do calcário requer apenas temperaturas de 850 a 900 °C. O calcinador mistura o calcário com o ar do calcinador. Dentro



do calcinador, os gases de combustão quentes de 1000 – 1200 °C da mistura de entrada do forno com o ar quente de 800 – 1000 °C do resfriador de clínquer do forno rotativo, garantindo uma ignição e combustão seguras dos combustíveis de reação lenta, de granulação grosseira. A sequência de secagem, pirólise, ignição e combustão do combustível leva muito mais tempo do que a calcinação do farelo cru, que é, portanto, o fator decisivo para o dimensionamento dos calcinadores.

Tipicamente, são introduzidos grumos de 50 a 100 mm, para que as partículas de combustível possam se queimar em 5 a 8 segundos antes que suas cinzas terminem na entrada do forno e se tornem parte do processo de formação do clínquer. Portanto, agora são várias as possibilidades de projetar calcinadores de acordo com as propriedades do combustível e permite o controle através da temperatura de combustão e do ar de combustão, respectivamente, a fim de reduzir também as emissões de Óxido de Nitrogênio (NOx).

### **3 USO DE COMBUSTÍVEIS CALCINADORES (RDF)**

Por determinadas razões, a preparação pode tornar-se muito cara ou a queima dos combustíveis calcinadores não pode prosseguir completamente, portanto, há a opção de uma câmara adicional de pré-combustão. Existem atualmente no mercado dois sistemas de câmara que permitem o uso de combustíveis alternativos difíceis, tais como papel alcatrão, pedaços de rotor de turbinas eólicas ou peças de pneus picados grosseiramente ou biomassa. O tamanho das peças pode ser de até 300 mm.

Um desses sistema é o chamado HotDisc® da FLSmidth, sobre cuja mesa giratória de rotação lenta a Fração Grossa de Alto Calorífico (HCF) derivada por simples pré-processamento de resíduos sólidos adequados entrará no fluxo de gás quente do calcinador. Os materiais grosseiros são secos, pirolisados e, após um tempo de permanência de aproximadamente 10 minutos, são ejetados por um pé-de-cabra para o fluxo de gás ascendente. Mais queimaduras acontecem no circuito normal do calcinador. O sistema funciona melhor com fraturas, que devem ter um comportamento térmico muito semelhante.

O chamado incinerador por etapas da Thyssen Krupp – Resource Technologies ([2022]) também introduz combustíveis de grãos grossos com baixo valor calórico (alto teor de água) no calcinador. Neste processo, o combustível não é necessariamente limpo, mas só é transportado mais adiante em direção ao laço do calcinador quando está completamente incinerado e pode ser transportado



pneumaticamente. Este sistema é, portanto, também adequado para combustíveis não homogêneos com comportamento de combustão variável. O tempo de retenção pode, portanto, variar extremamente entre si.

#### 4 MODERNIZAÇÃO

A fim de se manterem competitivas, as fábricas estão sendo constantemente modernizadas. Os resfriadores de clínquer, por exemplo, estão sendo convertidos em resfriadores de grelha mais eficientes termicamente, alguns dos quais também são combinados com um sistema de recuperação de calor residual. Os queimadores principais estão sendo convertidos em modernos queimadores multicomcombustíveis para que combustíveis sólidos e líquidos alternativos possam ser utilizados além de carvão duro, lignite e coque de petróleo.

Na recuperação de calor desperdiçado, os gases de escape do forno quente de aproximadamente 430 °C são alimentados através de um sistema de caldeira e o vapor gerado nela é alimentado a uma turbina. O gerador produz cerca de 1/3 da eletricidade necessária. A eficiência da usina de geração de calor residual está entre 22 – 25%, sendo que o vapor pode ser resfriado novamente por ar ou água.

Os gases residuais totais do forno podem ser desnitrificados por meio de redução não catalítica (SNCR = *selective non-catalytic reduction*) seletiva ou redução catalítica seletiva (SCR = *selective catalytic reduction*), dependendo do circuito desenvolvido de gás bruto ou gás limpo das plantas e da taxa de utilização do calor residual na secagem da usina. Em alguns casos, pode até ser necessário reaquecer o gás de exaustão já termicamente exaurido e, portanto, resfriado no sistema SCR, a fim de atingir os 250 °C necessários para a operação do catalisador.

A água de amônia é então injetada no duto de gás de combustão, que é necessária para a reação de conversão dos óxidos de nitrogênio no conversor catalítico. Após passar pelo conversor catalítico, o gás de combustão é direcionado para a pilha através de um ventilador de processo a menos de 0,1 mg/ °C NOx e quase livre de deslizamento de amônia.

À medida que o TSR aumenta, a boa natureza do processo do forno torna-se cada vez mais tensa.

Portanto, deve ser dada atenção absoluta a todos os requisitos do piroprocessamento e à qualidade da entrada de resíduos para produzir HCF adequado para a câmara de pré-combustão, CDR para o calcinador e SRF para o queimador final do forno.



Consequentemente, as instalações experimentais têm que ser substituídas por instalações profissionais suficientes para executar um processo de forno estável. O mais tardar a partir de um TSR de >50%, a qualidade CDR influencia todo o processo de produção. Isto significa, por exemplo, não mais estações de ancoragem sem possibilidade de homogeneização, linhas pneumáticas só são instaladas retas e para os últimos metros até o ponto de injeção, sem abas triplas perturbadoras que interrompam a alimentação contínua, uma concentração de oxigênio suficiente no ponto de alimentação no calcinador, um tamanho de partícula adotado que tem que ser produzido na planta de pré-tratamento de acordo com um tempo de residência suficiente, ou uma amostragem representativa em CDR de queda livre, para citar apenas alguns pontos de uma longa lista.

De fato, basta aceitar que a inspeção técnica individual do processo de queima do clínquer com antecedência é demorada e, às vezes, exposta. Os fabricantes de cimento nem sempre sabem exatamente quão tolerante é seu forno rotativo e o que aconteceu em seu tubo, por exemplo, em relação ao vapor de água, balanço de gás, demanda de energia, conteúdo de oxigênio no ponto de aplicação. Mas, em última análise, é mais eficaz do que se preocupar com conversões caras do piroprocessamento ou com o uso de especificações de fornecimento extravagantes, que não podem ser controladas devido à falta de compromissos e normas, que mais tarde são importantes também para a base contábil ou para o Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) – conteúdo neutro para a necessidade de permissões de Gases de efeito estufa (GEE).

Antes de iniciar o pré e coprocessamento, os dados-chave de cada forno devem ser determinados pela inspeção individual sólida. Não faz absolutamente nenhum sentido procurar na literatura geral ou na Internet. A tecnologia, a química e o tipo de forno individual são decisivos para o planejamento da planta de pré-tratamento. Portanto, não é apenas imperativo distinguir verbalmente os diferentes tipos de CDR e conhecer algumas especificações gerais, as condições em cada ponto de alimentação têm que ser bem conhecidas e especificadas.

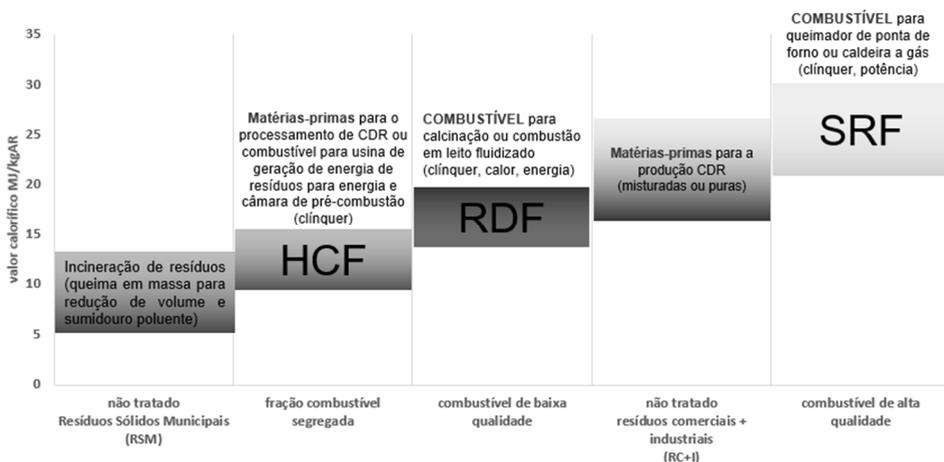
A planta de pré-processamento tem que ser projetada adequadamente para garantir a produção de combustíveis alternativos personalizados. Por exemplo, fornos úmidos ou antigos equipados apenas com um pré-aquecedor não são adequados para o coprocessamento de CDR com um tamanho de grão de 80 – 100 mm e um valor calorífico inferior a lignite. Devido à falta do calcinador, SRF



com um tamanho <25 mm, livre de partículas tridimensionais, e com trajetórias curtas tem que ser produzido. Em contraste, os fornos modernos têm a possibilidade de alimentar o SRF através do queimador principal, CDR para o calcinador e HCF para a câmara de pré-combustão.

A Figura 2 apresenta a fronteira entre os CDRs respectivamente de baixo grau HCF, CDR e alto grau SRF é seu menor poder calorífico comparável à lignite ( $22 \pm 2$  MJ/kg) e seu ponto de alimentação correspondente ao tamanho de grão requerido no ponto de alimentação.

Figura 2 – Fronteira entre os CDRs



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Todos os combustíveis derivados de resíduos, inclusive o HCF, devem ser sempre controlados com qualidade, independentemente de ser pelas autoridades para fins de controle da poluição do ar ou de seu próprio interesse, de acordo com as necessidades ou produtos do forno.

A avaliação prévia dos resíduos é para identificar a composição, a quantidade de combustíveis valiosos e sua qualidade, e para determinar a quantidade de impurezas a serem descartadas e o conhecimento de uma tecnologia sensata de pré-processamento orientada para a demanda. A chance de não ser rejeitada da lista de fornecedores aumentará se este trabalho preliminar tiver sido feito corretamente, e evitará maus investimentos.

Ambos os resultados são importantes para o esforço e itens necessários, a operação da planta e o projeto necessário para produzir



CDRs adequados e de qualidade assegurada e para determinar a viabilidade do projeto.

## **5 OBJETIVO E PROJETO DE UMA PLANTA DE PROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS**

A origem dos resíduos brutos não tratados não desempenha mais esse papel, hoje em dia. Plantas de geração de CDR modernas e bem equipadas estão em condição de produzir subprodutos de acordo com a demanda do cliente consumidor, por meio de testes de adequação, gerenciamento de fluxo de material e garantia de qualidade a partir dos seguintes fatores orientadores:

- ♦ Em relação ao controle da poluição do ar;
- ♦ O processo de formação de clínquer no que diz respeito ao desempenho do produto;
- ♦ O processo de combustão incluindo perturbações que afetam a durabilidade do revestimento do tijolo por corrosão, formação de circuitos, entupimento ou formação de anéis e outros impactos causados por cloro, enxofre ou álcalis.

Para atender a todos esses requisitos, a produção de CDR tem que começar com uma aquisição confiável para fluxos de resíduos.

Em países desenvolvidos em termos de gestão de resíduos, os resíduos comerciais e industriais podem ser coletados separadamente no ponto de origem. Isto apoia principalmente o objetivo de reciclagem e evita a contaminação por orgânicos úmidos, minerais, resíduos perigosos e outras impurezas, resultando em uma redução significativa nos gastos de capital para triagem e processamento de combustível. Ao invés de equipamentos caros, mais esforço é colocado aqui em uma aquisição seletiva e uma análise química confiável com antecedência.

Em contraste, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são geralmente coletados em um "sistema de um cesto" (às vezes, já em uma coleta úmida e seca), mas na maioria das vezes de forma mista e depositados na planta de condicionamento. Não há possibilidade de intervenção qualitativa e o operador (público) da planta tem que aceitar o que entra.

A planta TMB aumenta o potencial de reciclagem de acordo com os resultados determinados da avaliação dos resíduos e da avaliação técnica do forno, e separa os poluentes e substâncias interferentes dos materiais recicláveis, faz compostagem a partir de matéria orgânica e produz CDRs orientados para a demanda a partir dos combustíveis segregados. É óbvio que a profundidade de processamento de cada etapa varia conseqüentemente dependendo da composição, objetivo, finalidades e confiabilidade do equipamento instalado.



De fato, o tratamento de resíduos sólidos em TMB tem um potencial de redução de  $CO_{2eq.}$ , que são a soma de vários "potenciais de evasão":

- ♦ Evitar a disposição em lixões e a emissão difusa de metano;
- ♦ Orientação controlada através da proibição do aterro sanitário de resíduos não tratados;
- ♦ O aumento das taxas de descarte e sanções deve encorajar as pessoas a reduzir sua quantidade de resíduos;
- ♦ A fermentação separada de produtos orgânicos gera biogás e subsequentes fertilizantes de compostagem;
- ♦ A recuperação de materiais recicláveis nas cadeias a montante pode ser encurtada ou mesmo eliminada;
- ♦ O uso de combustíveis alternativos, incluindo proporções de papel, papelão, têxtil, borracha natural etc., substituirá os combustíveis fósseis à base de carbono e hidrocarbonetos, combustíveis primários.

Se o conteúdo orgânico e, portanto, a principal entrada de umidade for conhecida, a sequência das etapas do processo certamente pode ser mudada para uma secagem biológica a ser realizada antes de uma generosa segregação através de peneiramento vibro-transformador suficiente e peneiramento pelo vento.

## 6 OS FRACASSOS MAIS POPULARES

Uma produção sustentável de CDRs deve buscar evitar as seguintes falhas:

Figura 3 – Rompedor de sacolas



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



- 1) *Rompedor de sacolas*: Os rompedores de sacolas têm limitações, a depender do fornecedor, de abertura em sacolas menores que 10 ou 30 cm. Geralmente os municípios condicionam seus resíduos em várias sacolas dentro de sacolas, dessa forma reduzindo a eficácia de abertura. Isto posto, para os resíduos coletados de forma indiferenciada, um triturador robusto de alto desempenho é recomendado para livrar e triturar os resíduos sólidos

Figura 4 – As peneiras em tambor não atendem ao efeito de separação pretendido



Fonte: Elaborada pelo autor (Baier, 2002).

- 2) *Segregação*: As peneiras em tambor não são adequadas para a separação eficiente da matéria orgânica, ou separação de inertes como pedras, detritos de cerâmica ou vidro, ou outras impurezas de RSU com uma composição de cinzas e distribuição granulométrica pouco clara. As “cobras” ou “rabos de cavalo” são formadas por giro, o que reduz a capacidade de segregação em até 30%, que têm de ser novamente triturados para uma segregação eficiente, a fim de garantir a pureza necessária das frações a serem processadas. Além disso, elas só utilizam ativamente ~20% de sua área de tela tubular, o que em última análise significa que cinco tambores devem competir com o desempenho e o resultado de uma tela plana. Isto acaba levando a uma maior necessidade de espaço para tambores na planta de processamento e é



equivalente ao mesmo investimento de uma peneira plana vibratória. As telas planas requerem uma base mais alta, mas fazem um melhor uso de sua área total disponível para uma separação eficiente do HCF.

- 3) *Classificação por peneira de vento*: Para uma separação eficiente do HCF são necessárias partículas claramente moídas, que podem ser separadas turbulentamente umas das outras a uma velocidade de vento apropriada. Deve ser permitido sedimentar de acordo com sua forma, tamanho e densidade de grãos ou tamanho em uma câmara de decantação suficientemente grande. A melhor experiência operacional sempre foi com classificadores que não têm internos e apenas um mínimo de graus de liberdade manipuláveis. Classificadores pequenos e compactos, que foram adaptados, por exemplo, do processamento de resíduos de demolição, não mostram seletividade suficiente em relação às pequenas diferenças de densidade que são encontradas no HCF desejado. Ao peneirar, um grau de liberdade previamente determinado deve necessariamente ser fixado, ou seja, a faixa de tamanho do grão deve ser mantida o mais estreita possível através de uma peneirada eficiente de antemão para poder separar mais efetivamente as impurezas leves (HCF) das pesadas. Entretanto, o mercado oferece muitas inovações interessantes, mas todas elas têm uma coisa em comum: obedecem às leis da natureza! Portanto, em geral, se você quiser projetar, oferecer ou comprar equipamentos, primeiro tenha um olhar para os princípios físicos por trás. Evite equipamentos com efeitos combinados ou com interiores auxiliares adicionais (tambor separador, bicos, deflectores etc.). A carga de resíduos será submetida ao peneiramento que privilegia a separação por densidade a partir de câmaras amplas, gerando um CDR suficientemente limpo.
- 4) *Separação de metais*: Os ímãs são bem conhecidos e são frequentemente planejados em grande número. O que sempre surpreende é que eles são frequentemente instalados em um ângulo de 90° em relação à direção da esteira transportadora. Os ímãs extraem os metais ferromagnéticos normalmente de forma mais eficiente no ponto de sua ausência de peso em uma trajetória no final da correia transportadora. Uma calha guiará o metal para dentro do contêiner rolante. Os separadores de corrente devem ser sempre montados após ímãs, porque o ferro está perturbando o efeito separador.



- 5) *Classificação por separadores infravermelhos (NIR)*: A separação do PVC serve exclusivamente para reduzir o cloro ligado organicamente. Os compostos de cloro inorgânicos, como o sal de cozinha e decapagem, não podem ser detectados e removidos por meio de NIR durante o condicionamento dos resíduos. Portanto, um balanço de cloro e seu limiar de tolerância devem ser esclarecidos durante a avaliação técnica do forno de clínquer. É ideal se um bypass de cloro já estiver instalado ou planejado. Por meio do NIR, pelo menos o conteúdo de PVC será ainda mais reduzido, de modo que não haverá problemas com o TSR mais alto, apesar dos sais. Estas etapas devem ser esclarecidas previamente, pois, caso contrário, somente a diluição por resíduos industriais e comerciais é possível.

Figura 5 – Peneiramento por densidade



Fonte: Elaborada pelo autor (Baier, 2006).

- 6) *Fragmentadora fina*: Se qualquer papel, papelão, tecido etc. saturado por umidade sobreviveu a este processo a montante descrito nos itens 1 a 5, eles são agora triturados com outros componentes do CDR para um tamanho de partícula de SRF que é em geral <30 mm ou menor.



Um olhar mais profundo explica que todas as partículas de combustível têm que passar pela mesma sequência de secagem, pirólise, ignição e queima até que um dos reagentes, combustível ou oxigênio, seja consumido e determinará a forma e o comprimento da chama.

Portanto, é extremamente importante conhecer as condições no queimador da extremidade do forno ou queimador satélite adicional.

Embora o pó de carvão possa ser assumido como uniforme em termos de tamanho, densidade e forma, ele pode, portanto, ser descrito com um coeficiente de arrasto constante (valor  $c_w$ ). Mas a situação se torna diferente para as partículas de resíduos derivados de SRF, que consistem de componentes diferentes.

Na prática, isso significa que se as partículas em uma mistura:

- Têm uma densidade e forma de grão uniformes, será feita uma separação de acordo com o tamanho do grão

$$v_s \sim \sqrt[2]{\varnothing_{\text{particle}}}$$

- Mostram um tamanho e forma de grão uniformes, a separação é feita de acordo com sua densidade

$$v_s \sim \sqrt[2]{\rho_{\text{particle}}}$$

- Ou ter uma densidade e tamanho de grão uniformes, a segregação é feita de acordo com a forma do grão

$$v_s \sim \sqrt[2]{1/c_w}$$

Correspondente:

$v_s$  velocidade de afundamento m/s

$\varnothing_{\text{particle}}$  Diâmetro da partícula m

$\rho_{\text{particle}}$  Densidade da partícula t/m<sup>3</sup>

$c_w$  Coeficiente de arrasto de um corpo equivalente rotacionalmente simétrico

Infelizmente, as misturas de resíduos derivados de CDRs nem sempre seguirão esta percepção física, de modo que uma grande variedade de resíduos combustíveis de diferentes proveniências e qualidade de pré-processamento deve ser esperada. Após deixar a ponta do queimador, a mistura se dividirá em classes com as mesmas



propriedades de voo, mesmo que tenham tamanhos, formas e densidades de partículas diferentes.

Isto corresponde ao que acontecerá após deixar a ponta do queimador, já que todas as partículas de uma classe terão as mesmas propriedades aerodinâmicas de afundamento. A classificação analítica dessas misturas ajuda a determinar a composição do combustível e a qualidade do condicionamento. A peneiração analítica separará várias classes da mesma propriedade de afundamento e assim determinará a quantidade de frações em uma mistura e sua forma de grão dominante.

A fim de evitar plásticos encolhidos, que falsificarão os resultados, as amostras são previamente secas a aproximadamente 60 °C e completamente carregadas no classificador analítico com a menor velocidade de vento. A fração de luz obtida é equilibrada, a densidade e a forma das partículas também são determinadas. A fração pesada restante é reaplicada na próxima maior velocidade de afundamento. Este processo é repetido até que nenhum resíduo seja encontrado. O arrasto aerodinâmico é determinado a partir da forma e densidade do grão, e usado para determinar as trajetórias de voo.

Avaliando resultados da classificação analítica de dois graus diferentes de SRF, temos que um é alimentado ao queimador principal (MB) e o outro ao queimador satélite na posição das 6:00 horas. Dependendo da velocidade do ar de transporte no queimador principal (21 m/s) e no queimador satélite (45 m/s), as partículas recebem seu impulso quando deixam a ponta do queimador. Depois disso, as partículas tomam trajetórias diferentes e se espalham de acordo com sua massa, densidade e forma do grão. A espessura das trajetórias representa sua porcentagem da respectiva mistura SRF.

Os resultados teóricos dão uma boa indicação das trajetórias balísticas e das possíveis regiões de pouso, sem levar em conta os tempos reais de queima em voo. Na maioria dos casos, quando as partículas pesadas podem pousar no leito de clínquer após 1 segundo (no caso de já terem se queimado antes), a maior parte do enxame de partículas ainda está em suspensão. Sua conversão completa na chama pode ser esperada quando as partículas são secas, pirolisadas, inflamadas e queimadas.

Toda a classificação analítica, onde todas as classes são determinadas, preverá acumulações adicionais ou aumento de temperatura na entrada do forno ou dará parâmetros para ajustar o queimador. Regularmente verificado na recepção das plantas, isto já levou a um *retrofit* ou modificação nas plantas de pré-tratamento,



instalando um classificador adequado com uma velocidade de separação abaixo de 10 m/s em sua produção de SRF.

Figura 6 – Peneira de vento com velocidade inferior a 10 m/s



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Após o queimador ter sido ajustado aos dados operacionais adequados com base nestes resultados de classificação, a rotina de aceitação diária só precisa determinar o conteúdo de material pesado acordado no CDR em cada entrega. A amostra representativa é retirada do caminhão na chegada à fábrica, e a porcentagem de fração pesada é verificada apenas na velocidade do vento especificada. Assim, não há necessidade criar especificações onde há dimensões arbitrárias ou porcentagens limitadas de partículas 2D ou 3D.



Por outro lado, o produtor de CDR está agora em condições de otimizar sua estratégia com relação à aquisição de resíduos comerciais e industriais (C&I). No caso de difícil acesso aos resíduos C&I, será necessário instalar uma peneira de vento adequada com velocidade inferior a 10 m/s para linhas de produção de SRF.

Como estas etapas influenciam o perfil de temperatura e o processo de formação do clínquer, grandes superfícies de combustão são obrigatórias para uma conversão adequada do SRF.

Alternativamente, é possível utilizar o chamado RocketMill, que é capaz de produzir SRF de granulação fina com uma grande superfície e bom comportamento de queima. O CDR alimentado, respectivamente HCF granulado grosso também pode ser alimentado, será triturado em uma câmara por meio de correntes de impacto rotativas. Estas correntes aumentam a superfície da partícula e cedem dinamicamente aos contaminantes duros no impacto. Como elas não são necessariamente trituradas, o desgaste é significativamente menor do que em moinhos com o princípio rotor-estator.

Os flocos leves SRF resultantes deixam o moinho com o fluxo de ar para cima, enquanto as partículas pesadas são descarregadas através de uma aba na parte inferior. Devido ao aumento da área de superfície das partículas e ao calor friccional, aproximadamente 10% da umidade introduzida também evapora.

Se o teor de umidade ainda for inaceitavelmente alto, o combustível alternativo deve ser seco na planta de condicionamento ou no lado do forno com o calor residual potencialmente disponível, o que também tem que ser esclarecido durante a avaliação técnica, previamente. Em ambos os casos, deve ser dada atenção especial ao gerenciamento dos vapores, respectivamente seu condensado.

A estocagem é um tópico sensível que é muitas vezes considerado como “dinheiro morto”. Entretanto, se quisermos aumentar o TSR através de mais coprocessamento, observamos cada vez mais que o forno perde sua tolerância e desempenho quando as variações de qualidade se tornam massivas. Isto não deixa de acontecer com altas taxas de entrada e falta de capacidade de homogeneização, já que vários fornecedores são normalmente necessários para atender à sua enorme demanda. Como resultado, você terá uma grande variedade de qualidades de combustível entregues a partir de uma grande variedade de plantas de condicionamento, e o fornecimento torna-se um desafio logístico, sem mencionar uma operação segura do forno.



Consequentemente, as estações de ancoragem com reboques de piso móvel originalmente instalados para “fins experimentais” estão se tornando insuficientes e devem ser substituídas por instalações de armazenamento com “filtro policial” adicional e capacidades de homogeneização suficientes.

## **7 VAMOS FALAR DE DINHEIRO**

Uma afirmação popular que ouvimos frequentemente é que o fornecedor assume que a planta de pré-tratamento pode ser refinanciada pela venda de energia e cinzas que substituirão os combustíveis primários e as matérias-primas.

No caso, vamos começar com o tema das matérias-primas artificiais, primeiro é preciso esclarecer que a composição dessa ARM corresponde à composição de sua matéria-prima de minha própria pedreira. Similar à formulação de misturas CDR, isto só pode ser feito com uma mistura de conteúdo bem especificado e de qualidade controlada das frações minerais.

A experiência anterior (GEODUR) mostra que isto é de fato viável com certos resíduos minerais previamente analisados. Uma parcela mais aleatória de cinzas com uma composição aleatória não trará nenhuma contribuição adicional na redução de recursos que se tornaria economicamente vantajosa. Pelo contrário, deveria ser construída uma capacidade adicional para compensar estas cinzas ausentes e sua composição. Embora, a questão da correção das cinzas também se tornará mais importante à medida que o TSR continuar a aumentar.

Em princípio, a indústria de cimento, como grande consumidor global de energia, sempre compra ao preço mais barato da energia, enquanto a indústria de gestão de resíduos é um concorrente local que quer se livrar de seus CDRs combustíveis como uma “fonte de energia”.

A descarbonização do calcário para produzir clínquer de cimento e o permutador de CO<sub>2</sub> são os dois fatores de custo e as principais razões para o uso de combustíveis e matérias-primas alternativas. Dependendo da tecnologia, o processo de queima do clínquer varia de processo úmido a processo seco com sua demanda específica de energia.

O maior benefício da CDR é a economia dos custos de energia primária, que são responsáveis por cerca de 26% dos custos de fabricação. Além de modernizar o equipamento da planta utilizando



tecnologias altamente eficientes como o cooler, o uso de combustíveis neutros em CO<sub>2</sub> oferece também uma opção rápida para economizar custos. Consequentemente, madeira seca e pré-processada, papel, borracha natural, têxteis etc. são de maior interesse no que diz respeito à sua neutralidade, mas seus combustíveis gerados devem corresponder obrigatoriamente à demanda de energia do processo térmico em seu ponto de alimentação.

Com relação ao financiamento de toda a gestão de resíduos em muitos países, as autoridades cobram a taxa de eliminação por uma certa porcentagem do consumo de, por exemplo, água, gás ou impostos imobiliários e transferem a responsabilidade, inclusive o orçamento, para empresas privadas. Embora este orçamento financeiro seja parcialmente insuficiente para cobrir todos os custos, o risco de corrupção é alto devido à falta de aplicação da lei e controle rigoroso.

Por exemplo, na Europa, o serviço de eliminação é adjudicado por licitação a empresas obrigatoriamente certificadas pelo Estado, que são controladas politicamente e com base nas normas legais. A taxa de eliminação de resíduos deve seguir o princípio do poluidor-pagador, que tem pelo menos duas funções principais: primeiro, incentivar as pessoas a reduzir a quantidade de resíduos que produzem, economizando seu próprio dinheiro, e segundo, cobrir todos os custos de uma eliminação de resíduos confiável e em conformidade com a lei.

Caso não seja possível evitar a coleta, transporte, gestão de materiais, triagem, acondicionamento, reciclagem até o monitoramento da qualidade, uso térmico, incineração de resíduos ou aterros sanitários, todos os objetos de coleta, transporte, gestão de materiais, triagem, condicionamento, reciclagem são incluídos nesta taxa de descarte.

A fim de obter números confiáveis, a situação atual é revista com frequência como parte de um plano de gerenciamento de resíduos em todo o estado. Isto inclui a determinação do número de habitantes, a quantidade de resíduos *per capita* e o tipo e composição dos resíduos.

Portanto, o produtor de resíduos é o proprietário responsável e tem que cobrir todos os custos. As taxas estão diretamente ligadas a cada coleta e caixote do lixo individual, o que significa que você paga dependendo das exigências legais e das necessidades anuais.



A seguir, diferentes cenários são utilizados para mostrar quais oportunidades e possibilidades econômicas existem para conduzir um projeto ao sucesso. As condições gerais são calculadas em euros por tonelada e assumidas da seguinte forma:

- ◆ Do lado da indústria de gestão de resíduos:
  - Uma estação de tratamento mecânico-biológico (TMB) é projetada para uma capacidade anual de 180.000 t de resíduos sólidos urbanos (RSU);
  - A compostagem não é levada em conta para a primeira;
  - O período de depreciação da planta é de vinte anos para o edifício, sete anos para as instalações fixas e três anos para os equipamentos móveis.
- ◆ Do lado da fábrica de cimento exploradora são levadas em conta, de forma exemplar:
  - Economia de energia primária;
  - Economia de CO<sub>2</sub>-certificados relacionados com a porção não fóssil da biomassa;
  - Perda térmica devido à entrada de água;
  - Valor de CDR ou preço de compra;
  - Novos investimentos para o manejo de CDR;
  - Gastos operacionais adicionais, por exemplo, devido ao laboratório, NO<sub>x</sub>-redução, revestimento do forno, perda de energia devido à umidade, operação de bypass etc.

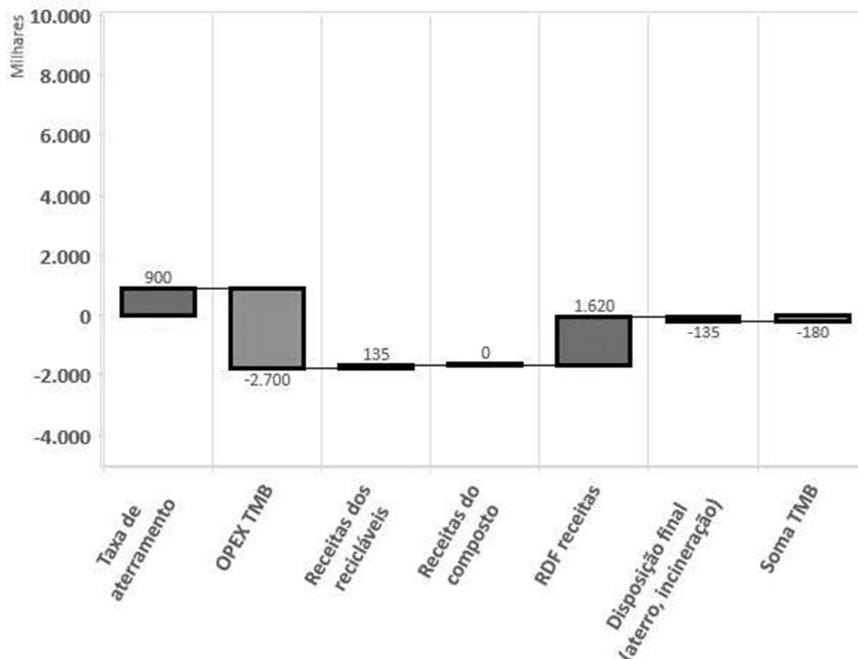
No primeiro caso, que é a situação inicial atual na maioria dos casos, o princípio do poluidor-pagador não se aplica, ou seja, a taxa de disposição permanece em seu nível baixo conhecido. É instalada uma tecnologia TMB simples que produzirá um combustível de baixo grau com alto teor de umidade e baixo valor calórico, mas um alto teor de biomassa.

A fim de estabelecer um sistema confiável de gerenciamento de resíduos, a fábrica de cimento está disposta a subsidiar o sistema através da compra de CDR, mesmo que sua qualidade esteja no nível mais baixo tolerável.

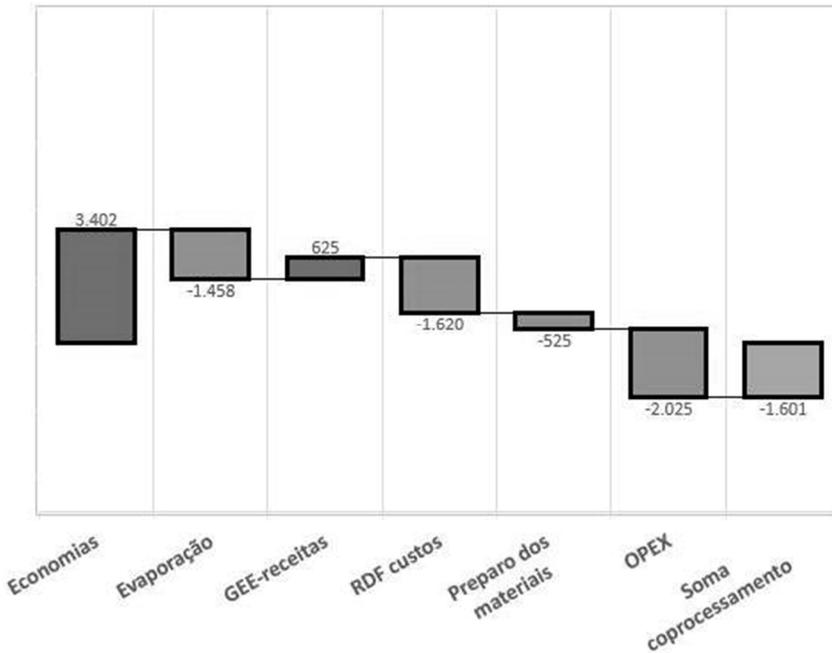
Uma rápida revisão dos cálculos mostra que este projeto de combustível alternativo a partir de uma planta TMB, enfrentará desafios para garantir sua viabilidade econômica, mesmo que a fábrica de cimento se disponha a comprar um combustível de baixa qualidade (RDF).



Tabela 5 – Análise de viabilidade econômico-financeira de plantas TMB para geração de CDR – Cenário 1



TMB			t/y	€/t	€/y
		Taxa de aterramento	180.000	5 €	900.000 €
		OPEX TMB	180.000	-15 €	-2.700.000 €
Valor	5%	Receitas dos recicláveis	9.000	15 €	135.000 €
Valor	35%	Receitas do composto	31.500	0 €	0 €
	45%	RDF receitas	81.000	20 €	1.620.000 €
		Disposição final (aterro, incineração)	27.000	-5 €	-135.000 €
		<b>Soma TMB</b>		<b>-1 €</b>	<b>-180.000 €</b>



Fábrica de cimento			t/y	€/t	€/y
Coprocessamento	70%	Economias	56.700	60 €	3.402.000 €
Perda térmica	30%	Evaporação	24.300	-60 €	-1.458.000 €
Frações de biomassa	25%	GEE-receitas	13.892	45 €	625.118 €
		RDF custos	81.000	-20 €	-1.620.000 €
1.500.000 €	2,0	Preparo dos materiais	81.000	-9 €	-525.000 €
		OPEX	81.000	-25 €	-2.025.000 €
		<b>Soma coprocessamento</b>		<b>-28 €</b>	<b>-1.600.883 €</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



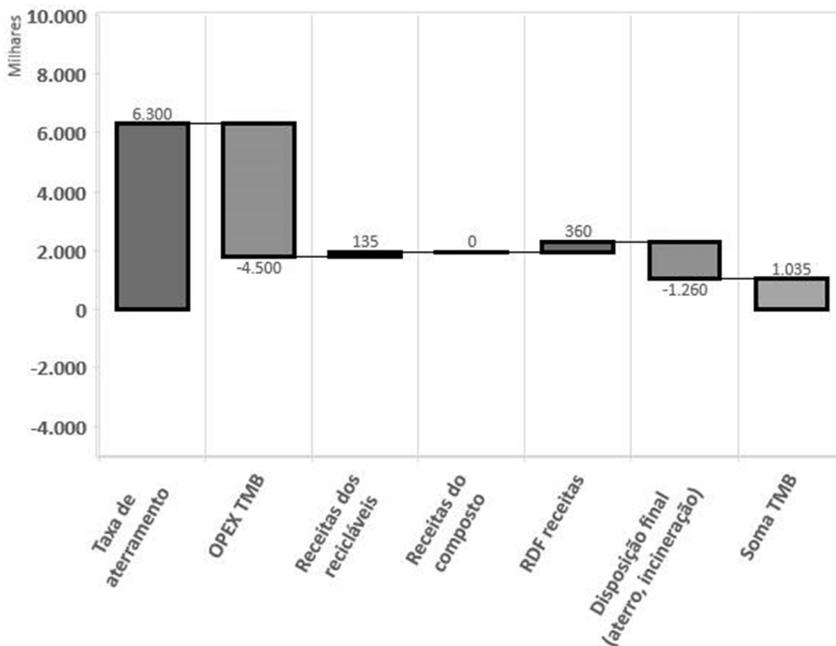
Os danos causados pela introdução de umidade no processo térmico pelo CDR maltratado e os custos iniciais não podem ser compensados pela economia em evitar o combustível fóssil e sua redução nas permissões de GEE. O prejuízo financeiro é cerca de nove vezes maior no lado da fábrica de cimento do que no lado do condicionador.

Neste ponto, deve ser claramente declarado que a viabilidade econômica de tal projeto depende essencialmente da aplicação do quadro legal e da certeza das taxas de eliminação, que devem cobrir todos os custos.

Sob as condições contratuais existentes e posterior subvenção pela fábrica de cimento, o TMB deverá ser atualizado para produzir CDR que se adapte mais ao processo.

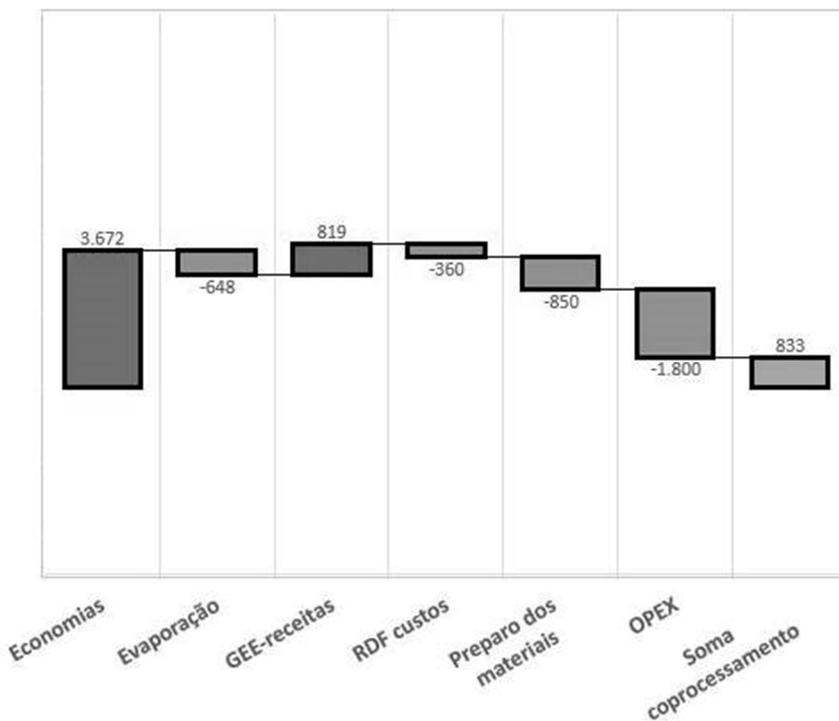
Por um lado, a atualização do TMB irá gerar uma melhor qualidade de CDR com um maior conteúdo de biomassa e uma menor introdução de umidade, e conseqüentemente uma maior taxa de substituição térmica na fábrica de cimento. Suas perdas serão reduzidas pela metade, mas ainda assim permanecerão negativas.

Tabela 6 – Análise de viabilidade econômico-financeira de plantas TMB para geração de CDR – Cenário 2





TMB			t/y	€/t	€/y
		Taxa de aterramento	180.000	35 €	6.300.000 €
		OPEX TMB	180.000	-25 €	-4.500.000 €
Valor	5%	Receitas dos recicláveis	9.000	15 €	135.000 €
Valor	35%	Receitas do composto	31.500	0 €	0 €
	40%	RDF receitas	72.000	5 €	360.000 €
		Disposição final (aterro, incineração)	36.000	-35 €	-1.260.000 €
		<b>Soma TMB</b>		<b>6 €</b>	<b>1.035.000 €</b>





<b>Fábrica de cimento</b>			<b>t/y</b>	<b>€/t</b>	<b>€/y</b>
Coprocesamento	85%	Economias	61.200	60 €	3.672.000 €
Perda térmica	15%	Evaporação	10.800	-60 €	-648.000 €
Frações de biomassa	30%	GEE-receitas	18.207	45 €	819.315 €
		RDF custos	72.000	-5 €	-360.000 €
3.000.000 €	3,0	Preparo dos materiais	72.000	-14 €	-850.000 €
		OPEX	72.000	-25 €	-1.800.000 €
		<b>Soma coprocessamento</b>		<b>14 €</b>	<b>833.315 €</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Por outro lado, os custos no TMB aumentarão até seis vezes em relação a antes da reconstrução e o colocarão de joelhos.

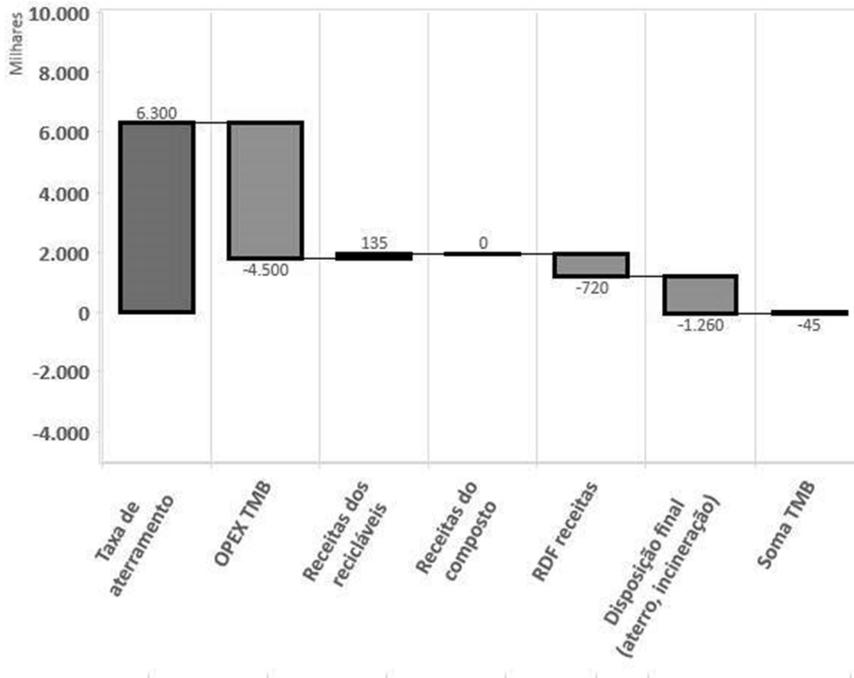
Se um Estado não permite a importação de resíduos estrangeiros (a qualidade dos CDR muitas vezes não permite qualquer outra designação), ele tem que aceitar que as taxas de eliminação terão que ser aumentadas significativamente!

Além disso, neste exemplo teórico, a fábrica de cimento deverá renunciar a uma taxa de portões e de subsidiar os custos do TMB a fim de equilibrar o cálculo para ambos os lados.

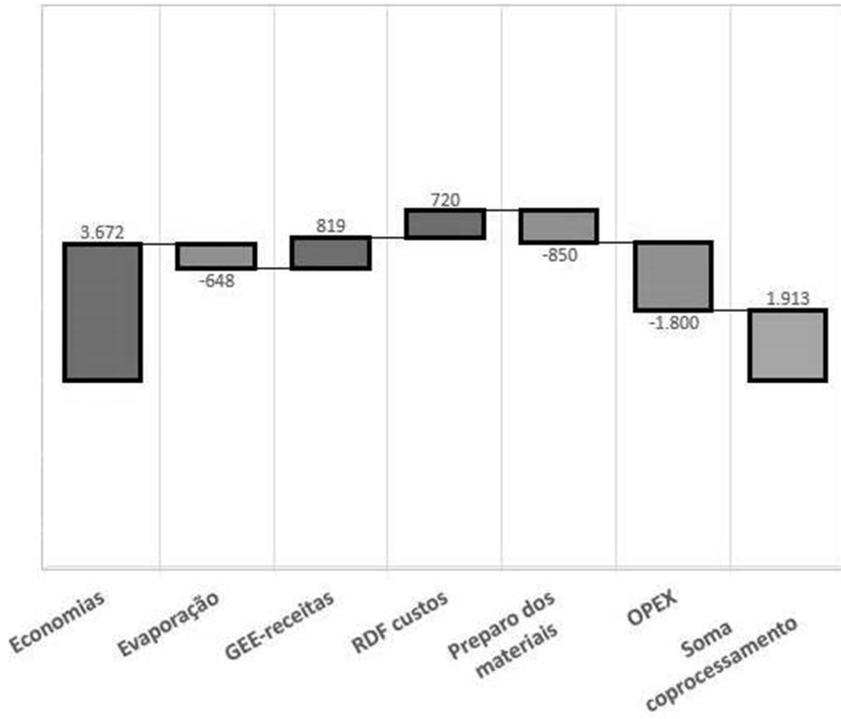
No entanto, a rentabilidade financeira resultante será muito apertada para que ambos os parceiros possam cobrir até mesmo as menores despesas, como reparos adicionais ou investimentos para um laboratório suficientemente equipado ou a operação de um aterro sanitário.



Tabela 7 – Análise de viabilidade econômico-financeira de plantas TMB para geração de CDR – Cenário 3



TMB			t/y	€/t	€/y
		Taxa de aterramento	180.000	35 €	6.300.000 €
		OPEX TMB	180.000	-25 €	-4.500.000 €
Valor	5%	Receitas dos recicláveis	9.000	15 €	135.000 €
Valor	35%	Receitas do composto	31.500	0 €	0 €
	40%	RDF receitas	72.000	-10 €	-720.000 €
		Disposição final (aterro, incineração)	36.000	-35 €	-1.260.000 €
		<b>Soma TMB</b>		<b>-0 €</b>	<b>-45.000 €</b>



Fábrica de cimento			t/y	€/t	€/y
Coprocessamento		Economias	61.200	60 €	3.672.000 €
Perda térmica		Evaporação	10.800	-60 €	-648.000 €
Frações de biomassa		GEE-receitas	18.207	45 €	819.315 €
		RDF custos	72.000	10 €	720.000 €
3.000.000 €		Preparo dos materiais	72.000	-14 €	-850.000 €
		OPEX	72.000	-25 €	-1.800.000 €
		<b>Soma coprocessamento</b>		<b>31 €</b>	<b>1.913.315 €</b>

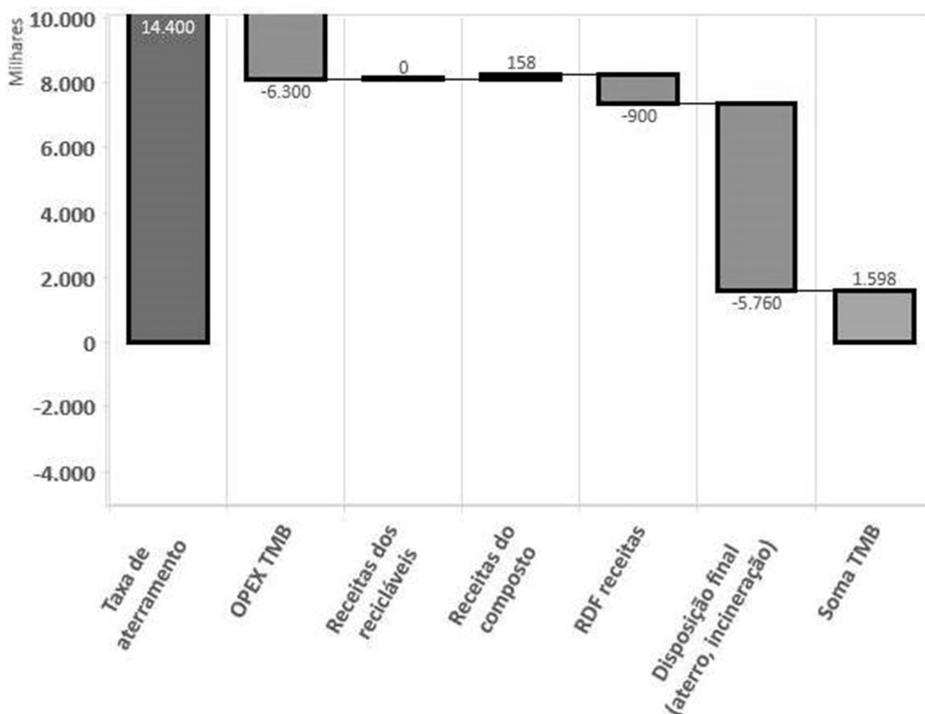
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



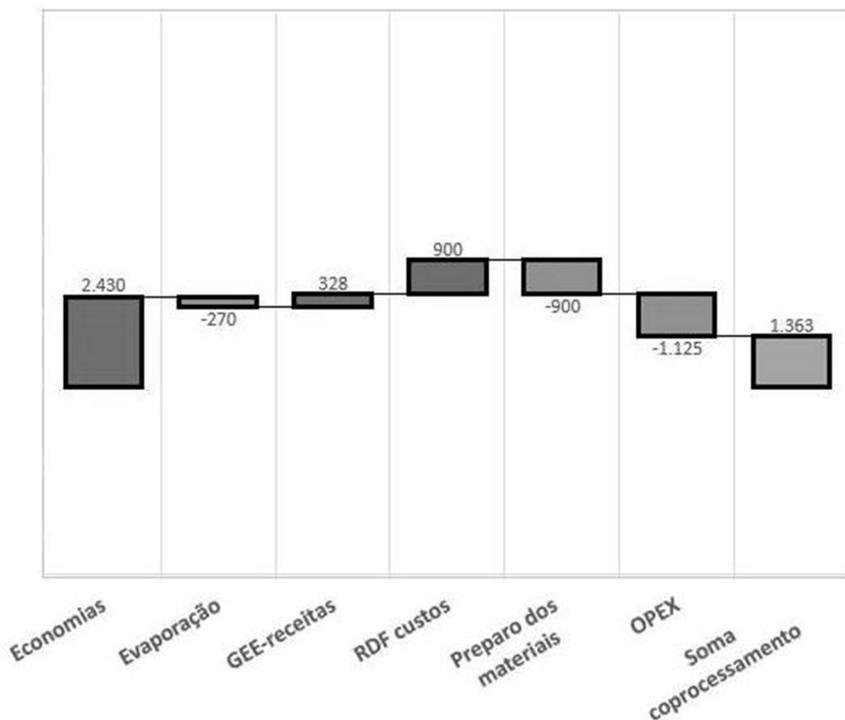
Finalmente, um TMB é uma planta de divisão, da qual saem vários fluxos para reciclagem, compostagem e combustíveis alternativos personalizados. Mas também os não recicláveis e as impurezas têm que ser descartados de forma segura em um aterro sanitário ou mesmo em um incinerador. Estes investimentos também têm que ser cobertos pelo princípio do poluidor-pagador.

Neste último exemplo, o princípio do poluidor-pagador é válido, e a taxa de eliminação apropriada cobrirá todo o investimento em uma tecnologia adequada para produzir CDR com qualidade. A fábrica de cimento ampliará suas instalações de recepção e armazenamento para garantir um fornecimento contínuo e receberá uma tarifa pelo serviço de processamento para compensar seus maiores investimentos, como a tecnologia SCR- ou SNCR- para reduzir NO<sub>x</sub> -emissões

Tabela 8 – Análise de viabilidade econômico-financeira de plantas TMB para geração de CDR – Cenário 4



TMB			t/y	€/t	€/y
		Taxa de aterramento	180.000	80 €	14.400.000 €
		OPEX TMB	180.000	-35 €	-6.300.000 €
Valor	0%	Receitas dos recicláveis	-	15 €	0 €
Valor	35%	Receitas do composto	31.500	5 €	157.500 €
	25%	RDF receitas	45.000	-20 €	-900.000 €
		Disposição final (aterro, incineração)	72.000	-80 €	-5.760.000 €
		<b>Soma TMB</b>		<b>9 €</b>	<b>1.597.500 €</b>





<b>Fábrica de cimento</b>			<b>t/y</b>	<b>€/t</b>	<b>€/y</b>
Coprocesamento	90%	Economias	40.500	60 €	2.430.000 €
Perda térmica	10%	Evaporação	4.500	-60 €	-270.000 €
Frações de biomassa	18%	GEE-receitas	7.290	45 €	328.050 €
		RDF custos	45.000	20 €	900.000 €
3.000.000 €	3,0	Preparo dos materiais	45.000	-22 €	-900.000 €
		OPEX	45.000	-25 €	-1.125.000 €
		<b>Soma coprocessamento</b>		<b>34 €</b>	<b>1.363.050 €</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Finalmente, uma usina WtE adicional para produzir energia pode completar este sistema para garantir uma cooperação pública e privada para uma gestão integradora, segura e confiável dos resíduos.

## 8 COMO REDIGIR UM CONTRATO DE FORNECIMENTO

Os períodos de contrato não são determinados pela fábrica de cimento, mas pelo acesso confiável aos resíduos, incluindo suas taxas de descarte. Uma fábrica de cimento não está interessada em ser fornecida com fracas qualidades de CDR durante um longo período de contrato, mas sim com qualidade e sob demanda.

Mais tarde, quando o TMB estiver em operação e a fábrica de cimento for continuamente fornecida, estas qualidades devem atender à especificação acordada do processo de produção de clínquer e serão, também, a base para seu faturamento frequente. Os termos destes contratos de compra são geralmente negociados individualmente e monitorados por inspeções regulares na recepção do lado da fábrica de cimento. A propósito, este modelo de faturamento pode ser estendido ou encurtado conforme desejado, de acordo com o sistema de bônus/malus acordado.

Isto também mostra muito claramente que vale sempre a pena avaliar com antecedência a composição e as propriedades dos resíduos de entrada pretendidos e projetar a planta de processamento de acordo, o que tem um enorme impacto sobre o investimento, a fim



de produzir qualidades CDR personalizadas para o calcinador ou SRF para o queimador principal.

A garantia de qualidade de acordo com as normas definidas fornecerá os parâmetros necessários para a verificação cruzada. Para este fim, a mediana estatística e o percentil 80 provaram ser úteis por meios que ambos os lados podem faturar em um determinado ritmo.

A seguir, mostra-se quando vários parâmetros foram acordados, os quais são analisados regularmente durante o período de entrega. Finalmente, estes são definidos com antecedência como base e tolerância para que um acordo seja baseado nestes resultados ou em seu desvio.

Nos exemplos 1 e 2, quatro parâmetros típicos (valor calorífico, e o conteúdo de cloro, umidade e biomassa) são identificados por esta fábrica de cimento individual. Esta base de faturamento pode ser ampliada ou encurtada conforme desejado para contratos de fornecimento individuais.

Aqui o **Exemplo 1** mostra as consequências se a especificação prometida não for cumprida. Entretanto, o **Exemplo 2** também mostra quanto lucro pode ser obtido se o sistema for projetado e operado, adequadamente.

Tabela 9 – Demonstrativo dos Exemplos 1 e 2.

		<b>poder calorífico (inferior)</b>		
		<16 MJ/kg	16 MJ/kg	>16 MJ/kg
Fator de correção	por t por 1 MJ/kg	- 2,00 \$	0,00 \$	1,00 \$

		<b>presença de cloro</b>		
		< 0,9%	0,90%	> 0,9%
Fator de correção	por t por 0,1%	3,00 €	0,00 \$	-3,00 \$

		<b>presença de umidade</b>		
		< 20%	20%	> 20%
Fator de correção	por t por %	1,50 \$	0,00 \$	-1,50 \$



		presença de biomassa		
Concentração		< 30%	30%	>30%
Fator de correção	por t por %	-2,00 \$	5,00 \$	2,00 \$

**10,00 \$**  
 Valor por tonelada  
**(planta específica contrato de fornecimento)**  
 Os parâmetros são determinados continuamente de acordo com um padrão previamente definido.

Exemplo 1	Valor mediano mensal	Desvio	
Poder calorífico MJ/kg	17,32 MJ/kg	= (17,32 MJ/kg - 16 MJ/kg) * 1,00 \$	+2,64 \$/t
Cloro	1,14%	= (0,9% - 1,14%)/0,1 × 3,00 \$	-7,20 \$/t
Umidade	30,0%	= (20,0% - 30,0%) × 1,50 \$	-15,00 €/t
Presença de orgânicos	31,8%	= (31,8% - 30,0%) × 2,00 \$	+8,60 \$/t
<b>Preço de compra por tonelada por planta:</b>			<b>-0,96 \$/t</b>

Exemplo 2	Valor mediano mensal	Desvio	
Poder calorífico MJ/kg	22,00 MJ/kg	= (22 MJ/kg - 16 MJ/kg) × 1,00 \$	+6,00 \$/t
Cloro	0,50%	= (0,9% - 0,5%)/0,1 × 3,00 \$	+12,00 \$/t
Umidade	12,0%	= (20,0% - 12,0%) × 1,50 \$	+12,00 \$/t
Presença de orgânicos	17,5%	= (17,5% - 30,0%) × 2,00 \$	-25,00 \$/t
<b>Preço de compra por tonelada por planta:</b>			<b>+15,00 \$/t</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



E isto também mostra muito claramente que vale sempre a pena avaliar a composição dos resíduos e suas propriedades com precisão prévia e projetar a planta de processamento para isso, ou seja, investir para produzir qualidades sob medida e garantir sua qualidade e fornecimento contínuo.

Os produtores de CDR serão inundados com plástico de várias origens e terão que refinar a operação com um mínimo de taxas de descarte. Eles tentam gerar receitas adicionais através da triagem dos recicláveis, mas isso deve ser empurrado para um mercado global saturado e só podem acomodar seus CDRs (pouco atraentes) aumentando as taxas de portões como pagamento adicional à fábrica de cimento.

As empresas acreditam em fortes receitas pela reciclagem, mas deve-se não esquecer a volatilidade desse mercado. Neste sentido, a receita geral dependerá fundamentalmente dos valores pagos pela prestação de serviço de processamento de RSU com o intuito de gerar CDR, podendo esta ser melhorada quando do advento de receitas acessórias oriundas da remuneração do CDR pelas cimenteiras.

Isto só funciona em países onde o princípio do poluidor-pagador é válido e o poluidor financiará toda a cadeia do processo desde a coleta até a disposição final e, ainda, quando a tarifa de processamento já inclui a despesa com eventuais aterramentos de rejeitos.

De fato, uma tarefa política gigantesca e um problema sério: as etilas, um produto residual da indústria de petróleo e gás, são a base para novos plásticos e tornam-se mais baratos para a indústria de processamento de plásticos quanto mais plásticos reciclarmos ou banirmos para lidar com a crescente inundação de plásticos, que permanecerão flutuando nos mares, despejados de forma selvagem e queimados sem controle.

Como parte da solução, os operadores da fábrica estão atualizando seu piroprocessamento para o mais recente e mais eficiente padrão tecnológico. Eles irão otimizar todo o processo de produção e instalar sistemas de desvio de cloro, dispositivos de recuperação de calor residual ou usinas de geração de energia para produção de eletricidade, e secadores e processamento fino para sintonia de baixas qualidades de CDR. Além disso, há investimentos adicionais em filtros de última geração, ventiladores de identificação maiores e tecnologia apropriada de desnitrificação, dos quais a SNCR ou SCR de alta ou baixa poeira estão agora em operação com sucesso. Queimadores baixos  $\text{NO}_x$ , sistemas automáticos de laboratório



e especialistas e, a longo prazo, acesso ou geração de hidrogênio servirão a um processo de produção de custo otimizado e ambientalmente amigável.

Vários fabricantes de queimadores, por exemplo, oferecem os chamados queimadores de baixo NO<sub>x</sub> ou multicomcombustível para operação de fornos rotativos de 10 MW a 300 MW. Dutos separados permitem velocidades separadas do ar de transporte e bicos flexíveis permitem diferentes ângulos de ataque para estender ou encurtar as trajetórias até a queima.

Aqui, um tamanho de partícula adaptado e uma mistura intensiva de combustível e ar devem garantir uma combustão rápida e completa e encurtar o tempo de residência na zona de reação do forno rotativo. Este comportamento é particularmente importante para misturas de diferentes combustíveis. Como nem sempre é este o caso, alguns operadores de fornos rotativos adicionaram oxigênio para encurtar a sequência de conversão, o que finalmente resulta em uma chama mais quente.

Devido ao teor de nitrogênio no ar de combustão, forma-se o NO<sub>x</sub> térmico. Os combustíveis alternativos derivados de resíduos geralmente contêm quantidades residuais de água, o que contribui para o resfriamento por chama e, portanto, para a redução do NO<sub>x</sub>, assim como o CO que ocorre em locais reage também com o NO<sub>x</sub> em uma reação e eliminação complexas. O NO<sub>x</sub> restante é reduzido nos sistemas de NO<sub>x</sub> correspondentes por meio de amoníaco diretamente ou em catalisadores. Devido à temperatura do gás requerida de 2000 °C, valores limitados de <0,1 mg/°C de NO<sub>x</sub> devem ser respeitados, hoje em dia.

Conseqüentemente, a alteração da temperatura do gás de formação de clínquer levará a uma mudança para uma mineralogia rica em minerais e reduzirá também as emissões de CO<sub>2</sub>. Finalmente, a própria composição do cimento será alterada pela adição de xisto queimado, cinzas volantes hidráulicas e argila temperada ou escória ativada para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> -emissão por tonelada de cimento.

A curto prazo, a única opção é otimizar a alimentação instável e melhorar as más qualidades de FA ou instalar câmaras de pré-combustão adicionais de boa natureza como HotDisc, PREPOL ou PyroRotor.

O sistema inteiro só funciona de forma sustentável e em benefício da sociedade se ambos os lados estiverem cientes do contexto e das conseqüências.



Modelos de contrato mais detalhados podem ser encontrados em WLTP (2019) e no Directional Compass: Alternative Fuels.

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reciclagem de materiais e a recuperação energética poupam recursos, reduz a poluição, restringe a ocupação de solos para disposição final, cria postos de trabalho, contribui para um desenvolvimento sustentável e para um ambiente melhor, além de mitigar as mudanças climáticas.

Neste contexto, a quantidade de resíduos gerados por si só já justifica o emprego de tecnologias para sua valorização. Todavia, a tomada de decisão deverá estar embasada não apenas no conhecimento qualitativo e quantitativo da matéria-prima, mas, sobretudo, no potencial do mercado consumidor dos subprodutos.

Dessa forma, apesar de lógico, o mercado tem cometido sérias gafes no que diz respeito ao potencial de geração de CDR. Ou seja, a geração de CDR deve estar diretamente relacionada com o potencial de consumo pela cimenteira e sua disposição em remunerar este recurso secundário.

Isto posto temos ainda que há um mercado global muito promissor para o CDR, mas deve-se ter em mente que esse mercado depende muito da capacidade de garantir uma qualidade adequada e constante para cada tecnologia de recuperação térmica, algo desafiador devido à alta heterogeneidade e carga poluente dos RSU transformados em CDR.

## REFERÊNCIAS

PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Directiva 2000/76/CE**, de 04 de dezembro de 2000, relativa à incineração de resíduos. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f735dd50-bee0-43e5-aad7-f6387270dcb9/language-pt>. Acesso em: 12 out. 2022.

THYSSEN KRUPP Industrial Solutions. prepol® SC – step combustor for waste utilization in cement plants. [2022]. Disponível em: <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/products-and-services/cement-plants-clinker-production-preheating/prepol-sc-step-combustor>. Acesso em: 12 out. 2022.

WLTP – White Label-Tandem Projects UG. **Directional Compass: Alternative Fuels**. Pre-processing of non-hazardous solid waste to customized alternative fuels and its thermal use. [Handbook for Project Managers]. 2020. Disponível em: <https://wltp.eu/activities/>. Acesso em: 12 out. 2022.

WLTP – White Label-Tandem Projects UG. **Fields of activities**. 2019. Disponível em: <https://wltp.eu/activities/>. Acesso em: 12 out. 2022.





# PLÁSTICO (E MICROPLÁSTICO) NO MEIO AMBIENTE: IMPACTOS E DESAFIOS PARA SUA GESTÃO

## *PLASTIC (AND MICROPLASTIC) IN THE ENVIRONMENT: IMPACTS AND CHALLENGES FOR ITS MANAGEMENT*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

NEVES, Charles Vieira; GAYLARDE, Christine Claire; BAPTISTA NETO, José Antônio; ALMEIDA, Marcelo Pompermayer de; POMPERMAYER, Fabiana Cunha Leão; VIEIRA, Khauê de Silva; FONSECA, Estefan Monteiro da. Plástico (e microplástico) no meio ambiente: impactos e desafios para sua gestão. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Charles Vieira Neves**

Doutorando em Geociências pelo Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense (DOT/UFF).

E-mail: contato@charlesneves.com.br

### **Christine Claire Gaylarde**

PhD em Biotecnologia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Pós-Doutora pela Cranfield University. Departamento de Microbiologia e Biologia Vegetal, Oklahoma University, Norman, Oklahoma, USA.

E-mail: cgaylarde@gmail.com

### **José Antônio Baptista Neto**

PhD em Geociências pela Queen's University, Belfast.

E-mail: jabneto@id.uff.br

### **Marcelo Pompermayer de Almeida**

Doutorando em Geociências pelo Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense (DOT/UFF).

E-mail: marcelo@valorainova.com.br

### **Fabiana Cunha Leão Pompermayer**

Doutora em Bioética pelo Programa de Pós-Graduação em Bioética Ética Aplicada e Saúde Coletiva (PPGBIOS).

E-mail: fabiana.educato@gmail.com

**Khauê de Silva Vieira**

Doutor em Geociências pelo Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense (DOT/UFF).

E-mail: kvieira87@gmail.com

**Estefan Monteiro da Fonseca**

Doutor em Geologia e Geofísica Marinha pelo Laboratório de Geologia Marinha / Universidade Federal Fluminense (LAGEMAR/UFF) / Queen's University, Belfast. Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Universidade Federal Fluminense (DOT/UFF).

E-mail: oceano25@hotmail.com

**RESUMO**

A existência onipresente de plástico, nas suas mais diversas formas, resultou no surgimento de preocupações relativas aos potenciais riscos e impactos no meio ambiente global. Questões críticas recentes, especialmente ligadas ao subproduto chamado de micro ou nanoplastico, em ecossistemas aquáticos, têm chamado a atenção da comunidade científica global. Diversos estudos registraram sinais de biodisponibilidade e resultantes efeitos deletérios na biota, em diferentes níveis tróficos, incluindo os seres humanos. Conseqüentemente, o conhecimento atual sobre plástico e as partículas resultantes de sua degradação e respectivos impactos potenciais está crescendo proporcionalmente. Apesar disso, há uma grande falta de integração do conhecimento obtido em ensaios de laboratório e levantamentos de campo. A presente revisão busca reunir informações que possam dar uma ideia mais precisa da situação atual e dos desafios futuros a serem enfrentados na gestão desta considerada "nova" classe de resíduos sólidos.

Palavras-chave: Poluição. Microplástico. Impacto Ambiental. Contaminantes Orgânicos. Saúde Humana.

**ABSTRACT**

The ubiquitous existence of plastic microparticles has resulted in concerns about the potential risks and impacts on the global environment, especially aquatic ecosystems, that they may cause. Several studies have recorded signs of bioavailability and resulting deleterious effects on biota at different trophic levels, including humans. Consequently, current knowledge about plastic microparticles and the potential impact on the environment is growing rapidly. Despite this, there is a great lack of integration of knowledge obtained in laboratory tests and field research. This review seeks to gather information that can give a more accurate idea of the current situation and future challenges to be faced in the management of this considered "new" class of solid waste.

Keywords: Pollution. Microplastic. Environmental impact. Organic Contaminants. Human health.



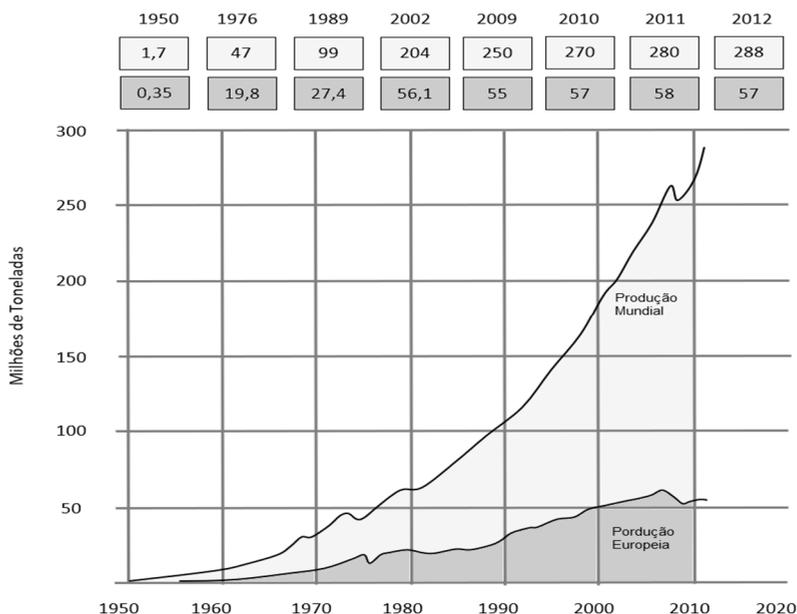
# 1 INTRODUÇÃO

Tendo sido criado no início do século passado, a produção da matriz plástica registrou um desenvolvimento acelerado a partir da década de 1920. Esta matéria-prima, relativamente nova, se comparada a outras como o vidro e o papel, passou a compor grande parte dos nossos utensílios do dia a dia. Atualmente, 400 milhões de toneladas de plástico são produzidas por ano globalmente e apenas 9% disso é reciclado (Geyer, 2020).

As matrizes plásticas compõem um grupo de compostos polímeros sintéticos produzidos a partir de hidrocarbonetos, aos quais são adicionados diversos produtos químicos para definir as propriedades finais do produto, como elasticidade, cor, resistência ao crescimento microbiano entre outros. Atualmente, os maiores produtores de plásticos mundiais são EUA, China, Índia e Brasil, ao mesmo tempo que os maiores exportadores são EUA, Japão, Alemanha e Reino Unido.

O caráter recalcitrante apresentado pelos polímeros, antes encarado como uma característica positiva, agora é considerado um problema. Devido a sua alta persistência como poluente no meio ambiente, tanto da água quanto do solo, este passou a representar um risco para todas as formas de vida.

Figura 1 – Evolução da produção de plástico (1950-2012)



Fonte: Plastics Europe (2012).



Atualmente há um movimento global obstinado a reduzir o uso de plásticos (Montenegro *et al.*, 2020). Ainda assim, as projeções futuras para a produção mostram um crescimento exponencial, atingindo valores de cerca de 1.800 milhões de toneladas em 2050 (UNEP, 2016). Destes, cerca de 0,5% são despejados nos oceanos todos os anos (Williams *et al.*, 2016). A partir daí, através de fotodegradação resultante da exposição a raios ultravioletas, além da degradação mecânica resultante das forças hidrodinâmicas e biológicas, grande parte desse material assume a forma de partículas menores, aumentando sua difusão pelo meio e biodisponibilidade na cadeia trófica.

Pequenas partículas plásticas, conhecidas na literatura científica como micro ou nanoplásticos (partículas de plástico que variam de 1 µm a 5 mm) representam, atualmente, a classe mais abundante e onipresente de resíduo antropogênico presente em ecossistemas marinhos e de água doce (Khan *et al.*, 2022). São geralmente encontrados em maiores quantidades nas proximidades de suas fontes e, portanto, níveis elevados são relatados regularmente em ambientes costeiros geomorfologicamente protegidos, onde complexos industriais e portuários tendem a se concentrar. Por outro lado, a maioria desses ambientes consiste em ecossistemas estuarinos, que com sua alta produtividade primária, atuam como berçários para estágios sensíveis em ciclos de vida de diversos organismos (Weinstein *et al.*, 1980). O aprofundamento da compreensão referente ao impacto dessas partículas é fundamental na avaliação da qualidade desses ambientes e dos arredores.

Um número crescente de impactos negativos dos microplásticos nos organismos aquáticos é registrado na literatura. Os impactos negativos associados a esses resíduos ocorrem principalmente devido à assimilação via ingestão (Singh, 2022). Os impactos prejudiciais relatados na literatura científica variam desde uma diminuição do potencial de crescimento do indivíduo (Lo; Chan, 2018) assim como na exaustão das reservas energéticas, e até no desequilíbrio no sistema endócrino (Pelamatti *et al.*, 2021; Rochman *et al.*, 2013).

Além dos potenciais efeitos mecânicos supracitados, decorrentes da ingestão desses resíduos, existe um grande grupo de elementos/compostos tóxicos associados aos microplásticos que podem se acumular nos tecidos gordurosos de organismos aquáticos (Batel *et al.*, 2016). Pesticidas como o Dicloro-Difenil-Tricloroetano (DDT) e os subprodutos da degradação secundária dos plásticos são alguns dos contaminantes mais comuns encontrados associados à superfície de plásticos amostrados em ambientes costeiros (Van *et al.*, 2012).



A toxicidade oferecida pelas micropartículas tem sua origem não apenas na sua composição repleta de compostos destinados a aumentar o caráter resistente dos polímeros. A diminuição gradativa dos corpos plásticos aumenta a capacidade destas de adsorver poluentes do meio, podendo ser chamados de concentradores de contaminantes, uma vez que as reações químicas apresentam íntima relação com a razão entre a massa da partícula e a sua superfície de contato. Em outras palavras, quanto mais fina a partícula, maior é sua capacidade de reter poluentes disponíveis no meio ambiente.

Embora hoje em dia seja comum a ingestão acidental de partículas plásticas, os organismos também estão expostos a esses contaminantes indiretamente, ou seja, através da ingestão de presas pré-contaminadas. Esse fenômeno é comumente conhecido como transferência trófica (Welden *et al.*, 2018). Nos últimos anos, a difusão trófica de micropartículas plásticas em ambientes aquáticos tornou-se um problema crescente e tem atraído muita atenção (Batel *et al.*, 2016; Mateos-Cárdenas *et al.*, 2019). Estudos anteriores documentaram a transferência trófica de microplásticos e seus contaminantes associados em água doce (Mateos-Cárdenas *et al.*, 2022) e sistemas marinhos (Costa *et al.*, 2020), entretanto, esse processo ainda é pouco compreendido (Pelamatti *et al.*, 2021).

Van Cauwenberghe e Janssen (2014) relataram que peixes, mexilhões e ostras colhidos para consumo humano continham 0,36 – 0,47 partículas. Segundo os levantamentos realizados por estes autores, os europeus ingerem cerca de 11.000 micropartículas de plástico por pessoa por ano. Muito disso vem do consumo de organismos aquáticos. Os bivalves de um mercado de peixe na China continham entre 2,1 e 10,5 partículas microplásticas por grama (Li *et al.*, 2015) e cerca de um quarto dos peixes inteiros obtidos em mercados na Indonésia e nos EUA continham plástico nas suas entranhas (Rochman, 2015). Verificou-se que partículas de microplástico são assimiladas diretamente da natureza em espécies comerciais dos mares Adriático e Mediterrâneo, Canal da Mancha e costa portuguesa (Bellas *et al.*, 2016; Tanaka; Takada, 2016).

No entanto, a importância da transferência trófica de contaminantes associados a microplásticos em sistemas estuarinos é pouco conhecida. Estudos científicos sugerem que a exposição humana a microplásticos por meio de alimentos aquáticos é um problema real, mas sua importância em comparação com outros alimentos ainda é desconhecida (Zhang *et al.*, 2022). Também faltam



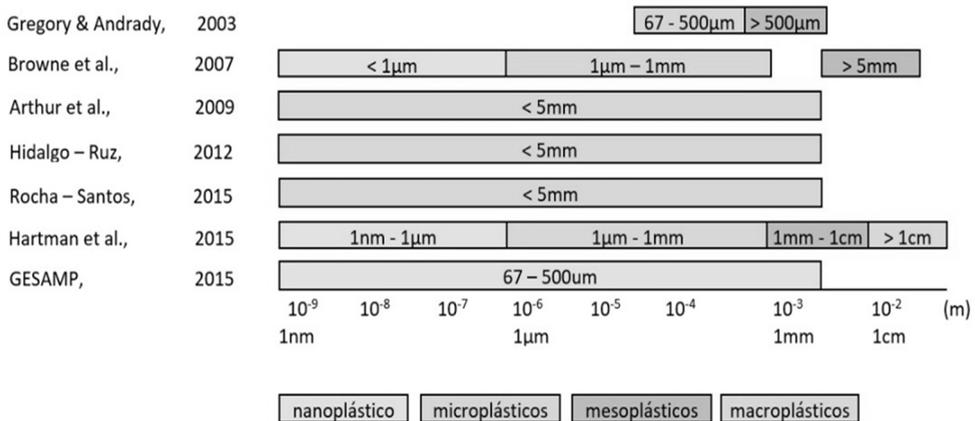
pesquisas sobre a influência da ingestão de microplásticos nas fases larvais de peixes e o papel do microzooplâncton na transferência de microplásticos através das teias alimentares marinhas ou estuarinas.

## 2 CONCEITO DE MICROPLÁSTICO

A matriz dos polímeros é basicamente formada de átomos de carbono e hidrogênio unidos em cadeias longas. Outros produtos químicos, como ftalatos, éteres difenílicos polibromados e tetrabromobisfenol A, normalmente também estão presentes em plásticos, e muitos desses aditivos químicos são lixiviados após adentrarem no meio ambiente.

Quanto ao microplástico e seus tamanhos, há diferentes classificações disponíveis na literatura. A caracterização mais aceita é da granulometria inferior a 5 mm, proposta em 2015 no *workshop* internacional dirigido pelo National Oceanic and Atmospheric Administration. A Figura 2 apresenta diferentes classificações de microplásticos associadas ao tamanho, proposta por diferentes autores, que utilizam também os termos nanoplásticos, mesoplásticos e macropelásticos.

Figura 2 – Diferentes classificações para micropartículas plásticas de acordo com a granulometria



Fonte: Olivatto (2017).

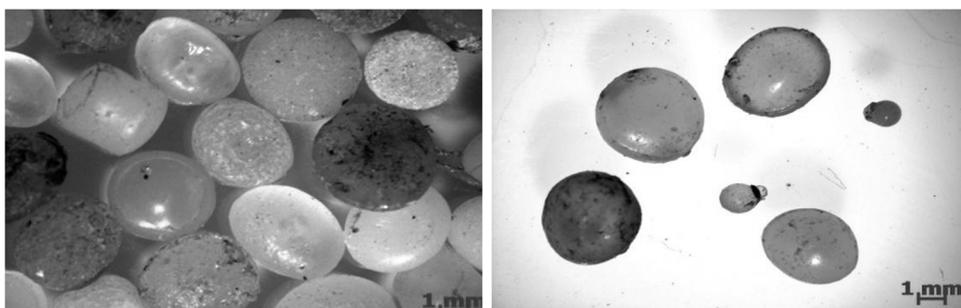
Os microplásticos são divididos em duas classes: primários e secundários. O primeiro caso se refere às partículas com características originais, de acordo com as respectivas funções para as quais foram



produzidas. Esta classe contempla as microesferas encontradas em produtos de higiene pessoal, de limpeza de pele, pellets de plástico usados como matéria na fabricação industrial e fibras plásticas usadas em têxteis sintéticos (Figura 3).

Os microplásticos primários são introduzidos diretamente nos ecossistemas através, por exemplo, do uso de cosméticos, perda acidental em derramamentos durante a fabricação ou transporte, como no caso de pellets perdidos em ambientes portuários. A indústria têxtil também utiliza fibras plásticas microscópicas para a produção de tecidos sintéticos e o procedimento de lavagem de roupas com esses tecidos libera tais fibras plásticas, que atingem também os cursos hídricos (Figura 3). Sua perda se dá pelo fato da incapacidade dos métodos tradicionais de tratamento de água de reter partículas de dimensões tão reduzidas.

Figura 3 – Pellets identificados em um ponto de coleta da Praia do Galeão, na Baía de Guanabara



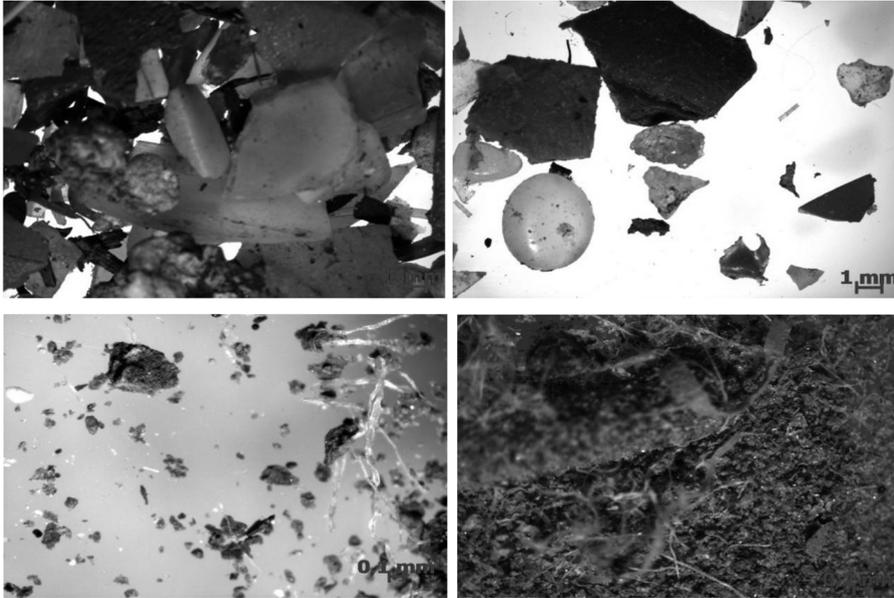
Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

No caso das partículas classificadas como secundárias, estas resultam da degradação das unidades originais através de esforço mecânico e por fotodegradação através da incidência de raios ultravioletas emitidos pelo Sol (Figura 4).

Embora o material plástico apresente longevidade e resistência à degradação, a sua fragmentação no meio ambiente ocorre quando combinada com diversos fatores ambientais, que incluem a radiação UV, presença de oxigênio, mudanças de temperatura, umidade, ação das ondas e contato com contaminantes e microrganismos. Como resultado, a matriz plástica sofre alteração de suas propriedades físicas e químicas, tornando-se mais frágil e se fragmentando em partículas progressivamente menores (Figura 4).



Figura 4 – Micropartículas plásticas secundárias identificados em um ponto de coleta da Praia do Galeão, na Baía de Guanabara



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As sacolas de supermercados produzidas dos polímeros oxobiodegradáveis, também podem gerar microplásticos secundários no meio ambiente. Na produção desses polímeros são adicionados aditivos químicos que atuam na aceleração da degradação oxidativa do material na presença de luz e calor. No entanto, os pequenos fragmentos resultantes desse processo não são consumidos facilmente por microrganismos, ou seja, a biodegradação a partir dos fragmentos não é estimulada. Assim, apesar de encarado como uma solução para a poluição por lixo plástico, os subprodutos da sua fragmentação são mais difíceis de serem retirados do ambiente, devido à maior dificuldade de identificação dessas partículas, além de contribuir com a liberação de compostos químicos metálicos para o meio ambiente.

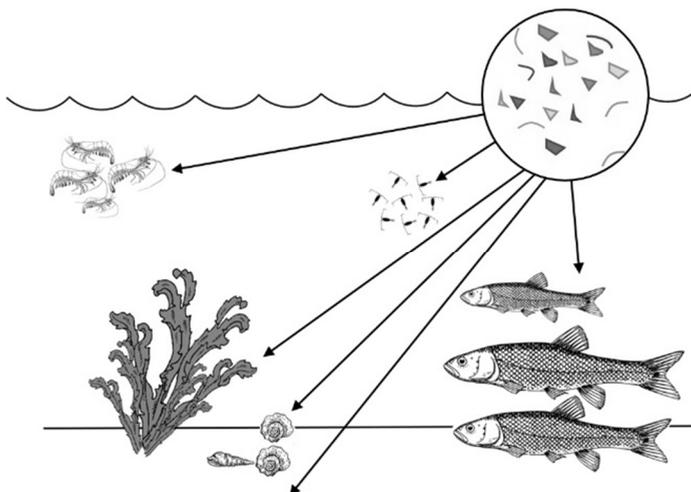
### 3 MICROPLÁSTICO PELO MUNDO

Nos últimos anos, a presença de micropartículas e nanopartículas plásticas tem sido registrada em diversos artigos científicos e outros documentos bibliográficos, ao redor do globo, nos mais diversos compartimentos ambientais e produtos de consumo humano, como alimentos e bebidas, o que tem gerado grande desconforto da comunidade científica mundial. Em ecossistemas



naturais, os microplásticos têm sido amplamente estudados nos corpos d'água marinhos e fluviais, em amostras de água, sedimento e interagindo com a biota (Ivleva *et al.*, 2016) (Figura 5).

Figura 5 – Microplástico presente em diversos compartimentos ecológicos aquáticos



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Mais recentemente, autores têm relatado a presença desse contaminante na atmosfera (Zhang *et al.*, 2020). No ambiente oceânico, estima-se que a distribuição das micropartículas plásticas é influenciada por uma série de fatores, sendo determinante a proximidade das fontes poluidoras. Por outro lado, ventos, correntes oceânicas e turbulência causada pelo tráfego de embarcações ajudam na difusão destes resíduos, podendo estes serem transportados por longas distâncias e atingir até áreas remotas, distantes das ações humanas.

Atualmente já se sabe que as correntes oceânicas apelidadas de grandes giros promoveram a concentração de grandes quantidades de resíduos plásticos em determinadas regiões no oceano, localizados em latitudes subtropicais nas principais aglomerações de correntes ao longo dos oceanos, sendo o giro do Pacífico o mais noticiado na mídia nos últimos anos (Figura 6).

Nos ecossistemas aquáticos, os microplásticos de baixa densidade são predominantemente encontrados na superfície da água devido à sua alta flutuação, enquanto os de alta densidade são mais prováveis nas profundezas. A densidade dessas partículas pode



umentar de acordo com o tempo de residência no ambiente, devido à formação de biofilmes, favorecendo assim a sua sedimentação e acúmulo nesses ambientes. Nessas condições de baixas temperaturas e ausência de luz ultravioleta (UV), os microplásticos depositados em sedimentos aquáticos estão mais resistentes ao mecanismo de degradação foto-oxidativa, principal mecanismo de degradação dos plásticos, e são, portanto, mais facilmente preservados.

Figura 6 – Grandes giros oceânicos



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A mesma dinâmica e distribuição também ocorre no ambiente terrestre, quando esse material se deposita nos sedimentos, o que permite considerar as partículas de microplásticos como um indicador geológico potencial no Antropoceno. Os detritos de plásticos e microplásticos têm sido observados também na interação com a biota marinha, comumente confundidos por alimentos, esses organismos ingerem esses resíduos que são encontrados nas análises de seus conteúdos estomacais. Dessa forma, alimentos como frutos do mar e também o sal já foram investigados sobre a contaminação por microplásticos e apresentaram resultados positivos.

O estudo publicado na Nature por Iñiguez *et al.* (2017), indicou a presença de 50-280 partículas de microplásticos por quilograma de sal analisado. Os autores analisaram um total de 21 amostras de sal comercializados na Espanha. Os microplásticos também estão sendo observados em ecossistemas de água doce da América do Norte, Europa e Ásia (Cera *et al.*, 2020). Considerando que os rios contribuem com o transporte de aproximadamente 80% dos resíduos sólidos



presentes no oceano, é extremamente relevante a investigação de microplásticos diretamente nesses ambientes. Além disso, do ponto de vista da saúde humana, pode-se considerar a contaminação de água doce por microplásticos até mais preocupante, dado a dependência do consumo de água potável pela população. Dessa forma, amostras de água de torneira, água mineral comercializada e cerveja também foram avaliadas em relação a contaminação por microplásticos. Os resultados dos estudos indicaram que todos esses produtos de consumo humano apresentam resíduos de microplásticos em sua composição. O estudo dirigido por Schymanski *et al.* (2018) indicaram que a principal fração das partículas de microplásticos identificada na água mineral é de tamanho muito reduzido, com dimensões abaixo de 20  $\mu\text{m}$ . Outro compartimento ambiental que também apresentou contaminação por microplásticos é o ar atmosférico.

Recentemente, Dris *et al.* (2015) relataram a presença de microplásticos na precipitação atmosférica. O estudo foi realizado no período de um ano, na Grande Paris, e identificou que ocorre por dia a precipitação de 2 a 355 partículas/ $\text{m}^2$  de fibras microplásticas. A caracterização morfológica e química pelas técnicas de Microscopia e Micro Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier, permitiu indicar a hipótese de que os tecidos sintéticos das roupas podem representar a principal fonte dessas fibras nesse ambiente.

Gaylarde *et al.* (2021a; 2021b) revisaram os estudos de liberação de microfibras pelas atividades de lavanderia, enfatizando a poluição do ar e do ambiente aquático resultante. Portanto, todos esses estudos sugerem que o cenário de exposição aos microplásticos que a sociedade está submetida é extremamente alarmante.

#### **4 IMPACTOS DA DIFUSÃO DO MICROPLÁSTICO PELO MEIO AMBIENTE**

Uma vez digeridos pelos organismos vivos, os principais impactos mecânicos das partículas microplásticas são a redução da capacidade de alimentação do hospedeiro, diminuição das reservas de energia e produção reprodutiva e prevenção da função intestinal completa (Sussarellu *et al.*, 2016). As partículas ingeridas podem passar pelo intestino, acumulando-se e bloqueando o trato digestivo, perturbando mecanicamente a alimentação e a digestão em alguns invertebrados bentônicos e outros organismos (Setälä *et al.*, 2014).

Devido às dificuldades metodológicas, os impactos químicos são menos discutidos e compreendidos. As partículas de microplástico apresentam duas classes de contaminantes. A primeira é composta por



aditivos plásticos e matérias-primas poliméricas; o segundo grupo inclui produtos químicos atraídos do ambiente. No primeiro caso, os constituintes plásticos originais são compostos por substâncias químicas adicionadas durante a fabricação para dar/melhorar a aparência ou a resistência do plástico (Hahladakis *et al.*, 2018). Assim, a matriz plástica, por si só, já apresenta em sua composição compostos nocivos, que também podem ser tóxicos quando liberados por qualquer reação ácida.

Por outro lado, alguns autores sugerem que os plásticos são mais perigosos como vetores de elementos tóxicos adsorvidos, como metais, do que fontes de aditivos ligados à matriz (Batel *et al.*, 2016; Naqash *et al.*, 2020; Zhang; Chen, 2020).

As micropartículas de plástico podem atrair muitos compostos orgânicos e inorgânicos do ambiente aquático circundante (Rochman *et al.*, 2013; Rochman, 2015). As características químicas e eletrostáticas da superfície microplástica hidrofóbica permitem que ela se ligue a toxinas. Assim, ao longo do processo de ingestão e posterior digestão pelos organismos, uma mistura de substâncias químicas perigosas pode ser lixiviada no trato digestivo e se tornar biodisponível para o organismo (Rochman, 2015).

Da mesma forma que as partículas finas de sedimentos naturais, a alta relação superfície/volume das pequenas partículas plásticas, associada ao seu caráter não polar de superfície, resulta na sorção de produtos químicos, produzindo uma mistura complexa de poluentes disponíveis para as espécies aquáticas (Gaylarde *et al.*, 2021a; Rochman *et al.*, 2013).

A toxicidade das partículas de microplástico é, portanto, inversamente proporcional ao tamanho da partícula, quanto menor a partícula, maior é o seu potencial para reter contaminantes que podem penetrar nos tecidos biológicos (Browne *et al.*, 2008). As toxinas também podem ser liberadas das partículas por ácidos no intestino (Batel *et al.*, 2016).

A progressão de compostos orgânicos através da rede trófica pode resultar em sua biomagnificação (Kelly *et al.*, 2007). As micropartículas plásticas que transportam poluentes podem atingir anfípodas (Chua *et al.*, 2014), poliquetas (Besseling *et al.*, 2013), mexilhões (Avio *et al.*, 2015) e peixes (Oliveira *et al.*, 2013). Outros autores relataram o aumento da biodisponibilidade de poluentes após a assimilação de microplásticos por meio de respostas fisiológicas, como inflamação (Von Moos *et al.*, 2012) e uma resposta imune estimulada (Browne *et al.*, 2008). Os resultados podem ser a redução



da capacidade de alimentação (Besseling *et al.*, 2013), diminuição das reservas de energia e capacidade reprodutiva (Sussarellu *et al.*, 2016) e mortalidade (Browne *et al.*, 2013). Os impactos ambientais exatos da transferência trófica permanecem desconhecidos.

## 5 OS IMPACTOS DOS MICROPLÁSTICOS NA SAÚDE HUMANA

Muitos estudos abordam os impactos teóricos dos produtos químicos em organismos individuais e cadeias tróficas limitadas. Pouco, no entanto, se sabe sobre o destino de microplásticos e misturas químicas ambientalmente significativas que passam por uma complexa rede trófica aquática. Consequentemente, há uma falta de compreensão sobre a transferência de microplásticos e seus compostos tóxicos associados aos alimentos aquáticos para humanos e o consequente impacto na saúde humana. A Organização Mundial da Saúde (OMS) enfatizou que os microplásticos são onipresentes no meio ambiente e devem ser uma preocupação para a saúde humana (Revel *et al.*, 2018), especialmente por meio da ingestão de alimentos contaminados (Waring *et al.*, 2018).

A assimilação de partículas microplásticas por humanos pode ocorrer através do consumo de alimentos aquáticos, água potável e inalação (Vethaak; Leslie, 2016). Embora os frutos do mar representem uma importante fonte de compostos tóxicos, especialmente micro e nanoplásticos, para os seres humanos (Singh, 2022), há pouca legislação criada para regular os níveis de microplásticos nos alimentos (Ziccardi *et al.*, 2016). Padrões estão sendo estabelecidos para determinar medidas de segurança. Como exemplo, a Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) sugeriu que consumir 225 gramas de mexilhões com a quantidade máxima relatada de microplásticos levaria a uma exposição de cerca de 7 microgramas de plástico (EFSA, 2016).

Em setembro de 2017, um grupo formado por instituições multinacionais como a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco), a North Pacific Marine Science Organization (PICES) e a Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) promoveu encontros internacionais para discutir a poluição plástica marinha e seus impactos (Zhu *et al.*, 2018). Como resultado, leis importantes e medidas de resposta estão em processo de promulgação (Xiong *et al.*, 2018).

Alimentos aquáticos podem conter partículas microplásticas por meio de transferência de cadeia trófica, aderência à superfície ou por meio de processamento industrial e embalagem (EFSA, 2016). Após



a assimilação, partículas de plástico menores que 2,5 µm podem entrar nos órgãos gastrointestinais. A presença de partículas de microplástico no trato gastrointestinal humano foi verificada pela detecção de microplásticos em fezes humanas (Schwabl *et al.*, 2019). Estima-se, no entanto, que até 90% das micropartículas de plástico ingeridas podem ser excretadas por humanos (Smith *et al.*, 2018).

Partículas de plástico abaixo de 150 µm podem passar pela parede gastrointestinal e se tornar biodisponíveis (Barboza *et al.*, 2018). Apesar disso, os autores sugeriram que apenas 0,3% desses resíduos seriam efetivamente absorvidos. Kurunthachalam e Krishnamoorthi (2021) sugeriram que partículas microplásticas abaixo de 20 µm podem entrar nos órgãos, e partículas menores (<10 µm) podem passar pela membrana celular e tecido placentário. Singh (2022) relatou que o acúmulo dessas partículas no fígado e cérebro humanos é maior do que em outros órgãos. No entanto, Heather *et al.* (2022) concordaram que algumas das partículas de plástico assimiladas por humanos podem ser biodisponíveis e estimaram que a taxa de eliminação do corpo e transferência e deposição em órgãos não é rápida o suficiente para impedir a absorção no sangue.

Tem sido sugerido que o impacto negativo dos microplásticos nos seres humanos é resultado da inflamação devido à natureza refratária das partículas de microplásticos, bem como às suas características especiais de contaminantes tóxicos de superfície, e que é provável que haja um efeito cumulativo dependente da dose (Wright; Kelly, 2017). No entanto, Heather *et al.* (2022) levantam a questão de saber se as exposições reais podem afetar efetivamente o sistema imunológico humano. De fato, a avaliação correta dos riscos humanos inerentes à ingestão de partículas plásticas ainda não é viável devido à falta de informações tanto sobre o risco toxicológico quanto sobre a exposição humana (Leslie; Depledge, 2020; Vethaak; Legler, 2021).

O efeito tóxico primário da assimilação de micropartículas plásticas resulta do estresse oxidativo e da inflamação seguinte (Eerkes-Medrano *et al.*, 2019). O estresse oxidativo resulta de um desequilíbrio entre a geração de compostos oxidantes e a ação dos sistemas de defesa antioxidantes. A geração de radicais livres e/ou espécies reativas não radicais é resultado do metabolismo do oxigênio (Pizzino *et al.*, 2017). De acordo com Eerkes-Medrano *et al.* (2019), os constituintes da matriz plástica podem aumentar a concentração de espécies reativas de oxigênio. Schirinzi *et al.* (2017) mostraram que micropartículas de plástico promoveram estresse oxidativo no tecido cerebral humano. Impactos adicionais incluem citotoxicidade, por meio de apoptose e necrose, e carcinogenicidade (Lusher *et al.*, 2017).



No corpo humano, os impactos mecânicos da ingestão de microplásticos inicialmente incluem obstrução intestinal ou abrasão tecidual. Adicionalmente, são esperados impactos indiretos na saúde humana, decorrentes da assimilação de micropartículas plásticas e incluindo efeitos toxicológicos causados pelos contaminantes carregados na superfície das partículas.

Apesar da escassez de artigos científicos correlacionando o consumo de peixes ou mariscos contaminados com microplásticos contendo desreguladores endócrinos e as consequentes disfunções endócrinas na fisiologia humana, o assunto já é aceito pela comunidade científica (Wright; Kelly, 2017). De acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), faltam estudos toxicológicos básicos de apoio sobre a ingestão humana de micropartículas plásticas e, portanto, é muito cedo para a elaboração de uma avaliação de segurança de risco alimentar (Lusher *et al.*, 2017). Ensaio para avaliar a degradação do plástico no trato intestinal também não estão disponíveis. Portanto, avaliações confiáveis do impacto resultante da biodisponibilidade dos poluentes que compõem a matriz plástica também são incertas (Gallo *et al.*, 2018).

Publicações médicas sobre os impactos decorrentes do uso do plástico em implantes apontam para efeitos genéticos, necrose celular, desequilíbrio bioquímico do cálcio, inflamação nos tecidos ósseos, entre outros (Lusher *et al.*, 2017). Finalmente, apesar da falta de dados, Gao *et al.* (2016) sugerem potenciais impactos endócrinos durante a fase de gestação e até mesmo durante a infância em seres humanos. Assim, é fundamental que se aprofunde o entendimento dos impactos relacionados ao consumo de organismos aquáticos e a consequente ingestão de partículas plásticas, uma vez que populações ao redor do globo já estão em constante contato com essa ameaça. Os efeitos cumulativos ainda não foram identificados e representam um perigo real.

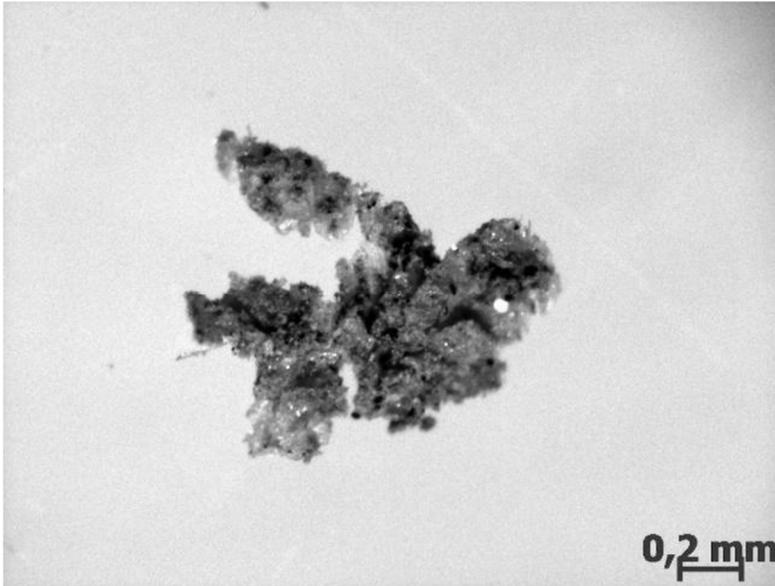
## **6 PERSPECTIVAS FUTURAS NA GESTÃO DO MICROPLÁSTICO: ALTERNATIVAS PARA A ELIMINAÇÃO DA MATRIZ PLÁSTICA**

Diversos métodos físicos e químicos podem ser aplicados como estímulo para a redução de plástico no meio ambiente. Entre eles podem ser citados incineração, pirólise, fotodegradação, alcoólise, ácido hidrólise e amonólise. Esses processos são facilmente aplicáveis. Por outro lado, podem gerar compostos secundários que resultem em impactos mais negativos que a própria existência do plástico no meio



ambiente. Estes subprodutos podem ser mais tóxicos e por isso são prejudiciais ao meio ambiente de várias maneiras, principalmente para a biosfera.

Figura 7 – Partículas microplásticas sendo colonizadas por microrganismos



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Assim, o tratamento biológico do plástico através do uso de cepas de bactérias e fungos se mostra a abordagem mais adequada e sustentável para gerenciar resíduos plásticos para reduzir esse problema (Figura 7), apesar do maior tempo requerido por estes métodos.

## 7 O USO DOS NANOCATALISADORES

A quebra de polímeros requer extensos catalisadores. Nanocatalisadores de óxido de zinco (ZnO) de diferentes tamanhos de partículas e proporções de peso foram usados para a reciclagem química de resíduos de garrafas de politereftalato de etileno (PET) (Alzuhairi *et al.*, 2018). O bis(2-hidroxietil) tereftalato foi o principal produto encontrado após a degradação do PET usando o nanocatalisador percalita (Guo *et al.*, 2018). Rezende *et al.* (2019) sintetizaram o catalisador de níquel, alcançando assim um grau de conversão de 97%.



A nanopartícula de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  foi imobilizada em nanofolhas de nitrato de boro para reciclar resíduos de PET por glicólise (Nabi *et al.*, 2019). Nanotubos de titanato de sódio ou protonado foram usados para a degradação pós-consumo e PET virgem (Lima *et al.*, 2019). Ainda assim, o efeito de nanomaterial para a condição dinâmica do ambiente e sua estabilidade devem ser explorados em detalhes. Mais pesquisas sobre tal atividade são necessárias para entender a reação do PET com nanomateriais e seu impacto a longo prazo.

## 8 TRATAMENTO BIOLÓGICO

O interesse sobre questões ambientais havendo a necessidade do desenvolvimento de matrizes que não sobrecarreguem significativamente o meio ambiente. A biodegradação, por sua vez, é necessária para polímeros uma vez que estes eventualmente entram em fluxos de água e por isso, não podem ser reciclados nem incinerados. Neste contexto é fundamental considerar a degradação microbiana de polímeros naturais e sintéticos para entender o que é necessário para a biodegradação e os mecanismos envolvidos. Estudos sobre a biodegradação de plásticos têm sido realizados para superar os problemas ambientais associados aos resíduos plásticos sintéticos. Neste sentido, os monômeros representam um substrato efetivo para *Pseudomonas putida* por degradação enzimática (Wierckx *et al.*, 2015). A espécie *Delftia* WL-3 (Liu *et al.*, 2018) degrada o politereftalato de etileno (PET) e seu constituinte, ou seja, dimetil tereftalato (DET) e o usa para crescimento como única fonte de carbono em sete dias. Farzi *et al.* (2019) despolimerizou o PET por espécies de *Streptomyces*. A porcentagem de taxa de biodegradação para tamanhos de partículas de PET variou entre cerca de 50 a 70% de efetividade. A cepa *Aeromonas* foi usada como biocatalisador para despolimerizar e assimilar o PET usando uma técnica de bioprocessamento de célula inteira (Gong *et al.*, 2018).

Vague *et al.* (2019) isolaram as espécies microbianas dos locais poluídos de petróleo em Houston, Texas, USA, para a degradação efetiva do PET. Algumas das amostras foram pré-tratadas por radiação ultravioleta que aumentou a degradação do plástico. Os autores formaram o consórcio de cinco espécies bacterianas diferentes potencializando o processo de degradação. No solo do composto, foi realizada a biodegradação do PET utilizando microrganismos da rizosfera. As cepas bacterianas compostas de *Serratia plymuthica* e *Arthrobacter sulfonivorans*, foram isoladas da região rizosférica da planta *Salix viminalis* (Janczak *et al.*, 2018). Duas cepas de fungos micorrízicos também foram isoladas juntamente com as cepas



bacterianas para degradar este polímero. Foi observada uma queda aproximada de 15 a 35% na resistência do polímero (Janczak *et al.*, 2018).

Muitas enzimas produzidas por bactérias e fungos são reconhecidas como degradantes do PET. Enzimas como esterase hidrolisam ligações de éster a aminoácidos e álcoois presentes no polímero PET. Além disso, a enzima lipase cliva os ésteres, que são solúveis em água ou ésteres do grupo hidroxila (OH). As enzimas PETase e MHETase são responsáveis pela quebra do polímero PET e mono-2-hidroxietiltereftalato em seus comonômeros, respectivamente (Kawai *et al.*, 2014; Yoshida *et al.*, 2016).

Yoshida *et al.* (2016) isolaram a bactéria *Ideonella sakaiensis* para a biodegradação de PET do local de reciclagem da garrafa PET. Esta bactéria adere à superfície do PET e libera a enzima PETase para atingir o polímero. Além disso, produz a enzima MHETase, que converte o produto intermediário mono-2-hidroxietiltereftalato em ácido tereftálico e etilenoglicol, formados após a quebra do PET. Até agora, a degradação mais efetiva do PET foi relatada por Yoshida *et al.* (2016) usando as espécies de bactéria *Ideonella sakaiensis* e *Streptomyces* (Chaves *et al.*, 2018). Os microrganismos mantêm o equilíbrio biogeoquímico da Terra desde o início. Portanto, explorar seu papel na mitigação da poluição do PET é o passo certo.

## 9 RECICLAGEM

Outra forma de gestão de resíduos plásticos é a reciclagem. De acordo com as normas internacionais estes podem ser classificados como de ciclo fechado e de ciclo aberto. No primeiro caso, a reciclagem de ciclo fechado se refere aos processos que produzem o mesmo produto original. Em contraste, no segundo caso ocorre a fabricação de um produto diferente, por exemplo, material isolante ou fibra (Van Der Velden *et al.*, 2014). O processo de reciclagem aberta oferece muitas maneiras de produzir o novo material, incluindo volta ao monômero, volta ao oligômero, reciclagem semimecânica e mecânica (Shen *et al.*, 2010). A reciclagem se tornou um método extremamente importante na medida em que reduz significativamente as contribuições para o aquecimento global, as emissões de gases de efeito estufa, o consumo de recursos fósseis se comparada com aterros sanitários, incineração e reciclagem química (Kuczenski; Geyer, 2010). Basicamente, os resíduos plásticos podem passar três tipos de reciclagem: mecânica; química; e, recuperação energética e incineração.



## 9.1 MECÂNICA

É a forma mais comum de reciclagem envolvendo quatro fases:

- ♦ **Fragmentação:** o plástico é separado por tipo e levado para moinhos para que tenham seu volume reduzido;
- ♦ **Lavagem e Separação:** o material é lavado e separado por densidade. Os mais densos afundam e os menos densos ficam na superfície da água;
- ♦ **Secagem:** o plástico é seco por meio de grandes secadores de ar quente;
- ♦ **Extrusão:** a matriz em alta temperatura toma uma forma pré-determinada. No caso particular do plástico, geralmente passa por uma matriz de filamentos contínuos (chamados popularmente de "espaguetes"). Então, são arrefecidos com água em temperatura ambiente e cortados em uma granuladora.

## 9.2 QUÍMICA

Através da reciclagem química há o processo de despolimerização do plástico, ou seja, reversão de um composto polimérico para um monômero ou para um polímero de menor peso molecular. Ela se dá por meio do processamento dos produtos plásticos e os transforma em compostos químicos ou matérias-primas para reaproveitar na produção de outros produtos.

## 9.3 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA E INCINERAÇÃO

Nesse processo, a queima dos resíduos plásticos tem como objetivo a geração de calor, vapor ou energia. É mais utilizada em locais que ainda não contam com a coleta seletiva e geralmente escolhida quando todas as possibilidades de reciclagem mecânica já foram esgotadas. A incineração dos resíduos tende a garantir a redução entre 85 e 90% do volume de todo o material.

## 10 BIOPLÁSTICOS

Os bioplásticos, com sua origem em matéria-prima natural, representam uma alternativa biodegradável ao polímero convencional de base petroquímica. Adicionalmente são ambientalmente seguros e reduzem a dependência de reservas fósseis (Oliveira *et al.*, 2017). Polímeros de origens como celulose ou amido são usados como material de partida para a conversão de ácidos



poliláticos, amido termoplástico e acetato de celulose (Shaghaleh et al., 2018).

Por outro lado, quando comparados com o plástico produzido de alimentos básicos, as microalgas são consideradas uma excelente fonte de matéria-prima para a produção de bioplástico em função do alto percentual de polímeros de carboidratos e proteínas. Foi relatado que a *Spirulina* tem 46% a 63% de teor de proteína e a *Chlorella* tem 51% a 58% de peso seco. Tem sido relatado que misturas de plásticos bioplásticos e termoestáveis são preparadas a partir de biomassa de *Chlorella* e *Spirulina* (Zeller et al., 2013).

Outro estudo demonstrou que a biomassa excedente da produção de biodiesel, se tratada quimicamente, pode produzir bioplástico principalmente polihidroxibutirato, que é produzido a 27% após 14 dias de cultivo de *Chlorella pyrenoidosa* (Das Sruthy et al., 2018). Para biomassa de algas sustentável para produtos de biorrefinaria, incluindo bioplástico, o cultivo à base de águas residuais pode ser incentivado para remediar a água para uso futuro e exploração da biomassa resultante para produtos de valor agregado. Bioplástico de algas é um subproduto na refinaria de algas, podendo ajudar na geração de receita junto com os biocombustíveis. O plástico à base de microalgas está em seu estágio inicial e pode desempenhar um papel vital como um produto futuro ecologicamente correto.

É de suma importância que a comunidade científica e ambiental saiba dos malefícios que o microplástico traz à vida humana e animal, sendo de grande necessidade que existam artigos e materiais bibliográficos sobre o assunto e que formas alternativas de o produzir na indústria sejam consideradas e aplicadas. Ademais, é essencial que a população esteja ciente dos malefícios que o plástico e, conseqüentemente, o microplástico causam a saúde humana e de demais seres vivos, que saibam fazer escolhas que agridam o mínimo possível a biosfera em que vivemos e contribuam para um futuro em um planeta menos impactado pelas ações humanas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao PROTEGEER, pela oportunidade de produzir este capítulo. Esta pesquisa tem o apoio da Companhia de Desenvolvimento de Maricá (Codemar) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).



## REFERÊNCIAS

- ALZUHAIRI, Mohammed Al Hussain; KHALIL, Bassam Ibrahim; HADI, Rusul Salah. Nano ZnO catalyst for chemical recycling of polyethylene terephthalate (PET). [Project: NanoCatalyst Chemical Recycling of Waste Plastics]. **Engineering and Technology Journal**, v. 35, part. A, n. 8, p. 831-837, 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/322234738\\_Nano\\_ZnO\\_Catalyst\\_for\\_Chemical\\_Recycling\\_of\\_Polyethylene\\_terephthalate\\_PET](https://www.researchgate.net/publication/322234738_Nano_ZnO_Catalyst_for_Chemical_Recycling_of_Polyethylene_terephthalate_PET). Acesso em: 01 ago. 2022.
- AVIO, Carlo Giacomo; GORBI, Stefania; MILAN, Massimo; BENEDETTI, Maura; FATTORINI, Daniele; D'ERRICO, Giuseppe; PAULETTO, Marianna; BARGELLONI, Luca; REGOLI, Francesco. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. **Environmental Pollution**, v. 198, p. 211-222, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.12.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749114005211>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BARBOZA, Luis Gabriel Antão; VETHAAK, Dick; LAVORANTE, Beatriz; LUNDEBYE, Anne-Katrine; GUILHERMINO, Lúcia. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. **Marine Pollution Bulletin**, v. 133, p. 336-348, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.047>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X1830376X>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BATEL, Annika; LINTI, Frederic; SCHERER, Martina; ERDINGER, Lothar; BRAUNBECK, Thomas. Transfer of benzo [a]pyrene from microplastics to *Artemia nauplii* and further to zebrafish via a trophic food web experimente: CYP1A induction and visual tracking of persistent organic pollutants. **Environmental Toxicology Chemistry**, v. 35, n. 7, p. 1656-1666, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3361>. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etc.3361>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BELLAS, Juan; MARTÍNEZ-ARMENTAL, José; MARTÍNEZ-CÁMARA, Ariana; BESADA, Victoria; MARTÍNEZ-GÓMEZ, Concéption. Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and Mediterranean coasts. **Marine Pollution Bulletin**, v. 109, n. 1, p. 55-60, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X16304301>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BESSELING, Ellen; WEGNER, Anna; FOEKEMA, Edwin M.; VAN DEN HEUVEL-GREVE, Martine J.; KOELMANS, Albert A. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.). **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 1, p. 593-600, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/es302763x>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es302763x>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BROWNE, Mark Antony; DISSANAYAKE, Awantha; GALLOWAY, Tamara Susan; LOWE, David Michaels; THOMPSON, Richard Charles. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 13, p. 5026-5031, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es800249a>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es800249a>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- BROWNE, Mark Anthony; NIVEN, Stewart J.; GALLOWAY, Tamara Susan; ROWLAND, Steve J., THOMPSON, Richard Charles. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity. **Current Biology**, v. 23, n. 23, p. 2388-2392, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.10.012>.



Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982213012530>. Acesso em: 01 ago. 2022.

CERA, Alessandra; CESARINI, Giulia; SCALICI, Massimiliano. Microplastics in freshwater: what is the news from the world? **Diversity**, v. 12, n. 7, p. 276, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/d12070276>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-2818/12/7/276>. Acesso em: 01 ago. 2022.

CHAVES, Michel Ricardo de Barros; LIMA, Maria Lair Sabóia de Oliveira; MALAFATTI-PICCA, Lusiane; ANGELIS, Derlene Attili de; CASTRO, Aline Machado de; VALONI, Érika; MARSAIOLI; ANITA Jocelyne. A practical fluorescence-based screening protocol for polyethylene terephthalate degrading microorganisms. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 29, n. 6, p. 1278-1285, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170224>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/gTFKmhRtD3kpWVDg5Vj6Ggz>. Acesso em: 01 ago. 2022.

CHUA, Evan M.; SHIMETA, Jeff; NUGEGODA, Dayanthi; MORRISON, Paul D.; CLARKE, Bradley O. Assimilation of polybrominated diphenyl ethers from microplastics by the marine amphipod, *Allorchestes compressa*. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 14, p. 8127-8134, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1021/es405717z>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es405717z>. Acesso em: 01 ago. 2022.

COSTA, Elisa; PIAZZA, Veronica; LAVORANO, Silvia; FAIMALI, Marco; GARAVENTA, Francesca; GAMBARDELLA Chiara. Trophic transfer of microplastics from copepods to jellyfish in the marine environment. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.571732>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2020.571732>. Acesso em: 01 ago. 2022.

DAS SRUTHY, Kris; SATHISH Asha; STANLEY John. Production of biofuel and bioplastic from *Chlorella pyrenoidosa*. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 8, part 3, p. 16774-16781, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478531831126X>. Acesso em: 01 ago. 2022.

DRIS, Rachid; GASPERI, Johnny; ROCHER, Vincent; SAAD, Mohamed; RENAULT, Nicolas; TASSIN, Bruno. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris. **Environmental Chemistry**, v. 12, n. 5, p. 592-599, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1071/EN14167>. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/en/EN14167>. Acesso em: 01 ago. 2022.

EERKES-MEDRANO, Dafine; Heather A.; LESLIE, B. Quinn. Microplastics in drinking water: a review and assessment. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 7, p. 69-75, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.001>. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/en/EN14167>. Acesso em: 01 ago. 2022.

EFSA, Panel on contaminants in the food chain (CONTAM). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood. [Panel members: Jan Alexander, Lars Barregård, Margherita Bignami, Sandra Ceccatelli, Bruce Cottrill, Michael Dinovi, Lutz Edler, Bettina Grasl-Kraupp, Christer Hogstrand, Laurentius (Ron) Hoogenboom, Helle Katrine Knutsen, Carlo Stefano Nebbia, Isabelle Oswald, Annette Petersen, Vera Maria Rogiers (until 9 May 2016), Martin Rose, Alain-Claude Roudot, Tanja Schwerdtle, Christiane Vleminckx, Günter Vollmer, Heather Wallace]. **EFSA Journal**, v. 14, n. 6. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2016.4501>. Disponível em: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2903/j.efsa.2016.4501>. Acesso em: 01 ago. 2022.



FARZI, Ali; DEHNAD, Alireza; FOTOUHI, Afsaneh F. Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 17, p. 25-31, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1878818118306613>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GALLO, Frederic; FOSSI, Cristina; WEBER, Roland; SANTILLO, David; SOUSA, João; INGRAM, Imogen; NADAL, Angel; ROMANO, Dolores. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. **Environmental Sciences Europe**, v. 30, art. 13, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0139-z>. Disponível em: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-018-0139-z>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GAO, Yanhua; ZHANG, Yanfang; YI, Juan; JINPENG, Zhou; XIANQING, Huang; SHI, Xinshan; XIAO, Shunhua; LIN, Dafeng. A longitudinal study on urinary cadmium and renal tubular protein excretion of nickel-cadmium battery workers after cessation of cadmium exposure. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, v. 89, p. 1137-1145, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00420-016-1153-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00420-016-1153-3>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GAYLARDE, Christine Claire; BAPTISTA NETO, Jose Antônio; FONSECA, Estefan Monteiro da. Plastic microfibre pollution: how important is clothes' laundering?

**Heliyon**, v. 7, n. 5, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07105>. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(21\)01208-1](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(21)01208-1). Acesso em: 01 ago. 2022.

GAYLARDE, Christine Claire; BAPTISTA NETO, Jose Antônio; FONSECA, Estefan Monteiro. 2021b. Nanoplastics in aquatic systems – are they more hazardous than microplastics? **Environmental Pollution**, v. 272, p. 115950. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115950>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749120366392>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GEYER, Roland. Production, use, and fate of synthetic polymers. [Chapter 2 in: LETCHER, Trevor Melvin. (ed.): Plastic waste and recycling. Cambridge, MA, Academic Press, 2013]. **Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions**, p. 13-32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00002-5>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128178805000025>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GONG, Jixian; LI, Yuqiang; WANG, Hongyang; LI, Huiqin; ZHANG, Jianfei. Depolymerization and Assimilation of Poly (Ethylene Terephthalate) by whole-cell bioprocess, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 394, n. 2, 2018 DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/2/022047>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/394/2/022047/pdf>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GUO, Shaopeng; LIU, Qibin; SUN, Jie; HONGGUANG, Jin. A review on the utilization of hybrid renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 1121-1147, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.105>. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v91y2018icp1121-1147.html>. Acesso em: 01 ago. 2022.

HAHLADAKIS, John N.; COSTAS, Velis A.; WEBER, Roland; IACOVIDOU, Eleni; PURNELL, Phil. An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 179-199, 2018. DOI: <https://doi.org/>

10.1016/j.jhazmat.2017.10.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941730763X>. Acesso em: 01 ago. 2022.

HEATHER, Leslie A.; VAN VELZEN, Martin J. Merel; BRANDSMA, Sicco H.; VETHAAK, Andre Dick; GARCIA-VALLEJO, Juan J. LAMOREE, Marja H. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. **Environment International**, v. 163, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412022001258>. Acesso em: 01 ago. 2022.

IÑIGUEZ, María E.; CONESA, Juan A.; FULLANA, Andrés. Microplastics in Spanish Table Salt. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09128-x>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/319160819\\_Microplastics\\_in\\_Spanish\\_Table\\_Salt](https://www.researchgate.net/publication/319160819_Microplastics_in_Spanish_Table_Salt). Acesso em: 01 ago. 2022.

IVLEVA, Natalia P.; WIESHEU, Alexandra C.; NIESSNER, Reinhard. Microplastic in Aquatic Ecosystems. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 56, n. 7, p. 1720-1739, 2016. Wiley Online Library. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201606957>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.201606957>. Acesso em: 01 ago. 2022.

JANCZAK, Katarzyna; HRYNKIEWICZ, Katarzyna; ZNAJEWSKA, Zuzanna; DĄBROWSKA, Grażyna. Use of rhizosphere microorganisms in the biodegradation of PLA and PET polymers in compost soil. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 130, p. 65-75, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964830517314646>. Acesso em: 01 ago. 2022.

KAWAI, Fusako; ODA, Masayuki; TAMASHIRO, Tomonori; WAKU, Tomonori; TANAKA, Naoki; YAMAMOTO, Masaki; MIZUSHIMA, Hiroki; MIYAKAWA, Takuya; TANOKURA, Masaru. A novel Ca<sup>2+</sup>-activated, thermostabilized polyesterase capable of hydrolyzing polyethylene terephthalate from *Saccharomonospora viridis* AHK190. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 98, p. 10053-10064, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5860-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-014-5860-y>. Acesso em: 01 ago. 2022.

KELLY, Barry C.; IKONOMOU, Michael G.; BLAIR, Joel D.; MORIN, Anne E.; GOBAS, Frank A. p. C. Food web-specific biomagnification of persistent organic pollutants. **Science**, v. 317, n. 5835, p. 236-239, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1138275>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1138275>. Acesso em: 01 ago. 2022.

KHAN, Qaiser Farid; ANUM, Sidra; SAKANDAR, Hafiz Arbab; FARHAN, Muhammad; AKHTAR Muhammad Tayyab; AFZAAL Muhammad; MAJEED Hamid. Occurrence of Microplastic Pollution in Marine Water. [Chapter in: HASHMI, Muhammad Zaffar. (ed.). Microplastic Pollution. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies (ECAT)]. **Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies**, p. 257-274, 2022. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89220-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89220-3_13). Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-89220-3\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-89220-3_13). Acesso em: 01 ago. 2022.

KUCZENSKI, Brandon; GEYER, Roland. Material flow analysis of polyethylene terephthalate in the US, 1996-2007. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1161-1169, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.013>. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/recore/v54y2010i12p1161-1169.html>. Acesso em: 01 ago. 2022.

KURUNTHACHALAM, Kannan; KRISHNAMOORTHY, Vimalkumar. A review of human exposure to microplastics and insights into microplastics as obesogens. **Frontiers in**



**Endocrinology**, v. 12, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fendo.2021.724989>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fendo.2021.724989/full>. Acesso em: 01 ago. 2022.

LESLIE, Heather A.; DEPLEDGE, Michael H. Where is the evidence that human exposure to microplastics is safe? **Environment International**, v. 142, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105807>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/342490829\\_Where\\_is\\_the\\_evidence\\_that\\_human\\_exposure\\_to\\_microplastics\\_is\\_safe](https://www.researchgate.net/publication/342490829_Where_is_the_evidence_that_human_exposure_to_microplastics_is_safe). Acesso em: 01 ago. 2022.

LI, Jiana; YANG, Dongqi; LI, Lan; JABEEN, Khalida; SHI, Huahong. Microplastics in commercial bivalves from China. **Environmental Pollution**, v. 207, p. 190-195, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749115300658>. Acesso em: 01 ago. 2022.

LIMA, Lucas Vinicius Sousa; MACÁRIO, Breno Silva, FIDÉLIS, Maysa do Nascimento; PESSANHA, André Luiz Machado. Variação sazonal das partículas de microplásticos no sedimento de quatro praias urbanas no estado da Paraíba, Brasil. **Anais IV CONAPESC...** Campina Grande: Realize Editora, 2019. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/57334>. Acesso em: 23 jun. 2022.

LIU, Jiawei; XU, Guanbao; DONG, Weiliang; XU, Ning; XIN, Fengxue; MA, Jiangfeng; FANG, Yan; ZHOU, Jay; JIANG, Ming. Biodegradation of diethyl terephthalate and polyethylene terephthalate by a novel identified degrader *Delftia* sp. WL-3 and its proposed metabolic pathway. **Letters in Applied Microbiology**, v. 67, p. 254-261, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/lam.13014>. Disponível em: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/lam.13014>. Acesso em: 01 ago. 2022.

LO, Hau Kwan Abby; CHAN, Kit Yu Karen. Negative effects of microplastic exposure on growth and development of *Crepidula onyx*. **Environmental Pollution**, v. 233, p. 588-595, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.10.095>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117330452>. Acesso em: 01 ago. 2022.

LUSHER, Amy; HOLLMAN, Peter; MENDOZA-HILL, Jeremy. Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) / Fisheries and Aquaculture Technical Paper 615**, p. 125-126, 2017. Disponível em: <https://rochmanlab.files.wordpress.com/2018/09/fao-report-2017.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2022.

MATEOS-CÁRDENAS, Alicia; SCOTT, David T.; SEITMAGANBETOVA Gulzara; VAN PELT, Frank n. A. M.; O'HALLORAN, John; Jansen, Marcel A. K. Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L.), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.). **Science of the Total Environment**, v. 689, p. 413-421, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.359>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719329328>. Acesso em: 01 ago. 2022.

MATEOS-CÁRDENAS, Alicia; MORONEY, Aran von der Geest; VAN PELT, Frank; O'HALLORAN; JANSEN, Marcel. Trophic transfer of microplastics in a model freshwater microcosm; lack of a consumer avoidance response. **Food Webs**, v. 31, p. 2352-2496, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2022.e00228>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352249622000106>. Acesso em: 01 ago. 2022.

MONTENEGRO, Marcelo; VIANNA, Manoela; TELES, Daisy Bispo. (org.). **O Atlas do Plástico 2020: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. [Autores:



ZAMORA, Andrea Maltchik; CATERBOW, Alexandra; NOBRE, Caio Rodrigues; DURAN, Camille; MUFFETT, Carroll; FLOOD, Chris; REHMER, Christian; CHEMNITZ, Christine; LAUWIGI, Christoph; ARKIN, Claire; COSTA, Claudete da; TELES, Daisy Bispo; AMORIM, Davi; AZOULAY, David; KNOBLAUCH, Doris; SEEGER, Dorothea; MOUN, Doun; SILVEIRA, Isabelle da; PATTON, Jane; HAUSMANN, Johanna; FARONI-PEREZ, Larisse; GUERRERO, Leo; MEDERAKE, Linda; XAVIER, Luciana Yokoyama; VIANNA, Manoela; FERNANDEZ, Manuel; MONTENEGRO, Marcelo; ERIKSEN, Marcus; SANTOS, Maureen; ZIEBARTH, Nadja; MARCUCCI, Nina; SPERANSKAYA, Olga; ZIMERMANN, Patricia; ROCHA, Roberto Laureano da; KALLEE, Ulrike; RIBEIRO, Victor Vasques; HERNANDEZ, Von; GURTLER, Stephan; FEIT, Steven]. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2020. Disponível em: <https://br.boell.org/pt-br/2020/11/29/atlas-do-plastico>. Acesso em: 01 ago. 2022.

NABI, Rizwana Begum Syed; TAYADE, Rupesh; HUSSAIN, Adil; KULKARNI Krishnanand P.; IMRAN, Qari Muhammad; BONG-GYU, Mun; BYUNG-WOOK, Yun. Nitric oxide regulates plant responses to drought, salinity, and heavy metal stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 161, p. 120-133, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847218313133>. Acesso em: 01 ago. 2022.

NAQASH, Nafiaah; PRAKASH, Sadguru; KAPOOR, Dhriti; SINGH, Rahul. Interaction of freshwater microplastics with biota and heavy metals: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, p. 1813-1824, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098847218313133>. Acesso em: 01 ago. 2022.

OLIVATTO, Glaucia Peregrina. **Estudo sobre Microplásticos em águas superficiais na porção oeste da Baía de Guanabara**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Química da PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29926/29926.PDF>. Acesso em: 01 ago. 2022.

OLIVEIRA, Miguel; RIBEIRO, Adriano; HYLLAND, Ketil; GUILHERMINO, Lucia. Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+ group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae). **Ecological Indicators**, v. 34, p. 641-647, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.06.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X13002501>. Acesso em: 01 ago. 2022.

OLIVEIRA, Vagne de Melo; ASSIS, Caio Rodrigo Dias; HERCULANO, Polyanna Nunes; CAVALCANTI, Maria Taciana Holanda; BEZERRA, Ranilson de Souza; PORTO, Ana Lúcia Figueiredo. Collagenase from smooth weakfish: extraction, partial purification, characterization and collagen specificity test for industrial application. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 43, n. 1, p. 52-64, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20950/1678-2305.2017v43n1p52>. Disponível em: <https://www.pesca.sp.gov.br/boletim/index.php/bip/article/view/1195>. Acesso em: 01 ago. 2022.

PELAMATTI, Tania; CARDELLI, Lara Roberta; RIOS-MENDOZA, Lorena Margarita. The role of microplastics in bioaccumulation of pollutants. In: ROCHA-SANTOS, Teresa; COSTA, Mónica; MOUNEYRAC, Catherine. (ed.). **Handbook of Microplastics in the Environment**, 2021, p. 1-30. Springer, Cham. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10618-8\\_18-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10618-8_18-1). Disponível em: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-030-10618-8\\_18-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-030-10618-8_18-1). Acesso em: 01 ago. 2022.

PIZZINO, Gabriele; IRRERA, Natasha; CUCINOTTA, Mariapaola; PALLIO, Giovanni; MANNINO, Federica; ARCORACI, Vincenzo; SQUADRITO, Francesco; ALTAVILLA, Domenica; BITTO, Alessandra. Oxidative Stress: harms and benefits for human health. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, Article ID 8416763, 2017.



DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/8416763>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5551541/>. Acesso em: 01 ago. 2022.

REVEL, Messica; CHÂTEL, Amélie; MOUNEYRAC, Carherine. Micro(nano)plastics: A threat to human health? **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 1, p. 17-23, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468584417300235>. Acesso em: 01 ago. 2022.

REZENDE, Luciana Cristina Soto Herek; OLIVEIRA, Jean Halison de; ZART, Vanessa Paola Miranda; MOISÉS, Murilo Pereira; OTTO, Guilherme Piovezan; FÁVARO, Sílvia Luciana. Synthesis of metal nanoparticles for use as nanocatalysts in pet recycling. **Acta Scientiarum Technology**, v. 41, n. 1, 37303, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v41i1.37303>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/333986281\\_Synthesis\\_of\\_metal\\_nanoparticles\\_for\\_use\\_as\\_nanocatalyst\\_s\\_in\\_pet\\_recycling](https://www.researchgate.net/publication/333986281_Synthesis_of_metal_nanoparticles_for_use_as_nanocatalyst_s_in_pet_recycling). Acesso em: 01 ago. 2022.

ROCHMAN, Chelsea M. The complex mixture, fate and toxicity of chemicals associated with plastic debris in the marine environment. [Chapter in: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.). *Marine Anthropogenic Litter*, Springer International Publishing, Cham, 2015, p. 117-140]. **Marine Anthropogenic Litter**, 2015. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_5). Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16510-3\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-16510-3_5). Acesso em: 01 ago. 2022.

ROCHMAN, Chelsea M.; HOH, Eunha; KUROBE, Tomofumi; THE, Swee J. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. **Scientific Reports**, v. 3, article 3263, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep03263>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep03263>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SCHIRINZI, Gabriella; PÉREZ-POMEDA, Ignacio; SANCHÍS, Josep; ROSSINI, Cesare; FARRÉ, Marinella; BARCELÓ, Damià. Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. **Environmental Research**, v. 159, p. 579-587, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.043>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935117310770>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SCHWABL, Philipp; SEBASTIAN, Köppel; KÖNIGSHOFER, Philipp; THERESA, Bucsecs; TRAUNER, Michael; REIBERGER, Bettina Liebmann. Detection of various microplastics in human stool: a prospective case series. **Annals of Internal Medicine**, v. 171, n. 7, p. 453-457, 2019. DOI: <https://doi.org/10.7326/M19-0618>. Disponível em: <https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M19-0618>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SCHYMANSKI, Darena; GOLDBECK, Christophe; HUMPF, Hans-Ulrich; FÜRST, Peter. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: release of plastic particles from different packaging into mineral water. **Water Research**, v. 129, p. 154-162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.11.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135417309272>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SETÄLÄ, Outi; FLEMING-LEHTINEN, Vivi; LEHTINIEMI, Maiju. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. **Environmental Pollution**, v. 185, p. 77-83, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749113005411>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SHAGHALEH, Hiba; XU, Xu; WANG, Shifa. Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. **RSC Advances**, v. 8, n. 2, p. 825-842, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1039/>



C7RA11157F. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c7ra11157f>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SHEN, Caofeng; TANG, Xianjing; YAO, Jun; SHI, Dezhi; FANG, Jie; KHAN, Muhammad I.; CHEEMA, Sardar Alam; CHEN Yingxu. Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in municipal waste incinerator bottom ash in Zhejiang province, China. **Journal of Hazardous Materials**, v. 179, n. 1- 3, p. 197-202, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.079>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389410002931>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SINGH, Richa. Microplastic Contamination in the Marine Food Web. [Chapter 3 in: AHAMAD, Arif; SINGH, Pardeep; TIWARY, Dhanesh]. **Plastic and Microplastic in the Environment: Management and Health Risks**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119800897.ch3>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119800897.ch3>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SMITH, Madeleine; LOVE, David C.; ROCHMAN, Chelsea M.; NEFF, Roni A. Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. **Current Environmental Health Reports**, v. 5, n. 3, p. 375-386, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6132564/>. Acesso em: 01 ago. 2022.

SUSSARELLU, Rossana; SUQUET, Marc; THOMAS, Yoann; LAMBERT, Christophe; FABIoux, Caroline; PERNET, Marie Eve; GOÏC, Nelly Le; QUILLIEN, Virgile; MINGANT, Christian; EPELBOIN, Yanouk; CORPOREAU, Charlotte; GUYOMARCH, Julien; ROBBENS, Johan; PAUL-PONT, Ika; SOUDANT, Philippe; HUVET, Arnaud. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 9, p. 2430-2435, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1519019113>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/292670443\\_Oyster\\_reproduction\\_is\\_affected\\_by\\_exposure\\_to\\_polystyrene\\_microplastics](https://www.researchgate.net/publication/292670443_Oyster_reproduction_is_affected_by_exposure_to_polystyrene_microplastics). Acesso em: 01 ago. 2022.

TANAKA, Kosuke; TAKADA, Hideshige. Microplastic fragments and microbeads in digestive tracts of planktivorous fish from urban coastal waters. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, article 34351, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34351>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/308813073\\_Microplastic\\_fragments\\_and\\_microbeads\\_in\\_digestive\\_tracts\\_of\\_planktivorous\\_fish\\_from\\_urban\\_coastal\\_waters](https://www.researchgate.net/publication/308813073_Microplastic_fragments_and_microbeads_in_digestive_tracts_of_planktivorous_fish_from_urban_coastal_waters). Acesso em: 01 ago. 2022.

UNEP – United Nations Environment Programme. **UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern**. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2016. Disponível em: [https://wesr.unep.org/media/docs/assessments/UNEP\\_Frontiers\\_2016\\_report\\_emerging\\_issues\\_of\\_environmental\\_concern.pdf](https://wesr.unep.org/media/docs/assessments/UNEP_Frontiers_2016_report_emerging_issues_of_environmental_concern.pdf). Acesso em: 01 ago. 2022.

VAGUE, Morgan; CHAN, Gayle; ROBERTS, Cameron; SWARTZ, Natasja A.; MELLIES, Jay. Pseudomonas isolates degrade and form biofilms on polyethylene terephthalate (PET) plastic, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1101/647321>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/333374634\\_Pseudomonas\\_isolates\\_degrade\\_and\\_form\\_biofilms\\_on\\_polyethylene\\_terephthalate\\_PET\\_plastic](https://www.researchgate.net/publication/333374634_Pseudomonas_isolates_degrade_and_form_biofilms_on_polyethylene_terephthalate_PET_plastic). Acesso em: 01 ago. 2022.

VAN CAUWENBERGHE, Lisbeth; JANSSEN, Collin R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. **Environmental Pollution**, v. 193, p. 65-70, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749114002425>. Acesso em: 01 ago. 2022.



VAN DER VELDEN, Natasha; PATEL, Martin Kumar; VOGTLÄNDER, Joost. LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. [Published 04 September 2013]. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 331-356, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0626-9>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749114002425?via%3Dihub>. Acesso em: 01 ago. 2022.

VAN, Almira; ROCHMAN, Chelsea M.; FLORES, Elisa M.; HILL, Kish L.; VARGAS, Erica; VARGAS, Serena A.; HOH, Euhna. Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California. **Chemosphere**, v. 86, n. 3, p. 258-263, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.039>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653511010836>. Acesso em: 01 ago. 2022.

VETHAAK, A. Dick; HEATHER, A. Leslie. Plastic debris is a human health issue. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 13, p. 6825-6826, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02569>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27331860/>. Acesso em: 01 ago. 2022.

VETHAAK, Dick; LEGLER, Juliette. Microplastics and human health: Knowledge gaps should be addressed to ascertain the health risks of microplastics. **Science**, v. 371, n. 6530, p. 672-674, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abe5041>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe5041>. Acesso em: 01 ago. 2022.

VON MOOS, Nadia; BURKHARDT-HOLM, Patricia; KOEHLER, Angela. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 20, p. 11327-11335, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/es302332w>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/230827928\\_Uptake\\_and\\_Effects\\_of\\_Microplastics\\_on\\_Cells\\_and\\_Tissue\\_of\\_the\\_Blue\\_Mussel\\_Mytilus\\_edulis\\_L\\_after\\_an\\_Experimental\\_Exposure](https://www.researchgate.net/publication/230827928_Uptake_and_Effects_of_Microplastics_on_Cells_and_Tissue_of_the_Blue_Mussel_Mytilus_edulis_L_after_an_Experimental_Exposure). Acesso em: 01 ago. 2022.

WARING, Rosemary H.; HARRIS, Rose M.; MITCHELL, Sonja C. Plastic contamination of the food chain: a threat to human health? **Maturitas**, v. 115, p. 64-68, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2018.06.010>. Disponível em: [https://www.maturitas.org/article/S0378-5122\(18\)30350-5/fulltext](https://www.maturitas.org/article/S0378-5122(18)30350-5/fulltext). Acesso em: 01 ago. 2022.

WEINSTEIN, Michael P.; WEISS, Scott L.; WALTERS, Mary F. Multiple determinants of community structure in shallow marsh habitats, Cape Fear River estuary, North Carolina, USA. **Marine Biology**, v. 58, p. 227-243, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00391880>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00391880>. Acesso em: 01 ago. 2022.

WELDEN, Natalie Ann; ABYLKHANI, Bexultan; HOWARTH, Leigh Michael. The effects of trophic transfer and environmental factors on microplastic uptake by plaice, *Pleuronectes platessa*, and spider crab, *Maja squinado*. **Environmental Pollution**, v. 239, p. 351-358, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.110>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117351813>. Acesso em: 01 ago. 2022.

WIERCKX, Nick; PRIETO, Maria Auxiliadora; POMPOSIELLO, Pablo; LORENZO, Victor de; O'CONNOR, Kevin; BLANK, Lars M. Plastic waste as a novel substrate for industrial biotechnology. **Microbial Biotechnology**, v. 8, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12312>. Disponível em: <https://sfamjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/1751-7915.12312>. Acesso em: 01 ago. 2022.

WILLIAMS, Allan Thomas; RANGEL-BUITRAGO, Nelson Guillermo; ANFUSO, Giorgio; CERVANTES, Omar; BOTERO, Camilo Mateo. Litter impacts on scenery and tourism on the Colombian North Caribbean coast. **Tourism Management**, v. 55, p. 209-224,



2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2016.02.008>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/296703903\\_Litter\\_impacts\\_on\\_scenery\\_and\\_tourism\\_on\\_the\\_Colombian\\_north\\_Caribbean\\_coast](https://www.researchgate.net/publication/296703903_Litter_impacts_on_scenery_and_tourism_on_the_Colombian_north_Caribbean_coast). Acesso em: 01 ago. 2022.
- WRIGHT, Stephanie L.; KELLY, Frank J. Plastic and Human Health: A Micro Issue? **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 12, p. 6634-6647 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00423>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317078116\\_Plastic\\_and\\_Human\\_Health\\_A\\_Micro\\_Issue](https://www.researchgate.net/publication/317078116_Plastic_and_Human_Health_A_Micro_Issue). Acesso em: 01 ago. 2022.
- XIONG, Xiong; ZHANG, Kai; CHEN, Xianchuan; SHI, Huahong; LUO, Ze; WU, Chenxi. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake – Qinghai Lake. **Environmental Pollution**, v. 235, p. 899-906, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.081>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117345591>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- YOSHIDA, Shosuke; HIRAGA, Kazumi; TAKEHANA, Toshihiko; TANIGUCHI, Ikuo; YAMAJI, Hironao; MAEDA, Yasuhito; TOYOHARA, Kiyotsuna; MIYAMOTO, Kenji; KIMURA, Yoshiharu; ODA, Kohei. A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). **Science**, v. 351, n. 6278, p. 1196-1199, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aad6359>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ZELLER, Mark Ashton; HUNT, Ryan; JONES, Alexander; SURAJ, Sharma. Bioplastics and their thermoplastic blends from *Spirulina* and *Chlorella* microalgae. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 130, n. 5, p. 3263-3275, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.39559>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.39559>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ZHANG, Qian; HE, Yuan; CHENG, Runjing; LI, Qian; QIAN, Zhiyong; LIN, Xiaohui. Recent advances in toxicological research and potential health impact of microplastics and nanoplastics in vivo. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 40415-40448, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19745-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-19745-3>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ZHANG, Yulan; KANG, Shichang; ALLEN, Steve; ALLEN, Deonie; GAO, Tanguang; SILLANPÄÄ, Mika. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. **Earth-Science Reviews**, v. 203, article 103118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001282521930621X>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ZHANG, Zhiqi; CHEN, Yinguang. Effects of microplastics on wastewater and sewage sludge treatment and their removal: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 382, article 122955, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122955>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894719323654>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ZHU, Lin; HUAIYU, Bai; CHEN, Bijuan; SUN, Xuemei; QU, Keming; XIA, Bin. Microplastic pollution in North Yellow Sea, China: Observations on occurrence, distribution and identification. **Science of the Total Environment**, v. 636, p. 20-29, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.182>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718313585>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ZICCARDI, Linda M.; EDGINGTON, Aaron; HENTZ, Karyn; KULACKI, Konrad, J.; DRISCOLL, Susan Kane. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: a state-of-the-science review. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 7, p. 1667-1676, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3461>. Disponível em: <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/etc.3461>. Acesso em: 01 ago. 2022.



# DE RESÍDUO À MATÉRIA-PRIMA: POSSIBILIDADES DE REINserÇÃO DO RESÍDUO DO AÇAÍ EM CADEIAS PRODUTIVAS NA PERSPECTIVA DE UMA ECONOMIA CIRCULAR

## *FROM RESIDUE TO RAW MATERIAL: POSSIBILITIES OF REINserTION OF AÇAÍ RESIDUE IN PRODUCTION CHAINS IN THE PERSPECTIVE OF A CIRCULAR ECONOMY*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

ROSA, Carla Lorena Sandim da; SILVA, Rodrigo Cândido Passos da; CAMARGO, Plínio Barbosa de. De resíduo à matéria-prima: possibilidades de reinserção do resíduo do açaí em cadeias produtivas na perspectiva de uma economia circular. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Carla Lorena Sandim da Rosa**

Engenheira Agrônoma. Especialista em Extensão, Inovação Socioambiental e Desenvolvimento de Sistemas Agroalimentares (NUMA/UFPA). Mestranda em Ciências com área de concentração em Ecologia Aplicada (ESALQ/CENA-USP).  
E-mail: lorenarosa@usp.br

### **Rodrigo Cândido Passos da Silva**

Engenheiro Agrícola e Ambiental. Doutor em Engenharia Civil na área de Geotecnia Ambiental – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Professor Adjunto da Universidade Federal do Pará (UFPA) na área de Engenharia e Meio Ambiente.  
E-mail: rodrigo.passos@ufpa.br

### **Plínio Barbosa de Camargo**

Engenheiro Agrônomo. Doutor em Ciências (Centro de Energia Nuclear na Agricultura – USP). Professor e Pesquisador na Universidade de São Paulo (USP) na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ).  
E-mail: pcamargo@cena.usp.br

## **RESUMO**

A demanda comercial pelo açaí vem crescendo cada vez mais e sendo acompanhada pela geração exacerbada de resíduos após o beneficiamento do fruto, seja pela agroindústria ou pela comercialização local, através do consumo como forma de alimentação, nas cidades da Região Norte do Brasil. O presente trabalho buscou investigar como a comunidade acadêmica vem tratando a temática da gestão dos resíduos do caroço do açaí, entre os anos



de 2011 e 2021, utilizando a bibliometria como ferramenta metodológica para entender as tendências de publicações, tendo como recorte as plataformas *Science Direct*, *Web of Science*, *Scopus* e *Scielo*. O levantamento de dados evidencia que o estudo proposto é um tema emergente, pois o número de publicações vem aumentando a partir do ano de 2019, tendo maior quantidade em 2021. Os estudos são realizados com maior tendência no Brasil, porém a pesquisa é de interesse da comunidade acadêmica internacional e realizada por autores em diversos países como Colômbia, Portugal, Itália, Espanha, Dinamarca, Polônia, Reino Unido e Estados Unidos, mostrando ser um tema promissor para pesquisas futuras. Os trabalhos tratam de diversas possibilidades de reutilização do resíduo e também sobre gestão, portanto, foram divididos em seis subáreas, sendo elas: fonte de energia renovável, remoção de poluentes, condicionador do solo, fonte de extrativo para indústrias, matéria-prima para construção civil e gestão ecoeficiente. Os trabalhos abordam formas possíveis de reinserir o resíduo do açaí numa nova cadeia produtiva, dando novas possibilidades de utilização em diversos setores de produção, tanto na produção de energia, quanto no setor secundário da indústria, promovendo, assim, a economia numa perspectiva circular, dando possibilidades de novas rotas para um resíduo que ainda é tratado como rejeito.

Palavras-chave: Análise bibliométrica. Resíduos gerados na Amazônia. Resíduos de biomassa. Gerenciamento de resíduos de Biomassa. Energia renovável.

## ABSTRACT

The commercial demand for açaí is growing more and more and being accompanied by the exacerbated generation of waste after the processing of the fruit, either by agroindustry or local marketing, through consumption as a form of food, in the cities of the Northern Region. The present work sought to investigate how the academic community has been dealing with the theme of waste management of the açaí stone, between 2011 and 2021, using bibliometry as a methodological tool to understand the trends of publications, having as cut out the platforms *Science Direct*, *Web of Science*, *Scopus* and *Scielo*. The data collection shows that the proposed study is an emerging theme, because the number of publications has been increasing since 2019, with a greater number of publications in 2021, with a greater trend of studies conducted by authors from Brazil, but the research is of interest to authors in Colombia, Portugal, Italy, Spain, Denmark, Poland, United Kingdom and United States, showing to be a promising topic for future research. The studies found were divided into 06 sub-areas: renewable energy source, removal of pollutants, soil conditioner, extractive source for industries, raw material for civil construction and efficient management. The work addresses possible ways to reinsert açaí residue into a new production chain, giving new possibilities of use in various production sectors, both in energy production and in the secondary sector of industry, thus promoting the economy in a circular perspective, giving possibilities of new routes for a waste that is still treated as tailings.

Keywords: Bibliometric analysis. Waste generated in the Amazon. Biomass waste. Biomass Waste Management. Renewable energy.

## 1 INTRODUÇÃO

O açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma das palmeiras mais importantes do gênero *Euterpe* e encontra-se distribuída principalmente na Amazônia. Do fruto dessa espécie a semente é a maior parte e o uso se dá para produção de polpa, a qual é tipicamente consumida no Norte do Brasil. No entanto, devido suas propriedades químicas, principalmente antioxidantes, houve maior comercialização para o restante do Brasil e do mundo (Buratto *et al.*, 2021; Domingues *et al.*, 2017).

Com a crescente demanda do fruto do açaí pela agroindústria e alto consumo regional, há resíduo de semente ou caroço do açaí, como é popularmente chamado, sendo gerado na Região Norte, contribuindo para entupimento de córregos, canais, esgotos e igarapés (Bentes, 2017).

A Organização das Nações Unidas (ONU), através de várias conferências ao longo das últimas décadas, consolidou metas e objetivos para que os países signatários consigam cada vez mais atingir o desenvolvimento sustentável. A última conferência estabelecida ocorreu no ano de 2015 e, dentre os objetivos, a temática dos resíduos sólidos está presente (ONU, 2015).

Pesquisas contendo reutilização do resíduo do beneficiamento do açaí, dando condições para incluí-lo em uma nova cadeia produtiva, estão cada vez mais recorrentes, visto que ele pode ser utilizado para diversos fins, seja na produção de energia, na construção civil, em diversas indústrias e até para remoção de poluentes (Buratto *et al.*, 2021; Nagata *et al.*, 2020; Pessoa *et al.*, 2019; Vitrone *et al.*, 2021). O interesse da comunidade acadêmica em torno do açaí vai além das propriedades benéficas do fruto para o consumo, direcionando-se também para o acúmulo de resíduos gerados, os quais vem sendo tratados como rejeitos. O resíduo do açaí pode ser utilizado em uma nova cadeia produtiva, como na produção de energia através da biomassa, por exemplo (Oliveira *et al.*, 2022). Buscando entender quais os principais eixos temáticos abordados pela academia, relacionados aos resíduos do açaí, a bibliometria ajuda a identificar as tendências acerca do assunto, dando uma visão panorâmica dos trabalhos publicados e das discussões apresentadas sob uma análise estatística. De acordo com Martínez-Lopez *et al.* (2020), essa metodologia é bastante eficaz para desenvolver uma visão geral de um campo de pesquisa, pois utiliza diferentes indicadores.

Com as diversas possibilidades de reutilização do caroço do açaí, o conceito de economia circular pode ser vinculado a esse ciclo



de produção, pois é um novo recurso para ser utilizado tanto na sua própria cadeia, seja como fonte de energia ou como condicionador do solo, quanto em outros ciclos de produção, amenizando a exploração de novos recursos. Segundo Sehnem e Pereira (2019), o conceito de economia circular foi tratado por diversos autores e começou a ser aplicado na Alemanha e no Japão, sendo a ideia principal enxergar o resíduo dentro de um fluxo cíclico, onde ele não será descartado, mas sim, valorizado. Portanto, as pesquisas estão se direcionando cada vez mais para tentar diminuir os impactos socioambientais causados por essa superprodução, além de agregar valor, inserindo-o numa nova cadeia produtiva.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi analisar panoramicamente os artigos científicos contidos em algumas plataformas de pesquisa, sob a metodologia da bibliometria, relacionados ao resíduo do caroço do açaí, para entender quais as principais tendências e prospecções pertinentes para a promoção de uma economia circular socialmente justa e ambientalmente adequada.

## **2 PROCESSOS METODOLÓGICOS**

Neste item, será descrita a metodologia utilizada para a coleta, tratamento e análise dos dados da pesquisa.

### **2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO**

O método do levantamento bibliográfico ajuda o pesquisador a aprofundar seus conhecimentos sobre determinado tema e consiste na leitura de materiais que já foram publicados (Gil, 2010). Este estudo foi desenvolvido a partir de um levantamento bibliográfico que possibilitou a escolha das palavras-chave utilizadas na bibliometria do eixo temático em questão. Ellegaard e Wallin (2015) declaram que métodos bibliométricos são ferramentas que oferecem análises quantitativas de publicações sobre um determinado tema. De acordo com Chain *et al.* (2019), para entender os processos e tendências de uma área de estudo, a bibliometria é um método bastante interessante. As palavras-chave, colocadas no idioma inglês, foram selecionadas de acordo com estudo preliminar.

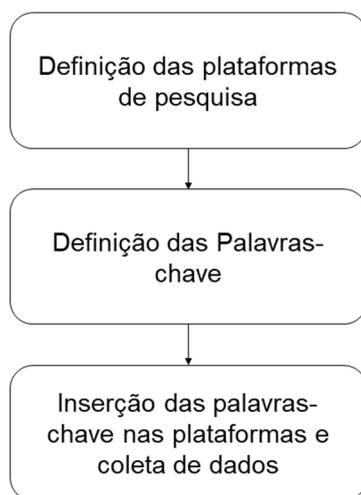
### **2.2 COLETA, TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS**

Para identificar o estado da arte dos trabalhos envolvendo gestão de resíduos sólidos relacionados com o resíduo do açaí, o

trabalho passou por uma série de etapas que consistiram em: levantamento, tratamento e análise dos dados.

O levantamento de dados, em fevereiro de 2022 (Figura 1), ou seja, dos artigos científicos, foi realizado em quatro plataformas, sendo elas: *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science* e *Scielo*. Os últimos dez anos foram selecionados como período de pesquisa (2011-2021). Inicialmente, fez-se a pesquisa com as palavras-chave: "solid waste", "waste management", "technological routes" e "açaí waste", sendo criado um quadro para análise dos resultados obtidos com o número de publicações. Após a obtenção desses resultados, como a intenção de ter resultados mais direcionados para o eixo temático da pesquisa, foi feita a combinação das palavras-chave: "solid waste" AND "açaí waste", "solid waste management" AND "açaí waste" e "açaí waste" AND "technological routes". A análise bibliométrica dá possibilidades para que o pesquisador analise estatisticamente a produção acadêmica de forma panorâmica (Liu *et al.*, 2019).

Figura 1 – Passo a passo para o levantamento de dados



Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

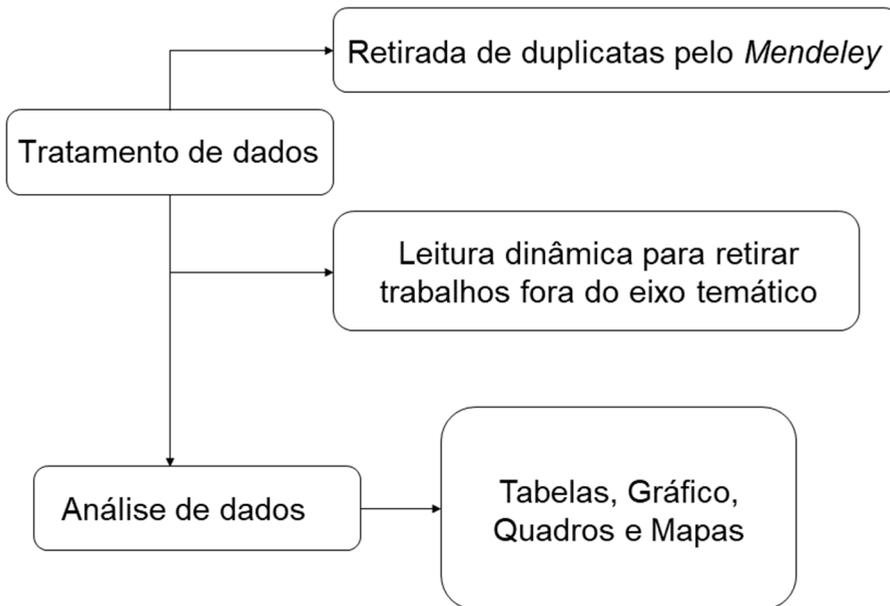
Após o levantamento, deu-se início a etapa de tratamento de dados (Figura 2) e foi feita a triagem dos artigos encontrados, retirando-se duplicatas com o auxílio do *software Mendeley*, além de uma leitura dinâmica para retirar os trabalhos que não se enquadravam no eixo temático.

Com o resultado dessa triagem, iniciou-se a etapa de análise dos dados quantitativos. O *software Excel*® auxiliou na criação de



gráfico para analisar a produção acumulada de artigos científicos com a temática dos resíduos do açaí ao longo do período avaliado (2011-2021). Ademais, foi elaborado um mapa para analisar distribuição e frequência da produção acadêmica mundial (Li *et al.*, 2018). O mapa foi criado com o software Qgis.

Figura 2 – Fluxograma do tratamento e análise de dados coletados



Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

Para compreender o temário estudado dos trabalhos encontrados em torno da temática do resíduo do açaí, foi feita a leitura dos artigos na busca de compreender os principais objetivos dos estudos. Os trabalhos foram divididos em seis subáreas, sendo: fonte de energia renovável; remoção de poluentes; condicionador do solo; fonte de extrativo para indústria; matéria-prima para construção civil; gestão ecoeficiente.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO – CARACTERÍSTICAS QUALIQUANTITATIVAS DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Os dados apresentados sobre as palavras-chave utilizadas individualmente mostraram uma expressiva quantidade de publicações de artigos em revistas científicas.



A Tabela 1 mostra que, durante o período selecionado (2011-2021), a palavra-chave “*Solid Waste*” destacou-se dentre os artigos publicados com 259.059 publicações, seguido de “*Waste Management*” com 209.648 resultados, ambas na plataforma *Science Direct*. De acordo com Chen *et al.* (2015), a temática de gestão de resíduos vem crescendo desde 2004, mas a partir de 2010 teve maior expressão e, segundo os autores, a maior atenção aos impactos ambientais das atividades humanas pode ser o principal motivo para o interesse da comunidade científica.

Tabela 1 – Análise quantitativa das publicações de 2011 a 2021

Palavras-chave	Scopus publicações (n)	Science Direct publicações (n)	SciELO publicações (n)	Web of Science publicações (n)
<i>Solid Waste</i>	69.643	259.059	856	64.658
<i>Waste Management</i>	104.446	209.648	723	81.013
<i>Technological Routes</i>	3.847	75.112	30	0
<i>Açaí Waste</i>	73	471	11	72

Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

Quando o tipo de resíduo foi especificado, utilizando a palavra-chave “*Açaí waste*”, houve um declive na quantidade de publicações nas plataformas selecionadas, porém ainda se teve uma quantidade considerável de publicações na plataforma *Science Direct*, registrando 471 resultados, principalmente a partir do ano de 2019, demonstrando um aumento no interesse pelo tema. O açaí despertou interesse da comunidade acadêmica pelos inúmeros benefícios nutricionais (Barbosa *et al.*, 2020). Já o aumento para o número de publicações envolvendo a temática do resíduo do açaí pode ser devido à sua geração ser bastante expressiva pela agroindústria, devido ao aumento de produção a cada ano para extração da polpa, a qual representa apenas 15% do fruto, ou seja, a maior parte é descartada, podendo chegar a 320 mil t/ano (Barros *et al.*, 2021; Teixeira *et al.*, 2005).

Apesar de a pesquisa com a palavra-chave “*Technological Routes*” ter resultados expressivos de artigos publicados na plataforma



*Science Direct*, a maioria não está associada às rotas tecnológicas para resíduos sólidos. Os resultados encontrados dizem respeito a trabalhos que possuem as palavras “*Technological*” e “*Routes*” utilizadas de maneira separada que podem aparecer no título, resumo e palavras-chave da busca e incluem diversas temáticas. Apenas quando se faz a combinação de palavras-chave nas plataformas selecionadas, direcionando para a temática dos resíduos, é que se encontra um resultado específico.

A combinação de palavras trouxe, como resultado, trabalhos mais próximos do eixo temático proposto para essa pesquisa. Foram utilizadas três combinações: “*Solid Waste*” AND “*Açaí Waste*”; “*Solid Waste Management*” AND “*Açaí Waste*” e “*Açaí Waste*” AND “*Technological Routes*”. Na amostra total (Tabela 2) constam 575 artigos encontrados nas plataformas, porém foi feita uma análise (Tabela 3) sobre os trabalhos, para identificar os que estavam de acordo com o eixo temático, além da exclusão de trabalhos que se repetiam entre as plataformas. Foram selecionados 31 artigos. Segundo estudo bibliométrico de Yang *et al.* (2013) a pesquisa sobre resíduos sólidos aumentou significativamente e concentra-se nas áreas de: engenharia; ciências ambientais e ecologia; química; recursos hídricos; biotecnologia e microbiologia aplicada.

Tabela 2 – Amostra total dos indicadores associados no período de 2011 a 2021

Palavras-chaves	Scopus	Science Direct	Scielo	Web of Science	TOTAL
<i>Solid Waste</i> AND <i>Açaí waste</i>	12	328	0	14	354
<i>Solid Waste Management</i> AND <i>Açaí Waste</i>	2	189	0	4	195
<i>Açaí Waste</i> AND <i>Technological Routes</i>	2	21	0	3	26
				<b>TOTAL</b>	<b>575</b>

Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

Tabela 3 – Resultado de publicações dos indicadores associados pós-análise

<b>Palavras-chaves</b>	<b>Scopus</b>	<b>Science Direct</b>	<b>Scielo</b>	<b>Web of Science</b>	<b>TOTAL</b>
<i>Solid Waste AND Açaí waste</i>	8	8	0	2	18
<i>Solid Waste Management AND Açaí Waste</i>	1	8	0	0	9
<i>Açaí Waste AND Technological Routes</i>	2	2	0	0	4
				<b>TOTAL</b>	<b>31</b>

Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

Na plataforma de pesquisa *Scielo*, quando a palavra-chave “*Solid Waste*” foi buscada, obteve-se 856 resultados, porém, quando se especifica o resíduo do açaí, nenhum resultado foi encontrado. Sousa e Alexandre (2016) fizeram um mapeamento da produção acadêmica sobre a política nacional de resíduos sólidos na plataforma *Scielo* e constataram que diferentes áreas do conhecimento publicam sobre o tema e que há carência de estudos com temáticas de resíduos específicos.

Wilson *et al.* (2015) afirmam que a gestão de resíduos é um dos serviços essenciais para a sociedade do século XXI e pode ser considerada um direito humano básico e, portanto, deveria estar ao lado, em nível de importância, do fornecimento de água potável. A conscientização do Poder Público sobre as questões do desenvolvimento sustentável, além de uma crescente demanda por recursos e energia, também aumentou o interesse pela gestão de resíduos (Chen *et al.*, 2015).

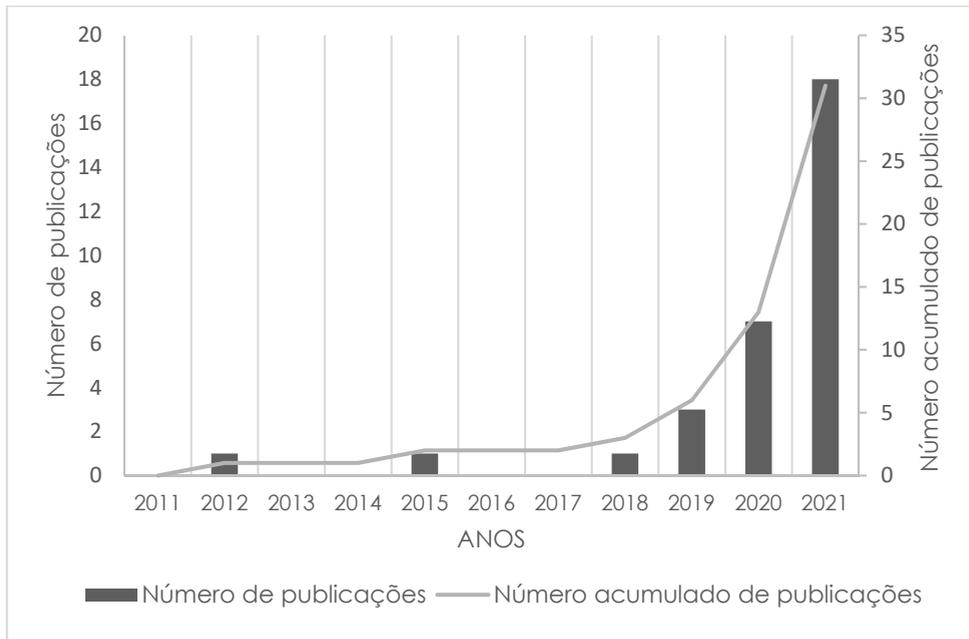
Quando se observa a produção acumulada de artigos sobre a gestão de resíduos do açaí ao longo dos anos (Figura 3), entre 2011 e 2015, foram publicados apenas dois trabalhos, representando 6,45% do total analisado. Entre 2016 e 2018 apenas um trabalho foi publicado sobre essa temática.

A partir do ano de 2019 as publicações começam a ficar mais expressivas e entre 2019 e 2021, a representação de publicações é de mais de 90%. Diante da grande produção, mercantilização e visibilidade mundial que o açaí atingiu, a comunidade acadêmica de



diferentes continentes vem estudando sobre o fruto e agora sobre os resíduos gerados do processo de extração da polpa. Os estudos vão desde assuntos como gestão, tecnologia que geram produtos de interesse para a indústria cosmética e alimentícia, geração de energia, entre outros (Buratto *et al.*, 2021; Ferreira *et al.*, 2021; Sánchez *et al.*, 2015).

Figura 3 – Produção acumulada de artigos sobre gestão de resíduos do açaí entre 2011 e 2021



Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

Pesquisas sobre a temática do resíduo do açaí ainda são emergentes, mas apesar disso, as publicações no Brasil estão se tornando expressivas e existem instituições fora do Brasil que já estão trabalhando o assunto. Durante a pesquisa, foram encontradas produções de artigos na Europa e na América do Norte, porém a maior concentração de publicações está no Brasil (Figura 4). As produções são colaborativas entre instituições do Brasil e de outros países como Colômbia [1], Portugal [1], Espanha [4], Itália [2], Dinamarca [2], Polônia [1], Reino Unido [2], Estados Unidos [1]. Segundo Yamanaka (2012), devido à grande divulgação das propriedades nutricionais e benéficas do fruto, o açaí deixou de ser consumido apenas localmente e passou a ser de interesse dos mercados nacional e internacional.



Figura 4 – Distribuição e frequência das publicações no mundo



Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

O resíduo do açaí é a semente, localmente chamada de caroço, o qual se trata de uma biomassa. A biomassa, no cenário da matriz energética, é considerada como energia renovável, ou seja, é fonte de bioenergia e tanto países desenvolvidos quanto países em desenvolvimento estão em busca de investir em energias renováveis e em novos mercados (Borges *et al.*, 2017).

Foram diversas temáticas de publicação envolvendo o resíduo do açaí e, a partir da análise dos estudos encontrados, foram organizados quadro com cada uma das seis subáreas (Quadro 1): fonte de energia renovável (FER), remoção de poluentes (RP), condicionador do solo (CS), fonte de extrativo para indústria (FEI), matéria-prima para construção civil (MPCC) e gestão eco-eficiente (GE-E).



Quadro 1 – Artigos analisados e classificados em subáreas

<b>Subárea: Fonte de Energia Renovável</b>	<b>Ano</b>
<i>Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region</i>	2015
<i>Pyrolysis of acai seed biomass: kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis</i>	2020
<i>Acai seed ash as a novel basic heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis: optimization of the biodiesel production process</i>	2021
<i>Integration of subcritical water pretreatment and anaerobic digestion technologies for valorization of açai processing industries residues</i>	2019
<i>Magnetic acid catalyst produced from acai seeds and red mud for biofuel production</i>	2021
<i>Process intensification for the recovery of methane-rich biogas from dry anaerobic digestion of açai seeds</i>	2021
<i>Valorization of acai bio-residue as biomass for bioenergy: determination of effective thermal conductivity by experimental approach, empirical correlations and artificial neural networks</i>	2021
<i>Coupled heat and mass transfer modelling in convective drying of biomass at particle-level: model validation with experimental data</i>	2020
<i>Analysis of the isothermal condition in drying of acai berry residues for biomass application</i>	2020
<i>Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality</i>	2022
<i>Dry anaerobic digestion of food industry by-products and bioenergy recovery: a perspective to promote the circular economy transition</i>	2022
<i>Characterization of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes</i>	2012

<b>Subárea: Remoção de Poluentes</b>	<b>Ano</b>
<i>Insights on preparation and characteristics of KOH-doped carbons derived from an abundant agroindustrial waste in Brazil: Amazon açai berry seeds</i>	2021
<i>Açai waste benefiting by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater</i>	2019
<i>Caffeine removal using activated biochar from açai seed (<i>Euterpe oleracea</i> Mart): Experimental study and description of adsorbate properties using Density Functional Theory (DFT)</i>	2021

<b>Subárea: Remoção de Poluentes</b>	<b>Ano</b>
<i>Utilization of acai stone biomass for the sustainable production of nanoporous carbon for CO<sub>2</sub> capture</i>	2020
<i>The addition of biochar as a sustainable strategy for the remediation of PAHcontaminated sediments</i>	2021
<i>Activated carbon obtained from amazonian biomass tailings (acai seed): modification, characterization, and use for removal of metal ions from water</i>	2020
<i>Insight on açai seed biomass economy and waste cooking oil: eco-sorbent castor oil-based</i>	2021
<i>Detoxification of sisal bagasse hydrolysate using activated carbon produced from the gasification of açai waste</i>	2021
<i>Composite of iron phosphate-supported carbon from the açai (Euterpe oleracea) as a solid catalyst for photo-Fenton reactions</i>	2021
<i>Low temperature sulfonation of acai stone biomass derived carbons as acid catalysts for esterification reactions</i>	2019
<i>Brazilian açai berry seeds: an abundant waste applied in the synthesis of carbon-based acid catalysts for transesterification of low free fatty acid waste cooking oil</i>	2021

<b>Subárea: Condicionador do solo</b>	<b>Ano</b>
<i>Chemical and mineralogical characterization and potential use of ash from Amazonian biomasses as an agricultural fertilizer and for soil amendment</i>	2021
<i>Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil</i>	2020

<b>Subárea: Fonte de Extrativo para Indústria</b>	<b>Ano</b>
<i>Characterization of industrial açai pulp residues and valorization by microwave-assisted extraction</i>	2021
<i>Açai (Euterpe oleracea Mart.) seed extracts from different varieties: a source of proanthocyanidins and eco-friendly corrosion inhibition activity</i>	2021

<b>Subárea: Matéria-prima para Construção Civil</b>	<b>Ano</b>
<i>Binderless fiberboards for sustainable construction: materials, production methods and applications</i>	2021



<b>Subárea: Matéria-prima para Construção Civil</b>	<b>Ano</b>
<i>Eco-particleboard manufactured from chemically treated fibrous vascular tissue of acai (Euterpe oleracea Mart.) fruit: a new alternative for the particleboard industry with its potential application in civil construction and furniture</i>	2018

<b>Subárea: Gestão Ecoeficiente</b>	<b>Ano</b>
<i>Waste management and bioenergy recovery from açai processing in the Brazilian Amazonian region: a perspective for a circular economy</i>	2021
Tratamento e análise de resíduos da produção de açai: um estudo sob a ótica da ecoeficiência	2020

Fonte: Elaborada pela autora (Da Rosa, 2022).

Os estudos retratam o resíduo do açai como resultado de uma agroindústria expressiva no beneficiamento do fruto e a maioria tem um viés técnico-tecnológico, mas apesar disso, a preocupação com as questões socioambiental e econômica estão como pano de fundo, visto que os estudos mostram formas de reinserção de um resíduo abundante numa nova cadeia produtiva, o qual interligaria esses assuntos de uma forma inter e transdisciplinar. De acordo com Domingues *et al.* (2017), no Norte do Brasil, as sementes do açai são consideradas resíduos urbanos que afetam o saneamento das cidades e, por mais que sejam utilizadas na técnica da compostagem e até mesmo queimadas para geração de energia térmica, ainda assim a quantidade de resíduos gerada não é absorvida por essas formas de reutilização levantadas nos trabalhos encontrados.

A cadeia produtiva do açai pode ser associada à perspectiva de uma economia circular, devido ao resíduo ter potencial de ser reinserido na sua própria cadeia ou em outras cadeias de produção, principalmente como fonte de energia. Dessa maneira, a exploração de novos recursos pode ser amenizada. Já existem modelos de transição para uma economia circular em diversos países e com a quantidade de resíduos gerados só na cadeia do açai, o Brasil tem condições de pensar em alternativas viáveis de mudança pensando, principalmente, na geração de empregos, na preservação de recursos e cada vez mais em buscar de uma independência energética de caráter renovável. A Europa faz a coleta de dados de resíduos e possui um Plano de Ação da Economia Circular com marcos regulatórios compartilhados, medidas financeiras e acordos comerciais com

estruturas de monitoramento das estratégias para avaliar o desempenho do cumprimento das metas (Sileryte *et al.*, 2022). Portanto, o Brasil pode usar os exemplos dos países que já possuem um plano para uma economia circular e adaptar à sua realidade, levando em consideração as particularidades regionais.

Grande parte dos artigos encontrados discutem o uso do resíduo do açaí como fonte de energia renovável, totalizando doze trabalhos. De acordo com Maciel-Silva *et al.* (2019), o fruto do açaí, após o despulpamento tem uma grande quantidade de biomassa residual e a biomassa é fonte de energia armazenada na forma de carboidratos que vem do processo de fotossíntese.

Uma das utilizações do resíduo se dá pela digestão anaeróbica, sendo o material orgânico convertido em biogás rico em metano sob temperatura mesofílica e microbiota metanogênica, visando a recuperação de energia e, nos estudos de Sganzerla *et al.* (2021), as sementes do açaí foram utilizadas para passar por esse processo sob regime seco e foi constatado que esse método de reaproveitamento do resíduo poderia suprir 43,19% da energia requerida pela indústria de processamento de açaí.

Santos *et al.* (2020) constataram que a semente do açaí é uma excelente fonte potencial de matéria-prima para produção de bioenergia através de processos termoquímicos, principalmente a pirólise que converte biomassa em hidrocarbonetos combustíveis. Já existem métodos de utilização do resíduo da queima das sementes, ou seja, aproveitamento do resíduo do açaí em duas etapas, pois as cinzas das sementes do açaí podem contribuir para uma produção mais limpa do biodiesel, visto que é facilmente sintetizada tornando-se um catalisador sustentável e eficiente (Mares *et al.*, 2021).

Além disso, na Amazônia, comunidades isoladas têm dificuldades de acesso à energia elétrica e o óleo diesel é comumente utilizado para o abastecimento de energia. Existem projetos do governo que já foram avaliados para utilizar a biomassa como fonte de energia renovável através da queima ou gaseificação, sendo considerados sustentáveis quando ligados a sistemas produtivos e que podem melhorar drasticamente a vida das comunidades (Sánchez *et al.*, 2015).

A utilização do resíduo do açaí para fins de “Remoção de poluentes” teve destaque em onze trabalhos. Um destino promissor para o resíduo abundante do açaí é a utilização para fabricação de carvão ativado ou biocarvão, visto que é um material rico em carbono e pode ser utilizado de diversas formas, principalmente na adsorção de



contaminantes, sendo a característica da biomassa fundamental para a qualidade do carvão. A biomassa do resíduo do açaí ativada com hidróxido de potássio (KOH) é promissora e serve para tratamento de água, remoção de poluentes entre outros (Zavarize; De Oliveira, 2021).

O baixo custo de obtenção e grande quantidade de resíduo do açaí podem impulsionar a produção de carvão ativado e ser utilizado de diversas formas estratégicas, tendo destaque na adsorção de efluentes como remoção de metais da água, poluentes orgânicos ambientais tal qual pesticidas, corantes têxteis, inibidores de fermentação e fosfatos de ferro, além de remoção de cafeína de soluções aquosas se ativado com carbonato de potássio, remediação de sedimentos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, onde os contaminantes migram para as superfícies do biochar feito a partir do resíduo do açaí (Almeida *et al.*, 2021; Bentes *et al.*, 2021; Bianco *et al.*, 2021; Nascimento *et al.*, 2021; Pessôa *et al.*, 2019; Queiroz *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2020).

A produção de catalisadores ácidos heterogêneos a partir do resíduo do açaí aplicados na conversão de óleo de cozinha residual de baixo teor de ácidos graxos em biodiesel se mostrou bastante promissora, ou seja, uma alternativa sustentável para produção de combustível (Araujo *et al.*, 2019; Zavarize; De Oliveira, 2021). A eutrofização nos rios, que é provocada pelo descarte irregular do óleo de cozinha, é uma preocupação ambiental. Martins *et al.* (2021), utilizou o caroço do açaí como enchimento em poliuretano à base de mamona para ser utilizado como filtro separador do óleo na água funcionando como um ecossorvente de boa qualidade.

Na subárea “condicionador do solo”, foram encontrados dois artigos. A biomassa do açaí pode também ser utilizada para produção de biocombustível e esse processo gera a cinza, do processo da queima, como resíduo. Albuquerque *et al.* (2021) avaliaram em seu trabalho o rendimento, composição e qualidade das cinzas produzidas da biomassa do caroço do açaí para ser utilizado como fertilizante e corretivo do solo como forma de reciclar esse resíduo e encontrou resultados promissores. Além disso, as cinzas da queima da biomassa podem melhorar a qualidade química do solo, aumentando os teores de fósforo, potássio e magnésio, além de reduzir o teor de alumínio, aumentando a saturação por bases (Sato *et al.*, 2020).

O caroço do açaí, além de fornecer energia da biomassa, também contém substâncias que podem ser aproveitadas por alguns setores industriais. Os dois trabalhos publicados na subárea “fonte de extrativos para a indústria” apresentam essas alternativas. De acordo

com Buratto *et al.* (2021), esse resíduo pode ser fonte de compostos bioativos, como extrativos hidrossolúveis com quantidade interessante de polifenóis e flavonoides, sendo potenciais aditivos antioxidantes, podendo ser aplicados nas indústrias cosmética e alimentícia, além da presença de polifenóis que podem ser utilizados na indústria farmacêutica (Martins *et al.*, 2021).

A subárea “Matéria-prima para construção civil” contém dois trabalhos, os quais trazem alternativas de utilização do resíduo. Os painéis de fibra servem para fabricação tanto de móveis, quanto para aplicações semiestruturais internas e externas e são geralmente fabricados com ligantes sintéticos, os quais são fabricados com recursos não renováveis, além de serem classificados como cancerígenos para humanos. O caroço do açaí, uma fonte lignocelulósica, pode ser utilizado para fabricação desses painéis de fibra, sendo uma fonte econômica e ecológica (Vitrone *et al.*, 2021).

A produção de aglomerados, que servem para indústria moveleira e construção civil, conta com a produção, principalmente, do monocultivo de Eucalipto. A quantidade de fibras existentes na semente do açaí é apropriada para fabricação desses aglomerados em escala industrial, sendo uma alternativa sustentável (Mesquita *et al.*, 2018).

Artigos com a proposta mais focadas nas formas de gestão do resíduo, tendo como pano de fundo alternativas sustentáveis e pensando no lado socioeconômico de maneira geral, foram incluídos na subárea “gestão ecoeficiente” e, de acordo com a metodologia implementada, foram encontrados dois trabalhos. Moreira e De Souza (2020) diagnosticaram qual tratamento dado ao resíduo do açaí gerado nos estabelecimentos de venda de açaí na Região Metropolitana de Belém, a fim de encontrar meios para que os próprios vendedores desfrutem de uma alternativa sustentável, contribuindo para redução dos impactos socioambientais na cidade. Grande parte dos vendedores de açaí não possui conhecimento sobre gestão socioambiental e não sabe sobre a destinação correta dos resíduos, bem como não possui um plano de gestão.

Dentre as formas de gerenciamento para uma gestão ecoeficiente, a recuperação de bioenergia é a mais encontrada na literatura e, o próprio funcionamento da agroindústria poderia ser abastecido com energia proveniente da reutilização do resíduo, sendo uma solução viável e prática para gestão, contribuindo para matriz energética e descarbonização (Ferreira *et al.*, 2021). Os trabalhos encontrados mostram diversas possibilidades da reutilização e



reinscrição do caroço do açaí numa nova cadeia produtiva, reduzindo impactos ambientais causados pelo excesso desse resíduo advindo da agroindústria e do consumo elevado, principalmente, na Região Norte do Brasil.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A plataforma *Science Direct* é onde mais se encontrou trabalhos publicados relacionados ao resíduo do açaí e o Brasil é o país com maior frequência de publicações sobre o assunto. Além disso, dentro do eixo temático principal, as subáreas “Fonte de energia renovável” e “Remoção de poluentes” são as que possuem a maior quantidade de trabalhos registrada, de acordo com a divisão e classificação dos autores desse capítulo.

A produção científica em torno da temática dos resíduos sólidos já está bastante difundida no cenário mundial, de forma mais específica, o resíduo do beneficiamento do açaí vem sendo olhado com mais atenção pela comunidade acadêmica, principalmente a partir de 2019, que vem buscando saídas sustentáveis para a reutilização desse resíduo por diversos setores, principalmente no setor energético de matriz renovável.

A perspectiva de uma economia circular para o resíduo do caroço do açaí é viável pela capacidade de reaproveitamento em várias cadeias produtivas existentes no país, destacando a geração de energia renovável, por se tratar de uma biomassa. A prática da economia circular em outros países pode ser fonte balizadora para o Brasil, mas também levando em consideração suas peculiaridades. A gestão dos resíduos do caroço do açaí também é premissa para construção de um caminho rumo ao desenvolvimento sustentável, visto que dá possibilidades de amenizar a exploração de recursos em alguma medida e, além disso, pode ajudar a alcançar os objetivos sobre cidades e comunidades sustentáveis e consumo e produção responsável, propostos pela Organização das Nações Unidas.

#### REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Alan R. L.; ANGÉLICA, Rômulo S.; MERINO, Agustín; PAZ, Simone P. A. Chemical and mineralogical characterization and potential use of ash from Amazonian biomasses as an agricultural fertilizer and for soil amendment. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, p. 126472, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126472>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621006922>. Acesso em: 18 mar. 2022.
- ALMEIDA, Arthur da Silva Vasconcelos de; VIEIRA, Wedja Timóteo; BISPO, Mozart Daltro; MELO, Samara Farias de; SILVA, Thiago Lopes da; BALLIANO, Tatiane

Luciano; VIEIRA, Melissa Gurgel Adeodato; SOLETTI, João Inácio. Caffeine removal using activated biochar from açai seed (*Euterpe oleracea* Mart): experimental study and description of adsorbate properties using Density Functional Theory (DFT). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104891, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104891>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720312409>. Acesso em: 22 mar. 2022.

ARAUJO, Rayanne O.; CHAAR, Jamal da Silva; QUEIROZ, Leandro Santos; ROCHA FILHO, Geraldo Narciso da; COSTA, Carlos Emmerson Ferreira da; SILVA, Graziela C. T. da; LANDERS, Richard; COSTA, Maria J. F.; GONÇALVES, Alexandre A. S.; SOUZA, Luiz K. C. de. Low temperature sulfonation of açai stone biomass derived carbons as acid catalysts for esterification reactions. **Energy Conversion and Management**, v. 196, p. 821-830, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.059>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419307307>. Acesso em: 19 mar. 2022.

BARBOSA, Priscila Oliveira; SOUZA, Melina Oliveira de; PALA, Daniela; FREITAS, Renata Nascimento. Açai (*Euterpe oleracea* Martius) as an antioxidant. In: PREEDY, Victor R. (ed.). **Pathology: Oxidative Stress and Dietary Antioxidants**. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2020, p. 127-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815972-9.00012-3>.

BARROS, Silma de Sá; OLIVEIRA, Erick da Silva; JR PESSOA, Wanison André Gil; ROSAS, Alexandra Lizandra Gomes; FREITAS, Ana Emília Margarido de; LIRA, Márcia Santos de F.; CALDERARO, Fábio Leandro; SARON, Clodoaldo; FREITAS, Flávio Augusto de. Waste açai (*Euterpe precatoria* Mart.) seeds as a new alternative source of cellulose: extraction and characterization. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, e31110716661, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16661>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/16661>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BENTES, Vera Lúcia Imbiriba. **Preparação e caracterização de compósitos a base de fosfatos de ferro suportados em carvões ativados de resíduos de caroços de açai e do endocarpo de tucumã para aplicação ambiental**. 2017. 137 f. Tese (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6182>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BENTES, Vera L.; NOBRE, Francisco X.; BARROS, Ivoneide C. L.; COUCEIRO, Paulo R. C. Composite of iron phosphate-supported carbon from the açai (*Euterpe oleracea*) as a solid catalyst for photo-Fenton reactions. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 16, p. 100520, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100520>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153221000957>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BIANCO, Francesco; RACE, Marco; PAPIRIO, Stefano; OLESZCZUK, Patryk; ESPOSITO, Giovanni. The addition of biochar as a sustainable strategy for the remediation of PAH-contaminated sediments. **Chemosphere**, v. 263, p. 128274, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128274>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653520324693>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BORGES, Ane Caroline Pereira; SILVA, Marcelo Santana; ALVES, Carine Tondo; TORRES, Echnildo Andrade. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 10, n. 2, mar. 2017. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/239>. Acesso em: 08 mar. 2022.



BURATTO, Rafaella T.; COCERO, María José; MARTÍN, Ángel. Characterization of industrial açai pulp residues and valorization by microwave-assisted extraction. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, v. 160, p. 108269, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108269>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270120307315>. Acesso em: 08 mar. 2022.

CHAIN, Caio Peixoto; SANTOS, Antônio Carlos dos; CASTRO JUNIOR, Luiz Gonzaga de; PRADO, José Willer do. Bibliometric analysis of the quantitative methods applied to the measurement of industrial clusters. **Journal of Economic Surveys**, v. 33, n. 1, p. 60-84, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/joes.12267>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/joes.12267>. Acesso em: 08 mar. 2022.

CHEN, Haibin; JIANG, Wei; YANG, Yan; MAN, Xin; TANG, Mingyi. A bibliometric analysis of waste management research during the period 1997-2014. **Scientometrics**, v. 105, n. 2, p. 1005-1018, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1714-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-015-1714-3>. Acesso em: 12 mar. 2022.

DOMINGUES, Alessandra Ferraiolo Nogueira; MATTIETTO, Rafaella de Andrade; OLIVEIRA, Maria do Socorro Padilha. **Teor de lipídeos em caroços de Euterpe oleracea Mart**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 115. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1062268/1/BOLETIMPD115Ainfo.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2022.

ELLEGAARD, Ole; WALLIN, Johan A. The bibliometric analysis of scholarly production: How great is the impact? **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 1809-1831, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1645-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-015-1645-z>. Acesso em: 16 mar. 2022.

FERREIRA, Samuel F.; BULLER, Luz S.; MACIEL-SILVA, Francisco W.; SGANZERLA, William G.; BERNI, Mauro D.; FORSTER-CARNEIRO, Tânia. Waste management and bioenergy recovery from açai processing in the Brazilian Amazonian region: a perspective for a circular economy. **Biofuels Bioprod Biorefin**, v. 15, n. 1, p. 37-46, jan./fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.2147>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbb.2147>. Acesso em: 16 mar. 2022.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

LI, Nan; HAN, Ruru; LU, Xiaohui. Bibliometric analysis of research trends on solid waste reuse and recycling during 1992-2016. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 130, p. 109-117, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303841>. Acesso em: 16 mar. 2022.

LIU, Wenjing; WANG, Jingsheng; LI, Chao; CHEN, Baoxiong; SUN, Yufang. Using Bibliometric Analysis to Understand the Recent Progress in Agroecosystem Services Research. **Ecological Economics**, v. 156, p. 293-305, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800918302192>. Acesso em: 16 mar. 2022.

MACIEL-SILVA, Francisco W.; MUSSATO, Solange I.; FORSTER-CARNEIRO, Tânia. Integration of subcritical water pretreatment and anaerobic digestion technologies for valorization of açai processing industries residues. **Journal of Cleaner Production**, v. 228, p. 1131-1142, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.362>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619314635>. Acesso em: 07 mar. 2022.

MARES, Erica Karine Lourenço; GONÇALVES, Matheus Arrais; LUZ, Patrícia Teresa Souza da; ROCHA FILHO, Geraldo Narciso da; ZAMIAN, José Roberto; CONCEIÇÃO, Leyvison Rafael Vieira da. Acai seed ash as a novel basic heterogeneous catalyst for biodiesel synthesis: Optimization of the biodiesel production process. **Fuel**, v. 299, p. 120887, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120887>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623612100764X>. Acesso em: 09 mar. 2022.

MARTÍNEZ-LÓPEZ, Francisco J.; MERIGÓ, José M.; GÁZQUEZ-ABAD, Juan Carlos; RUIZ-REAL, J. L. Industrial marketing management: Bibliometric overview since its foundation. **Industrial Marketing Management**, v. 84, p. 19-38, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2019.07.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019850119307308>. Acesso em: 09 mar. 2022.

MARTINS, Gabriel R.; GUEDES, Douglas; MARQUES DE PAULA, Urbano L.; DE OLIVEIRA, Maria d. S. P.; LUTTERBACH, Marcia T. S.; REZNIK, Leila Y.; SÉRVULO, Eliana F.C.; ALVIANO, Celuta S.; RIBEIRO DA SILVA, Antonio J.; ALVIANO, Daniela S. Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) Seed Extracts from Different Varieties: A Source of Proanthocyanidins and Eco-Friendly Corrosion Inhibition Activity. **Molecules**, v. 26, n. 11, p. 3433, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26113433>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/26/11/3433>. Acesso em: 18 mar. 2022.

MESQUITA, Antonio de Lima; BARRERO, Núbia Garzon; FIORELLI, Juliano; CHRISTOFORO, André Luís; FARIA, Lenio José Guerreiro de; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Eco-particleboard manufactured from chemically treated fibrous vascular tissue of acai (*Euterpe oleracea* Mart.) Fruit: A new alternative for the particleboard industry with its potential application in civil construction and furniture. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 644-651, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.074>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669017309044>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MOREIRA, Márcia Athayde; DE SOUSA, Ana Lidia Ferreira de. Tratamento e análise de resíduos da produção de açaí: um estudo sob a ótica da ecoeficiência. **Revista Ambiente Contábil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte**, v. 12, n. 2, p. 279-297, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21680/2176-9036.2020v12n2ID18923>. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/ambiente/article/view/18923>. Acesso em: 18 mar. 2022.

NASCIMENTO, Bruna Figueiredo do; ARAUJO, Caroline Maria Bezerra de; NASCIMENTO, Alisson Castro do; SILVA, Flávio Luiz Honorato da; MELO, Débora Jamila Nóbrega de; JAGUARIBE, Emerson Freitas; CAVALCANTI, Jorge Vinicius Fernandes Lima; MOTTA SOBRINHO, Mauricio Alves da. Detoxification of sisal bagasse hydrolysate using activated carbon produced from the gasification of açaí waste. **Journal of Hazardous Materials**, v. 409, p. 124494, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124494>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420324845>. Acesso em: 16 mar. 2022.

NAGATA, Gabriele A.; SOUTO, Bernardo A.; PERAZZINI, Maisa T. B.; PERAZZINI, Hugo. Analysis of the isothermal condition in drying of acai berry residues for biomass application. **Biomass and Bioenergy**, v. 133, p. 105453, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105453>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953419304027>. Acesso em: 25 mar. 2022.

OLIVEIRA, Paulo Renato Souza; TRUGILHO, Paulo Fernando; OLIVEIRA, Tiago José Pires de. Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 6, p. 8549-8558, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15847-6>.



Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-15847-6>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PESSÔA, Thiago Sabino; FERREIRA, Letticia Emely de Lima; SILVA, Maryne Patrícia da; PEREIRA NETO, Luiz Martins; NASCIMENTO, Bruna Figueiredo do; FRAGA, Tiago José Marques; JAGUARIBE, Emerson Freitas; CAVALCANTI, Jorge Vinicius; MOTTA SOBRINHO, Maurício Alves da. Açai waste benefiting by gasification process and its employment in the treatment of synthetic and raw textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118047, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118047>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619329178>. Acesso em: 11 mar. 2022.

QUEIROZ, Leandro S.; SOUZA, Luiz K. C. de; THOMAZA, Kelly Taise C.; LIMA, Erika Tallyta Leite; ROCHA FILHO, Geraldo n. da; NASCIMENTO, Luis Adriano S. do; PIRES, Luiza H. de Oliveira; FAIAL, Kelson do Carmo Freitas; COSTA, Carlos E. F. da. Activated carbon obtained from amazonian biomass tailings (acai seed): modification, characterization, and use for removal of metal ions from water. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110868, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110868>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720307982>. Acesso em: 27 mar. 2022.

SÁNCHEZ, Antonio Santos; TORRES, Ednildo Andrade; KALID, Ricardo de Araújo. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 278-290, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.075>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115003457>. Acesso em: 09 mar. 2022.

SANTOS, Vanuza O.; QUEIROZ, Leandro S.; ARAÚJO, Rayanne O.; RIBEIRO, Flaviana C. P.; GUIMARÃES, Mariana N.; COSTA, Carlos E.F. da; CHAAR, Jamal S.; SOUZA, Luiz K. C. de. Pyrolysis of acai seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology Reports**, v. 12, p. 100553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100553>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X20301742>. Acesso em: 09 mar. 2022.

SATO, Michel Keisuke; LIMA, Herdjanía Veras de; COSTA, Aline Noronha; RODRIGUES, Sueli; MOONEY, Sacha J.; CLARKE, Michèle; PEDROSO, Augusto José Silva; MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas. Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 36-46, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095758201932244X>. Acesso em: 19 mar. 2022.

SEHNEM, Simone; PEREIRA, Susana Carla Farias. Rumo à economia circular: sinergia existente entre as definições conceituais correlatas e apropriação para a literatura brasileira. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa**, v. 18, n. 1, p. 35-62, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21529/RECADM.2019002>. Disponível em: <http://www.periodicosibepes.org.br/index.php/recadm/article/view/2581>. Acesso em: 01 abr. 2022.

SGANZERLA, William G.; AMPESE, Larissa C.; PARISOTO, Thuanny A. C.; FORSTER-CARNEIRO, Tânia. Process intensification for the recovery of methane-rich biogas from dry anaerobic digestion of açai seeds. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01698-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01698-1>. Acesso em: 09 mar. 2022.

SILERYTE, Rusne; SABBE, Arnout; BOUZAS, Vasileios; MEISTER, Kozmo; WANDL, Alexander; TIMMEREN, Arjan van. European Waste Statistics data for a Circular

Economy Monitor: opportunities and limitations from the Amsterdam Metropolitan Region. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, p. 131767, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131767>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622013786>. Acesso em: 03 mai. 2022.

SOUSA, José Paulo; ALEXANDRE, Érica Rebouças. Política Nacional de Resíduos Sólidos Urbanos: mapeamento da produção acadêmica brasileira de 2000 a 2015 nos periódicos da Scielo. **Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – vol. 4**, Eixo Temático ET-01-025 – Gestão Ambiental, Congestas, 2016. Disponível em: <http://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2016/trabalhos/pdf/congestas2016-et-01-025.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2022.

SOUZA, Luiz K. C. de; GONÇALVES, Alexandre A. S.; QUEIROZ, Leandro Santos; CHAAR, Jamal S.; ROCHA FILHO, Geraldo n. da; COSTA, Carlos E. F. da. Utilization of acai stone biomass for the sustainable production of nanoporous carbon for CO<sub>2</sub> capture. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 25, p. e00168, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00168>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993719302891>. Acesso em: 22 mar. 2022.

TEIXEIRA, Leopoldo Brito; GERMANO, Vera Lucia Campos; OLIVEIRA, Raimundo Freire de; FURLAN JUNIOR, José. Processos de compostagem usando resíduos das agroindústrias de açaí e de palmito do açaizeiro. **Circular Técnica 41**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2005. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/28116/1/Circ.tec.41.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2022.

ONU – UNITED NATIONS. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. **70/1 Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**, 2015. Disponível em: [https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E). Acesso em: 27 mar. 2022.

VITRONE, Federica; RAMOS, Diego; FERRANDO, Francesc; SALVADÓ, Joan. Binderless fiberboards for sustainable construction. Materials, production methods and applications. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 102625, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102625>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221004836>. Acesso em: 28 mar. 2022.

WILSON, David C.; RODIC, Ljiljana; MODAK, Prasad; SOOS, Reka; ROGERO, Ainhoa Carpintero; VELIS, Costas; IYER, Mona; SIMONETT, Otto. **Global Waste Management Outlook**. United Nations Environment Programme, UNEP, cap. 3, p. 63-100, 2015. Disponível em: [https://eprints.whiterose.ac.uk/99773/1/GWMO\\_report.pdf](https://eprints.whiterose.ac.uk/99773/1/GWMO_report.pdf). Acesso em: 28 mar. 2022.

YAMANAKA, Eric Seiti. Cultivo, extração e beneficiamento do açaí orgânico. **Dossiê Técnico**. Universidade Estadual Paulista, SIRT/UNESP, 2012. Disponível em: <http://sbrf.ibict.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NjEwOA%3D%3D>. Acesso em: 08 mar. 2022.

YANG, Lie; CHEN, Zhulei; LIU, Ting; GONG, Zhe; YU, Yingjian; WANG, Jia. Global trends of solid waste research from 1997 to 2011 by using bibliometric analysis. **Scientometrics**, v. 96, n. 1, p. 133-146, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-012-0911-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11192-012-0911-6>. Acesso em: 17 mar. 2022.

ZAVARIZE, Danilo Gualberto; OLIVEIRA, Jorge Diniz de. Brazilian açaí berry seeds: an abundant waste applied in the synthesis of carbon-based acid catalysts for transesterification of low free fatty acid waste cooking oil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 17, p. 21285-21302, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12054-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-12054-7>. Acesso em: 08 mar. 2022.





# INFLUÊNCIA DE AGREGADOS PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE ARGAMASSAS

## *INFLUENCE OF AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE ON MORTARS COMPRESSIVE STRENGTH*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

ROSA, Maíta dos Santos; VAN ELK, Ana Ghislane Henriques Pereira; PAIVA, William de; CONCEIÇÃO, Vinícius Masquetti da. Influência de agregados provenientes de resíduos de construção e demolição na resistência à compressão de argamassas. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.).

**Cooperação Intersectorial e Inovação:** ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Maíta dos Santos Rosa**

Mestranda em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Graduada em Engenharia Civil pela UERJ. Técnica em Edificações pela Escola Técnica Estadual Henrique Lage (ETEHL/FAETEC).

E-mail: maitarosa@outlook.com

### **Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk**

Professora Adjunta da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Graduada em Engenharia Civil e Mestre em Geotecnia pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutora em Geotecnia Ambiental pela Universidad de Oviedo na Espanha. Especialista em Engenharia Sanitária e Controle Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública (ENSP/FIOCRUZ).

E-mail: anaghislane@eng.uerj.br

### **William de Paiva**

Professor Adjunto da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). Graduado em Licenciatura Plena em Matemática pela UEPB. Graduado em Engenharia Civil e Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutor em Engenharia Civil, área de concentração Geotecnia, pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Especialista em Projetos, Execução e Controle de Estruturas e Fundações pelo Instituto de Pós-Graduação e Graduação (IPOG).

E-mail: w.paiva461@gmail.com

### **Vinícius Masquetti da Conceição**

Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Graduado em Engenharia Civil e em Tecnologia em Meio Ambiente pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (EESC-USP).

E-mail: vinicius.conceicao@fau.ufrj.br



## RESUMO

A indústria da construção civil gera quantidades significativas de resíduos sólidos e há no setor uma demanda por quantidades elevadas de matéria-prima para a produção de agregados, o que resulta em externalidades negativas ao meio ambiente. Alguns tipos de resíduos gerados pela construção civil podem retornar à cadeia produtiva na forma de agregados, através de processos de reciclagem e/ou reuso. Em razão da valorização dos resíduos de construção e demolição (RCD) se faz necessário a consolidação de informações a respeito da viabilidade técnica dessa aplicação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a influência da substituição de agregados naturais por agregados reciclados mistos provenientes de RCD na resistência à compressão de argamassas. Dessa maneira, foram obtidos da literatura dados de resistência à compressão de 85 argamassas produzidas com diferentes teores de agregado reciclado de resíduo misto, bem como de suas respectivas argamassas de referência, produzidas sem agregado reciclado. Os dados foram submetidos a análise estatística, que consistiu na descrição dos dados, geração de correlograma e análise de variância (ANOVA). A partir da metodologia estatística adotada, concluiu-se que a diferença existente entre a resistência à compressão das argamassas com e sem agregado reciclado de resíduo misto não é significativa, e que o teor de agregado reciclado misto não influencia diretamente nos resultados de resistência à compressão das argamassas. Também foram identificados na literatura os principais fatores relacionados aos agregados reciclados, como alta absorção de água e ocorrência de reações pozolânicas, que podem estar relacionados às variações de resistência à compressão de argamassas, por vezes observadas.

Palavras-chave: Resíduos de Construção e Demolição. RCD. Agregado reciclado. Argamassa. Resistência à compressão.

## ABSTRACT

The construction industry generates significant amounts of solid waste and there is a demand in the sector for high amounts of raw material for the production of aggregates, which results in negative externalities to the environment. Some types of waste generated by civil construction can return to the production chain in the form of aggregates, through recycling and/or reuse processes. In view of the recovery of construction and demolition waste (CDW) it is necessary to consolidate information regarding the technical feasibility of this application. In this context, the present work aimed to analyze the influence of replacing natural aggregates with mixed recycled aggregates from CDW on the compressive strength of mortars. Thus, data on compressive strength of 85 mortars produced with different contents of recycled aggregate from mixed waste were obtained from the literature, as well as compressive strength data of their respective reference mortars, produced without recycled aggregate. Data were submitted to statistical analysis, which consisted of data description, generation of correlogram and analysis of variance (ANOVA). From the statistical methodology adopted, it was concluded that the difference between the compressive strength of mortars with and without recycled mixed waste aggregate is not significant, and that the mixed recycled aggregate



content does not directly influence the compressive strength results of mortars. The main factors related to recycled aggregates, which may be related to variations in mortar compressive strength sometimes observed, such as high water absorption and occurrence of pozzolanic reactions, were also identified in the literature.

Keywords: Construction and demolition waste. CDW. Recycled aggregate. Mortar. Compressive strength.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil gera um volume significativo de resíduos. Aproximadamente, 30% do total de resíduos gerados no mundo são resíduos de construção e demolição (RCD) (Thongkamsuk *et al.*, 2017). No Brasil, foram coletados, em 2020, aproximadamente 47 milhões de toneladas de RCD (Abrelpe, 2021). Por serem volumosos, os RCDs ocupam grandes espaços nos aterros sanitários, e quando descartados de forma inadequada podem obstruir os sistemas de drenagem urbana, assorear rios e córregos, contribuir para a proliferação de agentes transmissores de doenças e para a degradação da paisagem urbana (Cabral *et al.*, 2010; Ferreira; Anjos; Nóbrega *et al.*, 2019; Moretti *et al.*, 2016).

Uma das alternativas para a destinação de grande parte desses resíduos é a reciclagem, que pode transformá-los em agregados potencialmente úteis de serem usados como materiais de construção (Alberte; Handro, 2021). Cerca de 80% dos resíduos gerados pela construção civil são inertes (Education..., 2011) e mais de 75% têm potencial de valorização, reciclagem e/ou reuso (Yeheyis *et al.*, 2013).

A construção civil é uma das atividades econômicas que mais consomem matéria-prima, cerca de 3.000 Mt/ano (Pacheco-Torgal, 2017). Estima-se que o setor é responsável pelo consumo de 40% de todo o recurso natural disponível no planeta (Ferreira; Anjos; Nóbrega *et al.*, 2019). De acordo com a Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (Anepac, 2015), a produção de agregados para a construção civil correspondeu em 2014 a  $\frac{2}{3}$  de toda a produção mineral global. A areia, que é usada como agregado miúdo, é o segundo material natural mais demandado no mundo depois da água, e aproximadamente 85% dessa demanda provém da indústria da construção civil (Lam *et al.*, 2019).

Com o advento do Acordo de Paris e as metas voluntárias de redução de emissões de carbono estabelecidas pelos 195 países que ratificaram o Acordo, aumenta-se a necessidade de uma indústria da construção civil mais sustentável. O setor contém elementos que produzem alta pegada de carbono, como a produção e o transporte



de agregados (Akhtar; Sarmah, 2018). O uso de agregado reciclado de RCD reduz a demanda por agregados de recursos naturais, bem como a demanda por aterros sanitários (Wang *et al.*, 2021). Dependendo de sua qualidade, o agregado reciclado pode ser empregado em várias obras de engenharia civil, contribuindo para a promoção da sustentabilidade do país (Lam *et al.*, 2019; Pimentel *et al.*, 2020)

A Resolução Conama nº 448/2012 estabeleceu que os resíduos pertencentes a classe "A" devem ser reutilizados ou reciclados como agregados. A ABNT NBR 15116:2021 estabelece requisitos e métodos de ensaio para o uso de agregados reciclados em argamassas e concretos de cimento Portland. Essa norma subdivide os agregados pertencentes à classe A em: agregado reciclado cimentício (ARCI); agregado reciclado de concreto (ARCO); e agregado reciclado de resíduo misto (ARM), constituído por uma mistura de materiais cimentícios e cerâmicos. Diversos estudos experimentais (Frotté *et al.*, 2017; Jochem *et al.*, 2019; Mikami *et al.*, 2018; Pimentel *et al.*, 2018; Sainz-Aja *et al.*, 2021; Samiei *et al.*, 2015; Silva; Capuzzo, 2020) vêm sendo realizados com o objetivo de investigar a viabilidade técnica de concretos e argamassas com o emprego de agregados reciclados em sua composição.

A aplicação de agregados reciclados provenientes de RCD em argamassas se mostra como uma opção viável, uma vez que as argamassas não possuem requisitos de desempenho mecânico elevados e permitem a utilização de quantidades significativas da fração miúda de agregados reciclados (Samiei *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2018). Alberte e Handro (2021) destacam a importância de fomentar o uso de agregado reciclado miúdo, com vistas a garantir sustentabilidade ao processo de reciclagem dos RCDs. Ainda assim, faz-se necessária a verificação da viabilidade técnica dessa aplicação.

A heterogeneidade do agregado reciclado de resíduo misto tem sido um fator limitante ao avanço de sua aplicação na produção de materiais cimentícios (Ferreira; Anjos; Maia *et al.*, 2021). Ainda que provenientes de uma mesma amostragem de resíduos, podem apresentar características variáveis (Kruger *et al.*, 2021). As diferentes características que o agregado misto pode apresentar influenciam nas propriedades mecânicas das argamassas (Alberte; Handro, 2021; Santos *et al.*, 2018). Assim, torna-se necessária a consolidação de informações a partir de estudos, para que o uso desse tipo de agregado reciclado seja expandido.

Para a avaliação da resistência mecânica no estado endurecido das argamassas, comumente são realizados ensaios de resistência à compressão. Há na literatura estudos experimentais



(Andrade *et al.*, 2018; Ferreira; Anjos; Maia *et al.*, 2021; Kruger *et al.*, 2021; Martínez *et al.*, 2016) em que a resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado de resíduo misto em diferentes proporções na composição foi avaliada.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar, a partir de referencial teórico, a influência da substituição de agregados naturais por agregados reciclados mistos provenientes de RCD nos resultados de resistência à compressão de argamassas, tendo em vista o grande volume que esse tipo de resíduo é gerado no setor da construção civil. Dessa maneira, pretende-se contribuir com a consolidação de informações que proporcionem avanço na utilização de agregados reciclados em argamassas, bem como, com a sustentabilidade no setor da construção civil.

## 2 MÉTODO

O presente estudo foi realizado tendo como base trabalhos científicos que desenvolveram estudos com argamassas produzidas com agregados reciclados provenientes de RCD, comparando a resistência à compressão das argamassas com resultados obtidos nos ensaios de argamassas produzidas com agregados naturais/convencionais.

Foram considerados trabalhos que usaram agregado reciclado de resíduo misto, composto principalmente por materiais cimentícios e cerâmicos. Não obstante, alguns trabalhos não especificaram a composição exata dos resíduos.

A busca pelos trabalhos científicos foi realizada utilizando-se os portais: *Google Scholar*, *Scielo*, e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD). Foram usados os seguintes termos de pesquisa para a seleção dos trabalhos: "agregado reciclado + argamassa"; "RCD + argamassa"; "Resíduos da Construção Civil (RCC) + argamassa"; "resíduos + argamassa"; "*recycled aggregate + mortar*"; "CDW + *mortar*"; "*waste + mortar*". O resultado da seleção abrangeu vinte pesquisas publicadas de 2003 a 2020. A seleção dos trabalhos não foi delimitada por data de publicação.

A partir dos vinte trabalhos selecionados, foram obtidos resultados de resistência à compressão de 85 argamassas produzidas com agregados reciclados mistos substituindo o agregado natural em diferentes percentuais, bem como os resultados das respectivas argamassas de referência, produzidas com agregados naturais. Esses dados foram organizados por percentual de agregado reciclado e foi calculada a média dos valores de resistência à compressão obtidos para cada percentual de substituição.



Para melhor interpretação, os dados foram submetidos a análise estatística, que foi dividida em três etapas. Na primeira etapa foi realizada a descrição dos dados, onde foram analisados os parâmetros de tendência central e de dispersão. Na segunda etapa, através do método de correlação de Pearson, foi gerado um correlograma indicando a correlação entre as seguintes variáveis:

- a) resistência à compressão de argamassas com agregados naturais (sem agregado reciclado) e resistência à compressão de argamassas com agregados reciclados (substituindo parcialmente ou integralmente agregados naturais);
- b) resistência à compressão de argamassas com agregados reciclados e teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados;
- c) resistência à compressão de argamassas com agregados naturais e teor de substituição dos agregados naturais pelos reciclados.

Na terceira etapa, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 1% e um fator para verificação da influência da introdução do agregado reciclado na argamassa, com relação aos resultados de resistência à compressão.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1, estão apresentados os dados de resistência à compressão das 85 argamassas com agregados reciclados mistos, organizados por percentual de substituição do agregado natural pelo reciclado. Para cada argamassa contendo agregado reciclado há uma argamassa de referência, produzida com 0% de agregado reciclado.

Em determinados estudos (Alvarenga, 2018; Barbosa, 2014; Carasek *et al.*, 2018; Leite *et al.*, 2011; Lima; Leite, 2012; Malta *et al.*, 2013; Pedrozo, 2008; Pimentel *et al.*, 2018), foram produzidas argamassas com mesmo teor de agregado reciclado, mas com determinadas diferenças na composição, como a dosagem ou o fator água/cimento.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 15116:2021), com exceção de três pesquisas (Corinaldesi *et al.*, 2007; Moriconi *et al.*, 2003; Roque *et al.*, 2020), que seguiram as Normas Europeias EN 196-1 e EN 1015-11. Os dados são referentes a ensaios de resistência à compressão realizados aos 28 dias, com exceção dos resultados de Barbosa (2014), cujos dados são referentes a ensaios aos 32 dias.

Tabela 1 – Dados de resistência à compressão

<b>Agregado reciclado misto [%]</b>	<b>Resistência à compressão – SEM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Resistência à compressão – COM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Fonte dos dados</b>
5	4,71	8,54	Rocha <i>et al.</i> , 2015
10	4,00	3,30	Lima, 2005
10	10,20	12,40	Oliveira e Cabral, 2011
20	1,33	1,25	Araújo, 2014
20	10,2	13,70	Oliveira e Cabral, 2011
20	4,20	4,20	Roque <i>et al.</i> , 2020
20	2,50	3,20	Oliveira, 2015
20	2,50	3,60	Oliveira, 2015
20	4,71	6,47	Rocha <i>et al.</i> , 2015
25	5,63	5,32	Cerqueira <i>et al.</i> , 2018
25	7,04	5,79	Andrade <i>et al.</i> , 2018
25	2,12	3,36	Araújo <i>et al.</i> , 2013
25	4,00	2,40	Lima, 2005
25	47,5	37,50	Malta <i>et al.</i> , 2013
25	37,5	29,00	Malta <i>et al.</i> , 2013
25	32,00	24,00	Malta <i>et al.</i> , 2013
25	27,56	23,78	Pedrozo, 2008
25	21,18	19,82	Pedrozo, 2008



<b>Agregado reciclado misto [%]</b>	<b>Resistência à compressão – SEM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Resistência à compressão – COM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Fonte dos dados</b>
30	5,94	6,96	Alvarenga, 2018
30	19,58	21,23	Alvarenga, 2018
30	10,20	10,50	Oliveira e Cabral, 2011
30	7,12	5,86	Pimentel <i>et al.</i> , 2018
30	6,36	5,16	Pimentel <i>et al.</i> , 2018
30	2,50	2,80	Oliveira, 2015
30	2,50	4,00	Oliveira, 2015
35	4,71	11,25	Rocha <i>et al.</i> , 2015
40	1,33	1,47	Araújo, 2014
40	10,20	17,20	Oliveira e Cabral, 2011
40	2,50	3,20	Oliveira, 2015
40	2,50	3,90	Oliveira, 2015
50	5,63	6,01	Cerqueira <i>et al.</i> , 2018
50	5,94	6,96	Alvarenga, 2018
50	19,58	14,95	Alvarenga, 2018
50	7,04	5,00	Andrade <i>et al.</i> , 2018
50	2,12	2,36	Araújo <i>et al.</i> , 2013
50	3,70	5,31	Barbosa, 2014

<b>Agregado reciclado misto [%]</b>	<b>Resistência à compressão – SEM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Resistência à compressão – COM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Fonte dos dados</b>
50	3,70	3,78	Barbosa, 2014
50	26,10	29,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
50	26,10	30,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
50	26,10	31,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
50	26,10	28,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
50	26,10	30,50	Leite <i>et al.</i> , 2011
50	26,10	26,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
50	25,50	23,40	Lima e Leite, 2012
50	12,30	14,20	Lima e Leite, 2012
50	4,00	2,50	Lima, 2005
50	47,5	35,00	Malta <i>et al.</i> , 2013
50	37,5	25,00	Malta <i>et al.</i> , 2013
50	32,00	20,00	Malta <i>et al.</i> , 2013
50	10,2	11,30	Oliveira e Cabral, 2011
50	27,56	22,13	Pedrozo, 2008
50	21,18	20,36	Pedrozo, 2008
50	4,20	3,00	Roque <i>et al.</i> , 2020
50	2,50	2,70	Oliveira, 2015



<b>Agregado reciclado misto [%]</b>	<b>Resistência à compressão – SEM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Resistência à compressão – COM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Fonte dos dados</b>
50	2,50	4,30	Oliveira, 2015
50	4,71	8,66	Rocha <i>et al.</i> , 2015
60	1,33	1,65	Araújo, 2014
60	7,12	5,65	Pimentel <i>et al.</i> , 2018
60	6,36	3,71	Pimentel <i>et al.</i> , 2018
65	4,71	5,80	Rocha <i>et al.</i> , 2015
70	7,50	4,20	Ferreira; Silva <i>et al.</i> , 2016
75	7,04	5,25	Andrade <i>et al.</i> , 2018
75	2,12	2,64	Araújo <i>et al.</i> , 2013
75	4,00	2,80	Oliveira e Cabral, 2011
75	27,56	22,63	Pedrozo, 2008
75	21,18	19,58	Pedrozo, 2008
80	1,33	1,53	Araújo, 2014
90	7,50	4,00	Ferreira; Silva <i>et al.</i> , 2016
100	7,04	5,20	Andrade <i>et al.</i> , 2018
100	1,33	2,64	Araújo, 2014
100	3,90	3,20	Carasek <i>et al.</i> , 2018
100	5,40	5,20	Carasek <i>et al.</i> , 2018

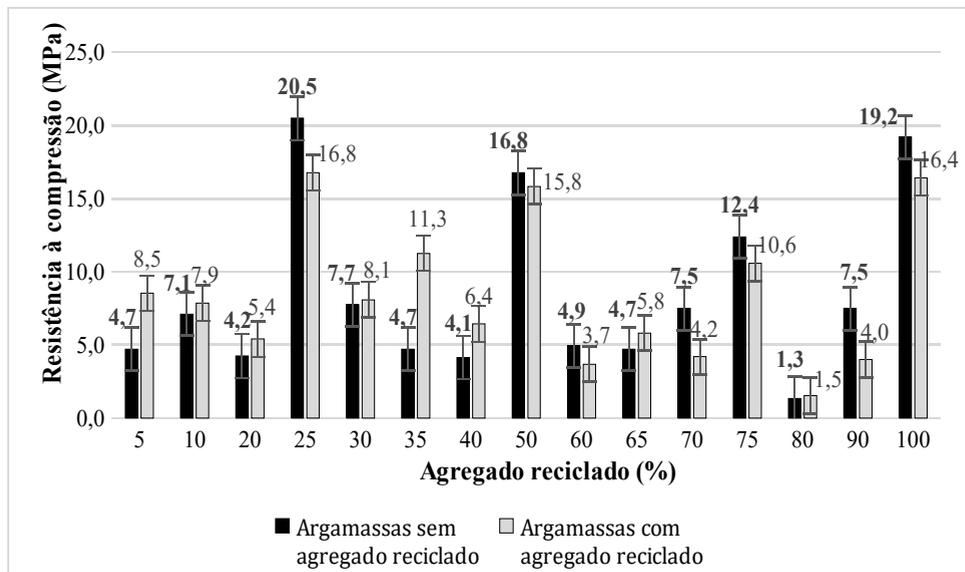
<b>Agregado reciclado misto [%]</b>	<b>Resistência à compressão – SEM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Resistência à compressão – COM agregado reciclado (Mpa)</b>	<b>Fonte dos dados</b>
100	27,8	17,20	Corinaldesi <i>et al.</i> , 2007
100	7,50	3,80	Ferreira; Silva <i>et al.</i> , 2016
100	26,10	30,50	Leite <i>et al.</i> , 2011
100	26,10	30,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
100	26,10	27,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
100	26,10	25,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
100	26,10	19,50	Leite <i>et al.</i> , 2011
100	26,10	22,00	Leite <i>et al.</i> , 2011
100	4,00	3,40	Lima, 2005
100	60,00	39,00	Moriconi <i>et al.</i> , 2003
100	27,56	22,73	Pedrozo, 2008
100	21,18	19,04	Pedrozo, 2008
100	4,20	3,80	Roque <i>et al.</i> , 2020

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

A Figura 1 apresenta a média dos valores de resistência à compressão para cada percentual de agregado reciclado, bem como a média dos valores de resistência à compressão das argamassas com agregados naturais, que serviram de referência. Observa-se que não há relação direta entre o percentual de agregado reciclado e a resistência à compressão.



Figura 1 – Média de resistência à compressão por percentual de agregado reciclado



Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Ao avaliar os parâmetros de tendência central (média) e dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação), apresentados na Tabela 2, observa-se que não há como afirmar que existe diferença estatística significativa entre a resistência de argamassas sem agregado reciclado misto e de argamassas com agregado reciclado misto, pois pode haver uma interseção entre os intervalos de confiança.

Tabela 2 – Média, desvio padrão e coeficiente de variação das variáveis estudadas

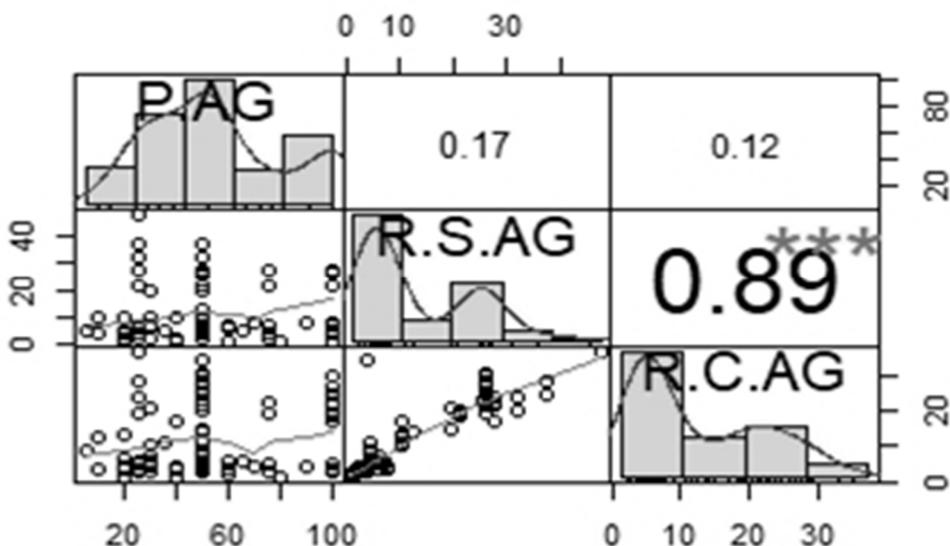
	<b>Resistência à compressão – SEM agregado reciclado</b>	<b>Resistência à compressão – COM agregado reciclado</b>
Média (MPa)	13,70047059	12,60270588
Desvio padrão (MPa)	12,89049778	10,6606186
Coeficiente de variação [%]	94,08799282	84,58991826

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).



A Figura 2 apresenta os dados da correlação de Pearson entre as variáveis: resistência à compressão de argamassas SEM agregado reciclado e resistência à compressão de argamassas COM agregado reciclado; resistência à compressão de argamassas SEM agregado reciclado e teor de substituição do agregado natural pelo reciclado; resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado e teor de substituição do agregado natural pelo reciclado.

Figura 2 – Correlação de Pearson (correlograma)



Legenda: **P.AG** – Percentual de agregado reciclado;  
**R.S.AG** – Resistência à compressão de argamassas SEM agregado reciclado;  
**R.C.AG** – Resistência à compressão de argamassas COM agregado reciclado.

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Observa-se que a correlação praticamente inexistente entre resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado e percentual de agregado reciclado, indicando que não há indícios de interferência entre as variáveis. Todavia, a correlação entre resistência à compressão de argamassas com e sem agregado reciclado é forte, apresentando um valor de 89%. Essa forte correlação também é mostrada graficamente na quadrícula de interseção entre as duas variáveis, com uma relação de aproximadamente 45 graus entre elas.



O diagrama de dispersão apresentado na Figura 3 mostra que não há uma relação de causa e efeito entre o teor de agregado reciclado e a resistência à compressão das argamassas produzidas com agregado reciclado misto.

Figura 3 – Diagrama de dispersão considerando os valores de resistência à compressão de argamassas com agregado reciclado misto e o percentual de agregado reciclado misto

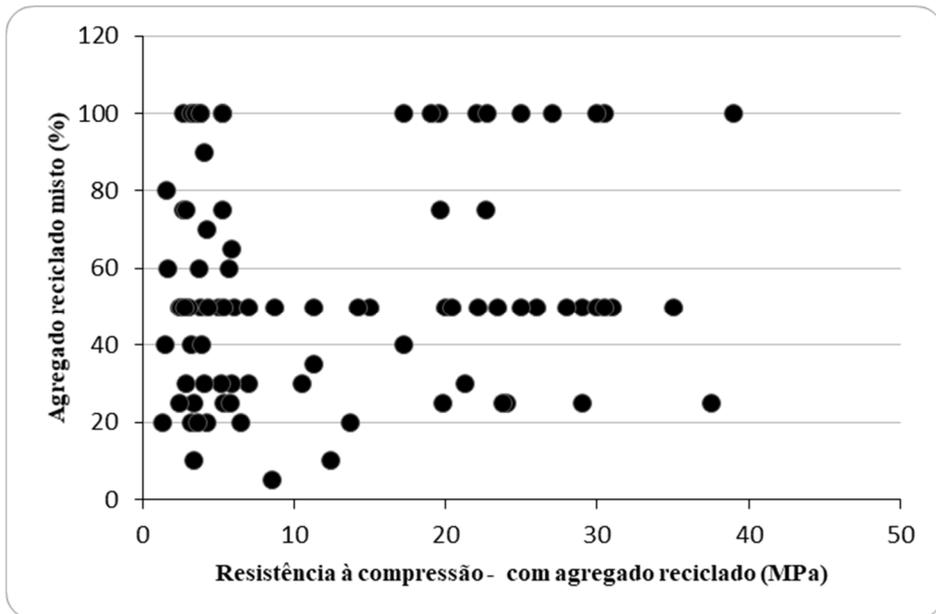
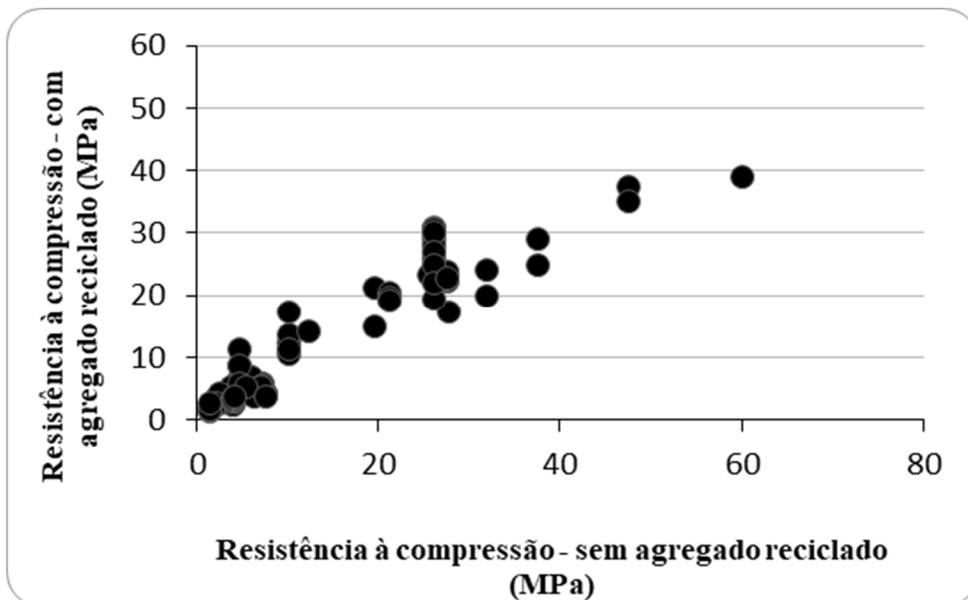




Figura 4 – Diagrama de dispersão considerando os valores de resistência à compressão de argamassas com e sem agregado reciclado misto na composição



Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Dependendo da amostra empregada, os autores obtiveram valores de resistência à compressão superiores ou inferiores ao obtido com o traço referência. Esses resultados evidenciam que fatores aliados ao teor de agregado reciclado misto são fundamentais para determinar o comportamento das argamassas em relação à resistência à compressão. O aumento da resistência à compressão, por vezes observado em argamassas com agregado reciclado de resíduo misto pode estar relacionado a fatores, como:

- reações pozolânicas e efeito filler, devido à presença de partículas finas de material cerâmico na composição do agregado reciclado misto (Jiménez *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2021);
- melhor distribuição granulométrica dos agregados reciclados, que contribui para o aumento da densidade e redução de vazios, tornando as argamassas mais resistentes (Ferreira; Anjos; Maia *et al.*, 2021);
- melhora na zona de transição entre a matriz de cimento e o agregado, proporcionada pela forma irregular e textura porosa dos agregados reciclados de resíduo misto (Silva *et al.*, 2016).



Já a redução da resistência à compressão é em muitos casos atribuída ao pior desempenho mecânico dos próprios grãos de agregados reciclados (Pederneiras *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2016) e à elevada absorção de água, relacionada à porosidade do material e ao aumento da superfície específica, que acaba impedindo a hidratação de algumas partículas de cimento (Carasek *et al.*, 2018; Ferreira; Anjos; Maia *et al.*, 2021).

Por conta desses fatores, a ABNT NBR 15116:2021 define alguns critérios que devem ser observados para o uso do agregado reciclado misto em argamassas, como o limite de absorção de água, o teor de cerâmica e o de materiais indesejáveis. Além desses critérios, a norma recomenda a pré-molhagem dos agregados reciclados, ou a compensação de água, não incluindo o teor de água absorvido pelos agregados no cálculo da relação água/cimento.

A Tabela 3 apresenta o resultado da análise de variância entre as médias de resistências de argamassas com e sem agregados reciclados.

Tabela 3 – Análise de variância (ANOVA)

<b>FONTE DA VARIAÇÃO</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>FCAL</b>	<b>VALOR-P</b>	<b>F CRÍTICO</b>
Entre grupos	51,21	1	51,22	0,37	0,54	6,79
Dentro dos grupos	23.504,35	168	139,91			
<b>Total</b>	<b>2.555,57</b>	<b>169</b>				

Legenda: **SQ** – Soma dos quadrados;

**MQ** – Soma dos quadrados dentro dos grupos;

**GL** – Grau de liberdade;

**Valor-P** – Poder do teste.

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Os resultados da análise de variância também mostram que não há diferença entre as médias de resistência à compressão de argamassas com e sem agregados reciclados. Isso pode ser afirmado com 99% de certeza, visto que o valor-p (poder do teste) apresenta-se numericamente superior ao nível de significância ( $\alpha = 0,01$ ).



Esse resultado está em consonância com outras pesquisas realizadas (Ferreira; Anjos; Ledesma *et al.*, 2020; Ferreira; Anjos; Maia *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2021), nas quais os autores notaram diferença pouco significativa entre os valores de resistência à compressão de argamassas sem agregado reciclado e com agregado reciclado de RCD misto.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A heterogeneidade dos resíduos e as particularidades adotadas na produção das argamassas podem proporcionar comportamentos divergentes em relação à resistência à compressão das argamassas produzidas com substituição parcial ou integral de agregado natural por agregado reciclado de resíduo misto. Entretanto, a análise estatística realizada, considerando uma amostra de 85 argamassas com agregado reciclado de resíduo misto, mostrou que a diferença existente entre a resistência à compressão de argamassas com e sem agregado reciclado não é significativa, e que não há relação entre o teor de agregado reciclado misto e a resistência à compressão das argamassas com agregado reciclado misto.

A análise de variância identificou com 99% de certeza a não existência de diferença entre as médias de resistência à compressão de argamassas com e sem agregado reciclado de resíduo misto. A análise de correlação entre os valores de resistência de argamassas com e sem agregado reciclado misto, apresentou coeficiente de 89%, indicando forte evidência de relação entre as duas variáveis. A análise de correlação entre o teor de agregado reciclado misto e a resistência à compressão das argamassas com agregado reciclado misto, por sua vez, apresentou coeficiente de 12%, indicando fraca evidência de relação entre as duas variáveis.

Conclui-se, portanto, a partir da metodologia estatística seguida, que o agregado reciclado misto se mostra tecnicamente viável de ser aplicado na produção de argamassas, no que concerne à sua influência na resistência à compressão. No entanto, faz-se necessário observar as recomendações a respeito da composição dos agregados reciclados e dos procedimentos de mistura a fim de que as argamassas se enquadrem aos requisitos determinados em normas de argamassas convencionais, independente do teor de agregado reciclado presente.



## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15116:2021** – Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=Q2h3NGNqWUwvUXNHRHd4L2lQZnF6UmJvUVQ4eFF1T2VSZURkUTFDd1VqVT0=>. Acesso em: 02 fev. 2022.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**, São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/> Acesso em: 31 maio 2022.

AKHTAR, Ali; SARMAH, Aji. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262-281, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261830742X>. Acesso em: 06 fev. 2022.

ALBERTE, Elaine Pinto Varela; HANDRO, Julia Barretto. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 305-320, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000300553>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/yqbdmK9qbBCS4TR98vKBzYz/?lang=pt>. Acesso em: 06 fev. 2022.

ALVARENGA, Maria Gabriela de Lima. **Análise de desempenho de argamassas com utilização de resíduos de construção e demolição de alvenaria como substituição parcial de agregado miúdo natural**. 2018. Dissertação (Mestrado em Estruturas; Geotecnia; Construção Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.bdtd.uerj.br:8443/handle/1/11657>. Acesso em: 12 ago. 2021.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira; POSSAN, Edna; SQUIAVON, Jéssica Zamboni; ORTOLAN, Tiago Luis Possebon. Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.089>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817322985>. Acesso em: 05 fev. 2022.

ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção. **O Mercado de Agregados no Brasil**. São Paulo: ANEPAC, 2015. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/8-mercado-de-agregados-no-brasil>. Acesso em: 26 ago. 2021.

ARAÚJO, Neuber Nascimento de. **Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da Grande Natal-RN**. 2014. Dissertação (Mestrado em Mecânica das Estruturas, Estruturas de concreto e Alvenaria e materiais e processos construtivos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/14856>. Acesso em: 12 ago. 2021.

ARAÚJO, Ricardo Melo; SILVA, Narciso, Gonçalves da Silva; CZOCHER, Amanda; REICHERT, Renata Aline. Avaliação do desempenho da utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregado miúdo em argamassa para revestimentos. **Revista Espaço Científico Livre**, n. 15, p. 13-21, ago./set. 2013.



Disponível em: [https://issuu.com/rev\\_espaco\\_cientifico\\_livre/docs/revista\\_espao\\_o\\_cient\\_fico\\_livre\\_n\\_aa8413b51d4fee/13](https://issuu.com/rev_espaco_cientifico_livre/docs/revista_espao_o_cient_fico_livre_n_aa8413b51d4fee/13). Acesso em: 13 ago. 2021.

BARBOSA, Ricardo Antonio. **Caracterização mecânica de argamassas confeccionadas com resíduos de construção gerados na própria obra**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-9WWG9P>. Acesso em: 12 set. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA, **Resolução nº 448**, de 18 de janeiro de 2012. Brasília, DF: Diário Oficial da República Federativa do Brasil nº 14, 19.01.2012. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=652](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=652). Acesso em: 15 set. 2021.

CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra; SCHALCH, Valdir; DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho; RIBEIRO, José Luis Duarte. Mechanical properties modeling of recycling aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061809003481>. Acesso em: 04 fev. 2022.

CARASEK, Helena; GIRARDI, Aline Crispim Canedo; ARAÚJO, Renato Costa; ANGELIM, Renato Resende; CASCUDO, Oswaldo. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, v. 64, n. 370, p. 288-300, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702244>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/nsVJSgzcp7gMzKVnHTjyQBH/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 06 set. 2021.

CERQUEIRA, Niander Aguiar; SOUZA, Victor Barbosa de; SILVA, Alex Sandro de Paula; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; MONTEIRO, Sergio Neves. Utilização de resíduo de construção civil (RCC) na produção de argamassas. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL, 73, 2018, São Paulo. **Anais...**, São Paulo, 2018. p. 2470-2481. DOI: <https://doi.org/10.5151/1516-392X-252>. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/utilizacao-de-resduo-de-construocivil-rcc-na-produo-de-argamassas>. Acesso em: 03 fev. 2022.

CORINALDESI, Valeria; MONOSI, Saveri; MORICONI, Giacomo. Effect of different recycled aggregates on mortar performance. In: CHUN, Yoon-Moon; CLAISSE, Peter; NAIK, Tarun R.; GANJIAN, Eshmaiel. (ed.) Sustainable Construction Materials and Technologies Conference. 2007, Coventry. **Proceedings [...]**. Coventry: Taylor & Francis Ltd, 2007. p. 59-62. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003061021>. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003061021-9/effect-different-recycled-aggregates-mortar-performance-corinaldesi-monosi-moriconi>. Acesso em: 28 set. 2021.

EDUCATION BUREAU OF GOVERNMENT OF HONG KONG, **Reuse, Reduce and Recycle of Construction and Demolition Waste**. May. 2011. Disponível em: [https://www.edb.gov.hk/attachment/tc/curriculum-development/kla/pshe/references-and-resources/geography/article-geological\\_resources.pdf](https://www.edb.gov.hk/attachment/tc/curriculum-development/kla/pshe/references-and-resources/geography/article-geological_resources.pdf). Acesso em: 12 fev. 2022.

EUROPEAN STANDARD NORME. **EN 1015-11:2019**. Methods of test for mortar for masonry Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.



EUROPEAN STANDARD NORME. **EN 196-1:2016**. Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos; LEDESMA, Enrique Fernández; PEREIRA, Jéssyca Emanuella Saraiva, NÓBREGA, Andreza Kelly Costa. Evaluation of the physical-mechanical properties of cement-lime based masonry mortars produced with mixed recycled aggregates.

**Materiales de Construcción**, v. 70, n. 337, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2020.02819>. Disponível em: <https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/2272>. Acesso em: 04 out. 2021.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos; MAIA, Cinthia; PINTO, Licarion; AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de; BRITO, Jorge de. Long-term analysis of the physical properties of the mixed recycled aggregate and their effect on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 274, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121796>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820338009>. Acesso em: 07 fev. 2022.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos; NÓBREGA, Andreza Kelly Costa; PEREIRA, Jéssyca Emanuella Saraiva; LEDESMA, Enrique Fernández. The role of powder content of the recycled aggregates of CDW in the behaviour of rendering mortars. **Construction and building materials**, v. 208, p. 601-612, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.058>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819305392>. Acesso em: 07 fev. 2022.

FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva; SILVA, Ayrton Wagner Barboza da; MEDEIROS, Luiza Gabriela Santos de; MELO, Ademaykon R.; BRUNO, Gabriela B.; FARIAS, Evilane C.; ANJOS, Marcos Alyssandro Soares dos. Caracterização e estudo comparativo entre dosagens de argamassas para revestimento, utilizando resíduos da construção civil (RCC) oriundos da Grande Natal/RN. In: Congresso Luso-brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2. 2016, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/327406155\\_Caracterizacao\\_e\\_estudo\\_comparativo\\_entre\\_dosagens\\_de\\_argamassas\\_para\\_revestimento\\_utilizando\\_residuos\\_da\\_construcao\\_civil\\_RCC\\_oriundos\\_da\\_Grande\\_NatalRN](https://www.researchgate.net/publication/327406155_Caracterizacao_e_estudo_comparativo_entre_dosagens_de_argamassas_para_revestimento_utilizando_residuos_da_construcao_civil_RCC_oriundos_da_Grande_NatalRN). Acesso em: 03 maio 2021.

FROTTÉ, Camila; NUBILA, Clarisse Sophia Alejandra Di; NAGALLI, André; MAZER, Wellington; MACIOSKI, Gustavo; OLIVEIRA, Luna Ollin Steffen de. Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. **Revista Matéria**, v. 22, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0143>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/4mZ9PFnw7vf4FGZyh8yZVXm>. Acesso em: 28 jan. 2022.

JIMÉNEZ, José Ramón; AYUSO, Jesús; LÓPEZ, Martín; FERNÁNDEZ, José María; BRITO, Jorge de. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 679-690, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181200863X>. Acesso em: 02 fev. 2022.

JOCHEM, Lidiane Fernanda; APONTE, Diego; BIZINOTTO, Marilda Barra; ROCHA, Janaíde Cavalcante. Effects of pre-wetting aggregate on the properties of



mortars made with recycled concrete and lightweight aggregates. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0677>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/gcvjZZ9nxHNymwcykZ7hJDf/>. Acesso em: 28 jan. 2022.

KRUGER, Patrícia; SERBAL, Patricia.; CHINELATTO, Adriana Scoton Antonio; PEREIRA, Eduardo. Influence of particle size distribution of conventional fine aggregate and construction demolition waste aggregate in Portland cement mortar. **Cerâmica**, v. 67, n. 383, jul./set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673833035>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/kb8QMcD6R3hpgVF789shxNt>. Acesso em: 12 jan. 2022.

LAM, Patrick T. I.; YU, Ann T. W; WU, Zezhou; POON, Chi-Sun. Methodology for upstream estimation of construction waste for new building projects. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 1003-1012, sep. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.183>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619312636>. Acesso em: 29 jan. 2022.

LEITE, Mônica Batista; LIMA, Paulo Roberto Lopes; SANTOS, Albert Cerqueira. Study of the consistence and mechanical behavior of recycled mortars, In: INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PROGRESS OF RECYCLING IN THE BUILT ENVIRONMENT, 2., 2011, São Paulo. **Anais [...]**. França: RILEM Publications SARL, 2011. p. 223-229. Disponível em: [https://www.rilem.net/publication/publication/411?id\\_papier=7782](https://www.rilem.net/publication/publication/411?id_papier=7782). Acesso em: 28 nov. 2021.

LIMA, Francisco Sales Neves de Souza. **Aproveitamento de resíduos de construção na fabricação de argamassas**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2005. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp091808.pdf> / [http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select\\_action=&co\\_obra=140958](http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=140958). Acesso em: 27 ago. 2021.

LIMA, Paulo Roberto Lopes; LEITE, Monica Batista. Influence of CDW Recycled Aggregate on Drying Shrinkage of Mortar. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2, n. 2, p. 53-57, jun. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2012.22009>. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=19986>. Acesso em: 27 set. 2021.

MALTA, Juliana Oliveira; SILVA, Vanessa Silveira; GONÇALVES, Jardel Pereira. Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais – GESTA**, v. 1, n. 2, p. 176-188, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/7214/6417>. Acesso em: 07 out. 2021.

MARTÍNEZ, Pablo Saiz; GONZÁLEZ CORTINA, Mariano; FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, Francisco; RODRÍGUEZ SANCHEZ, Antonio. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 162-169, April 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.059>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616000949>. Acesso em: 27 set. 2021.

MIKAMI, Rafael Jansen; KRUGER, Patrícia; PEREIRA, Eduardo; KUMMER, Ana Carolina Barbosa; DÖLL, Maria Magdalena. Influência do teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável.



**Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0497>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/yjFNdrqGmMdnCpHbcspRx9Q/?lang=pt>. Acesso em: 27 jan. 2022.

MORETTI, Juliana Petermann; SALES, Almir; ALMEIDA, Fernando do Couto Rosa; REZENDE, Mariana A. M.; GROMBONI, Pedro p. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317-323, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.062>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816303579>. Acesso em: 02 fev. 2022.

MORICONI, Giacomo; CORINALDESI, Valeria; ANTONUCCI, R. Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortars and brick. **Materials and Structures**, v. 36, n. 10, p. 702-708, dez. 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02479505>. Acesso em: 27 nov. 2021.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias de; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. Argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados de Fortaleza/CE, Brasil.

**Revista de Engenharia Civil**, v. 16, n. 41, p. 21-34, set. 2011. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n41/Pag21-34.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2021.

OLIVEIRA, Rosana Prado. **Estudo da Influência do teor de finos dos agregados reciclados mistos nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7894>. Acesso em: 26 nov. 2021.

PACHECO-TORGAL, Fernando. High tech startup creation for energy efficient built environment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 918-629, May 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.088>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116311443>. Acesso em: 03 fev. 2022.

PEDERNEIRAS, Cinthia Maia; DURANTE, Maria del Pilar; AMORIM, Ênio Fernandes; FERREIRA, Ruan Landolfo da Silva. Incorporation of Recycled aggregates from construction and demolition waste in paver blocks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000400005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/FpBk6mTD44WRgJ7MMLypx7r>. Acesso em: 05 fev. 2022.

PEDROZO, Ruben Francisco Esteche. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90936/264721.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

PIMENTEL, Lia Lorena; PISSOLATO JUNIOR, Osvaldo; JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila; MARTINS, Heline Laura de Sousa. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas. **Revista Matéria**, v. 23, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0305>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/JJ8rGkNnK5TNxNws7Z6pKKr>. Acesso em: 06 fev. 2022.

PIMENTEL, Lia Lorena; RIZZO, Giovanna Falzetta; JACINTHO, Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila; FONTANINI, Patrícia Stella Pucharelli. Concrete



produced with recycled aggregate: a durability analysis for structural use. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952020000600013>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/dnRDfh5NFXNgnjtFd8dxJpM>. Acesso em: 04 fev. 2022.

ROCHA, Luciana Sandrini; CURCIO, Daniela da Rosa; SIGNORINI, Vanessa Büttow; DUFAU, Thomaz. Dosagem e caracterização de argamassas de assentamento e revestimento com agregados de resíduos da construção civil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 4, 2015, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/281036355\\_DOSAGEM\\_E\\_CARACTERIZACAO\\_DE\\_ARGAMASSAS\\_DE\\_ASSENTAMENTO\\_E\\_REVESTIMENTO\\_COM\\_AGREGADOS\\_DE\\_RESIDUOS\\_DA\\_CONSTRUCAO\\_CIVIL](https://www.researchgate.net/publication/281036355_DOSAGEM_E_CARACTERIZACAO_DE_ARGAMASSAS_DE_ASSENTAMENTO_E_REVESTIMENTO_COM_AGREGADOS_DE_RESIDUOS_DA_CONSTRUCAO_CIVIL). Acesso em: 07 fev. 2022.

ROQUE, Samuel; PEDERNEIRAS, Cinthia Maia; FARINHA, Catarina Brazão; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Concrete-Based and Mixed Waste Aggregates in Rendering Mortars. **Materials**, v. 13, n. 8, Abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13081976>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/8/1976>. Acesso em: 23 nov. 2021.

SAINZ-AJA, José; CARRASCAL, Isidro; POLANCO, Juan Antonio; CIMENTADA, Ana Isabel; THOMAS, Carlos; BRITO, Jorge de. Aging of recycled aggregates mortars by drying-wetting cycles. **Construction and Building Materials**, v. 307, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124934>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821026842>. Acesso em: 06 fev. 2022.

SAMIEI, Reza Raeis; DANIOTTI, Bruno; PELOSATO, Renato; DOTELLI, Giovanni. Properties of cement-lime mortars vs. cement mortars containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 84-94, mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815002895>. Acesso em: 08 nov. 2021.

SANTOS, Ana Rita; VEIGA, Maria do Rosário; SILVA, António Santos; BRITO, Jorge de; ÁLVAREZ, José Ignacio. Evolution of the microstructure of lime based mortars and influence on the mechanical behaviour: The role of the aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 907-922, Oct. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.223>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818318968>. Acesso em: 06 fev. 2022.

SILVA, Carla Mabel Medeiros de Albuquerque e; CAPUZZO, Valdirene Maria Silva. Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0882>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jrmat/a/QC3bgd3Wz79RMGm3MLdVrBb>. Acesso em: 06 fev. 2022.

SILVA, Rui Vasco; BRITO, Jorge de; DHIR, Ravindra K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 400-415, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815308424>. Acesso em: 28 nov. 2021.



SUN, Junfang; CHEN, Ji; LIAO, Xin; TIAN, Angran; HAO, Jinxu; WANG, Yuchen; TANG, Qiang. The Workability and Crack Resistance of Natural and Recycled Aggregate Mortar Based on Expansion Agent through an Environmental Study. **Sustainability**, v. 13, n. 2, Jan. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020491>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/2/491>. Acesso em: 03 fev. 2022.

THONGKAMSUK, Poombete; SUDASNA, Krichkanok; TONDEE, Tusanee. Waste generated in high-rise buildings construction: A current situation in Thailand. **Energy Procedia**, v. 138, p. 411-416, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.186>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217351299>. Acesso em: 06 fev. 2022.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Acordo de Paris**. 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings#:a0659cbd-3b30-4c05-a4f9-268f16e5dd6b>. Acesso em: 28 ago. 2022.

WANG, Bo; YAN, Libo; FU, Qiuni; KASAL, Bohumil. A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 171, Aug. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105565>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344921001725>. Acesso em: 06 fev. 2022.

WU, Huixia; XIAO, Jianzhuang; LIANG, Chaofeng; MA, Zhiming. Properties of Cementitious Materials with Recycled Aggregate and Powder Both from Clay Brick Waste. **Buildings**, v. 11, n. 3, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/11/3/119/htm>. Acesso em: 05 fev. 2022.

YEHEYIS, Muluken; HEWAGE, Kasun; ALAM M. Shahria; ESKICIOGLU, Cigdem; SADIQ, Rehan. An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. **Clean Techn Environ Policy**, v. 15, p. 81-91, Feb. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-012-0481-6>. Acesso em: 28 jan. 2022.



# FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO PARA AUXILIAR A REMEDIÇÃO DE LIXÕES DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

## *DECISION SUPPORT TOOL TO ASSIST THE REMEDIATION OF SOLID URBAN WASTE OPEN DUMPS*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

GOMES, Juliano da Cunha; CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de. Ferramenta de apoio à decisão para auxiliar a remediação de lixões de resíduos sólidos urbanos. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Juliano da Cunha Gomes**

Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Florianópolis, Brasil. Professor do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) – Campus Garopaba, Brasil.

E-mail: juliano.gomes@ifsc.edu.br

### **Armando Borges de Castilhos Junior**

Doutor em Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Industriais pelo Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França – Lyon, França. Professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Florianópolis, Brasil.

E-mail: armando.borges@ufsc.br

## **RESUMO**

A Política Nacional de Resíduos Sólidos brasileira, instituída no ano de 2010, determinou aos municípios que fizessem a remediação e eliminação de seus lixões de resíduos sólidos urbanos em quatro anos. Entretanto, devido as dificuldades técnicas e econômicas enfrentadas, a comissão nacional dos municípios se mobilizou para pedir prorrogação do prazo por meio de um projeto de Lei, que ainda não foi sancionado. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma ferramenta de apoio à decisão para auxiliar os municípios no diagnóstico e na indicação de cenários e técnicas de remediação de seus lixões. A ferramenta desenvolvida foi testada por especialistas em onze lixões de diferentes estados brasileiros e na República de Cabo Verde e foi avaliada como sendo fácil de entender e usar, fornece um diagnóstico coerente com o diagnóstico realizado pelos próprios especialistas, é capaz de auxiliar no estabelecimento das prioridades de remediação e na indicação do cenário e técnicas de remediação de forma assertiva.

Palavras-chave: Lixões. Resíduos Sólidos Urbanos. Ferramenta de apoio à decisão. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Remediação de lixões.



## ABSTRACT

The Brazilian national solid waste policy, established in 2010, determined that municipalities should carry out the remediation and elimination of their urban solid waste dumps within four years. However, due to the technical and economic difficulties faced, the national commission of municipalities mobilized to ask for an extension of the deadline through a bill, which has not yet been sanctioned. Given the above, the objective of this work was to develop a decision support tool to assist municipalities in the diagnosis and indication of scenarios and remediation techniques for their dumps. The developed tool was tested by specialists in eleven dumps in different Brazilian states and in the Republic of Cape Verde and was evaluated as being easy to understand and use, provides a diagnosis consistent with the diagnosis made by the specialists themselves, is capable of assisting in the establishment of the remediation priorities and assertively indicating the scenario and remediation techniques.

Keywords: Open dumps. Urban Solid Waste. Decision support tool. National Solid Waste Policy. Remediation of open dumps.

## 1 INTRODUÇÃO

No ano de 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) a qual determinou a remediação e eliminação dos lixões de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil (Lei nº 12.305/2010). Para isso foi concedido um prazo inicial de quatro anos, que não foi cumprido devido as dificuldades técnicas e econômicas enfrentadas pelos municípios. Em julho de 2015, foi proposto um projeto de Lei (Projeto de Lei do Senado nº 425, de 2014) para prorrogar o prazo da eliminação dos lixões para até 2021, conforme o porte do município. Em abril de 2019, o projeto de Lei foi aprovado na Câmara dos Deputados e atualmente encontra-se aguardando a sanção do Presidente da República (Altafin, 2014).

Entre os anos de 2011 e 2019 a destinação final de RSU em lixões no Brasil foi reduzida de 29% para 17,5% da massa total de resíduos coletada, que em 2019 foi de 79 milhões de toneladas. Isso significa que cerca de 13,8 milhões de toneladas de RSU ainda são destinadas anualmente aos lixões brasileiros (Abrelpe, 2012; 2020). Os principais impactos dos lixões estão relacionados a degradação da qualidade do solo, ar, água superficial e subterrânea pela emissão de gases do efeito estufa, geração de lixiviados com altas concentrações de carga orgânica, microrganismos e metais. Além disso, há proliferação de vetores de doenças na área do lixão e atração de pessoas com vulnerabilidade social que passam a sobreviver do lixo nesse ambiente insalubre (Castilhos Junior *et al.*, 2013; Monteiro *et al.*, 2001; Nucase, 2008, p. 112).



Existem quatro métodos reconhecidos internacionalmente para a remediação de lixões de RSU. O método presuntivo norte-americano, o guia técnico francês, o manual de reabilitação de lixões indianos e o caderno técnico brasileiro para remediação de áreas degradadas por RSU.

O método presuntivo traz como principais medidas de remediação o confinamento dos resíduos após a escavação e tratamento de áreas mais contaminadas, coleta e tratamento de águas, gases e lixiviados. Para isso o método oferece uma série de fluxogramas que indicam os estudos a serem realizados (Boyer *et al.*, 1999).

No guia técnico francês realiza-se o diagnóstico do lixão em quatro etapas (Ademe, 2005):

- 1) levantamento documental e do histórico da área;
- 2) visita ao lixão;
- 3) análise de risco; e,
- 4) escolha do cenário de remediação.

Na etapa de análise de risco os lixões podem ser classificados em três categorias:

- 1) categoria A – risco alto a médio;
- 2) categoria B – risco médio a baixo; e,
- 3) categoria C – risco baixo a nulo.

O manual de reabilitação de lixões indiano utiliza uma escala de 0-1000 pontos para classificar o índice de risco de determinado lixão. São cinco tipos de risco (Joseph *et al.*, 2008):

- 1) risco muito alto (750-1000 pontos) – que determina o encerramento imediato das atividades e a remediação do lixão;
- 2) risco alto (600-749 pontos) – onde se recomenda o encerramento imediato das atividades, mas a remediação é opcional;
- 3) risco moderado (450-599 pontos) – o qual sugere a conversão do lixão em aterro sanitário;
- 4) risco baixo (300-499 pontos) – podendo-se realizar a conversão em aterro sanitário gradualmente; e,
- 5) risco muito baixo (<300 pontos) – indicando potencial de uso do lixão como um futuro aterro.

O caderno técnico brasileiro para remediação de áreas degradadas por RSU estabelece diversos critérios para a adoção de cinco possíveis cenários de remediação (Feam, 2010):

- 1) remoção dos resíduos para um aterro sanitário;



- 2) confinamento dos resíduos por uma camada de argila de baixa permeabilidade;
- 3) remediação parcial com reconformação topográfica, cobertura vegetal com gramíneas e sistema de coleta e controle de água subterrânea, gases e lixiviados;
- 4) adequação provisória como aterro controlado para pequenos municípios que aguardam o licenciamento para conversão da área em aterro sanitário; e,
- 5) conversão em aterro sanitário quando a área atende aos requisitos da ABNT NBR 13896:1997.

Por isso o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma Ferramenta de Apoio à Decisão (FAD) baseada nos principais métodos existentes para indicar os cenários e técnicas de remediação e auxiliar os gestores municipais no estabelecimento das prioridades de remediação entre seus lixões.

## **2 DESENVOLVIMENTO**

A FAD foi criada para sistematizar o diagnóstico simplificado de lixões de RSU de modo a auxiliar as tomadas de decisões quanto aos cenários e técnicas de remediação.

### **2.1 METODOLOGIA**

Utilizou-se como metodologia as cinco etapas seguintes:

- 1) Preenchimento de um questionário;
- 2) Atribuição de pontuação às respostas do questionário preenchido;
- 3) Estabelecimento da pontuação e do nível de impacto do lixão;
- 4) Classificação dos cenários e técnicas de remediação; e,
- 5) Elaboração do diagnóstico simplificado e interpretação dos resultados.

#### **2.1.1 Preenchimento do questionário**

O questionário do Quadro 1 foi aprimorado a partir do questionário de Ramos *et al.* (2017), com o objetivo de levantar as informações necessárias para a realização do diagnóstico simplificado. A ordem das respostas para cada pergunta foi estabelecida de modo que a primeira resposta indica o menor impacto e a última resposta o maior impacto ambiental.



## Quadro 1 – Questionário para diagnóstico simplificado do lixão

### **Legislações necessárias para o preenchimento do questionário:**

- ◆ Lei nº 9.985/2000
- ◆ Plano Diretor Municipal
- ◆ ABNT NBR 13896:1997
- ◆ ABNT NBR 10004:2004
- ◆ Resolução Conama nº 420/2009
- ◆ Resolução Conama nº 396/2008
- ◆ Resolução Conama nº 357/2005

### **Informações e análises requeridas antes da visita:**

- ◆ Acumulado de chuva nas últimas 24 horas anteriores à visita
- ◆ Atlas pluviométrico do Brasil (disponível no site do CPRM)
- ◆ Nível piezométrico abaixo dos resíduos
- ◆ Tipo de solo e permeabilidade
- ◆ Análise de solo segundo Resolução Conama nº 420/2009
- ◆ Análise de água subterrânea segundo Resolução Conama nº 396/2008
- ◆ Análise de águas superficiais segundo Resolução Conama nº 357/2005
- ◆ Mapa de solos da região
- ◆ Mapa dos recursos hídricos da região
- ◆ Levantamento topográfico, investigação geológica, geotécnica e hidrogeológica;
- ◆ Composição gravimétrica do lixão
- ◆ Representação em planta planialtimétrica, em escala não inferior a 1:2.000, do uso do solo, das águas subterrâneas e das águas superficiais num raio mínimo de 200 m;
- ◆ Relatórios de avaliação preliminar e confirmatória de passivo ambiental em solo e água subterrânea, conforme ABNT NBR 15515-1 e 15515-2, para saber se há contaminação.

### **IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA**

#### **Denominação do local:**

- ◆ Endereço:
- ◆ Distrito / Bairro:
- ◆ CEP:
- ◆ Município / UF:
- ◆ Orçamento inicial:
- ◆ Latitude / Longitude:
- ◆ Folha topográfica:
- ◆ Coordenadas UTM:
- ◆ Datum / MC:
- ◆ Bacia Hidrográfica:
- ◆ Data da visita:
- ◆ Início atividades lixão:



- ♦ Fim atividades lixão:
- ♦ Enquadramento da área (plano diretor):
- ♦ Uso futuro da área:
- ♦ Proprietário terreno:
- ♦ Nomes / funções informantes: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_
- ♦ Nomes / funções acompanhantes: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### Condições meteorológicas no dia da visita:

- Sol  Sol com algumas nuvens  Sol com muitas nuvens  
 Totalmente encoberto  Chuva

Intensidade e direção dos ventos: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Acumulado de chuva nas últimas 24h: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

#### Situações:

Ocorre em local com restrição conforme a legislação?

- Sim  Não

Ocorre em área urbana ou rural?

- Urbana  Rural

Ocorre em talvegue, que poderia abrigar curso d'água intermitente?

- Sim  Não

Ocorre em região de várzea pântano ou mangue?

- Sim  Não

Quantidade de corpos hídricos na área do lixão e/ou até num raio de 200 m?

(Ex.: 2)

Ocorre em área industrial?

- Sim  Não

### 1 CARACTERIZAÇÃO DO LIXÃO

#### 1.1 Área do lixão

<5.000 m<sup>2</sup>  > 5.000 m<sup>2</sup> < 50.000 m<sup>2</sup>

>= 50.000 m<sup>2</sup> <= 500.00 m<sup>2</sup>  > 500.000 m<sup>2</sup>

#### 1.2 Atividade do lixão

- Lixão fechado há mais de 20 anos  
 Lixão fechado num tempo entre 10 e 20 anos  
 Lixão fechado há menos de 10 anos  
 Ainda em atividade

### 1.3 Acidentes e eventos importantes no lixão

a) Adensamento dos resíduos

Não  Sim

b) Deslizamento

Não  Sim

c) Erosão

Não  Sim

d) Outros

Não  Sim Quais? \_\_\_\_\_

### 1.4 Espessura da camada de resíduos

a)  < 2 m                      b)  > 2 < 10 m

c)  > = 10 m                  d)  dado não existente

### 1.5 Classificação dos resíduos ABNT NBR 10004:2004 (múltipla escolha)

a)  Resíduos inertes – classe II B

b)  Resíduos não inerte – classe II A

c)  Resíduos perigosos – classe I

d) Quais? \_\_\_\_\_

### 1.6 Existe parcela significativa de resíduos classe A, B e C da construção civil (Resolução Conama nº 307/2002)?

a)  Sim b)  Não

### 1.7 A maior parte dos resíduos está estabilizada?

a)  Sim b)  Não

### 1.8 Impermeabilização superior

a)  Existente e construída de acordo com a ABNT NBR 13896:1997, sendo capaz de impedir a infiltração das águas pluviais e emissão de gases

b)  Existente, mas não construída de acordo com a ABNT NBR 13896:1997, portanto, não sendo capaz de impedir a infiltração das águas pluviais dentro do solo ou apenas parcial

c)  Inexistente

### 1.9 Pluviometria

a)  0 – 800 mm/ano (baixa)      b)  800 – 1500 mm/ano (significativa)

c)  1500 – 2300 mm/ano (alta)    d)  mais que 2300 mm/ano (excessiva)

### 1.10 Declividade do terreno natural

a)  0 – 3% (plano)                      b)  3 – 8% (ligeiramente ondulado)

c)  8 – 20% (ondulado)              d)  20 – 45% (fortemente ondulado)

e)  45 – 75% (montanhoso)        f)  75 – 100% (escarpado)

### 1.11 A área do lixão atende os critérios da ABNT NBR 13896:1997 e da Resolução Conama nº 404/2008, possibilitando seu uso por período superior a 15 anos?

a)  Sim b)  Não

**1.12 Há evidências de zonas mais poluídas que outras (hotspots)?**a)  Não b)  Sim**1.13 Qual o volume estimado dos hotspots?**a)   $< 10.000 \text{ m}^3$  (volume pequeno)b)   $>= 10.000 \text{ m}^3 <= 500.000 \text{ m}^3$  (volume médio)c)   $> 500.000 \text{ m}^3$  (volume grande)**1.14 Caso a resposta 1.12 seja "Sim". Os resíduos dos hotspots representam algum tipo de ameaça (ex.: tóxico, móvel, volátil, contaminante)?**a)  Não b)  Sim**2 SOLO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS****2.1 Impermeabilização inferior**a)  Existente e construída de acordo com a ABNT NBR 13896:1997, sendo, portanto, apropriada para impedir a infiltração de lixiviadosb)  Existente, mas não construída de acordo com a ABNT NBR 13896:1997c)  Inexistente d)  Dado não existente**2.2 Presença de lixiviados nos taludes, aterros e entornos**a)  Não se constata visualmente a presença de lixiviadosb)  Presença de fluxo de lixiviados após forte chuvac)  Presença visível e constante de lixiviados**2.3 Existe coleta de lixiviados?**a)  Sim b)  Parcial c)  Não**2.4 Existe tratamento de lixiviados?**a)  Sim b)  Sim, mas não adequado c)  Não**2.5 O material disponível na região para ser usado como cobertura possui coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do lixão?**a)  Sim b)  Não**2.6 Natureza do solo sob o lixão**a)  Solo predominantemente argilosob)  Solo predominantemente silteosoc)  Solo predominantemente arenoso**2.7 Permeabilidade do solo onde está localizado o lixão**a)  Inferior a  $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ b)   $5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ c)  Maior que  $5 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ **2.8 Nível piezométrico abaixo dos resíduos**a)   $> 3 \text{ m}$  b)   $1,5 - 3 \text{ m}$  c)   $< 1,5 \text{ m}$ **2.9 Se a distância entre os resíduos e a água subterrânea é inferior a 1,5 m**a)  Resíduos fora do contato com a água subterrâneab)  Resíduos parcialmente banhadosc)  Resíduos banhados



**2.10 Descontinuidades do terreno sobre o qual está o lixão**

- a)  Ausência reconhecida de falhas, fraturas ou de carstificações no terreno onde está o lixão ou em sua proximidade
- b)  Ausência de falhas, fraturas ou de carstificações no terreno onde o lixão está, mas presente nas proximidades
- c)  Presença de falhas, fraturas ou carstificação intensa no terreno onde está o lixão

**2.11 Contaminação do solo comprovada devido à presença de uma ou mais substâncias cujos valores ultrapassam os limites recomendados pela Resolução Conama nº 420/2009**

- a)  Não b)  Sim c)  Dado não existente

**2.12 Contaminação das águas subterrâneas comprovada devido à presença de uma ou mais substâncias cujos valores ultrapassam os limites recomendados pela Resolução Conama nº 396/2008 conforme uso preponderante das águas subterrâneas?**

- a)  Não b)  Sim c)  Dado não existente

**2.13 Caso a resposta da questão 2.11 ou 2.12 seja “Sim”: De maneira geral, o volume de contaminante é pequeno?**

- a)  Sim b)  Não

**2.14 Distância de um ponto de alimentação de água potável de uso doméstico**

- a)  > 200 m b)  100 – 200 m c)  <100 m d)  Desconhecida

**2.15 Distância de um ponto de alimentação de água para o abastecimento público**

- a)  > 200 m b)  100 – 200 m c)  <100 m

**2.16 Uso preponderante da água subterrânea da área ou entorno diretamente afetado pela presença do lixão**

- a)  Não utilizada
- b)  Uso animal, na agricultura, piscicultura, lazer ou industrial;
- c)  Abastecimento humano

**3 ÁGUAS SUPERFICIAIS**

**3.1 Distância de um ponto de alimentação em água potável para o uso doméstico**

- a)  > 200 m                      b)  100 – 200 m
- c)  <100 m                      d)  Desconhecida

**3.2 Utilização das águas (classificação das águas segundo Resolução Conama nº 357/2005)**

- a)  Classe IV                      b)  Classe III
- c)  Classe II                      d)  Classe I                      e)  Classe especial

**3.3 Distância entre o lixão e a borda do corpo hídrico mais próximo**

- a)  > 200 m                      b)  100 – 200 m                      c)  <100 m



**3.4 Distância de um ponto de alimentação de água para abastecimento público**

- a)  > 200 m      b)  100 – 200 m      c)  <100 m

**3.5 Distância da zona balneável mais próxima**

- a)  > 200 m      b)  100 – 200 m      c)  <100 m

**3.6 Distância de nascente d'água mais próxima**

- a)  > 500 m      b)  200 – 500 m      c)  < 200 m

**3.7 Uso preponderante da água de superfície**

- a)  Não é utilizada  
b)  Uso animal, na agricultura, piscicultura, lazer ou industrial  
c)  Abastecimento humano

**3.8 Poluição das águas, constatada por análises – valores máximos permitidos de turbidez, DQO, DBO, pH, OD, E. coli, cloreto e nitrogênio amoniacal estabelecidos pela Resolução Conama nº 357/2005?**

- a)  Não b)  Sim

**4 MEIO SOCIAL**

**4.1 Densidade populacional dentro de um raio de 500 m**

- a)  <10 residências b)  100 – 10 residências c)  >100 residências

**4.2 Há presença de hospital, creche, escola ou asilo na área do lixão ou num raio de 500 m?**

- a)  Não b)  Sim

**4.3 Distância do núcleo populacional mais próximo**

- a)  > 500 m b)  < 500 m  
c)  Há aglomeração humana sobre o terreno do lixão ou imediatamente ao lado

**4.4 Existência de atividades agropecuárias na área ou no entorno**

- a)  Nunca      b)  Às vezes      c)  Frequentemente

**4.5 Utilização da área ou no entorno para atividades de lazer**

- a)  Nunca      b)  Às vezes      c)  Frequentemente

**4.6 Zona de isolamento físico do lixão**

- a)  Zona isolada com barreira de proteção e vigiada  
b)  Zona isolada com barreira de proteção, mas não vigiada  
c)  Zona não isolada e não vigiada

**4.7 Presença de animais no lixão**

- a)  Insetos      b)  Roedores      c)  Escorpiões      d)  Urubus  
e)  Outras aves – Quais? \_\_\_\_\_  
f)  Outros animais – Quais? \_\_\_\_\_

**4.8 Danos à saúde da população residente no lixão e/ou entorno**

- a)  Nunca      b)  Às vezes  
c)  Frequentemente      d)  Dado não disponível





Para cada lixão preencheu-se uma cópia impressa do questionário, de modo a manter um registro físico arquivado.

### 2.1.2 Atribuição de pontuação às respostas do questionário preenchido

Para atribuir valores às respostas do questionário do Quadro 1, foi desenvolvido o sistema de pontuação da Tabela 1 e Tabela 2, baseado na ponderação de atributos de Sánchez (2008) e elementos de índice e risco de Joseph *et al.* (2008). O sistema de pontuação parte do pressuposto que após o preenchimento do Quadro 1, deve-se atribuir, na Tabela 1 e na Tabela 2, os valores obtidos para cada resposta do Quadro 1 e ainda calcular o somatório dos valores obtidos. Por exemplo: Se no Quadro 1 a resposta para a pergunta 1.1 for letra c, então na Tabela 2, o valor obtido será 4,5.

Tabela 1 – Situações constatadas na área do lixão

Situação	Valores das respostas		Valor obtido
	Não	Sim	
a) Ocorre em local com restrição conforme a legislação federal, estadual e/ou municipal?	0	100	
b) Ocorre em talvegue, que poderia abrigar curso d'água intermitente?	0	100	
c) Ocorre em região de várzea pântano ou mangue?	0	100	
d) Quantidade de corpos hídricos na área do lixão e/ou até num raio de 200 m? (Ex.: 2)	Se a resposta for maior que zero, valor é 100		
e) Ocorre em área industrial?	0	100	
<b>Somatório dos valores obtidos:</b>			

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 2 – Pontuações do questionário de diagnóstico simplificado

1 CARACTERIZAÇÃO DO LIXÃO							
Questão	Valores das respostas do Quadro 1						Valor obtido
	a	b	c	d	e	f	
1.1 Área do lixão	1,5	3	4,5	6	-	-	
1.2 Atividade do lixão	1,5	3	4,5	6	-	-	
1.3a Ocorrência de adensamento dos resíduos	3	6	-	-	-	-	
1.3b Ocorrência deslizamento	3	6	-	-	-	-	
1.3c Ocorrência de erosão	3	6	-	-	-	-	
1.3d Outras ocorrências	3	6	-	-	-	-	
1.4 Espessura da camada de resíduos	1,5	3	4,5	6	-	-	
1.5a Presença de resíduos – classe II B	6	-	-	-	-	-	
1.5b Presença de resíduos – classe II A	6	-	-	-	-	-	
1.5c Presença de resíduos – classe I	6	-	-	-	-	-	
1.6 Existe parcela significativa de resíduos classe A, B e C da construção civil?	3	6	-	-	-	-	
1.7 A maior parte dos resíduos está estabilizada?	3	6	-	-	-	-	
1.8 Impermeabilização superior	2	4	6	-	-	-	
1.9 Pluviometria	1,5	3	4,5	6	-	-	
1.10 Declividade do terreno natural	1	2	3	4	5	6	
1.11 A área do lixão atende os critérios da ABNT NBR 13896:1997 e Resolução Conama nº 404/2008?	3	6	-	-	-	-	
1.12 Há evidências de zonas mais poluídas que outras ( <i>hotspots</i> )?	3	6	-	-	-	-	
1.13 Qual o volume estimado dos <i>hotspots</i> ?	2	4	6	-	-	-	
1.14 Os resíduos dos <i>hotspots</i> representam algum tipo de ameaça?	3	6	-	-	-	-	



2 SOLO E ÁGUAS SUBTERRÂNEAS							
Questão	Valores das respostas do Quadro 1						Valor obtido
	a	b	c	d	e	f	
2.1 Impermeabilização inferior	1,5	3	4,5	6	-	-	
2.2 Presença de lixiviados nos taludes, aterros e entornos	2	4	6	-	-	-	
2.3 Existe coleta de lixiviados?	2	4	6	-	-	-	
2.4 Existe tratamento de lixiviados?	2	4	6	-	-	-	
2.5 O material disponível na região para ser usado como cobertura possui coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do lixão?	3	6	-	-	-	-	
2.6 Natureza do solo sob o lixão	2	4	6	-	-	-	
2.7 Permeabilidade do solo onde está localizado o lixão	2	4	6	-	-	-	
2.8 Nível piezométrico abaixo dos resíduos	2	4	6	-	-	-	
2.9 Se a distância entre os resíduos e a água subterrânea é inferior a 1,5 m	2	4	6	-	-	-	
2.10 Descontinuidades do terreno sobre o qual está o lixão	2	4	6	-	-	-	
2.11 Contaminação do solo comprovada (Resolução Conama nº 420/2009)?	2	4	6	-	-	-	
2.12 Contaminação das águas subterrâneas comprovada (Resolução Conama nº 396/2008)?	2	4	6	-	-	-	
2.13 Se 2.11 ou 2.12 for "Sim": De maneira geral, o volume de contaminante é pequeno?	3	6	-	-	-	-	
2.14 Distância de um ponto de alimentação de água potável de uso doméstico	1,5	3	4,5	6	-	-	
2.15 Distância de um ponto de alimentação de água para o abastecimento público	2	4	6	-	-	-	
2.16 Uso preponderante da água subterrânea	2	4	6	-	-	-	

3 ÁGUAS SUPERFICIAIS							
Questão	Valores das respostas do Quadro 1						Valor obtido
	a	b	c	d	e	f	
3.1 Distância de um ponto de alimentação em água potável para o uso doméstico	1,5	3	4,5	6	-	-	
3.2 Utilização das águas (classificação das águas segundo Resolução Conama nº 357/2005)	1,2	2,4	3,6	4,8	6	-	
3.3 Distância entre o lixão e a borda do corpo hídrico mais próximo	2	4	6	-	-	-	
3.4 Distância de um ponto de alimentação de água para abastecimento público	2	4	6	-	-	-	
3.5 Distância da zona balneável mais próxima	2	4	6	-	-	-	
3.6 Distância de nascente d'água mais próxima	2	4	6	-	-	-	
3.7 Uso preponderante da água de superfície	2	4	6	-	-	-	
3.8 Poluição das águas (Resolução Conama nº 357/2005)?	3	6	-	-	-	-	



4 MEIO SOCIAL							
Questão	Valores das respostas do Quadro 1						Valor obtido
	a	b	c	d	e	f	
4.1 Densidade populacional dentro de um raio de 500 m	2	4	6	-	-	-	
4.2 Há presença de hospital, creche, escola ou asilo na área do lixão ou num raio de 500 m?	3	6	-	-	-	-	
4.3 Distância do núcleo populacional mais próximo	2	4	6	-	-	-	
4.4 Existência de atividades agropecuárias na área ou no entorno	2	4	6	-	-	-	
4.5 Utilização da área ou no entorno para atividades de lazer	2	4	6	-	-	-	
4.6 Zona de isolamento físico do lixão	2	4	6	-	-	-	
4.7a Presença de insetos	6	-	-	-	-	-	
4.7b Presença de roedores	6	-	-	-	-	-	
4.7c Presença de escorpiões	6	-	-	-	-	-	
4.7d Presença de urubus	6	-	-	-	-	-	
4.7e Presença de outras aves	6	-	-	-	-	-	
4.7f Presença de outros animais	6	-	-	-	-	-	
4.8 Danos à saúde da população residente no lixão e/ou entorno	1,5	3	4,5	6	-	-	
4.9 Danos materiais à população residente no lixão e/ou entorno	1,5	3	4,5	6	-	-	
4.10 Existência de catadores	3	6	-	-	-	-	

5 MEIO NATURAL E PAISAGENS							
Questão	Valores das respostas do Quadro 1						Valor obtido
	a	b	c	d	e	f	
5.1 Largura da barreira vegetal (cerca viva) do lixão	2	4	6	-	-	-	
5.2 Distância de um elemento cultural, turístico, arqueológico ou ambiental importante	1,5	3	4,5	6	-	-	
5.3 Existe desmatamento e/ou de redução de biodiversidade em razão da presença do lixão?	2	4	6	-	-	-	
5.4 Há dispersão de resíduos no entorno?	3	6	-	-	-	-	
5.5 Há possibilidade das águas contaminadas se dirigirem a um mangue ou pântano?	1,5	3	4,5	6	-	-	
5.6 Danos aos animais domésticos e/ou selvagens	2	4	6	-	-	-	
5.7 O clima da região é árido ou semiárido?	3	6	-	-	-	-	
5.8 A região tem mais evapotranspiração do que chuvas?	3	6	-	-	-	-	



6 MEIO ATMOSFÉRICO							
Questão	Valores das respostas do Quadro 1						Valor obtido
	a	b	c	d	e	f	
6.1 Presença de odores no lixão e/ou entorno	2	4	6	-	-	-	
6.2 Ocorrência de explosões recentes	1,5	3	4,5	6	-	-	
6.3 Queima de resíduos	2	4	6	-	-	-	
6.4 Possibilidade de bolsões de gás e/ou de migração de biogás	2	4	6	-	-	-	
6.5 Existe coleta de gás?	1,5	3	4,5	6	-	-	
6.6 Existe de tratamento de gás?	2	4	6	-	-	-	
<b>Somatório dos valores obtidos:</b>							

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Dessa forma, a soma dos valores obtidos nos somatórios da Tabela 1 e Tabela 2 constitui a pontuação do lixão.

### 2.1.3 Estabelecimento da pontuação e do nível de impacto do lixão

A pontuação do lixão foi estimada utilizando a equação 1.

$$P_L = \frac{S + V_r}{4}$$

Onde:

**PL** = pontuação do lixão;

**S** = somatório dos valores das situações obtido na Tabela 1;

**Vr** = somatório dos valores das respostas obtido na Tabela 2.

A Tabela 3 permite estabelecer o impacto ambiental do lixão, através da pontuação obtida na Equação 1. No sistema de pontuação, um lixão pode obter entre 125 a 832 pontos. Os intervalos de pontuação adotados na Tabela 3 indicam que, quanto maior a diferença de pontuação entre os níveis, maior o impacto ambiental do lixão. Um lixão que obteve 300 pontos, por exemplo, é classificado como de médio impacto ambiental.



Tabela 3 – Nível de impacto ambiental do lixão em função da pontuação obtida

Nível de impacto	Intervalo de pontuação	Diferença de pontuação
Reduzido	$> = 125 < = 160$	35 pontos
Baixo	$> = 161 < = 266$	105 pontos
Médio	$> = 267 < = 479$	212 pontos
Alto	$> = 480 < = 832$	352 pontos

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Assim, em caso de lixões com mesmo nível de impacto, as prioridades de remediação são definidas ordenando-os da pontuação mais alta para a mais baixa, onde o lixão que obtiver maior pontuação, tem maior prioridade de remediação.

#### 2.1.4 Classificação dos cenários e técnicas de remediação

Para indicar os cenários e técnicas de remediação aplicáveis para cada caso, utilizou-se como referência os cenários indicados por Feam (2010) e (Ramos (2016), e as técnicas de remediação sugeridas por Bosmans *et al.* (2013), Boyer *et al.* (1999), Burlakovs *et al.* (2017), Dubey; Chakrabarti; Pandit (2016), Gabbar; Aboughaly; Ayoub (2018), EPA (1997), US EPA (2004; 2011), Zaman (2010).

A revisão da literatura indicou três principais cenários de remediação:

- 1) Confinamento dos resíduos;
- 2) Remoção dos resíduos; e,
- 3) Conversão em aterro sanitário.

Cada cenário possui um número variado de técnicas. Para classificar os três cenários de modo a saber qual é o mais indicado, comparou-se os critérios de escolha das técnicas de remediação, constantes na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6, com a resposta da sua respectiva pergunta no Quadro 1. Se o critério for satisfeito, marca-se um X na última coluna, atribui-se valor para cada técnica e finalmente o valor de cada cenário. A Tabela 7 não pontua, pois são técnicas comuns aos três cenários de remediação.



Tabela 4 – Cenário confinamento dos resíduos

<b>Técnica de remediação:</b> Melhoria da cobertura existente		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Em lixões antigos onde a infiltração da água foi abundante tornando a lixiviação dos resíduos restantes relativamente baixa.	idade_lixão > 30 anos e 1.8 e 1.9 e 2.7	
Em regiões de clima árido.	5.7	
Em regiões de mais evapotranspiração do que chuvas.	5.8	
Em lixões com resíduos estabilizados.	1.7	
Em lixões com resíduos de construção.	1.6	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 1 ponto)		

<b>Técnica de remediação:</b> Cobertura de barreira única ou cobertura de barreira dupla (barreiras hidráulicas)		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Quando o controle da infiltração não é a principal meta.	2.7	
Quando o volume de contaminantes é pequeno.	2.13	
Quando a região é de baixa precipitação anual.	1.9	
Quando as águas subterrâneas não são usadas para consumo humano.	2.16	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 1,25 ponto):		



<b>Técnica de remediação:</b> Cobertura com evapotranspiração		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Em locais onde o material disponível para ser usado como cobertura são de grão fino e alta capacidade de armazenamento de água, como os sedimentos e sedimentos argilosos.	2.5	
Em locais onde a estabilidade do declive deve ser garantida.	1.10	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 2,5 pontos):		

<b>Técnica de remediação:</b> Remoção direta de <i>hotspot</i> para aterro sanitário		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Quando o volume do <i>hotspot</i> for pequeno.	1.13	
Quando há evidências de <i>hotspot</i> , e ele estiver em local acessível.	1.12	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 2,5 pontos):		



<b>Técnica de remediação:</b> Remoção de <i>hotspot</i> por mineração com tratamento térmico por gaseificação		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Quando há evidências de <i>hotspot</i> , e ele estiver em local acessível.	1.12	
Quando o volume do <i>hotspot</i> for grande o suficiente para que sua remoção e tratamento reduza os riscos no lixão.	1.13	
Quando se deseja fazer o tratamento ou disposição final de resíduos que representam ameaça (ex.: tóxico, móvel, volátil, contaminante); ou que estão em contato com água.	1.14	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 1,67 ponto)		
<b>Valor do cenário confinamento dos resíduos:</b> Verificar o valor de cada técnica. Quando o valor for maior que zero, somar 1 ponto no valor do cenário		

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 5 – Cenário conversão em aterro sanitário

<b>Técnica de remediação: Instalação de aterro sanitário</b>		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Quando a área do lixão não tenha restrições ambientais ou sociais.	Situação "a" da Tabela 1	
Quando o lixão atende aos requisitos da ABNT NBR 13896:1997, NBR 8419/1992, NBR 15849/2010, e; a área disponível possibilite o uso do aterro por um período superior a quinze anos.	1.11	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 2,5 pontos)		
<b>Técnica de remediação: Remoção direta dos resíduos do lixão</b>		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
Quando o volume do lixão for pequeno	1.1 × 1.4	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 5 pontos):		
<b>Técnica de remediação: Remoção dos resíduos do lixão por mineração</b>		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se o critério for satisfeito</b>
O lixão deve ter mais de 15 anos de idade.	1.2	
O volume do lixão grande o suficiente para viabilizar a implantação e operação do projeto.	1.1 × 1.4	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 2,5 pontos):		
<b>Valor do cenário conversão em aterro sanitário:</b> Verificar o valor de cada técnica. Quando o valor for maior que zero, somar 1,67 ponto no valor do cenário		

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 6 – Cenário remoção dos resíduos

<b>Técnica de remediação: Remoção direta para o aterro sanitário</b>		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando o volume do lixão for pequeno ao ponto de viabilizar os custos do processo.	1.1 × 1.4	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 5 pontos)		

<b>Técnica de remediação: Remoção por mineração</b>		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
O lixão deve ter mais de 15 anos de idade.	1.2	
O volume do lixão grande o suficiente para viabilizar a implantação e operação do projeto.	1.1 × 1.4	
<b>Valor da técnica:</b> Somar o número de critérios satisfeitos na técnica (cada X vale 2,5 pontos):		
<b>Valor do cenário remoção dos resíduos:</b> Verificar o valor de cada técnica. Quando o valor for maior que zero, somar 2,5 pontos no valor do cenário		

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 7 – Técnicas comuns aos três cenários de remediação.

<b>CENÁRIO TODOS</b>		
<b>Técnica de remediação:</b> Controle da área		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando a erosão superficial é uma preocupação	Se sim, marcar com X	
Quando existe possibilidade de invasão (área não isolada ou presença de catadores)	4.6 ou 4.10	
Quando não existe ventilação passiva ou controle dos gases	6.5 e 6.6	
Quando se deseja impedir o uso da água subterrânea sob o lixão	2.12	
<b>A técnica se aplica aos cenários de remediação (Sim/Não)?</b> Caso ao menos 1 critério tenha sido satisfeito, a resposta é Sim		

<b>ÁGUA SUBTERRÂNEA</b>		
<b>Técnica de remediação:</b> Controle da água subterrânea com poços de extração e drenagens de subsuperfície com paredes de suspensão degradáveis ou paredes de tratamento (ex.: Paredes de depósito de ferro).		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando há risco de contaminação das águas subterrâneas no perímetro do lixão.	1.8 e 2.1 e 2.10	
<b>A técnica se aplica aos cenários de remediação (Sim/Não)?</b> Caso ao menos 1 critério tenha sido satisfeito, a resposta é Sim		



<b>Técnica de remediação:</b> Coleta de lixiviado / água contaminada através do sistema de bombeamento pressurizado		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando há contaminação das águas subterrâneas no perímetro do lixão	2.12	
<b>A técnica se aplica aos cenários de remediação (Sim/Não)?</b> Caso ao menos 1 critério tenha sido satisfeito, a resposta é Sim		

<b>Técnica de remediação:</b> Tratamento físico, químico e biológico da água subterrânea.		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando há contaminação das águas subterrâneas ou superficial no perímetro do lixão	2.12 ou 3.8	
<b>A técnica se aplica aos cenários de remediação (Sim/Não)?</b> Caso ao menos 1 critério tenha sido satisfeito, a resposta é Sim		

<b>EMISSIONES ATMOSFÉRICAS</b>		
<b>Técnica de remediação:</b> Sistema ativo de coleta de gases		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando há odor excessivo, risco de inalação, explosão, ou riscos associados ao uso do solo com acesso público.	6.1 ou 6.2 ou 6.5 ou 6.6	
<b>A técnica se aplica aos cenários de remediação (Sim/Não)?</b> Caso ao menos 1 critério tenha sido satisfeito, a resposta é Sim		



<b>Técnica de remediação:</b> Ventilação passiva de gás		
<b>Critério de escolha</b>	<b>Questão correspondente e no Quadro 1</b>	<b>Preencha com um X se critério for satisfeito</b>
Quando as emissões locais representam risco para saúde humana	(6.1 ou 6.2 ou 6.5 ou 6.6) e (4.1 a 4.5 ou 4.8)	
Quando a cobertura pode acumular gás no interior do aterro	6.4	
Quando os resíduos têm alto teor orgânico, podendo produzir gás	1.5 e 6.1 e 6.2 e 6.3	
<b>A técnica se aplica aos cenários de remediação (Sim/Não)?</b> Caso ao menos 1 critério tenha sido satisfeito, a resposta é Sim		

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Uma avaliação qualitativa foi adicionada ao final (Figura 1), para que se pudesse levar em consideração as características relevantes do lixão e os aspectos legais envolvidos e adicionar pontuação extra ao score do lixão. Dessa forma calcula-se o valor total do cenário através da equação 2.

#

$V_{tc} = \sum_{i=1}^n V_{ci} + \sum_{j=1}^m V_{cj}$

+5,#

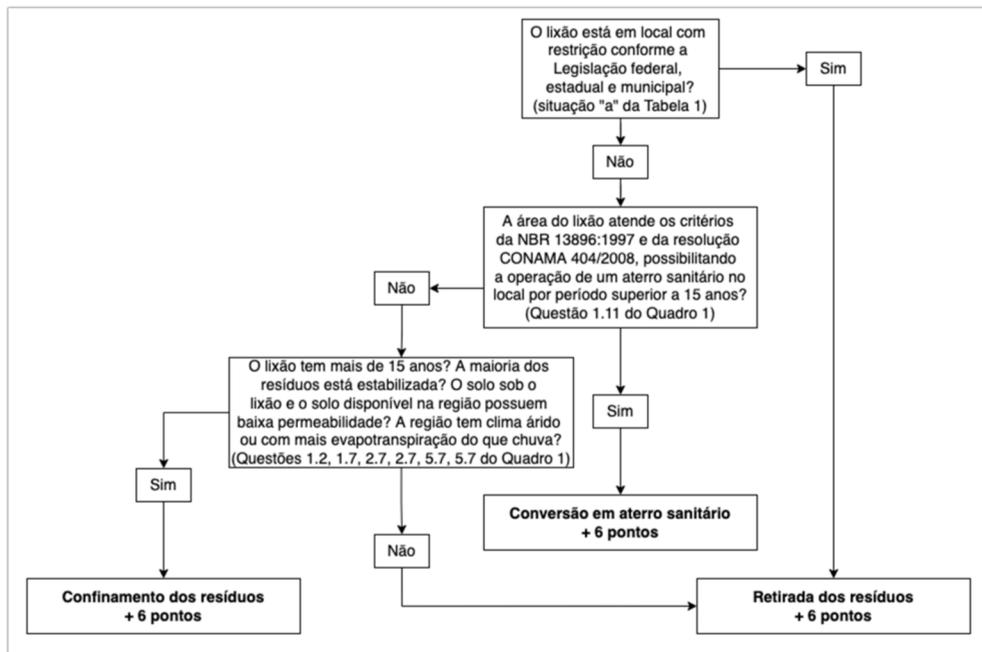
Onde:

**V<sub>tc</sub>** = valor total do cenário;

**V<sub>c</sub>** = valor do cenário com maior pontuação entre a Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.



Figura 1 – Fluxograma de atribuição de pontuação extra ao cenário de remediação



Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2020).

Estes seis pontos extras foram definidos utilizando o valor máximo possível em um cenário (cinco) mais um, para não haver possibilidade de empate.

### 2.1.5 **Elaboração do diagnóstico simplificado e interpretação dos resultados**

O diagnóstico simplificado está relacionado com a forma de interpretação dos resultados obtidos na aplicação do sistema de pontuação para cada lixão de determinado município ou região. Quanto maior a pontuação do cenário obtida na equação 2, mais indicado seu uso. Como justificativa de uso do cenário com maior pontuação, pode-se utilizar os critérios de escolhas satisfeitos na Tabela 4, Tabela 5 ou Tabela 6 (utilizar a Tabela do cenário com maior pontuação) e Tabela 7, por exemplo: Supondo que o cenário “Conversão em aterro sanitário” obteve maior pontuação entre os três cenários. Pode-se informar no diagnóstico que os principais motivos para a escolha do cenário foram a ausência de restrições sociais e ambientais (primeiro critério da Tabela 5) e o atendimento às normas



da ABNT, possibilitando a instalação e operação do aterro por um período superior a 15 anos (Segundo critério da Tabela 5).

A necessidade de uso de determinada técnica de remediação para determinado cenário está relacionada à quantidade de critérios de escolha satisfeitos na Tabela 4, na Tabela 5, na Tabela 6 e na Tabela 7. Se ao menos um critério de escolha for selecionado, a técnica de remediação é necessária. Então após definidos os cenários e informados os principais motivos para sua escolha, pode-se relatar no diagnóstico quais as técnicas de remediação serão necessárias para cada cenário. Por fim, as incertezas do diagnóstico estão ligadas à falta de informações no momento do preenchimento do Quadro 1.

Portanto, pode-se relacionar as incertezas com as respostas do tipo "Dado não existente", "Dado não disponível", "Desconhecido". O Quadro 2 apresenta um modelo de diagnóstico simplificado.

Quadro 2 – Modelo de diagnóstico simplificado

<b>Nome do Lixão:</b> <b>Pontuação do Lixão:</b> <b>Nível de Impacto do Lixão:</b> <b>Cenário mais indicado:</b>
<b>Cenário 1:</b> Pontuação: Motivos para sua escolha: Técnicas de remediação necessárias: Incertezas:
<b>Cenário 2:</b> Pontuação: Motivos para sua escolha: Técnicas de remediação necessárias: Incertezas:
<b>Cenário 3:</b> Pontuação: Motivos para sua escolha: Técnicas de remediação necessárias: Incertezas:

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).



Em um município ou região com mais de um lixão, pode-se utilizar a pontuação e o nível de impacto do lixão para definir as prioridades de remediação.

## 2.2 RESULTADOS

A FAD, foi testada e validada por uma banca de cinco especialistas na área de resíduos sólidos, em onze lixões de diferentes estados brasileiros e quatro lixões da República de Cabo Verde. Dos lixões brasileiros, três estavam no estado de Santa Catarina (SC1, SC2, SC3), um no estado de São Paulo (SP), um no estado do Rio de Janeiro (RJ), um no estado do Rio Grande do Sul (RS) e um no estado do Espírito Santo (ES). Os quatro lixões de Cabo Verde foram nomeados como CV1, CV2, CV3 e CV4.

Embora seja possível realizar o diagnóstico simplificado manualmente, ou seja, utilizando o Quadro 1, Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, Equação 2, Figura 1 e Quadro 2, os especialistas optaram por utilizar o ReLix (disponível gratuitamente em: <https://github.com/jcgomes/ReLix>), que é o software desenvolvido a partir da sistematização dessa FAD e que permite que os registros fiquem salvos em bancos de dados, facilita a visualização das informações, automatiza o diagnóstico e fornece o apoio à decisão.

Figura 2 – Tela de indicação de cenário e técnicas de remediação feito pelo ReLix

The screenshot displays the 'Cenário(s) de remediação para o lixão: Lixão RS' section. It features a table with the following data:

Cenário	Pontuação
Retirada dos resíduos	8,5
Confinamento dos resíduos	4
Conversão em aterro sanitário	3,3334

Below this, the 'Técnica(s) de remediação indicada(s) para o cenário selecionado:' section shows a table of recommended techniques:

Técnica	Pontuação
Remoção dos resíduos por mineração com tratamento térmico por gaseificação	5
Coleta de lixiviado / água contaminada através do sistema de bombeamento pressurizado	5
Controle da água subterrânea com poços de extração e drenagens de subsuperfície com paredes de suspensão degradáveis ou paredes de tratamento	5
Sistema ativo de coleta de gases	5
Tratamento físico, químico ou biológico da água contaminada / lixiviado	5
Ventilação passiva dos gases	5
Controle da área	2,5

The total value for the scenario is indicated as 'Valor total do cenário: R\$ 0,00'. A note at the bottom states: 'Cenário indicado: Retirada dos resíduos, porque embora o lixão não esteja em local com restrição conforme a legislação, a área do lixão não atende os critérios da NBR 13896:1997 e da resolução CONAMA 404/2008, não possibilitando a operação de um aterro sanitário no local por período superior a 15 anos; A maioria dos resíduos não estão estabilizados; O clima da região não é árido ou semiárido; A região não tem mais evapotranspiração do que chuvas;'. Buttons for 'Salvar' and 'Cancelar' are visible at the bottom right.

Fonte: Gomes *et al.* (2020).



A Figura 2 ilustra a tela de indicação do cenário mais provável para um dos lixões brasileiros (RS), onde é possível perceber que os cenários e técnicas de remediação são automaticamente classificados em função da pontuação obtida e ao final o ReLix sugere o cenário de remediação mais indicado.

Na Tabela 8, observa-se o resumo da aplicação do ReLix nos onze lixões, em ordem crescente de pontuação e nível de impacto.

Tabela 8 – Resumo dos resultados da aplicação do ReLix nos onze lixões

Parâmetro	CV2	RJ	SC1	CV1	CV3	SP	ES	SC3	SC2	RS	CV4
Caracterização do lixão	74	61,5	68	81,5	73,5	82,5	74,5	64	67	69	81
Solos e águas subterrâneas	55	56	49	50	53	68,5	61	66,5	62,5	51	65,5
Águas superficiais	24,5	24,1	29,1	20,5	24,5	33,5	31,1	32	31,5	25,5	27
Meio social	57	33,5	31	57,5	70	66	40	42	40	44	60
Meio natural e paisagens	33,5	28	28	35,5	38,5	43,5	30	34,5	48	29,5	40,5
Meio Atmosférico	34,5	16,5	18,5	31	34,5	32,5	22	24,5	26,5	18,5	34,5
Situações ocorridas	0	100	100	100	100	100	200	200	200	300	400
<b>Pontuação do lixão</b>	279	320	324	376	394	427	459	464	476	538	709
<b>Nível de impacto</b>	M	M	M	M	M	M	M	M	M	A	A
<b>Cenário indicado</b>	RR	RR	CA	RR	CR	RR	RR	RR	RR	RR	RR

Legenda: **M** – Médio; **A** – Alto;  
**RR** – Remoção de Resíduos;  
**CA** – Conversão em Aterro Sanitário;  
**CR** – Confinamento de Resíduos.

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2020).



O diagnóstico feito pela FAD revelou que dos lixões que receberam a indicação do cenário remoção dos resíduos, CV2, RJ, CV1, SP, SC3, SC2 e RS não atendiam os critérios legais e técnicos para a conversão em aterro sanitário, a maior parte dos resíduos não estava estabilizada, o solo sob o lixão possuía baixa permeabilidade e o clima da região não é no mínimo semiárido com mais evapotranspiração do que chuvas.

Para o lixão ES, embora o ReLix também tenha indicado o cenário Remoção de resíduos em primeiro lugar, não ficou claro no trabalho de Salvador (2019) quais os principais motivos para a indicação do cenário, entretanto, a autora relata que o segundo cenário mais indicado pela FAD foi o confinamento dos resíduos, o qual na prática já havia sido adotado pela prefeitura municipal e demonstrava ser o cenário mais viável economicamente. Nesse sentido a FAD foi assertiva na recomendação das técnicas de remediação necessárias para o confinamento com o menor impacto possível, confirmando que o ReLix permite ao tomador de decisão ponderar a viabilidade técnica e econômica entre os cenários indicados.

O único lixão onde o cenário conversão em aterro sanitário foi indicado foi o SC1, pois ele não se encontrava em local com restrição legal e a área atendia os critérios legais e técnicos para a operação de um aterro sanitário por mais de quinze anos.

Ao lixão CV3 foi indicado o cenário confinamento dos resíduos, pois embora sua área não possuía restrições legais e permitia a operação de um aterro sanitário por mais de quinze anos, o lixão tinha mais de trinta anos e por isso a geração de gases e lixiviados era baixa, a maior parte dos resíduos estava estabilizada e a região tem clima árido.

O lixão com o maior nível de impacto foi o CV4 e encontrava-se em local com restrição legal, por isso o cenário de remoção dos resíduos foi indicado. Em síntese, comparando os resultados obtidos com a aplicação do ReLix (Tabela 8), entende-se que quanto maior a pontuação do lixão, maior seu nível de impacto, consequentemente maior a prioridade de remediação.

Entretanto, embora nove dos onze lixões obtiveram nível de impacto médio, percebe-se que aquele que obteve a menor pontuação (CV2) estava a treze pontos do nível de impacto baixo enquanto o que obteve a maior pontuação (SC2) estava a quatro pontos do nível de impacto alto, ou seja, ambos estavam próximos do limite de mudança de nível de impacto, significando que se todos os lixões fossem de um mesmo município ou região, a FAD permitiria a



análise caso a caso para tomar as decisões mais adequadas quanto as prioridades de remediação.

Os especialistas que aplicaram a FAD nos onze lixões avaliaram-na como sendo fácil de entender e usar, fornece um diagnóstico coerente com o diagnóstico realizado pelos próprios especialistas, é capaz de auxiliar no estabelecimento das prioridades de remediação e na indicação do cenário e técnicas de remediação de forma assertiva.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A FAD desenvolvida nesse trabalho foi planejada para atender a determinação da PNRS Brasileira para a eliminação dos seus lixões de RSU, mas também foi testada em lixões da República de Cabo Verde e se mostrou eficiente, tendo potencial de auxiliar outros países que passam pela mesma situação do Brasil.

Focada principalmente nos pequenos municípios, desprovidos de equipe técnica especializada, projetou-se uma ferramenta fundamentada em técnicas de remediação consolidadas internacionalmente, mas simples de utilizar.

A ferramenta pode ser aplicada manualmente ou por meio do *software* ReLix, que foi desenvolvido para automatizar o diagnóstico e a indicação dos cenários e técnicas de remediação, bem como permitir o armazenamento das informações de todos os lixões cadastrados em banco de dados, facilitando a análise dos dados para a tomada de decisão.

Para validar a FAD, formou-se uma banca de especialistas que aplicaram a ferramenta em onze lixões e a avaliaram como sendo fácil de entender e usar, fornece um diagnóstico coerente com o diagnóstico realizado pelos próprios especialistas, é capaz de auxiliar no estabelecimento das prioridades de remediação e na indicação do cenário e técnicas de remediação de forma assertiva.

### REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004:2004** – Resíduos sólidos – Classificação. São Paulo: ABNT, 2004. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=V1BmejNuejBUdy94S1d6cUFoTU9BNThodHVhaHdTcDU=>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13896:1997** – Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. São Paulo: ABNT, 1997. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=Q2h3NGNqWUwvUXNHRHd4L2lQZnF6UmJvUVVQ4eFF1T2V5ZURkUTFDd1VqVT0=>. Acesso em: 02 fev. 2022.



ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15515-1:2021** – Passivo ambiental em solo e água subterrânea – Parte 1: Avaliação preliminar. São Paulo: ABNT, 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=MW9tUVPbGpObmRwWUEwenBTNmIxcUwwS3g0a0QzcFAxK3dTNkV6VDNOaz0=>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15515-2:2021** – Passivo ambiental em solo e água subterrânea – Parte 2: Investigação confirmatória. São Paulo: ABNT, 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=TINwRWdtSDB6V2gzekhmdDY4TGtMNmt4RkdNZE5rOTU4MnMvOXdZVHlubz0=>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2012**. São Paulo: ABRELPE, 2012. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2012/>. Acesso em: 31 maio 2022.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 31 maio 2022.

ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. **Remise en état des décharges: méthodes et techniques**. Ademe: Angers, 2005. Disponível em: [https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/62265/remise-en-etat-des-decharges-methodes-et-techniques?\\_lg=fr-FR](https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/62265/remise-en-etat-des-decharges-methodes-et-techniques?_lg=fr-FR). Acesso em: 08 maio 2016.

ALTAFIN, Iara Guimarães [Agência Senado]. Municípios pedem mais prazo para apresentar planos de gestão e acabar com lixões. **Senado Federal, Portal de Notícias**, 02.04.2014. Disponível em: <http://www12.senado.gov.br/noticias/materias/2014/04/02/municipios-pedem-mais-prazo-para-apresentar-planos-de-gestao-e-acabar-com-lixoes>. Acesso em: 07 out. 2021.

BOSMANS, Anouk; VANDERREYDT, Ive; GEYSEN, Daneel; HELSEN, Lieve. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 10-23, 15 set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.032>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612002557>. Acesso em: 12 dez. 2017.

BOYER, Ivan; HAUSER, Victor; GIMON, Dianna M.; GILL, Marc D. **Decision Tool For Landfill Remediation**. Prepared for: Air Force Center for Environmental Excellence 3207 North Road Brooks AFB, TX 78235-5363, August 1999. Disponível em: [http://synectics.net/public/library/StreamResource.axd?DSN=pub&Mode=FileImage\\_Inline&ID=382](http://synectics.net/public/library/StreamResource.axd?DSN=pub&Mode=FileImage_Inline&ID=382). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: 11 abr. 2022.

BRASIL. **Lei nº 9.985**, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 307**, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=305](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305). Acesso em: 28 ago. 2022.



BRASIL. **Resolução Conama nº 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=305](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 396**, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=545](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=545). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 404**, de 11 de novembro de 2008. Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=573](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=573). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 420**, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=601](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=601). Acesso em: 28 ago. 2022.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei do Senado nº 425, de 2014**. Prorroga o prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos de que trata o art. 54 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. [Altera a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos]. Disponível em: <https://www.congressional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pls-425-2014>. Acesso em: 14 maio 2022.

BURLAKOV, Juris; KRIIPSALU, Mait; KLAIVINS, Maris; BHATNAGAR, Amit; VINCEVICA-GAILE, Zane; STENIS, Jan; JANI, Yahya; MYKHAYLENKO, Valeriy; DENAFAS, Gintaras; TURKADZE, Tsitsino; HOGLAND, Marika; RUDOVICA, Vita; KACZALA, Fabio; ROSENDAL, Rene Møller; HOGLAND, William. Paradigms on landfill mining: From dump site scavenging to ecosystem services revitalization. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 123, p. 73-84, ago. 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344916301707>. Acesso em: 31 maio 2022.

CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de; RAMOS, Naiara Francisca; ALVES, Clarissa Martins; FORCELLINI, Fernando Antônio; GRACIOLLI, Odacir Dionísio. Catadores de materiais recicláveis: análise das condições de trabalho e infraestrutura operacional no Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 18, n. 11, p. 3115-3124, nov. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-81232013001100002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/RDFvSTprvh8CBzXrsZnrPQN/?lang=pt>. Acesso em: 31 maio 2022.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Atlas pluviométrico do Brasil**. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique///Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>. Acesso em: 28 ago. 2022.

DUBEY, Amitkumar; CHAKRABARTI, Mayurika; PANDIT, Devanshu. Landfill Mining as a Remediation Technique for Open Dumpsites in India. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, p. 319-327, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.012>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029616301013>. Acesso em: 31 maio 2022.



EPA – Environmental Protection Agency. **Landfill Manuals: Landfill Operational Practices.** Ardavan, Wexford, Ireland: Environmental Protection Agency, 1997. Disponível em: <https://www.epa.ie/publications/licensing--permitting/waste/EPA-Landfill-Operational-Practices.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.** [LANZA, Vera Christina Vaz (FIP); MACHADO, Rosângela Moreira Gurgel (GESOL – Feam); TORQUETTI, Zuleika Stela Chiacchio (DQGA – Feam); FERNANDES, Patrícia Rocha Maciel (GESOL – Feam); REIS, Alexandre Guimarães (Assessor da Presidência – Feam); TEIXEIRA, Cornélio Zampier (Consultor do MMA / Feam)]. (Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos). Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente; Fundação Israel Pinheiro, 2010. Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/Flavia/areas\\_degradadas.pdf](http://www.feam.br/images/stories/Flavia/areas_degradadas.pdf). Acesso em: 31 maio 2022.

GABBAR, Hossam A.; ABOUGHALY, Mohamed; AYOUB, Nasser. Comparative study of MSW heat treatment processes and electricity generation. **Journal of the Energy Institute**, v. 91, n. 4, p. 481-488, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.04.009>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1743967117300120>. Acesso em: 31 maio 2022.

JOSEPH, Kurian; NAGENDRAN, R.; THANASEKARAN, K.; VISVANATHAN, C.; HOGLAND, William; KARTHIKEYAN, O. Parthiba; MOORTHY, n. Narayana. **Dumpsite Rehabilitation Manual.** Chennai, Chennai-600 025, India: Anna University Chennai, 2008. Disponível em: <https://www.elaw.org/system/files/Dumpsite%20Rehabilitation%20Manual.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

MONTEIRO, José Henrique Penido; FIGUEIREDO, Carlos Eugênio Moutinho; MAGALHÃES, Antônio Fernando; MELO, Marco Antônio França de; BRITO, João Carlos Xavier de; ALMEIDA, Tarquínio Prisco Fernandes de; MANSUR, Gilson Leite. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos.** [Coordenação Técnica: Victor Zular Zveibil]. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

NUCASE – Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. **Resíduos Sólidos: Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários.** Guia do profissional em treinamento: Nível 2. [Realização do NUCASE – Núcleo Sudeste de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Coordenação de Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, Emília Wanda Rutkowski, Isaac Volschan Junior e Sérgio Túlio Alves Cassini. Esgotamento sanitário: operação e manutenção de sistemas simplificados de tratamento de esgotos: guia do profissional em treinamento: nível 2]. Belo Horizonte: ReCESA – Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental, 2008. Disponível em: [http://www.dec.uem.br/mbr/Saneamento%20IV/aterro/aterro\\_sanitario.pdf](http://www.dec.uem.br/mbr/Saneamento%20IV/aterro/aterro_sanitario.pdf). Acesso em: 28 ago. 2022.

RAMOS, Naiara Francisca. **Proposição de metodologia para apoio à decisão para a recuperação de área degradada por disposição irregular de resíduos sólidos urbanos.** 2016. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/176640>. Acesso em: 20 maio 2022.

RAMOS, Naiara Francisca; GOMES, Juliano da Cunha; CASTILHOS JUNIOR, Armando Borges de; GOURDON, Rémy. Desenvolvimento de ferramenta para diagnóstico ambiental de lixões de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 6, p. 1233-1241, nov./dez. 2017. Disponível em:



[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522017000601233](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017000601233). Acesso em: 28 ago. 2022.

ReLix – Remediação de lixões de resíduos sólidos urbanos. **Ferramenta de apoio à decisão para diagnóstico e remediação de lixões de resíduos sólidos urbanos**.

2018. Disponível em: <https://github.com/jcgommes/ReLix>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SALVADOR, Luana. **Recuperação de áreas degradadas pela disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos – critérios para tomada de decisão: lixão municipal de Rio Novo do Sul/ES**. 2019. 90 f. TCC (Graduação) - Curso de Pós-Graduação Latu Sensu em Recuperação de Áreas Degradadas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2019.

SÁNCHEZ, Luis Enríque. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Parcialmente disponível em: <http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Avaliacao-de-impacto-ambiental-2ed-DEG.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2022.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. **Fact Sheet on Evapotranspiration Cover Systems for Waste Containment**. Washington, DC, USA: United States environmental protection agency, 2011. Disponível em: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/fs\\_evap\\_covers\\_epa542f11001.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-04/documents/fs_evap_covers_epa542f11001.pdf). Acesso em: 28 ago. 2022.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. **Technical Guidance for RCRA/CERCLA Final Covers (Draft)**. Washington, DC, USA: United States environmental protection agency, 2004. 421 p. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10074PP.PDF?Dockey=P10074PP.PDF>. Acesso em: 28 ago. 2022.

ZAMAN, Atiq U. Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 7, n. 2, p. 225-234, 1 mar. 2010. <https://doi.org/10.1007/BF03326132>. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF03326132>. Acesso em: 28 ago. 2022.





# MODELAGEM DA EMISSÃO ZERO DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM CAMADAS DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

## *MODELING THE ZERO EMISSION OF GREENHOUSE GASES IN COVER LAYERS SYSTEMS OF LANDFILLS*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

LE MOS, Moisés Antônio da Costa; CAVALCANTE, André Luís Brasil. Modelagem da emissão zero de gases do efeito estufa em camadas de cobertura de aterros sanitários. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Moisés Antônio da Costa Lemos**

Doutorando em Geotecnia. Mestre em Geotecnia. Engenheiro Civil.  
E-mail: moisesaclemos@gmail.com

### **André Luís Brasil Cavalcante**

Doutor em Geotecnia. Mestre em Geotecnia. Engenheiro Civil. Professor Associado da Universidade de Brasília (UnB).  
E-mail: abrasil@unb.br

## RESUMO

Os aterros sanitários modernos possuem sistema de captação de gás, no entanto, uma quantidade significativa é emitida para a atmosfera, tornando os aterros uma das maiores fontes antropogênicas de gases do efeito estufa. O biogás gerado em aterros sanitários tem grande potencial energético, porém têm seu impacto ambiental negativo devido à geração de metano e dióxido de carbono. As camadas de cobertura de aterros sanitários são formadas por um sistema onde granulometria, umidade e temperatura afetam o transporte dos gases. Diversas pesquisas buscam otimizar o sistema de cobertura (e.g. camadas oxidativas), a fim de mitigar o transporte de metano aumentando sua oxidação. Contudo, mesmo com todas as tentativas de se eliminar o metano, pouca atenção é dada ao dióxido de carbono que ainda escapa para a atmosfera em quantidades significativas. Atualmente, o uso de escória de ferro vem sendo discutido pela sua capacidade de remoção do dióxido de carbono pela carbonatação. Nessa pesquisa, os autores fazem um estudo de alternativas para camadas de cobertura de aterros sanitários por meio de modelagem utilizando equações semianalíticas. Os resultados de fluxo de metano e dióxido de carbono mostram que se os materiais que compõem a camada de cobertura de aterros sanitários (argila compactada,



oxidativa, escória de ferro) possuem propriedades adequadas é possível diminuir a emissão de biogás para a atmosfera. O uso da escória mostrou que a remoção de  $\text{CO}_2$  pode ser alterada de -2,3% (sem o uso de escória) para quase 56,3%. Contudo, a depender da espessura das camadas utilizadas a emissão zero pode vir a ser obtida, mostrando a necessidade de modelos como o apresentado nesse trabalho para o desenvolvimento de critérios de projeto de camadas de cobertura.

Palavras-chave: Emissão zero. Aterro sanitário. Biogás. Camada de cobertura. Solução semianalítica.

## ABSTRACT

Modern landfills have a drainage gas system, however, a significant amount is emitted into the atmosphere, making landfills one of the largest anthropogenic sources of greenhouse gases. Landfill gas generated in landfills has great energy potential, but has a negative environmental impact due to the generation of methane and carbon dioxide. The cover layers of sanitary landfills are formed by a system where grain size, moisture and temperature affect the transport of gases. Several researches seek to optimize the covering system (e.g. oxidative layers) in order to mitigate the transport of methane by increasing its oxidation. However, even with all the attempts to eliminate methane, little attention is given to the carbon dioxide that still escapes into the atmosphere in significant amount. Currently, the use of steel slag has been discussed for its ability to remove carbon dioxide by carbonation. In this research, the authors study alternatives for covering layers of sanitary landfills through modeling using semi-analytical equations. The results of methane and carbon dioxide flux show that if the materials of the cover layer of sanitary landfills (compacted clay, biochar, steel slag) have adequate properties, it is possible to reduce the emission of landfill gas into the atmosphere. The use of steel slag showed that  $\text{CO}_2$  removal can be changed from -2.3% (without the use of steel slag) to almost 56.3%. However, depending on the thickness of the layers used, zero emission may be reached, showing the need for models like the one presented in this work for the development of design criteria for covering layers.

Keywords: Zero emission. Landfill. Biogas. Cover layer. Semi-analytical solution.

## 1 INTRODUÇÃO

As preocupações levantadas pela emissão de gases de efeito estufa por ações antrópicas tem sido destacada principalmente a partir da assinatura do Protocolo de Kyoto, em 1997 (UNFCCC, [2022]). Contudo, o grande foco desse acordo internacional foi focado na redução do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Após mais de duas décadas após o protocolo de Kyoto, outro gás tem sido o objetivo de grandes discussões que é o metano ( $\text{CH}_4$ ). O  $\text{CH}_4$  é um gás com potencial de aquecimento global 25 vezes maior do que o  $\text{CO}_2$ . Dessa forma, o Global Methane Pledge foi lançado na COP26, em novembro de 2021,



para catalisar ações visando reduzir as emissões de metano (European..., 2021). O acordo possui 111 países participantes que juntos são responsáveis por 45% das emissões globais de metano causadas pelo homem. Ao aderir ao acordo, os países signatários devem reduzir coletivamente as emissões de metano em pelo menos 30% abaixo dos níveis de 2020 até 2030.

Nesse contexto, é importante mencionar os aterros sanitários que são a terceira maior fonte de emissões antropogênicas de CH<sub>4</sub> nos EUA e na China e a segunda no Brasil (IEA, 2021). Uma complexa série de reações biológicas e químicas é iniciada com o enterramento de resíduos sólidos em um aterro, resultando na produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> como os principais produtos finais da decomposição biológica (Barlaz; Chanton; Green, 2009).

A emissão de metano (CH<sub>4</sub>) em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) tem sido uma preocupação crescente devido ao seu alto potencial de aquecimento global (28 a 36 vezes maior que o CO<sub>2</sub> em 100 anos, US EPA, 2021) e sua natureza altamente explosiva (Chetri; Reddy; Grubb, 2022). Idealmente, todo CH<sub>4</sub> gerado seria capturado e usado de forma benéfica como fonte de energia. No entanto, mesmo em aterros modernos, uma parte do CH<sub>4</sub> é liberado antes da instalação dos sistemas de coleta de gás ou por não ser capturado pelo sistema de coleta (ou seja, emissões fugitivas) (Barlaz; Chanton; Green, 2009).

As camadas de cobertura são comumente executadas em aterros sanitários para minimizar as emissões de gases e a infiltração de chuva nos resíduos. Os sistemas típicos de cobertura de aterros sanitários na China geralmente consistem de uma camada protetora do solo, uma camada de drenagem, uma geomembrana (GMB), um revestimento de argila compactada (CCL) e uma camada de recuperação do biogás. A eficiência dos sistemas de coleta de gás está entre 50% e 100% em países desenvolvidos (Xie; Zhang *et al.*, 2018).

Novos sistemas de cobertura de aterros sanitários, principalmente sistemas formados por matéria orgânica, têm sido explorados extensivamente para mitigar as emissões de CH<sub>4</sub> de aterros sanitários. A oxidação de CH<sub>4</sub> devido a presença de microrganismos foi identificada como uma tecnologia econômica para gerenciar as emissões de aterros sanitários de RSU (Bogner *et al.*, 2003; Scheutz; Kjeldsen, 2011).

Solos modificados com biocarvão têm sido utilizados com objetivo de aumentar a oxidação microbiana de CH<sub>4</sub> em sistemas de cobertura de aterros sanitários (Bogner *et al.*, 2003). O biocarvão com sua alta porosidade e grande superfície específica proporciona



ambiente favorável para que as bactérias metanotróficas proliferem e prosperem no solo de cobertura, facilitando a oxidação do  $\text{CH}_4$  (Yargicoglu *et al.*, 2015). A aplicabilidade ambiental do biocarvão é regida por suas propriedades físico-químicas, como tamanho dos poros, porosidade, área superficial específica, pH, grupos funcionais, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica e composição elementar (Kumar *et al.*, 2021).

No entanto, mitigar apenas o  $\text{CH}_4$  não resolve totalmente as emissões fugitivas, pois o biogás compreende quase a mesma proporção de  $\text{CO}_2$  que o  $\text{CH}_4$  (Barlaz; Chanton; Green, 2009). Recentemente, o foco mudou para a mitigação de outros componentes do biogás, como  $\text{CO}_2$  e sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que também são emitidos de resíduos junto com  $\text{CH}_4$  em quantidades significativas o suficiente para causar danos ambientais e à saúde humana. A este respeito, um novo sistema de cobertura biogeoquímica que consiste em uma camada de solo alterada por biocarvão sobreposta por uma camada de escória de ferro (BOF = *Basic Oxygen Furnace*) é proposta para mitigar  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  simultaneamente (Chetri; Reddy; Grubb, 2019; 2020; 2022; Reddy; Grubb; Kumar, 2018; Reddy; Kumar *et al.*, 2018). No geral, a cobertura biogeoquímica fornece uma solução holística e sustentável para as emissões fugitivas de aterros sanitários (Chetri; Reddy; Grubb, 2022; Reddy; Chetri *et al.*, 2019; Reddy; Gopakumar *et al.*, 2019).

Embora muitos problemas de transporte de contaminantes, como difusão através de meios não homogêneos com limites arbitrários, possam ser resolvidos numericamente, soluções analíticas ainda são buscadas porque podem fornecer uma melhor compreensão do mecanismo de difusão de contaminantes e previsão de seus movimentos, bem como meios de verificação de modelos numéricos (Park; Zhan, 2001; Xie; Reddy *et al.*, 2015). Dessa forma, o uso de modelos analíticos também pode ser usado no projeto de aterros sanitários (Nadarajah; Rowe, 1996).

Nesse contexto, este artigo apresenta a modelagem de transporte de gases em camadas de cobertura de aterro sanitário. A modelagem utiliza um modelo semianalítico simulando uma camada de proteção (CP) com argila compactada (CCL) e outra possuindo CP, BOF e biocarvão. Os resultados mostram potencial redução de emissão de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  dependendo das propriedades dos materiais utilizados. A solução semianalítica proposta pode ser utilizada para avaliação de resultados experimentais, avaliação do sistema de cobertura em camadas do aterro e verificação de modelos numéricos.



## 2 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO

O modelo geral considerado nesta pesquisa é a equação advecção-dispersão-reação em um perfil de solo heterogêneo. Em locais como aterros sanitários e ensaios de laboratório são comuns a presença de diversos materiais como camada de proteção (CP), argila compactada (CCL), biocarvão e escória de ferro (BOF).

Os parâmetros considerados no modelo são o coeficiente de difusão  $D_{m,i}$  de cada gás  $m$  em cada camada  $i = 1, 2, \dots, n$ ; a velocidade de Darcy  $v_i$ ; a constante de ordem zero  $\gamma_{m,i}$  (oxidação do metano/carbonatação).

### 2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES E CONDIÇÕES DE CONTORNO

O transporte de contaminantes na camada  $i$  pode ser expresso usando a Equação Advecção-Dispersão-Reação:

$$R_{m,i} \frac{\partial c_{m,i}}{\partial t} = D_{m,i} \frac{\partial^2 c_{m,i}}{\partial z^2} - v_i \frac{\partial c_{m,i}}{\partial z} \pm \gamma_{m,i} \quad (1)$$

Onde  $t$  é o tempo (T),  $z$  é a direção do transporte do contaminante (L),  $D_{m,i}$  é o coeficiente de difusão molecular do gás  $m$  da camada  $i$  ( $\text{ms}^{-2}$ ),  $v_i$  é a velocidade de Darcy ( $\text{ms}^{-1}$ ), e  $\gamma_{m,i}$  é a constante de produção/consumo de ordem zero ( $\text{mol m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ),  $R_{m,i}$  é o fator de retardo.

A Lei de Henry geralmente descreve a solubilidade do gás. De acordo com Reid, Prausnitz e Poling (1987), quando a solubilidade é pequena e a velocidade do fluxo é baixa o suficiente. A Lei de Henry pode ser usada e representada por:

$$H^{m,i} = \frac{c_w^{m,i}}{c_a^{m,i}} \quad (2)$$

Onde,  $c_a^{m,i}$  é concentração molar do gás  $m$  na fase gasosa na camada  $i$  [ $\text{mol m}^{-3}$ ] e  $c_w^{m,i}$  é concentração molar do gás  $m$  na fase líquida na camada  $i$  [ $\text{mol m}^{-3}$ ], e por fim:

$$R_{m,i} = 1 + \frac{\theta_{w,i} H^{m,i}}{\theta_{a,i}} \quad (3)$$

A solução para a equação de transporte de contaminantes multicamadas depende das condições iniciais e de contorno. A condição inicial pode ser expressa como:



$$c_i(z, 0) = c_i \quad (4)$$

Onde  $c_i$  é a concentração inicial do contaminante na camada  $i$  (M L<sup>-3</sup>).

A condição de contorno em que a camada de cobertura está exposta à atmosfera é:

$$c_m(L, t) = c_{atm} \quad (5)$$

$c_{atm}$  é a concentração de cada gás (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) na atmosfera.

No transporte de contaminantes em multicamadas, é necessário considerar a continuidade entre as camadas. Assim, a concentração do contaminante e o fluxo dispersivo são considerados contínuos nas interfaces entre as camadas adjacentes:

$$c_i(1_i, t) = c_{i+1}(1_i, t) \quad (6)$$

$$\theta_i D_i \frac{\partial c_i(1_i, t)}{\partial z} = \theta_{i+1} D_{i+1} \frac{\partial c_{i+1}(1_i, t)}{\partial z} \quad (7)$$

A condição de contorno para N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, onde a camada de cobertura está em contato com o resíduo sólido é considerado como fluxo zero:

$$c_{N_2, O_2}(L, t) v_i - D_{N_2, O_2} \frac{\partial c_{N_2, O_2}(L, t)}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

A condição de contorno para CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, onde a camada de cobertura está em contato com o resíduo sólido é necessário converter a vazão afluyente para as concentrações dos gases na base da coluna. Os autores incorporaram a conversão usando o seguinte cálculo:

$$c_0^{CH_4} = \frac{J_{in} A_{col.}}{Q} \quad (9)$$

Onde,  $c_0^{CH_4}$  é a concentração molar do CH<sub>4</sub> (mol m<sup>-3</sup>);  $J_{in}$  é o fluxo de entrada do CH<sub>4</sub> ou CO<sub>2</sub> (mol m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>);  $A_{col.}$  é a área transversal da coluna (m<sup>2</sup>);  $Q$  é a vazão do biogás utilizado no ensaio (m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>).

Considerando a solução da Equação 1 para um sistema com  $i$  camadas e a solução para cada camada ( $i$ ) no espaço de Laplace é a seguinte:



$$C_1(z,s) = A_1(z,s)G_0(s) + B_1(z,s)G_1(s) + P_1(z,s), \quad i=1 \quad (10)$$

$$C_i(z,s) = A_i(z,s)G_{i-1}(s) + B_i(z,s)G_i(s) + P_i(z,s), \quad i=2, \dots, n-1 \quad (11)$$

$$C_n(z,s) = A_n(z,s)G_{n-1}(s) + B_n(z,s)G_L(s) + P_n(z,s), \quad i=n \quad (12)$$

Os termos  $G_0(s) = \mathcal{L}\{g_0(t)\}$  e  $G_L(s) = \mathcal{L}\{g_L(t)\}$  podem ser obtidos analiticamente. As funções auxiliares  $A_i$ ,  $B_i$ , and  $P_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) são descritas em Carr (2020).

Com base no balanço de massa de advecção e dispersão, o fluxo de massa ( $J$ ) de uma camada arbitrária  $i$  é (Rowe; Booker, 1984; Xie; Reddy *et al.*, 2015):

$$J = v_i c_i(z,t) - D_i \frac{\partial c_i(z,t)}{\partial z} \quad (13)$$

O fluxo de massa pode ser utilizado nos cálculos de eficiência de remoção (ER) de cada gás. Quando o fenômeno atinge um estado estacionário a ER pode ser estimada pela seguinte equação:

$$ER(\%) = \frac{J_{in} - J_{out}}{J_{in}} \times 100 \quad (14)$$

Onde,  $J_{in}$  é o fluxo afluyente de metano ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );  $J_{out}$  é o fluxo de efluente de metano em uma posição específica na camada de cobertura ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

## 2.2 OXIDAÇÃO DO METANO

A taxa de oxidação do metano ( $r_{CH_4}$ ) é significativamente afetada pelo teor de água e temperatura do solo (Abichou *et al.*, 2011; Scheutz *et al.*, 2009). Usando a teoria cinética de Michaelis-Menten, é possível estimar com as seguintes recomendações de Abichou *et al.* (2011):

$$r_{CH_4} = -f_{V,T} f_{V,m} V_{max} \frac{[CH_4]}{K_{CH_4} + [CH_4]} \times \frac{[O_2]}{K_{O_2} + [O_2]} \quad (15)$$

Onde,  $V_{max}$  é a taxa máxima de oxidação de  $CH_4$  ( $\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $f_{V,T}$  e  $f_{V,m}$  são os fatores modificadores em função da temperatura e umidade do solo, respectivamente (adimensional);  $K_{O_2}$  e  $K_{CH_4}$  são as constantes de meia saturação do  $O_2$  e  $CH_4$ , respectivamente



(adimensional); (CH<sub>4</sub>) e (O<sub>2</sub>) são as frações molares de metano e oxigênio (adimensional), respectivamente.

O fator de temperatura e umidade modificado pela oxidação do metano desenvolvido por Abichou *et al.* (2011) são:

$$f_{V,T} = \begin{cases} 0.0142T; & T < 15^{\circ}C \\ 0.112T - 1.47; & 15^{\circ}C \leq T \leq 33^{\circ}C \\ 2.235 - 0.18(T - 33); & T > 33^{\circ}C \end{cases} \quad (16)$$

$$f_{V,m} = \begin{cases} 0; & \theta_w \leq \theta_{wilt} \\ \frac{\theta_w - \theta_{wilt}}{\theta_{fc} - \theta_{wilt}}; & \theta_{wilt} < \theta_w \leq \theta_{fc} \\ 1; & \theta_{fc} < \theta_w \leq \theta_s \end{cases} \quad (17)$$

Onde,  $T$  é a temperatura do sistema ( $^{\circ}C$ ),  $\theta_{wilt}$  é o teor de umidade volumétrica da água em que a atividade microbiana para a oxidação do metano é insignificante ( $m^3 m^{-3}$ );  $\theta_{fc}$  é a capacidade de armazenamento da água, definida como o teor de umidade volumétrica da água que o solo retém água sem infiltração ( $m^3 m^{-3}$ ).

Na solução semianalítica formulada nesta pesquisa, uma taxa de oxidação do metano análoga é desenvolvida considerando:

$$r_{CH_4} = -f_{V,T} f_{V,m} \rho_{d,i} \alpha_{i,CH_4} \quad (18)$$

Onde,  $\alpha_{i,CH_4}$  ( $mol\ kg^{-1}\ s^{-1}$ ) é uma constante relacionada ao O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> para concentração molar e as constantes de meia saturação que devem ser ajustadas na condição específica (laboratório/campo) (adimensional),  $\rho_{d,i}$  é a massa específica seca ( $kg\ m^{-3}$ ).

A oxidação do metano é o processo químico que ocorre quando o metano (CH<sub>4</sub>) reage com o oxigênio (O<sub>2</sub>) para produzir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e outras substâncias, liberando energia. A estequiometria da oxidação do metano pode ser descrita como (Chetri; Reddy; Grubb, 2022):



$$r_{O_2} = r_{CH_4} \quad (20)$$

$$r_{CO_2} = -r_{CH_4} \quad (21)$$



Onde,  $r_{O_2}$  é a taxa de consumo de  $O_2$  via oxidação de  $CH_4$  ( $\text{mol kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) e  $r_{CO_2}$  é a taxa de produção de  $CO_2$  via oxidação de  $CH_4$  ( $\text{mol kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ).

### 2.3 CARBONATAÇÃO

O mecanismo fundamental por trás da reação de carbonatação da escória de ferro (alto forno e aciaria) é permitir a reação entre cátions ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) na presença de umidade e  $CO_2$  para formar carbonatos. A carbonatação da escória pode ocorrer em estado úmido ou aquoso. A carbonatação aquosa é mais rápida e resulta em maior grau de carbonatação do que a carbonatação seca. A reação de carbonatação aquosa na escória de ferro envolve: (1) a lixiviação de metal mineral alcalino da matriz de escória (predominantemente cálcio); (2) absorção de  $CO_2$  gasoso em fase aquosa seguida de conversão de ácido carbônico em íons carbonato; e, (3) precipitação subsequente de carbonatos estáveis (Chetri; Reddy; Grubb, 2019; Pan *et al.*, 2016), conforme:



A taxa de carbonatação será considerada como:

$$r_{CO_2} = -\alpha_{cb}$$

Onde,  $\alpha_{cb}$  é a taxa de carbonatação do dióxido de carbono ( $\text{mol m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ ).

## 3 MATERIAIS

Os materiais utilizados nessa pesquisa foram retirados de dados de ensaios de laboratório realizados por Chetri; Reddy; Grubb (2022) e dos utilizados por Xie, Zhang *et al.* (2018). Na Tabela 1 encontram-se todas as propriedades dos materiais utilizados nas simulações.



Tabela 1 – Parâmetros dos materiais utilizados nas simulações

Solo	Camada de Proteção <sup>[1]</sup>	Argila Compactada <sup>2</sup> <sub>1</sub>	Biocarvão	Escória de Ferro (BOF) <sup>[2]</sup>
Gravidade Específica	2,71	2,68	0,65	3,34
Matéria Orgânica [%]		5,80	96,71	1,94
Pedregulho	-	3,7	45	0
Areia	2,2	14,4	54	86,4
Finos	97,8	81,9	1	13,6
Limite de Liquidez (LL)	36,7	22	-	-
Limite de Plasticidade (LP)	22	17	-	-
Índice de Plasticidade (IP)	14,7	5	-	-
Classificação (Sistema Unificado de Classificação de Solos – SUCS)		CL	SP	SM
$k_s$ [m/s]	1,00e-08	5×10e-10	4×10e-5	3×10e-5
Umidade	0,193	0,16	0,15	0,1
Massa Específica Seca [g/cm <sup>3</sup> ]	1,5	1,3	1,35	1,72
Porosidade	0,465	0,56	0,5	0,52
Teor de Umidade Volumétrica Inicial [θ <sub>i</sub> ]	0,280	0,18	0,05	0,16
δ [Kpa <sup>-1</sup> ] <sup>[3]</sup>	0,0032	0,0212	0,0265	0,0327

<sup>[1]</sup> Xie, Zhang *et al.*, 2018; <sup>[2]</sup> Chetri; Reddy; Grubb, 2022;

<sup>[3]</sup> SWRC AI (Modelo de Cavalcante e Zornberg, 2017).

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Na Tabela 2, tem-se as camadas de coberturas de quatro casos discutidos nessa pesquisa. Dois casos serão relacionados a um sistema composto de camada de proteção (CP) e argila compactada (CCL). Outros dois casos serão relacionados a um sistema de três camadas composto por uma camada de proteção (CP), escória de ferro (BOF) e biocarvão.

Tabela 2 – Casos e espessuras de materiais simulados

Camada	Casos 1 e 2	Casos 3 e 4
Layer 1	CP (10 cm)	CP (10 cm)
Layer 2	CCL (50 cm)	BOF (20 cm)
Layer 3	-	Biocarvão (20 cm)

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

As condições iniciais das concentrações dos gases (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>) são as encontradas na atmosfera. Assim, sua concentração na atmosfera são  $c_{in}^{CH_4} = 0 \text{ mol m}^{-3}$ ,  $c_{in}^{CO_2} = 0,011 \text{ mol m}^{-3}$ ,  $c_{in}^{O_2} = 9,33 \text{ mol m}^{-3}$  e  $c_0^{N_2} = 31,72 \text{ mol m}^{-3}$  (NG *et al.*, 2015).

As constantes de Henry para CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> foram  $3,16 \times 10^{-2}$ ,  $8,145 \times 10^{-1}$ ,  $1,59 \times 10^{-2}$  e  $3,18 \times 10^{-2}$ , respectivamente (NG *et al.*, 2015). Os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> foram  $13,4 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ , a área da coluna transversal  $1,56 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  e vazão do ensaio de  $7 \text{ mL min}^{-1}$  (De Visscher *et al.*, 1999).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os casos 1 e 2 consistiram de uma camada de proteção e argila compactada. Esse tipo de sistema é comumente encontrado em aterros sanitários do Brasil e ao redor do mundo. Os casos 3 e 4 simularam o sistema de camada biogeoquímica contendo uma camada de proteção, escória de ferro e biocarvão. Na Tabela 3 constam todos os parâmetros de transporte para cada gás. A escolha dos parâmetros foi baseada em pesquisas realizadas utilizando modelagens e ensaios de laboratório (Bian; Xin; Chai, 2018; Feng *et al.*, 2017; Ng; Feng; Liu, 2015).



Tabela 3 – Parâmetros utilizados nas modelagens para cada tipo de material

Caso	Layer	$D_{CH_4}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$D_{CO_2}$ [m/s <sup>2</sup> ]
1 e 2	Camada de Proteção (CP)	$8,3 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$
	Argila Compactada (CCL)	$6,3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
3 e 4	Camada de Proteção (CP)	$7,7 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-6}$
	Escória de Ferro (BOF)	$6,1 \times 10^{-6}$	$9,8 \times 10^{-6}$
	Biocarvão	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$

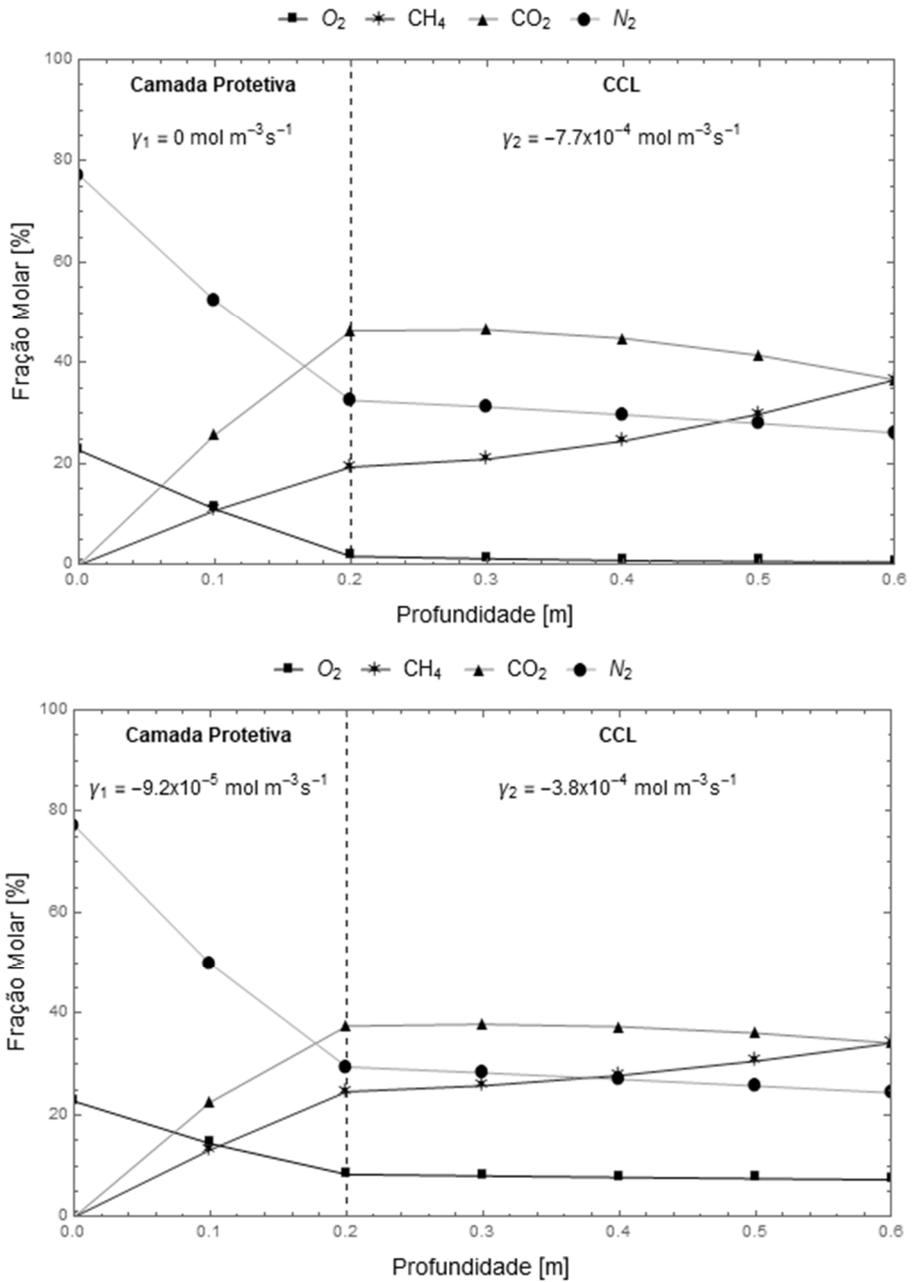
Caso	Layer	$D_{O_2}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$D_{N_2}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$v_g$ [m/s]
1 e 2	Camada de Proteção (CP)	$1,5 \times 10^{-5}$	$8,3 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-9}$
	Argila Compactada (CCL)	$1 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-7}$
3 e 4	Camada de Proteção (CP)	$1,4 \times 10^{-5}$	$7,8 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-9}$
	Escória de Ferro (BOF)	$1 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-6}$	$7,6 \times 10^{-7}$
	Biocarvão	$2,5 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6}$

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

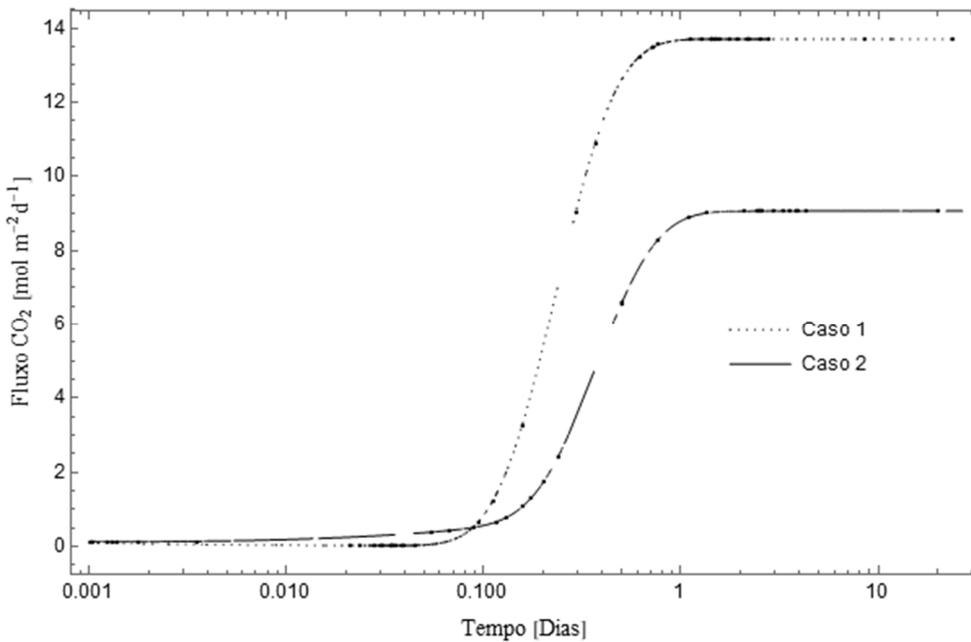
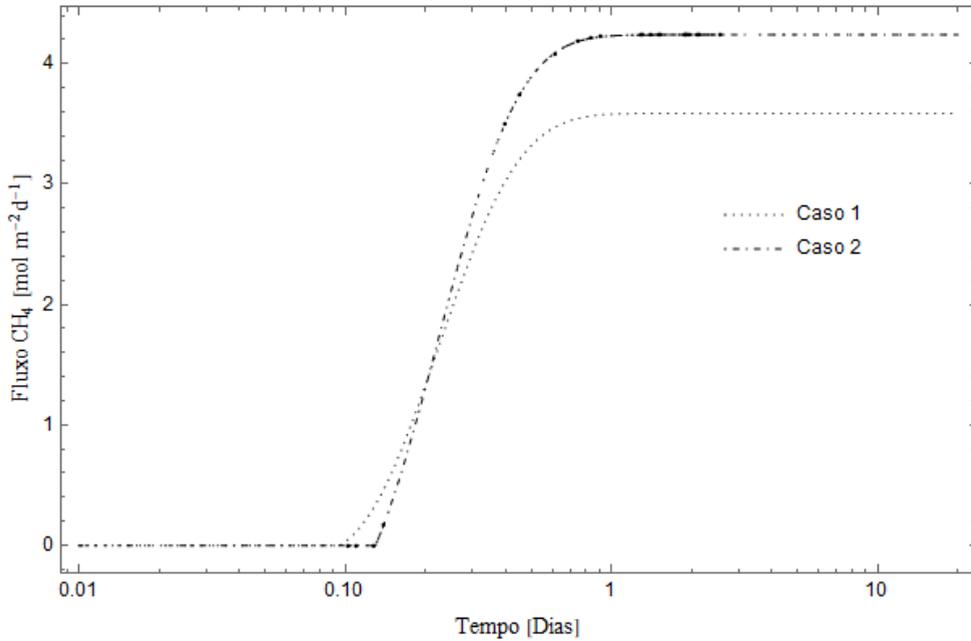
Nas Figuras 1.a e 1.b têm-se as frações molares dos respectivos gases ao longo da camada de cobertura para os casos 1 e 2 para trinta dias de simulação.

Nas Figuras 2.a e 2.b têm-se os fluxos das mesmas simulações. No caso 1, tem-se que a camada com maior espessura (CCL) tem um maior valor de taxa de oxidação do metano (Equação 18) se comparado com o caso 2.

Figuras 1.a e 1.b – Fração molar ao longo da profundidade para os casos 1 (a) e 2 (b)



Fonte: Elaboradas pelos autores (2022).

Figuras 2.a e 2.b – Fluxo de CH<sub>4</sub> (a) e CO<sub>2</sub> (b) para os casos 1 e 2

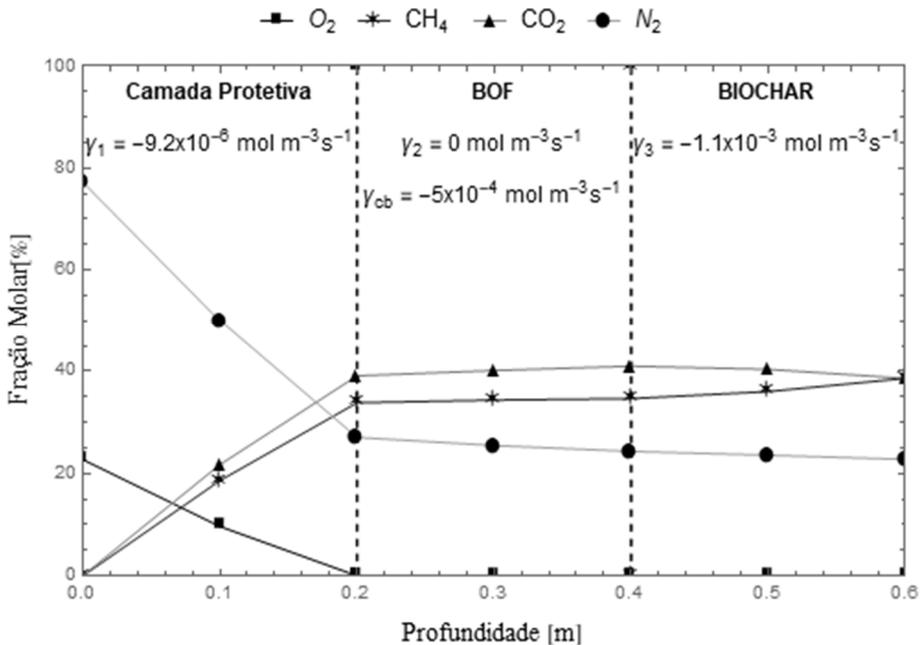
Fonte: Elaboradas pelos autores (2022).

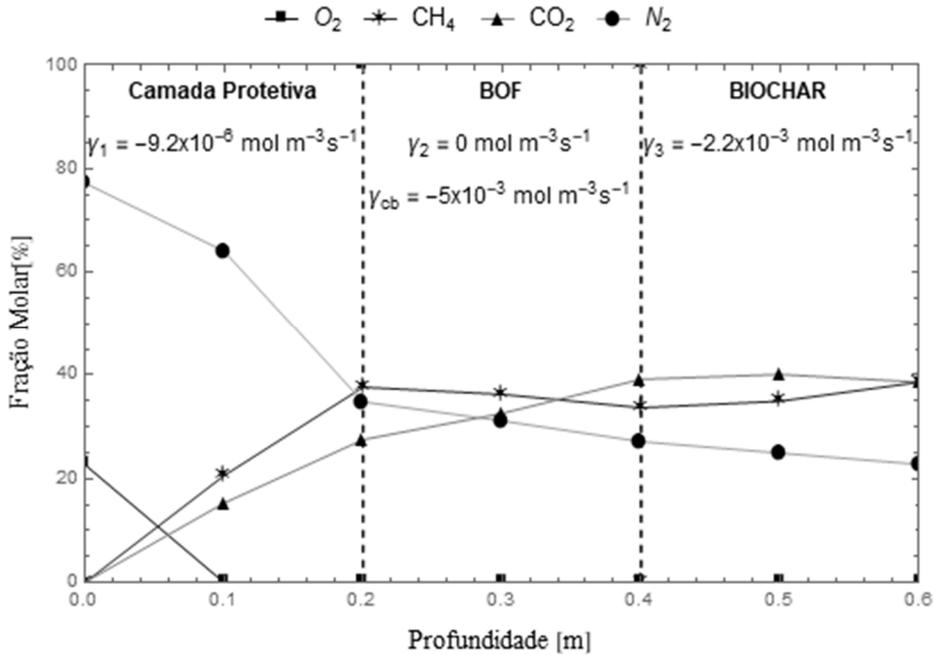


Assim, conclui-se que apesar de ser mais vantajoso ter maiores  $\gamma_{CH_4}$ , conseqüentemente, tem-se maiores liberações  $CO_2$  para a atmosfera. A eficiência de remoção do metano ( $ER_{CH_4}$ ) e dióxido de carbono ( $ER_{CO_2}$ ) foram de 73,2% e -2,3% para o caso 1, respectivamente. O valor negativo deve-se a fluxo maior do que ao presente no biogás. A eficiência de remoção do metano ( $ER_{CH_4}$ ) e dióxido de carbono ( $ER_{CO_2}$ ) foram de 68,4% e 2,6% para o caso 2, respectivamente. Maiores valores de  $\gamma_{CH_4}$  estão relacionadas a maiores percentuais de matérias orgânica no solo, umidade adequadas para as bactérias metanotróficas e pH. Portanto, focar somente na capacidade hidráulica do solo (condutividade hidráulica saturada) e grau de compactação pode não ser a melhor forma de otimizar a oxidação do metano.

Importante destacar, também, que a depender da  $\gamma_{CH_4}$  a disponibilidade de oxigênio ao longo da camada de cobertura tem grande alteração. Comparando-se o caso 1 e 2, é possível notar que a partir de 0.2m o oxigênio torna-se indisponível (caso 1), contudo, para o caso 2 o oxigênio está presente mesmo em profundidades maiores.

Figuras 3.a e 3.b – Fração molar ao longo da profundidade para os casos 3 (a) e 4(b)



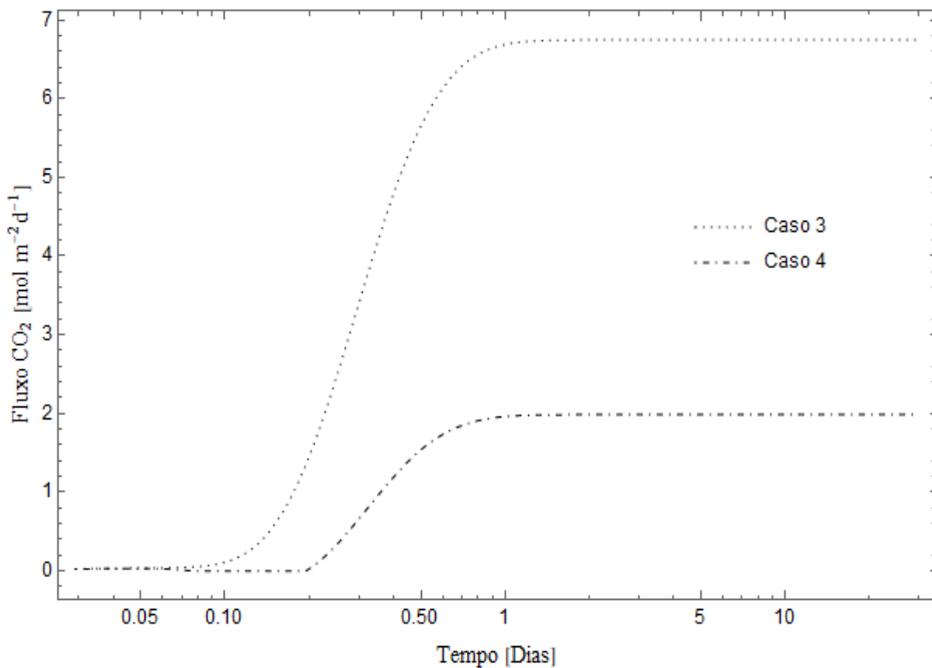
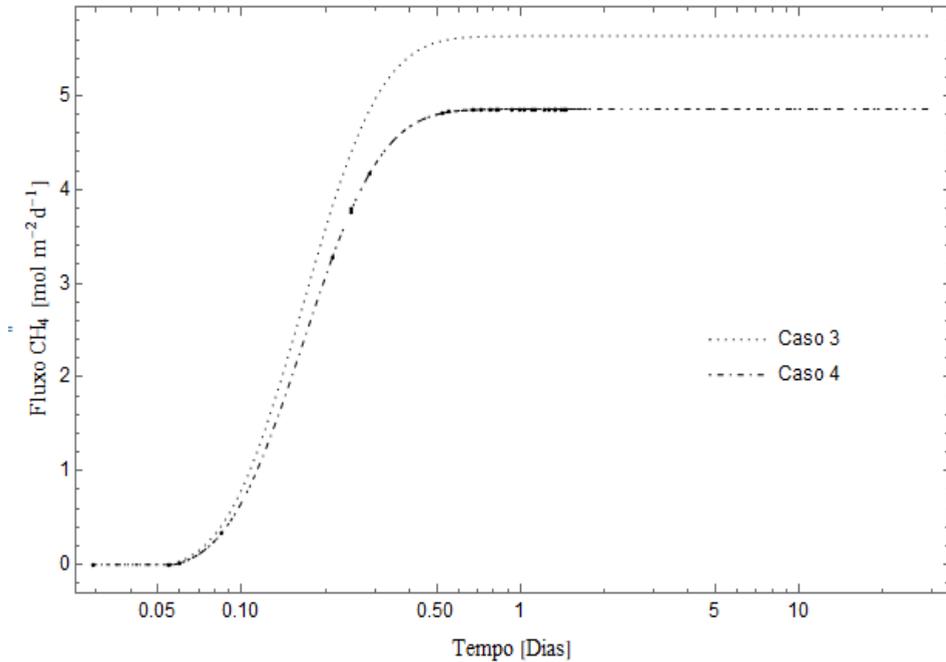


Fonte: Elaboradas pelos autores (2022).

Nas Figuras 3.a e 3.b tem-se a fração molar para os casos 3 e 4. Entre as maiores diferenças para os casos 1 e 2, pode-se citar uma maior  $\gamma_{\text{CH}_4}$  do biocarvão comparado a qualquer outro material. Além disso, a depender da capacidade de carbonatação da escória de ferro a eliminação do CO<sub>2</sub> a fração molar dele pode ser reduzida de tal forma como mostrado para o caso 4.

Nas Figuras 4.a e 4.b, têm-se os fluxos de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> para os casos 3 e 4. A eficiência de remoção do metano ( $ER_{\text{CH}_4}$ ) e dióxido de carbono ( $ER_{\text{CO}_2}$ ) foram de 57,9% e 20,6% para o caso 3, respectivamente. A eficiência de remoção do metano ( $ER_{\text{CH}_4}$ ) e dióxido de carbono ( $ER_{\text{CO}_2}$ ) foram de 63,7% e 56,3% para o caso 4, respectivamente.

Figuras 4.a e 4.b – Fluxo de CH<sub>4</sub> (a) e CO<sub>2</sub> (b) para os casos 3 e 4



Fonte: Elaboradas pelos autores (2022).



Dessa forma, é possível notar que as vantagens de se utilizar o sistema biogeoquímico estão na grande capacidade de remover  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  simultaneamente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dois sistemas de camadas de cobertura foram modelados na qual um é a forma largamente utilizada no mundo (camada de proteção e argila compactada) e outra utilizando o sistema biogeoquímico. A adição de camada de escória de ferro (BOF) acima do biocarvão reduziu significativamente as emissões fugitivas de  $\text{CO}_2$  além de  $\text{CH}_4$ .

As coberturas foram analisadas simulando biogás contendo mistura de 50%  $\text{CH}_4$  e 50%  $\text{CO}_2$  e fluxo de entrada de  $13.4 \text{ mol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Comparando-se os dois sistemas (tradicional e biogeoquímica) pode-se concluir que o tradicional tem grande efetividade na remoção de metano, mas falha ao conter emissões de  $\text{CO}_2$ .

A escória de ferro é largamente utilizada na indústria da construção civil, contudo possuem limitação devido ao seu maior teor de ferro e óxido de cálcio. No entanto, essa pesquisa evidencia o alto potencial para aplicações ambientais devido à sua característica única. Além disso, o uso da escória de ferro em locais como aterros sanitários pode-se diminuir o impacto causado pela exposição deste resíduo ao meio ambiente.

Por fim, o modelo proposto evidenciou a importância do desenvolvimento de uma solução semianálítica para otimização de critérios de projetos de camada de cobertura. Assim, a solução proposta permite que análises paramétricas sejam realizadas e comparações entre os métodos numéricos existentes.

## REFERÊNCIAS

- ABICHOU, Tarek; MAHIEU, Koenraad; CHANTON, Jeff; ROMDHANE, Mehrez; MANSOURI, Imane. Scaling methane oxidation: From laboratory incubation experiments to landfill cover field conditions. **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 978-986, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.12.002>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21196106/>. Acesso em: 30 ago. 2022.
- BARLAZ, Morton A.; CHANTON, Jeff P.; GREEN, Roger B. Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 59, n. 12, p. 1399-1404, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1399>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3155/1047-3289.59.12.1399>. Acesso em: 30 ago. 2022.
- BIAN, Rongxing; XIN, Danhui; CHAI, Xiaoli. A Simulation model for estimating methane oxidation and emission from landfill cover soils. **Waste Management**, v. 77, p. 426-434. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.029>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18302526>. Acesso em: 30 ago. 2022.

BOGNER, Jean; CHANTON, Jeffrey; BLAKE, Donald; MORCET, Muriel; KJELDTSEN, Peter. Comparative oxidation and net emissions of methane and selected non-methane organic compounds in landfill cover soils. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 22, p. 5150-5158, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/es034016b>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es034016b>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CARR, Elliot J. New Semi-Analytical Solutions for Advection–Dispersion Equations in Multilayer Porous Media. **Transport Porous Medium**, v. 135, p. 39-58, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-020-01468-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11242-020-01468-z>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CAVALCANTE, Andre Luis Brasil; ZORNBERG, Jorge Gabriel. Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. **International Journal Geomechanics**, v. 17, n. 7, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000875](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000875). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0000875>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CHETRI, Jyoti K.; REDDY, Krishna R.; GRUBB, Dennis G. Carbon-Dioxide and Hydrogen-Sulfide removal from simulated landfill gas using steel slag. **Journal of Environmental Engineering**, v. 146, n. 12, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001826](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001826). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001826>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CHETRI, Jyoti K.; REDDY, Krishna R.; GRUBB, Dennis G. Innovative Biogeochemical Cover to Mitigate Landfill Gas Emissions: Investigation of Controlling Parameters Based on Batch and Column Experiments. **Environmental Processes**, v. 6, p. 935-949, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00390-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40710-019-00390-x>. Acesso em: 30 ago. 2022.

CHETRI, Jyoti K.; REDDY, Krishna R.; GRUBB, Dennis G. Investigation of different biogeochemical cover configurations for mitigation of landfill gas emissions: laboratory column experiments. **Acta Geotechnica**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-022-01509-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-022-01509-5>. Acesso em: 30 ago. 2022.

DE VISSCHER, Alex; THOMAS, Dirk; BOECKX, Pascal; VAN CLEEMPUT, Oswald. Methane oxidation in simulated landfill cover soil environments. **Environmental Science and Technology**, v. 33, n. 11, p. 1854-1859, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1021/es9900961>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es9900961>. Acesso em: 30 ago. 2022.

FENG, Song; NG, Charles; LEUNG, Anthony; LIU, Hongwei. W. Numerical modelling of methane oxidation efficiency and coupled water-gas-heat reactive transfer in a sloping landfill cover. **Waste Management**, v. 68, p. 355-368, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17302994>. Acesso em: 30 ago. 2022.

GLOBAL METHANE PLEDGE. **About the Global Methane Pledge**. 2022. Disponível em: <https://www.globalmethanepledge.org/#about>. Acesso em: 30 ago. 2022.

EUROPEAN COMMISSION / UNITED STATES OF AMERICA. **Global Methane Pledge**. Nairobi, Kenya: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) / Climate & Clean Air Coalition (CCAC), 2021. Disponível em: <https://www.ccacoalition.org/en/resources/global-methane-pledge>. Acesso em: 30 ago. 2022.



IEA – International Energy Agency. **Top twelve emitters of methane with breakdown by sector**. France: International Energy Agency, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/top-twelve-emitters-of-methane-with-breakdown-by-sector-2021>. Acesso em: 25 maio 2022.

KUMAR, Manish; DUTTA, Shanta; YOU, Siming; LUO, Gang; ZHANG, Shicheng; SHOW, Pau Loke; SAWARKAR, Ankush D.; SINGH, Lal; TSANG, Daniel C. W. A critical review on biochar for enhancing biogas production from anaerobic digestion of food waste and sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127143>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621013627?via%3Dihub>. Acesso em: 30 ago. 2022.

NADARAJAH, Preba; ROWE, Kerry. A simplified multi-layered flow model for use in landfill design. **Computers and Geotechnics**, v. 18, n. 4, p. 245-266, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0266-352X\(95\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0266-352X(95)00032-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0266352X95000326>. Acesso em: 30 ago. 2022.

NG, Charles W. W.; FENG, Soang; LIU, Hongwei W. A fully coupled model for water-gas-heat reactive transport with methane oxidation in landfill covers. **Science of the Total Environment**, v. 508, p. 307-319, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.037>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969714016192>. Acesso em: 30 ago. 2022.

PAN, Shu-Yuan; ADHIKARI, Rahul; CHEN, Yi-Hung; LI, Ping; CHIANG, Pen-Chi. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO<sub>2</sub> fixation via accelerated carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 617-631, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.112>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616310083>. Acesso em: 30 ago. 2022.

PARK, Eungyu; ZHAN, Hongbin. Analytical solutions of contaminant transport from finite one-, two-, and three-dimensional sources in a finite-thickness aquifer. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 53, n. 1-2, p. 41-61, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(01\)00136-X](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(01)00136-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016977220100136X>. Acesso em: 30 ago. 2022.

REDDY, Krishna R.; CHETRI, Jyoti K.; KUMAR, Girish; GRUBB, Dennis G. Effect of basic oxygen furnace slag type on carbon dioxide sequestration from landfill gas emissions. **Waste Management**, v. 85, p. 425-436, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09596526190133>. Acesso em: 30 ago. 2022.

REDDY, Krishna R.; GOPAKUMAR, Archana; RAI, Raksha K.; KUMAR, Girish; CHETRI, Jyoti K.; GRUBB, Dennis G. Effect of basic oxygen furnace slag particle size on sequestration of carbon dioxide from landfill gas. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 37, n. 5, p. 469-477, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0734242X18823948>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X18823948>. Acesso em: 30 ago. 2022.

REDDY, Krishna R.; GRUBB, Dennis G; KUMAR, Girish. Innovative biogeochemical soil cover to mitigate landfill gas emissions. In: **Protection and restoration of the environment XIV (PREXIV)**, Greece, 3-6 Julho 2018. Disponível em: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10063895>. Acesso em: 30 ago. 2022.

REDDY, Krishna R.; KUMAR, Girish; GOPAKUMAR, Archana, GRUBB Dennis G. CO<sub>2</sub> sequestration using BOF slag: application in landfill cover. In: **Protection and**



**restoration of the environment XIV (PREXIV)**, Greece, 3-6 Julho 2018. Disponível em: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10063896>. Acesso em: 30 ago. 2022.

REID, Robert C.; PRAUSNITZ, John M.; POLING, Bruce E. **The Properties of Gases and Liquids**. 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1987.

ROWE, R. Kerry; BOOKER, John R. The analysis of pollutant migration in a non homogeneous soil. **Geotechnique**, v. 34, n. 4, p. 601-612, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.4.601>. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1984.34.4.601>. Acesso em: 30 ago. 2022.

SCHEUTZ, Charlotte; KJELDSSEN, Peter. Landfill top covers. **Solid Waste Technology and Management 1 & 2**, Wiley, p. 830-840, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470666883.ch52>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470666883.ch52>. Acesso em: 30 ago. 2022.

SCHEUTZ, Charlotte; KJELDSSEN, Peter; BOGNER, Jean E.; DE VISSCHER, Alex; GEBERT, Julia; HILGER, Helene A.; HUBER-HUMER, Marion; SPOKAS, Kurt. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management & Research**, v. 27, n. 5, p. 409-455, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X09339325>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X09339325>. Acesso em: 30 ago. 2022.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **Protocolo de Kyoto**. 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings#:2cf7f3b8-5c04-4d8a-95e2-f91ee4e4e85d>. Acesso em: 30 ago. 2022.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. **What is the Kyoto Protocol?** [2022]. Disponível em: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/kyoto_protocol). Acesso em: 30 ago. 2022.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. **Basic information about landfill gas**. Landfill methane outreach program (LMOP). Washington, DC, USA: United States environmental protection agency, 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>. Acesso em: 30 ago. 2022.

XIE, Haijian; ZHANG, Chunhua; SEDIGHI, Majid; THOMAS, Hywel R.; CHEN, Yunmin. An analytical model for diffusion of chemicals under thermal effects in semi-infinite porous media. **Computers and Geotechnics**, v. 69, p. 329-337, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.06.012>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X15001408>. Acesso em: 30 ago. 2022.

XIE, Tao; REDDY, Krishna; WANG, Chengwen; YARGICOGLU, Erin; SPOKAS, Kurt. Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 9, p. 939-969, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2014.924180>. Acesso em: 30 ago. 2022.

YARGICOGLU, Erin N.; SADASIVAM, Bala Yamini; REDDY, Krishna R.; SPOKAS, Kurt. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochar. **Waste Management**, v. 36, n. 2, p. 256-268, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X14005133>. Acesso em: 30 ago. 2022.





**AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE  
OPERACIONAL DE ATERROS SANITÁRIOS DA  
REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO**

***ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL SUSTAINABILITY  
OF SANITARY LANDFILLS IN  
THE METROPOLITAN REGION OF RIO DE JANEIRO***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

CUNHA, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da; OLIVEIRA, Marlus Newton Passos Bento Vianna de; SOARES, Ricardo. Avaliação da sustentabilidade operacional de aterros sanitários da região metropolitana do Rio de Janeiro. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

**Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da Cunha**

Engenheiro civil. Graduado pela Universidade Veiga de Almeida (UVA). Pós-Graduado em Gestão de Empresas de Petróleo e Gás pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doutor em Engenharia Ambiental pela UERJ. Coordenador e professor do Núcleo de Sustentabilidade da Pós-Graduação da UVA. E-mail: carlos.pinheiro@uva.br

**Marlus Newton Passos Bento Vianna de Oliveira**

Advogado. Graduado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Pós-Graduado em Recuperação Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela PUC-Rio e Technische Universität Braunschweig (TUBS). Doutorando em Geociências Universidade Federal Fluminense (UFF). German Chancellor Fellow. Advogado da prática de Direito Ambiental do escritório BMA Advogados. E-mail: marlus@bmalaw.com.br

**Ricardo Soares**

Químico Industrial pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Licenciado em Química pela Universidade Salgado de Oliveira (Universo). Especialista em Filosofia e História da Ciência pela Faculdade Unyleya. Mestre em Geociências (Geoquímica Ambiental) pela UFF. Doutor em Geociências (Geoquímica Ambiental) pela UFF. Pós-Doutor em Geociências (Geoquímica Ambiental) pela UFF. Químico Industrial do Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Professor do Mestrado Profissional em Ciências do Meio Ambiente da Universidade Veiga de Almeida (UVA).

E-mail: ricardo.soares@uva.br



## RESUMO

Em 2022, foi lançado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) que reforça o complexo desafio que é o encerramento total de vazadouros no Brasil e a necessidade da expansão dos aterros sanitários ambientalmente adequados. Apesar dos benefícios do encerramento de lixões, a expansão de novas áreas de disposição final é um subproduto do cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos, reforçada pelo PLANARES. Ainda que construídos dentro dos mais rigorosos padrões normativos, os novos aterros sanitários geram pressões ambientais, sociais e econômicas, representando novos riscos a serem gerenciados, em especial, pelo Poder Público. Para mitigar estes riscos, é necessária a avaliação constante do desempenho operacional dos aterros. O Índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitários (ISOAS) proposto por Cunha, almeja verificar a condição de sustentabilidade dos aterros, bem como identificar os pontos críticos de gestão e mapear fragilidades regionais na gestão, avaliando indicadores técnico-ambientais, econômicos e sociais. A partir da pesquisa de Cunha, almeja-se analisar a proposta metodológica do ISOAS e verificar a condição de sustentabilidade de dois aterros sanitários, o Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Nova Iguaçu e o CTR de São Gonçalo, ambos no Estado do Rio de Janeiro. Constatou-se que, através do uso da ferramenta, é possível identificar: problemas crônicos e agudos da operação; fatores limitantes do nível de sustentabilidade; e percepções ambientais de grupos sociais. Os resultados da aplicação do ISOAS demonstram que ambos os aterros tiveram um bom desempenho técnico-ambiental com quatro estrelas obtidas. O aterro sanitário com o melhor desempenho econômico foi o CTR São Gonçalo, com três estrelas; o melhor desempenho socioambiental foi o do CTR Nova Iguaçu, também com três estrelas; ambos os aterros obtiveram o mesmo desempenho geral, com três estrelas.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Avaliação de desempenho ambiental. Gestão de resíduos. Operação de aterros sanitários.

## ABSTRACT

In 2022, the National Solid Waste Plan (PLANARES) was issued, which highlights the complex challenge that is the total closure of dumpsites in Brazil and the need for the expansion of environmentally sound sanitary landfills. Despite the benefits of closing down dumpsites, the expansion of new final disposal areas has been a consequence of complying with the National Solid Waste Policy Act and is now further reinforced by PLANARES. Even if built within the strictest regulatory standards, the new landfills generate environmental, social and economic stresses, representing new risks to be managed, especially by the public authorities. To mitigate these risks, it is necessary to constantly evaluate the operational performance of landfills. The Index of Landfill Operational Sustainability (ISOAS) proposed by Cunha, aims to verify the sustainability condition of landfills, as well as to identify critical points of management and map regional weaknesses in management, evaluating technical-environmental, economic, and social indicators. Based on Cunha's research, the goal is to analyze the ISOAS methodological proposal and verify the sustainability condition of two landfills, the Nova Iguaçu Waste Treatment



Center and the São Gonçalo Waste Treatment Center, both located in the state of Rio de Janeiro. It was found that through the use of the tool it is possible to identify chronic and acute problems in the operation; identify limiting factors of the sustainability level and identify environmental views of social groups, among other actions. The results of the ISOAS application show that both landfills had a good technical-environmental performance with four stars obtained. The landfill with the best economic performance was the CTR São Gonçalo, with three stars; the best socio-environmental performance was the CTR Nova Iguaçu, also with three stars; both landfills obtained the same overall performance, with three stars.

Keywords: Sustainability. Environmental Performance Assessment. Waste Management. Sanitary Landfill Operation.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente população mundial gera, aproximadamente, dois bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) anualmente. Esse quantitativo representa uma média diária de, aproximadamente, cinco milhões de toneladas de RSU que devem ser adequadamente gerenciadas, a fim de evitar significativos impactos ambientais negativos, devido ao descarte inapropriado de RSU no meio ambiente (UN-Habitat, 2018). A taxa de geração de RSU é diretamente proporcional ao aumento populacional e afluência econômica, o que reflete na necessidade de aquisição constante de espaço físico para a disposição final, assim como a mitigação dos impactos negativos (ambientais, sociais, econômicos). Logo, é necessária a realização de um planejamento preciso, com a tomada de ações que considerem a execução, o monitoramento e o controle que assegurem um correto gerenciamento de RSU, como uma estratégia de longo prazo eficaz e sustentável a serem adotadas por governos e empresas conscientes da necessidade do desenvolvimento e aprimoramento constante de práticas sustentáveis.

Segundo Cunha (2022), pode-se considerar o gerenciamento como o ato de planejar, executar, monitorar, controlar e agir em prol de um objetivo, meta e/ou estratégia definida no respectivo âmbito de interesse. Por outro lado, a gestão deve focar em ações de otimização de processos, com análise crítica de múltiplos cenários, decisões éticas e racionais, baseadas em informações derivadas do gerenciamento, almejando o alcance de um objetivo, meta ou estratégia, além da satisfação das principais partes interessadas.

O gerenciamento de resíduos sólidos é o conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente pelo gerador, contendo minimamente, o planejamento, a execução, o monitoramento e o controle de ações em diferentes etapas:



- ♦ Armazenamento temporário;
- ♦ Coleta e transporte;
- ♦ Transbordo (se necessário);
- ♦ Destinação Final (tratamento e valorização); e,
- ♦ Disposição final ambientalmente adequada do Rejeito.

Por sua vez, a gestão de resíduos pode ser entendida como um conjunto de ações voltadas para a busca de soluções e adoção de processos decisórios assertivos no gerenciamento dos resíduos sólidos, que considere, minimamente, as dimensões política, econômica, ambiental, cultural, social, legal e técnica. Logo, o gerenciamento e a gestão dos resíduos representam um conjunto ordenado de técnicas, ferramentas, processos e ações complexas que visam garantir a sustentabilidade das atividades.

Considerando todo o exposto anteriormente, entende-se que a elaboração de estratégias e ferramentas de gestão que assegurem uma destinação final ambientalmente adequada de RSU figura como uma importante tomada de decisão para mudanças significativas no paradigma ambiental global vigente. Esse tema deve se constituir em pauta prioritária para empresas, governos e sociedade que almejam contribuir para a mudança de *status* da disposição e para o desenvolvimento de uma economia circular e sustentável, que ressignifique os resíduos e conseqüentemente a lógica de produção e consumo baseada em descarte (Cunha; Ritter; Ferreira, 2020).

## 1.1 CENÁRIO NACIONAL

Em outubro de 2010, foi sancionada a Lei Federal nº 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil. A partir dela, as diversas esferas governamentais (federal, estadual e municipal) deram início a um processo inédito de articulação política, técnica e legal a fim de reverter o obsoleto cenário da gestão de RSU no país, até então, marcado pela disposição final inadequada em vazadouros (Cunha, 2019). Apesar dos múltiplos esforços empreendidos ainda há vazadouros operando sem qualquer controle ambiental, causando contaminação do solo, das águas subterrâneas/superficiais e propiciando a proliferação de vetores e doenças. Esta cultura de omissão política e desprezo de técnicas de engenharia, reflete um descaso dos anseios da população por um ambiente equilibrado ecologicamente (Cunha; Ritter; Ferreira, 2020). Conseqüentemente, foi promulgado em 13 abril de 2022, pelo Decreto nº 11.043, o Plano Nacional de Resíduos (PLANARES) que possui, entre outros objetivos, a missão de eliminar os lixões atualmente ativos (PLANARES, 2022).



Segundo o Panorama 2019 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2020); 59,5% das 72 milhões de toneladas do RSU coletados no Brasil foram dispostos em Aterros Sanitários (AS). Embora haja um inegável avanço na disposição final dos resíduos no país após a implementação da PNRS, observa-se que este avanço é desigual e concentrado nas regiões metropolitanas e municípios de maior porte e consequentemente de maior capacidade de investimento (PLANARES, 2022). Além da óbvia necessidade de universalização dos AS no país, é de fundamental importância que a qualidade dos que estão em operação seja assegurada, para que os efeitos ambientais e na saúde pública sejam assegurados.

Segundo os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento de 2020, 73,8% (48,16 milhões toneladas/ano) dos RSU gerados foram dispostos em aterros sanitários; 11,6% (7,58 milhões toneladas/ano) em aterros controlados e 14,6% (9,55 milhões toneladas/ano) em vazadouros (SNIS, 2022, p. 44). Embora os resultados apresentados por essas importantes fontes não convirjam, denotando mais uma lacuna do conhecimento do setor, servem ao menos para gerar uma dimensão aproximada do problema (Cunha, 2019). Finalmente, deve ser considerado também a emblemática falta de informação técnica qualificada sobre a efetiva qualidade operacional dos AS que recebem cerca de 119 mil toneladas diariamente.

## **1.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS, AMBIENTAIS E NORMATIVAS DOS ATERROS SANITÁRIOS**

Os AS são estruturas de engenharia civil desenvolvidas para a disposição e/ou recebimento de RSU, projetados e operados para minimizar os impactos ao meio ambiente de maneira geral e à saúde pública em particular. De acordo com a NBR 8419:1992, o aterro sanitário de RSU é uma:

[...] técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT NBR 8419:1992, p. 3).

Essa tecnologia é indispensável em qualquer sistema de gestão de resíduos municipais, mesmo após o uso de outras tecnologias de tratamento, como incineração, compostagem e reciclagem. No Brasil,



a utilização de AS como tecnologia de destinação final de RSU vem se expandindo aceleradamente nos últimos anos, em especial devido ao necessário enquadramento das municipalidades aos preceitos legais impostos pela PNRS. Ademais, vale destacar que de acordo com as Resoluções nº 01/86 e nº 237/1997 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), em função dos impactos ambientais deletérios associados, as atividades de localização, implantação, operação e encerramento dos AS são passíveis de prévio licenciamento ambiental em três etapas.

De acordo com Sisino e Oliveira (2006), os AS causam impactos ambientais significativos nos diversos compartimentos: ar, água e solo, conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Potenciais impactos e consequências ambientais dos aterros sanitários

<b>Impacto</b>	<b>Consequência</b>
Poluição do solo	Causa alterações das características físicas, químicas e biológicas do solo. Muitos materiais possuem substâncias altamente poluidoras/tóxicas, por exemplo: metais (chumbo, mercúrio, zinco etc.), pesticidas, e ainda a presença de cloretos e nitrogênio amoniacal.
Poluição das águas	O lixiviado oriundo de aterros sanitários oferece risco de contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Caso a população ao redor utilize poços de captação para abastecimento, essa água pode estar contaminada.
Poluição do ar	A geração de gases, como o metano (CH <sub>4</sub> ), advindos da decomposição da matéria orgânica, contribui para o efeito estufa. Esses gases são liberados na atmosfera e podem ocasionar explosões, pondo em risco as pessoas que vivem ao redor dos aterros sanitários. O material particulado vindo da cobertura diária dos resíduos, ou da degradação dos próprios resíduos e, bem como a escavação de solo para material de cobertura e a compactação do solo caso as vias de acesso de caminhões e máquinas não estejam pavimentadas, também contribuirão para a poluição do ar.
Poluição visual	Alteração da paisagem local, com a supressão de vegetação, escavação da área, recorte de encostas, são ações que favorecem a erosão.
Odores	Advindos, principalmente, da decomposição da matéria orgânica e do lixiviado gerado.



<b>Impacto</b>	<b>Consequência</b>
Poluição sonora	Provocada por caminhões que transportam os resíduos e máquinas que despejam, compactam e espalham os resíduos, além da ampliação das áreas para despejo.
Acidentes	Aumento do tráfego de caminhões pesados.
Proliferação de vetores	Potenciais problemas para a saúde da população local, atração de aves como urubus, podem provocar acidentes com aeronaves.

Fonte: Adaptado de Sisinho e Oliveira (2006).

A fim de evitar estes e outros impactos ambientais possíveis, diversos requisitos devem ser observados pelos projetistas e operadores nas etapas de planejamento, implantação e operação dos AS, destacando-se a relevância dos sistemas de impermeabilização de base; de drenagem de água superficiais, assim como a drenagem e tratamento de lixiviado e biogás. A boa operação dos AS depende essencialmente de um projeto alinhado aos preceitos legais e normativos vigentes, da perícia técnica da equipe responsável pela implantação, da disponibilidade de equipamentos pesados adequados ao porte do aterro, da disponibilidade de recursos financeiros e humanos, da qualidade dos materiais e insumos adquiridos e, em especial, do esmero técnico e ambiental da equipe responsável pela operação.

Para Cunha (2019), quando mal operados, os AS acabam por causar preocupações de ordem social, ambiental e técnica, tais como:

- ♦ A emissão descontrolada de biogás pode, além de aumentar a concentração de gases de efeito estufa, causar incômodos à população local devidos ao odor característico dos resíduos e/ou expor a riscos de outras situações potencialmente perigosas;
- ♦ O lançamento de lixiviado no ambiente sem o tratamento necessário, pode causar impacto como toxicidade aos corpos hídricos;
- ♦ Abrigo e local de reprodução de vetores de doenças, por este motivo, a boa operação desta atividade configura-se em uma ação preventiva de saúde pública.

No Brasil, a Norma Técnica NBR 13896:1997 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o principal instrumento orientador que estabelece os critérios e condicionantes mínimas necessárias para elaboração de projetos, operação e fechamento de



AS. A norma se vincula à NBR 8419:1992, que, por sua vez, define procedimentos para a apresentação de projetos de aterros sanitários de RSU no licenciamento dos órgãos de controle ambiental. A NBR 13896:1997 fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas.

Quanto à proteção das águas superficiais e subterrâneas a norma propõe que todas as instalações devem possuir um sistema permanente de monitoramento com vistas a assegurar o controle da qualidade delas. Quanto ao sistema de impermeabilização de base, drenagem e tratamento do lixiviado, é recomendado que, sempre que as condições hidrogeológicas do local escolhido para a implantação do aterro não atenderem às especificações mínimas de permeabilidade, deve ser prevista a implantação de uma camada de impermeabilização. O sistema de tratamento de lixiviado deve ser projetado, construído e operado de forma que seus efluentes atendam aos padrões de lançamento e garantam a qualidade do corpo hídrico receptor, bem como ter os efluentes tratados monitorados pelo menos quatro vezes ao ano.

Quanto à segurança, um AS deve ser operado e mantido de forma a minimizar a possibilidade de incêndio, explosão ou derramamento/vazamento de resíduos que possam constituir ameaça à saúde humana ou ao meio ambiente. Para tal são recomendados processos de segregação, elaboração de planos de atendimento à emergência, assim como de inspeção e manutenção de rotina. Além disso, deve ser previsto um plano de encerramento e cuidados com o fechamento do aterro sanitário após a finalização da sua vida útil. O objetivo do plano é minimizar a necessidade de manutenção futura, assim como a liberação indevida de lixiviado contaminado para as águas subterrâneas e/ou corpos d'água superficiais para a atmosfera.

Quando bem implantados e operados, os aterros sanitários figuram como uma solução tecnológica e ambiental que atende aos requisitos de viabilidade para disposição adequada dos RSU. Entretanto, esta solução também acaba por representar um novo desafio a ser enfrentado, em especial pelo Poder Público. A expansão de novas áreas de disposição final no Brasil, mesmo que construídas atendendo aos mais rigorosos padrões normativos e legais, representa novos riscos ao meio ambiente e à saúde pública, em especial, devido



à hipótese de operação deficiente e pouco harmônica com a comunidade do entorno.

Desta forma, faz-se necessária uma constante avaliação do desempenho ambiental dessa atividade de engenharia. Esta avaliação deve ser baseada em procedimentos gerenciais, criados e continuamente aferidos sob os pilares da sustentabilidade, englobando critérios técnicos-ambientais, econômicos e socioambientais. A avaliação do desempenho pode ser um relevante instrumento para a gestão e redução de riscos ambientais de atividades potencialmente poluidoras. Além disso, a criação de procedimentos gerenciais pode auxiliar na elaboração de políticas públicas, bem como na verificação de sua eficácia. Contudo, para obter êxito é fundamental o desenvolvimento de indicadores de desempenho que forneçam um eficiente diagnóstico da condição de sustentabilidade dos AS, de maneira simples, apesar das complexidades inerentes à atividade.

### **1.3 PREMISSAS DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL E DE SUSTENTABILIDADE**

Tradicionalmente, a avaliação de desempenho ocorre a partir do uso de indicadores e índices. Em síntese, os indicadores podem ser compreendidos como medidas qualitativas ou quantitativas que mostram o estado de uma operação, processo ou sistema em análise. Já os índices podem ser considerados como um caso especial de indicador que trata características complexas com caráter agregativo e sintético por meio de uma pontuação adimensional.

Em síntese, a função dos indicadores de desempenho é mostrar a ocorrência ou ausência de fatos. Os indicadores devem ser capazes de chamar a atenção de um analista, líder ou gestor, sobre os problemas que estão ocorrendo em um sistema produtivo, empresa ou equipe; devendo ser capazes de demonstrar o real estado da qualidade da operação e um efetivo monitoramento dos aspectos críticos.

No caso da construção de indicadores de sustentabilidade, muitas experiências se assemelham a diagnósticos ou medidas de monitoramento, nos quais o interesse é a mensuração continuada de níveis de sustentabilidade, que fornecerão informações fundamentais para o planejamento ambiental (Bell, 2008). Com isso, entende-se que o planejamento ambiental estará sempre associado a processos com decisões estratégicas, que exigem estudos de alternativas visando a um cenário futuro de maior sustentabilidade. As ações de



gerenciamento ambiental serão aquelas relacionadas à operacionalização de decisões tomadas em planejamentos ambientais.

Destaca-se que os indicadores apontam, mas não resolvem um problema, a atuação do gestor é que fará a diferença na resolução e na manutenção de um estado desejado. A avaliação de sustentabilidade deve ser pensada no âmbito do planejamento e aplicada no gerenciamento, passando a figurar como uma ferramenta de gestão que possui o objetivo de inserir, de maneira ampla, as boas práticas sustentáveis.

#### **1.4 ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE OPERACIONAL DE ATERROS SANITÁRIOS (ISOAS)**

A proposta de Cunha (2019) para o Índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitário (ISOAS) foi baseada na divisão do índice em três grupos de indicadores: técnico-ambientais, econômicos e sociais. A partir de um modelo matemático, baseado no conceito *Triple Bottom Line* (TBL = Tripé da Sustentabilidade), os valores obtidos a partir da análise de cada grupo são processados, obtendo-se um valor percentual que representa a sustentabilidade do aterro sanitário. A métrica de valoração segue uma lógica meritocrática baseada na concessão de estrelas em função do desempenho.

O conjunto de indicadores técnico-ambientais divide-se em três subgrupos: características locais; infraestrutura implantada; e, condições operacionais do aterro sanitário.

Os indicadores econômicos se dividem em dois subgrupos: disponibilidade de equipamentos operacionais e análise de inadimplência.

Finalmente, os indicadores socioambientais se baseiam nas diferentes percepções de impactos. Para tal, a metodologia define a aplicação de um questionário estruturado de perguntas fechadas à população residente e domiciliada nas proximidades.

##### **1.4.1 Quanto aos grupos, subgrupos e subáreas de indicadores**

O ISOAS foi dividido nos seguintes grupos, subgrupos e subáreas:

- ♦ *Grupo*: Indicadores técnico-ambientais:
  - *Subgrupo*: Características Locacionais



- *Subárea 1*: Análise das características fisiográficas e ambientais
- *Subárea 2*: Análise da interface socioambiental
- *Subárea 3*: Análise do sistema viário público de acesso
- *Subgrupo*: Infraestrutura implantada
  - *Subárea 1*: Avaliação da infraestrutura implantada
  - *Subárea 2*: Avaliação do sistema de controle ambiental
- *Subgrupo*: Condições operacionais
  - *Subárea 1*: Avaliação das características operacionais
  - *Subárea 2*: Avaliação da eficiência dos sistemas de controle
  - *Subárea 3*: Análise dos documentos e diretrizes operacionais
- ♦ *Grupo*: Indicadores econômicos:
  - *Subgrupo 1*: Avaliação da disponibilidade de Equipamentos Mínimos Obrigatórios (EMO)
  - *Subgrupo 2*: Análise da influência da inadimplência
- ♦ *Grupo*: Indicadores sociais
  - *Subgrupo 1*: Avaliação da percepção social dos impactos ambientais negativos da atividade (Entrevistas realizadas na área de influência direta do empreendimento)
  - *Subgrupo 2*: Avaliação de impactos ambientais negativos da atividade (Análise realizada pelo usuário da metodologia ISOAS)

Desta forma a metodologia propõe 105 indicadores, sendo, 78 técnicos-ambientais (22 locacionais, 20 de infraestrutura e 36 operacionais), 12 econômicos e 15 socioambientais. Segundo Cunha (2019), as pontuações definidas para os indicadores foram definidas com base na realização de média aritmética dos resultados da aplicação de Técnica Delphi junto a um grupo de especialistas em gestão e gerenciamento de resíduos em diferentes Estados Brasileiros. As pontuações máximas possíveis por grupos e subgrupos estão apresentadas no Quadro 2.



Quadro 2 – Pontuação máxima por grupos e subgrupos de indicadores

<b>Grupo de Indicadores</b>	<b>Subgrupos</b>	<b>Pontuação Máxima por área</b>
Indicadores Técnicos-Ambientais	Características Locacionais	162
	Infraestrutura Implantada	169
	Condições Operacionais	304
Indicadores Econômicos	Avaliação da Disponibilidade de EMO	53
	Análise de Inadimplência	-53
Indicadores Socioambientais	Avaliação da percepção social dos impactos	133
<b>Pontuação Máxima Total</b>		<b>821</b>

Fonte: Cunha (2019).

A métrica de valoração da sustentabilidade segue uma lógica meritocrata, baseada na concessão de estrelas em função do desempenho obtido pelo aterro durante a análise. Caso a pontuação do aterro esteja entre 0% e 50%, ele é classificado como insustentável; valores entre 51% e 60%, é concedida uma estrela; entre 61% e 70% duas estrelas; entre 71% e 80% três estrelas; entre 81% e 90% quatro estrelas, entre 91% e 100% cinco estrelas.

De acordo com Cunha (2019), a análise de eficiência dos diferentes grupos de indicadores propostos permite verificar o desempenho em uma escala variável de 0% a 100%. Entretanto, o ISOAS almeja que o resultado da análise exprima o conceito de TBL e por este motivo considera os três grupos de indicadores de maneira simultânea e equitativa. Desta forma, através da realização de uma média aritmética dos resultados de eficiência de cada um dos grupos, pode-se atingir este objetivo e expressar, em um valor único, dentro de uma escala de 0% a 100%, o ISOAS. Os Quadros 3, 4, 5, 6 e 7 apresentam, com detalhes, os indicadores que integram os diversos grupos, subgrupos e subáreas do ISOAS.



Quadro 3 – Indicadores Econômicos

<b>Avaliação da Disponibilidade de EMO</b>					
<b>Sub-item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
79	Trator Esteira D6K 13,4t 125HP*	Adequada	10		
		Deficiente	5		
		Inexistente	0		
80	Escavadeira 90HP*	Adequada / Desnecessário	9		
		Deficiente	5		
		Inexistente	0		
81	Caminhão Tanque*	Adequada / Desnecessário	9		
		Deficiente	5		
		Inexistente	0		
82	Compactador de solo 130HP*	Adequada / Desnecessário	7		
		Deficiente	3		
		Inexistente	0		
83	Moto nivelador 125HP*	Adequada / Desnecessário	5		
		Deficiente	3		
		Inexistente	0		
84	Carregadeira de rodas 128HP (Equipamento Opcional)	Adequada / Desnecessário	4		
		Deficiente	2		
		Inexistente	0		
85	Disponibilidade de Lâmina Raspadora (Equipamento Opcional)	Adequada / Desnecessário	4		
		Deficiente	2		
		Inexistente	0		
86	Custo Médio Operacional Praticado em função do Porte	Adequada CMO Praticado = CMO Estimado $\pm$ 10%	5		
		Limítrofe CMO Praticado = CMO Estimado $\pm$ 20%	3		
		Inadequado CMO Praticado = CMO Estimado $\pm$ 30%	0		



<b>Inadimplência</b>					
<b>Sub-item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
87	A gestora do aterro registrou entre 5% e 25% de inadimplência nos valores a serem pagos no último semestre?*	Não	0		
		Sim	-12		
88	A gestora do aterro registrou entre 25% e 50% de inadimplência nos valores a serem pagos no último semestre?*	Não	0		
		Sim	-13		
89	A gestora do aterro registrou entre 50% e 75% de inadimplência nos valores a serem pagos no último semestre?*	Não	0		
		Sim	-14		
90	A gestora do aterro registrou mais de 75% de inadimplência nos valores a serem pagos no último semestre?*	Não	0		
		Sim	-15		
SUB-TOTAL POSSÍVEL			53		0%
SUB-TOTAL OBTIDO					
ANÁLISE DE PERFORMANCE					

\* A avaliação deve ser procedida em função do referencial de Equipamentos Mínimos Obrigatórios (EMO) em função do porte do Aterro.

\*\* Analisar o indicador a partir da inadimplência de um ou mais geradores de RSU ou RCS que, juntos ou não, representaram o recebimento indicado.

Fonte: Adaptado de Cunha (2019).



Quadro 4 – Indicadores Técnico-Ambientais  
– Subgrupo: Características Locacionais

<b>Características Locacionais</b>					
<b>Características fisiográficas e ambientais</b>					
	<b>Sub-Item</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
1	Profundidade do lençol freático	Ideal > 3,0 m	9		
		Aceitável entre 1,5 m e 3,0 m	5		
		Não recomendável < 1,5 m	1		
2	Proximidade de Unidades de Conservação	Ideal > 500 m	8		
		Aceitável entre 500 e 1 m	4		
		Não recomendável < 1 m	1		
3	Permeabilidade do solo de fundação (Coeficiente de permeabilidade < 1x10 <sup>-6</sup> cm/s)	Adequado	8		
		Inadequado	1		
4	Declividade do Terreno [%]	Ideal < 15%	7		
		Aceitável entre > 15% e < 30%	4		
		Não recomendável > 30%	1		
5	Disponibilidade de material de recobrimento diário e intermediário	Suficiente Atende à demanda na VU	7		
		Insuficiente Não atende a demanda na VU	4		
		Inexistente Não há jazida nos limites do terreno	1		
6	Isolamento visual da vizinhança	Bom	8		
		Ruim	1		
7	Distância de cursos d'água	Ideal > 200 m	9		
		Aceitável entre 200 m e 50 m	5		
		Não recomendável < 50 m	1		
8	Vida útil (Cálculo teórico)	Ideal > 15 anos	9		
		Aceitável entre 15 e 10 anos	5		
		Não recomendável < 10 anos	1		
9	Área sujeita a inundação	Sim	2		
		Não	6		



<b>Características Locacionais Interface socioambiental</b>					
	<b>Sub-Item</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
10	Proximidade de núcleos habitacionais	Longe > 500 m	9		
		Próximo < 500 m	1		
11	Densidade populacional	Alta	1		
		Média	2		
		Baixa	4		
12	Utilização da área pela população	Eventual	6		
		Rotineira	2		
		Intenso	1		
13	Zoneamento urbano	Adequado	8		
		Inadequado	0		
14	Valor da terra	Alto	2		
		Médio	4		
		Baixo	6		
15	Aceitação da atividade pela população e ONGs locais	Receptiva	8		
		Dúbia	4		
		Repúdio	1		
16	Distância do centro de massa municipal (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Ideal < 5 km	10		
		Recomendado entre 5 e 20 km	6		
		Não recomendável > 20 km	2		



<b>Características Locacionais</b>					
<b>Sistema viário público de acesso</b>					
	<b>Sub-Item</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
17	Número de faixas de rolamento para tráfego de caminhões e carretas (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Bom	7		
		Regular	3		
		Ruim	0		
18	Fluxo (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Adequado Mão única	7		
		Regular Trechos mistos	4		
		Periclitante Mão dupla	1		
19	Tráfego de caminhões e carretas por núcleos populacionais (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Sim	3		
		Não	6		
20	Condições de manutenção da via de acesso (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Adequada	8		
		Regular	5		
		Inadequada	1		
21	Condições de iluminação da via de acesso (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Adequada	5		
		Regular	3		
		Inadequada	1		
22	Condições de sinalização da via de acesso (A avaliação deve considerar, o último trecho de 1 km)	Adequada	7		
		Regular	4		
		Inadequada	1		
SUB-TOTAL POSSÍVEL			162		
SUB-TOTAL OBTIDO				0	
ANÁLISE DE PERFORMANCE					0%

Fonte: Adaptado de Cunha (2019).



Quadro 5 – Indicadores Técnico-Ambientais  
– Subgrupo: Infraestrutura Implantada

Infraestrutura Implantada					
Avaliação da infraestrutura implantada					
Sub-Item		Avaliação	Peso	Pont.	Comprov.
23	Cercamento em todo perímetro do terreno	Sim	9		
		Não	0		
24	Balança rodoviária	Sim	9		
		Não	1		
25	Portão com controle de acesso (Portaria/Guarita)	Sim	9		
		Não	1		
26	Sinalização das vias internas do empreendimento	Sim	8		
		Não	1		
27	Sinalização de risco nas dependências do empreendimento	Sim	5		
		Não	0		
28	Cinturão verde em desenvolvimento útil	Sim	8		
		Não	1		
29	Faixa de proteção sanitária <i>non-aedificant</i> (largura > 10 m)	Sim	9		
		Não	1		
30	Disponibilidade de gerador reserva para acionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos em situações emergenciais	Sim	8		
		Parcialmente	4		
		Não	1		
31	Disponibilidade de pontos móveis de iluminação para acionamento noturno e situações emergenciais	Sim	7		
		Parcialmente	4		
		Não	1		



Infraestrutura Implantada					
Avaliação do sistema de controle implantado					
Sub-Item		Avaliação	Peso	Pont.	Comprov.
32	Sistema de drenagem subsuperficial	Existente / Não aplicável	9		
		Insuficiente	4		
		Inexistente	1		
33	Sistema simples de impermeabilização de base constituído por barreira física, com coeficiente de permeabilidade inferior a 10 <sup>-7</sup> m/s	Existente / Adequado	7		
		Insuficiente	3		
		Inexistente	0		
34	Sistema composto de impermeabilização de base constituído por duas ou mais barreiras físicas justapostas em toda a extensão do sistema, com coeficiente de permeabilidade inferior a 10 <sup>-7</sup> m/s	Existente / Adequado	7		
		Insuficiente	4		
		Inexistente	0		
35	Sistema duplo composto de impermeabilização de base constituído por duas geomembranas e, pelo menos, mais uma barreira física, justapostas, com coeficiente de permeabilidade inferior a 10 <sup>-7</sup> m/s	Existente / Adequado	9		
		Insuficiente	3		
		Inexistente	0		
36	Sistema de detecção de vazamento instalado sob o sistema artificial de impermeabilização da base	Existente / Adequado	8		
		Insuficiente	3		
		Inexistente	0		
37	Sistema de drenagem de efluentes líquidos lixiviados	Adequado	10		
		Insuficiente	4		
		Inadequado / Inexistente	0		



<b>Infraestrutura Implantada</b>					
<b>Avaliação do sistema de controle implantado</b>					
	<b>Sub-Item</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
38	Sistema de drenagem pluvial provisória	Adequado	10		
		Insuficiente	5		
		Inadequado / Inexistente	0		
39	Sistema de drenagem pluvial definitiva	Adequado	10		
		Insuficiente	5		
		Inadequado / Inexistente	0		
40	Sistema de drenagem de biogás	Adequado	9		
		Insuficiente	5		
		Inadequado / Inexistente	1		
41	Técnica de tratamento de lixiviado	Sist. Primário + Envio p/ ETE	6		
		Sist. Secundário + Envio p/ ETE	7		
		Sist. Terciário + Envio p/ ETE	9		
		Sist. Primário + Lançamento	3		
		Sist. Secundário + Lançamento	6		
		Sist. Terciário + Lançamento	8		
		Recirc. + Envio p/ ETE	5		
		Recirc. + Primário + Envio p/ ETE	6		
		Recirc.+ Secun. + Envio p/ ETE	7		
		Envio para ETE	5		
		Inexistente / Recirculação	1		



<b>Infraestrutura Implantada</b>					
<b>Avaliação do sistema de controle implantado</b>					
	<b>Sub-Item</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
42	Técnica de tratamento de biogás	Não foi constatada queima	1		
		Queima pontual direta no dreno	6		
		Queima concentrada	8		
		Queima e recuperação energética	9		
		Comercialização (gás / vapor / energia)	10		
SUB-TOTAL POSSÍVEL			169	0	0%
SUB-TOTAL OBTIDO					
ANÁLISE DE PERFORMANCE					

Fonte: Adaptado de Cunha (2019).

Quadro 6 – Indicadores Técnico-Ambientais  
– Subgrupo: Condições Operacionais

<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Características operacionais</b>					
	<b>Sub-Item</b>	<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
43	Procedimento de lógica operacional definida e em andamento	Sim Integralmente	7		
		Sim Parcialmente	4		
		Não	1		
44	Aspecto geral	Bom	9		
		Ruim	1		
45	Compactação dos taludes e bermas	Adequado	9		
		Inadequado	1		
46	Ocorrência de queima espontânea	Sim	2		
		Não	6		



<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Características operacionais</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
47	Rotina de recobrimento diário dos resíduos (Deve ser realizada após o término de cada jornada de trabalho, solo ou geomembrana)	Suficiente	9		
		Insuficiente	5		
		Inexistente	0		
48	Recobrimento intermediário de platôs, bermas e taludes (Este recobrimento deve ser executado exclusivamente em solo, com camada de espessura mínima de 20 cm e compactação).	Suficiente	10		
		Insuficiente	5		
		Inexistente	0		
49	Presença de vetores aéreos (Urubus, garças ou outras aves)	Sim	3		
		Não	7		
50	Presença de moscas (Em grandes quantidades)	Sim	3		
		Não	7		
51	Presença de catadores de materiais recicláveis na frente de operações	Sim	2		
		Não	8		
52	Presença de animais (Cachorros, porcos, bois e cavalos)	Sim	2		
		Não	7		
53	Ponto de lançamento do chorume tratado	Adequado / Inexistente (Reuso)	8		
		Inadequado	1		
54	Traçado dos acessos internos à frente de trabalho	Bom	8		
		Ruim	1		

<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Características operacionais</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
55	Manutenção da trafegabilidade dos acessos internos de maneira a permitir sua utilização sob quaisquer condições climáticas	Adequada	9		
		Regulares	5		
		Inadequada	1		

<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Controle</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
56	Eficiência do sistema de drenagem e queima de gases	Adequado	8		
		Inadequado	0		
57	Recebimento de resíduos não autorizados pelo licenciamento ambiental	Sim	3		
		Não	6		
58	Monitoramento de vetores ativo e em atendimento às exigências do órgão ambiental licenciador	Sim	9		
		Parcialmente	5		
		Não	1		
59	Monitoramento de biogás ativo e em atendimento às exigências do órgão ambiental licenciador	Sim	7		
		Parcialmente	4		
		Não	0		
60	Monitoramento geotécnico ativo e em atendimento às exigências do órgão ambiental licenciador	Sim	10		
		Parcialmente	4		
		Não	1		



<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Controle</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
61	Monitoramento de lixiviado bruto ativo e em atendimento às exigências do órgão ambiental licenciador	Sim	10		
		Parcialmente	4		
		Não	0		
62	Monitoramento de águas subterrâneas ativo e em atendimento às exigências do órgão ambiental licenciador	Sim	10		
		Parcialmente	4		
		Não	0		
63	Monitoramento de águas superficiais ativo e em atendimento às exigências do órgão ambiental licenciador	Sim	10		
		Parcialmente	4		
		Não	0		
64	Funcionamento do sistema de drenagem pluvial definitivo	Adequado	10		
		Deficiente	4		
		Inadequado	0		
65	Funcionamento do sistema de drenagem pluvial provisório	Adequado	10		
		Deficiente / Sem manutenção	4		
		Inadequado / inexistente	0		
66	Funcionamento do sistema de drenagem de lixiviado	Adequado	9		
		Deficiente	3		
		Inadequado	0		
67	Funcionamento do sistema de tratamento de chorume (Deve ser verificado o atendimento aos padrões da Resolução Conama nº 430/2011)	Adequado	10		
		Deficiente	5		
		Inadequado / Inexistente	0		



<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Avaliação da Eficiência dos Sistemas de Controle</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
68	Disponibilidade de sistema de comunicação interna e externa entre funcionários do aterro	Sim	7		
		Insuficiente	3		
		Não	0		
69	Disponibilidade de equipamentos de atendimento à emergência	Sim	9		
		Não	0		

<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Documentos básicos e diretrizes operacionais</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
70	Existência de ponto de atendimento a emergências disponível em aterro	Sim	9		
		Não	0		
71	Existência de ponto de amostragem a análise de resíduos, para monitoramento da qualidade	Sim	5		
		Não	0		
72	Existência de Licença de Operação para todas as unidades do aterro	Sim	10		
		Não	0		
73	Existência de Outorga de Lançamento para o Efluente Tratado na Estação de Tratamento de Chorume (ETC)	Sim	10		
		Não	0		



<b>Condições Operacionais</b>					
<b>Documentos básicos e diretrizes operacionais</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
74	Existência de ponto de avanço definido em projeto e disponível no aterro	Sim	9		
		Não	1		
75	Existência de ponto de encerramento em projeto e disponível no aterro	Sim	9		
		Não	1		
76	Existência de ponto de inspeção e manutenção do maquinário disponível no aterro	Sim	7		
		Não	1		
77	Existência de registros de treinamentos realizados, a menos de seis meses	Sim	9		
		Parcialmente	5		
		Não	1		
78	Existência de banco de dados contendo os registros operacionais do aterro, especificando dia e hora do recebimento [...] e a tipologia do resíduo disposto classificado conforme a Lei nº 12.305/2010	Sim	9		
		Parcialmente	4		
		Não	1		
SUB-TOTAL POSSÍVEL			306	0	0%
SUB-TOTAL OBTIDO					
ANÁLISE DE PERFORMANCE					

Fonte: Adaptado de Cunha (2019).



Quadro 7 – Indicadores Socioambientais

<b>Indicadores Socioambientais</b>					
<b>Avaliação da percepção de impactos negativos</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
91	Foi percebido cheiro de lixo nas redondezas do aterro?*	Não houve relatos	10		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
92	Foi percebido barulho de caminhões transitando no entorno do aterro?*	Não houve relatos	9		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
93	Foi percebida fumaça oriunda de caminhões transitando no entorno do aterro?*	Não houve relatos	9		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		



<b>Indicadores Socioambientais</b>					
<b>Avaliação da percepção de impactos negativos</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
94	Foi constatada a presença de resíduos volantes oriundos dos caminhões?*	Não houve relatos	10		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
95	Foi constatada fila de caminhões no acesso à balança do aterro?*	Não houve relatos	8		
		Menos de 10% dos entrevistados	7		
		Menos de 25% dos entrevistados	5		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
96	Foi constatado chorume oriundo dos caminhões no entorno do aterro?*	Não houve relatos	10		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		



<b>Indicadores Socioambientais</b>					
<b>Avaliação da percepção de impactos negativos</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
97	Foi percebido barulho do maquinário pesado da operação do aterro no entorno do aterro?*	Não houve relatos	8		
		Menos de 10% dos entrevistados	7		
		Menos de 25% dos entrevistados	5		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
98	Foi percebido o aumento de poeira e material particulado no interior das residências devido ao trânsito de caminhões no entorno do aterro?*	Não houve relatos	9		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		

<b>Indicadores Socioambientais</b>					
<b>Avaliação da percepção de impactos negativos</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
99	Foi constatada a proliferação de ratos e outros vetores terrestres após a instalação do aterro?*	Não houve relatos	10		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		



<b>Indicadores Socioambientais</b>					
<b>Avaliação da percepção de impactos negativos</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
100	Foi constatada alteração de odor/sabor característico na água de poço após a instalação do aterro?*	Não houve relatos	10		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	3		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
101	Foi constatada a proliferação de moscas e outros vetores aéreos após a instalação do aterro?*	Não houve relatos	9		
		Menos de 10% dos entrevistados	7		
		Menos de 25% dos entrevistados	5		
		Menos de 50% dos entrevistados	3		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
102	Quantos entrevistados afirmaram haver, ao menos, três benefícios em função das operações normais do aterro?*	Não houve relatos	1		
		Menos de 10% dos entrevistados	4		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	8		
		Mais de 50% dos entrevistados	10		
103		Nenhum	6		



<b>Indicadores Socioambientais</b>					
<b>Avaliação da percepção de impactos negativos</b>					
<b>Sub-Item</b>		<b>Avaliação</b>	<b>Peso</b>	<b>Pont.</b>	<b>Comprov.</b>
	Quanto à duração dos impactos constatados, quantos foram considerados constantes?*	Menos de 10% dos entrevistados	4		
		Menos de 25% dos entrevistados	3		
		Menos de 50% dos entrevistados	2		
		Mais de 50% dos entrevistados	0		
104	Quanto à frequência dos impactos constatados, quantos foram considerados diários?*	Nenhum	6		
		Menos de 10% dos entrevistados	4		
		Menos de 25% dos entrevistados	3		
		Menos de 50% dos entrevistados	2		
		Mais de 50% dos entrevistados	0		
105	Quanto entrevistados afirmaram haver, ao menos, três prejuízos ao bem-estar em função das operações normais do aterro?*	Nenhum	10		
		Menos de 10% dos entrevistados	8		
		Menos de 25% dos entrevistados	6		
		Menos de 50% dos entrevistados	4		
		Mais de 50% dos entrevistados	1		
SUB-TOTAL POSSÍVEL			133	0	0%
SUB-TOTAL OBTIDO					
ANÁLISE DE PERFORMANCE					

Fonte: Adaptado de Cunha (2019).



Após análise dos Quadros 3, 4, 5, 6 e 7, percebe-se que, a partir da análise crítica de documentos estratégicos elaborados durante o rito de licenciamento dos aterros sanitários (Relatórios de Vistoria, Pareceres Técnicos, Notificações, Atas de Reunião, Licenças e outros), dos projetos técnicos (Concepção, Executivo e *As Built*) e outros documentos de caráter público (geralmente disponíveis no processo de licenciamento ambiental da atividade) é possível avaliar parte significativa dos indicadores propostos por Cunha (2019).

Entretanto, a metodologia não pode ser aplicada apenas com base na análise de dados secundários, as vistorias às dependências dos aterros para verificação *in loco* de indicadores e a realização de entrevistas com os gestores operacionais dos aterros para levantamento de dados estratégicos são indispensáveis para a geração de resultados efetivos.

## 2 OBJETIVOS

Considerando a abrangência e a complexidade do índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitários (ISOAS), proposta por Cunha (2019), este artigo produziu um recorte diagnóstico da análise de dois aterros sanitários localizados na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro, ambos operados pelo mesmo grupo empresarial, a “Orizon Valorização de Resíduos”.

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar e comparar o desempenho obtido no ano de 2019 pelo CTR Nova Iguaçu e CTR São Gonçalo, localizados no Estado do Rio de Janeiro, a partir da interpretação dos resultados do Índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitário (ISOAS) proposto por Cunha (2019).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♦ Avaliar o resultado da verificação dos indicadores técnico-ambientais, econômicos e socioambientais no CTR Nova Iguaçu;
- ♦ Avaliar o resultado da verificação dos indicadores técnico-ambientais, econômicos e socioambientais no CTR São Gonçalo;
- ♦ Comparar o desempenho dos CTRs analisados e verificar tendências operacionais, problemas socioambientais e questões econômicas limitantes.



### 3 METODOLOGIA UTILIZADA

A primeira etapa da metodologia fundamentou-se em uma revisão bibliográfica que visou estabelecer um denso referencial teórico, direcionado para a busca de conceitos, legislações, normas, diretrizes e procedimentos, nacionais e internacionais. Para a uniformização de sinônimos no processo de pesquisa e localização de dados, foram utilizados os seguintes descritores:

- ♦ Construção de indicadores de sustentabilidade;
- ♦ Análise de desempenho ambiental;
- ♦ Critérios técnicos-ambientais de implantação e de operação de aterros sanitários;
- ♦ Análise de viabilidade econômica de aterros sanitários;
- ♦ Dimensionamento de equipamentos operacionais de aterros sanitários;
- ♦ Licenciamento e Avaliação de impactos ambientais em aterros sanitários; e,
- ♦ Percepção social de impactos ambientais em aterros sanitários.

As principais bases de dados utilizados foram a SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), ERIC (*Educational Resources Information Center*), Portal Periódicos Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e Google Acadêmico.

A segunda etapa metodológica foi a internalização das informações obtidas nas revisões supracitadas, em especial na proposta realizada por Cunha (2019), com posterior composição de referências consultadas, análise crítica das informações obtidas, avaliação dos indicadores constituintes do ISOAS e seus resultados de aplicação nos CTRs Nova Iguaçu e São Gonçalo no ano de 2019.

### 4 RESULTADOS OBTIDOS

Diante do volume expressivo de dados e informações gerados com a aplicação da metodologia ISOAS, os resultados obtidos foram organizados de acordo com a:

- ♦ Consolidação das informações gerais dos aterros sanitários avaliados; e,
- ♦ Aplicação do ISOAS nos aterros sanitários coparticipantes da pesquisa.



## 4.1 INFORMAÇÕES GERAIS DOS ATERROS SANITÁRIOS AVALIADOS

Inicialmente, cabe destacar que a pesquisa de campo realizada por Cunha (2019) foi realizada no dia 24 de janeiro de 2019 no CTR São Gonçalo, localizado no município de São Gonçalo e no dia 23 de janeiro de 2019 no CTR Nova Iguaçu, localizado no município de Seropédica, ambos na Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

### 4.1.1 Informações gerais do CTR Nova Iguaçu

O CTR Nova Iguaçu, teve a sua localização na Estrada de Adrianópolis s/nº, município de Nova Iguaçu (Coordenadas 656046,24 E e 7491663,37 S), aprovada pela antiga Fundação Estadual de Engenharia Ambiental (FEEMA) do Rio de Janeiro, atual Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Não foi localizado no sistema INEA os dados relativos à Licença Prévia (LP) da atividade. A área destinada aos quatro vales de aterros sanitários é de 415.823 m<sup>2</sup> e localiza-se na bacia hidrográfica da Baía de Guanabara e tem precipitação média anual de 1.408 mm.

Figura 1 – Imagem aérea do CTR Nova Iguaçu



Fonte: Software Google Earth (2022).

A Figura 1 apresenta uma visão geral da localização do aterro. A imagem aérea foi extraída do software Google Earth no ano de 2020.



Como a atividade de disposição final de resíduos é extremamente dinâmica, a imagem selecionada pode destoar da atual conformação.

A unidade iniciou sua operação em 13 de fevereiro de 2003, desta forma, a Licença de Operação (LO) vem sendo renovada ao longo dos últimos anos. A última LO expedida para a unidade foi a IN018048, datada de 03 de novembro de 2011, expirada 03 de novembro de 2014. No sistema do INEA não foi localizado o pleito de renovação da referida licença junto ao processo administrativo original.

Destaca-se que, eventualmente, o sistema do referido órgão pode estar desatualizado, não constando as informações mais atuais sobre o processo administrativo em questão. Atualmente o aterro recebe resíduos gerados nos municípios de Nova Iguaçu, Duque de Caxias, Mesquita, Belford Roxo e Nilópolis, representando um recebimento médio estimado de 2.278 t/d de RSU. A atual empresa gestora do empreendimento é a Orizon Valorização de Resíduos S/A.

#### **4.1.2 Informações gerais do CTR São Gonçalo**

O CTR São Gonçalo, teve a sua localização na Estrada do Anaia s/nº, município de São Gonçalo (Coordenadas 706793,36 E e 7470740,76 S), aprovada pelo INEA em 01 de março de 2011 através de LP nº IN015922, expirada em 01 de março de 2014. A área destinada ao aterro sanitário na fase 1, possui aproximadamente 106.500 m<sup>2</sup> e localiza-se na bacia hidrográfica da Baía de Guanabara, com uma precipitação média anual de 1.257 mm.

A Figura 2 apresenta uma visão geral da localização do aterro. A imagem aérea foi extraída do *software Google Earth* no ano de 2020. Como a atividade de disposição final de resíduos é extremamente dinâmica, a imagem selecionada pode destoar da atual conformação.

A unidade iniciou sua operação em 23 de janeiro de 2012, tendo como instrumento autorizativo a LO nº IN0018810, expirada em 23 de janeiro de 2016. No sistema do INEA não foi localizada a renovação da referida licença junto ao processo administrativo original, apenas uma Ata de Reunião datada de 28 de setembro de 2016 informando que o pleito de renovação estaria em análise. Entretanto, a atividade possui diversas averbações da LO nº IN018810.



Destacando-se a última disponibilizada, AVB002536, datada de 27 de novembro de 2014. Na ocasião da pesquisa o aterro recebia resíduos gerados nos municípios de São Gonçalo e 70% dos resíduos gerados em Niterói, representando um recebimento médio estimado de 1.407 t/d de RSU (Cunha, 2019). A atual empresa gestora do empreendimento é a Orizon Valorização de Resíduos S/A.

Figura 02 – Imagem aérea do CTR São Gonçalo



Fonte: Software Google Earth (2022).

#### **4.2 QUANTO À APLICAÇÃO DO ISOAS NOS ATERROS SANITÁRIOS COPARTICIPANTES**

Como produto da aplicação da metodologia ISOAS por Cunha (2019), foi proposto o Quadro 8, que apresenta a consolidação das avaliações dos grupos, subgrupos e subáreas de indicadores em função das pontuações obtidas, suas respectivas eficiências e valores do ISOAS.



Quadro 8 – Resultados gerais da aplicação do ISOAS  
no CTR Nova Iguaçu e no CTR São Gonçalo

Grupo de Indicadores	Subgrupos	Subáreas	CTR Nova Iguaçu			
			P-O	E-Sa	E-Sg	E-G
Indicadores Técnicos-Ambientais	Características Locacionais	Características fisiográficas	60	84%	87%	91%
		Interface socioambiental	43	84%		
		Sistema viário público de acesso	37	95%		
	Infraestrutura Implantada	Avaliação da infraestrutura implantada	72	100%	90%	
		Avaliação dos sistemas de controle	80	82%		
	Condições Operacionais	Características operacionais	98	94%	95%	
		Avaliação dos sistemas de controle	114	92%		
		Documentos básicos e diretrizes operacionais	77	99%		
	Indicadores Econômicos	Avaliação da Disponibilidade de EMO		49	93%	
Análise de Inadimplência		-12	23%			
Indicadores Socioambientais			95	71%	71%	
			<b>ISOAS</b>		<b>77%</b>	



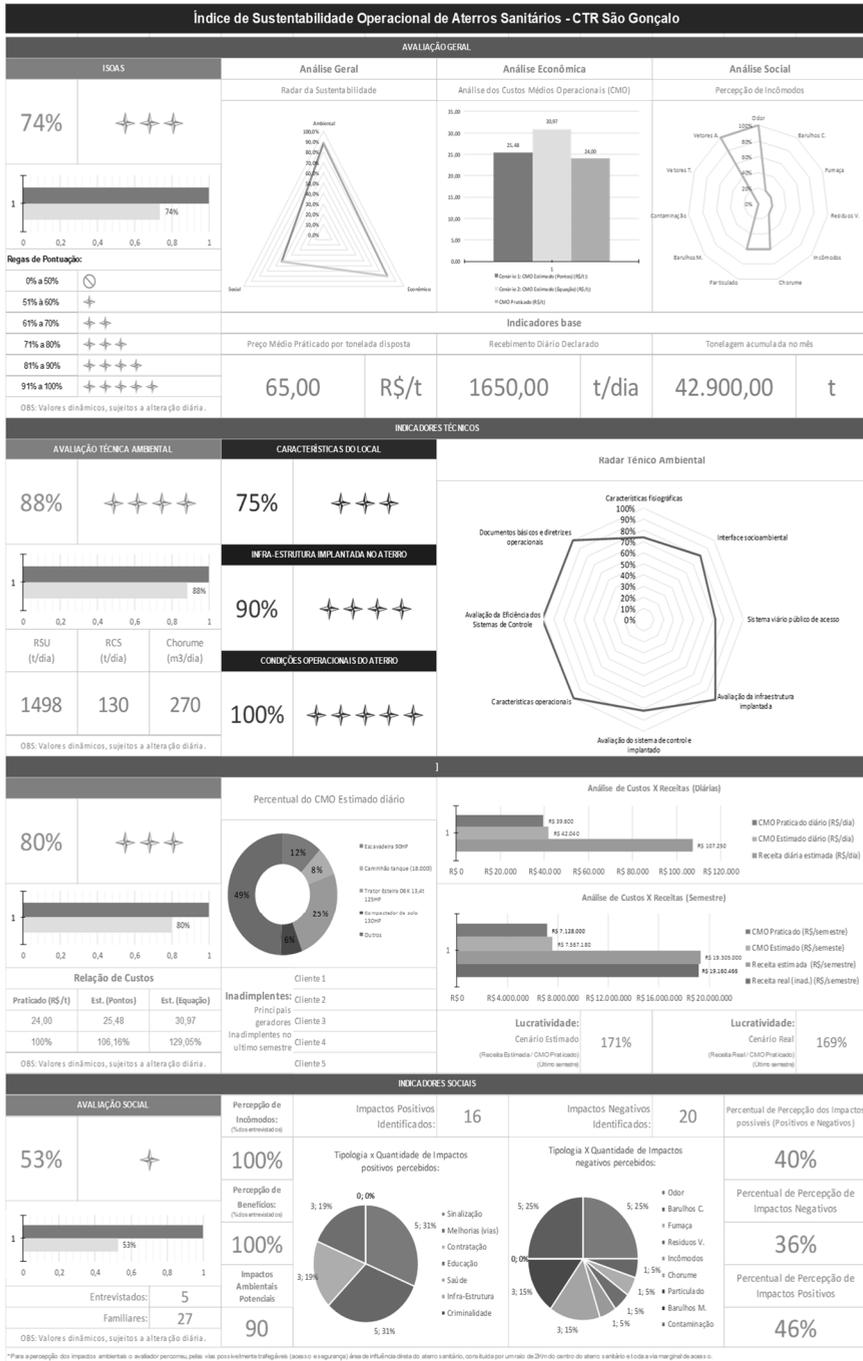
Grupo de Indicadores	Subgrupos	Subáreas	CTR São Gonçalo			
			P-O	E-Sa	E-Sg	E-G
Indicadores Técnicos-Ambientais	Características Locacionais	Características fisiográficas	53	74%	75%	88%
		Interface socioambiental	41	81%		
		Sistema viário público de acesso	28	72%		
	Infraestrutura Implantada	Avaliação da infraestrutura implantada	73	100%	90%	
		Avaliação dos sistemas de controle	79	81%		
	Condições Operacionais	Características operacionais	104	100%	100%	
		Avaliação dos sistemas de controle	123	100%		
		Documentos básicos e diretrizes operacionais	77	100%		
	Indicadores Econômicos	Avaliação da Disponibilidade de EMO		42	80%	
Análise de Inadimplência		0	0%			
Indicadores Socioambientais			70	53%	53%	
			<b>ISOAS</b>		74%	

Legenda: **P-O** – Pontuação obtida;  
**E-Sa** – Eficiência Subárea;  
**E-Sg** – Eficiência Subgrupo;  
**E-G** – Eficiência Grupo.

Fonte: Adaptado de Cunha (2019).

Os dashboards consolidados estão nas Figuras 3 e 4.

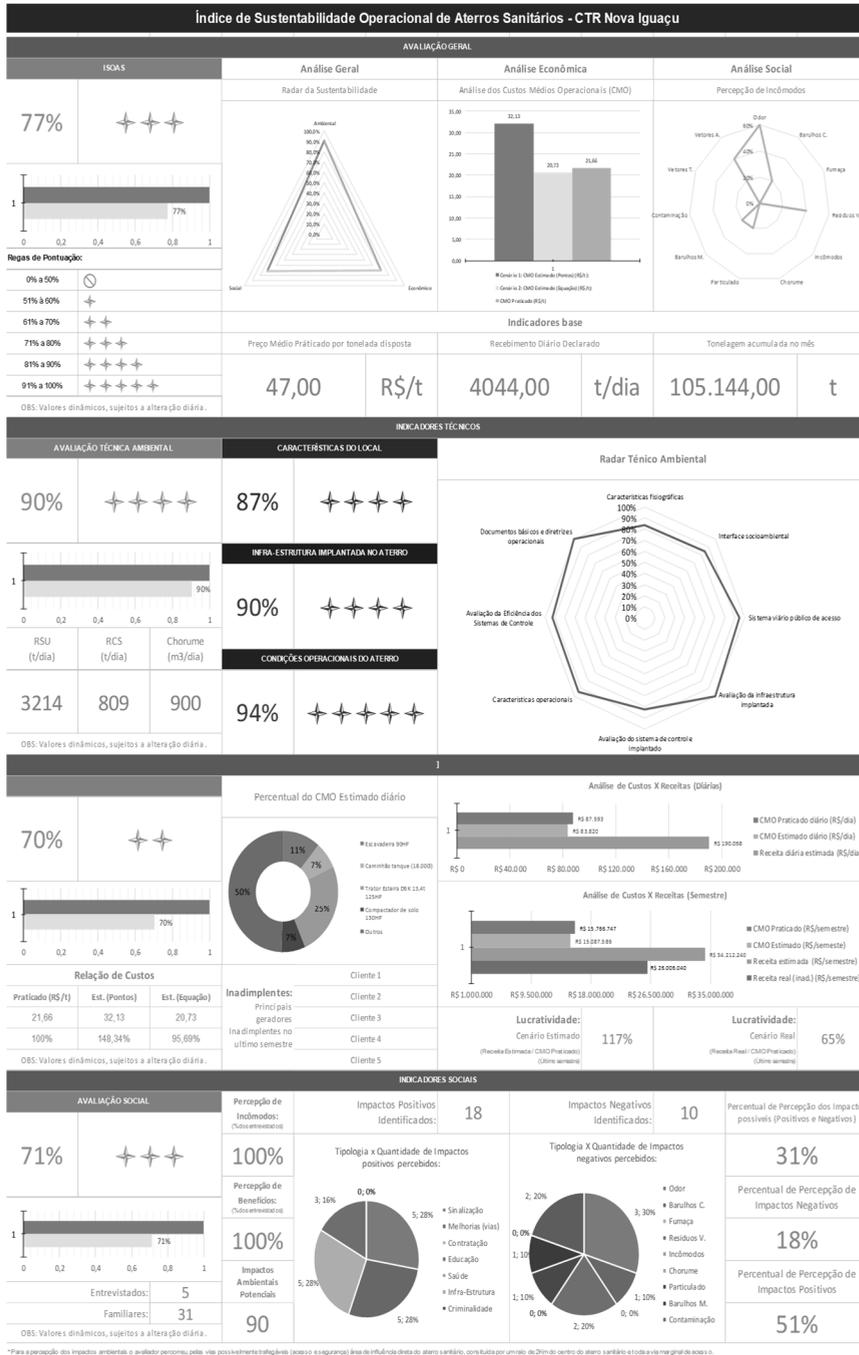
Figura 3 – Dashboard operacional do CTR São Gonçalo



Fonte: Cunha (2019).



Figura 4 – Dashboard operacional do CTR Nova Iguaçu



Fonte: Cunha (2019).



Os Dashboards apresentados consolidam os resultados dos principais indicadores da metodologia em uma avaliação pontual. Diante ao exposto, entende-se haver a oportunidade de se construir uma interface dinâmica com a comparação de resultados em diferentes momentos, caracterizando evoluções ou não dos resultados dos indicadores propostos.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Constata-se que o ISOAS apresenta robustez técnica, sintonia com as premissas da ABNT NBR 13896:1997 e com os preceitos conceituais do TBL. Entretanto, vale destacar que a análise isolada do ISOAS gera apenas o “retrato” de uma atividade que é, por natureza, dinâmica. Para uma melhor análise da condição de sustentabilidade dos aterros sanitários é fundamental que haja uma frequência estabelecida para monitoramento dos indicadores, bem como a realização do controle estatístico dos resultados gerados e a criação de uma série histórica.

Corroborando com Cunha (2019), acredita-se que, a partir do ISOAS, seja possível:

- ◆ Identificar e registrar tendências operacionais;
- ◆ Identificar problemas crônicos e agudos da operação;
- ◆ Identificar fatores limitantes do nível de sustentabilidade;
- ◆ Aferir o engajamento das partes interessadas;
- ◆ Identificar percepções das diferentes partes interessadas;
- ◆ Priorizar investimentos;
- ◆ Priorizar ações de controle;
- ◆ Desenvolver, orientar, subsidiar, analisar e acompanhar políticas públicas.

Quanto aos resultados obtidos, verifica-se que os CTRs Nova Iguaçu e São Gonçalo ficaram com percentuais de eficiência de 77% e 74%, respectivamente. Estando enquadrados como “três estrelas” na metodologia do ISOAS. Quando se analisa os resultados gerados pelo grupo de indicadores técnico-ambientais, percebe-se que o CTR Nova Iguaçu apresenta condição mais favorável, com 91% de eficiência, contra 88% do CTR São Gonçalo. Entretanto, para compreender a diferença identificada de percentuais, é necessário verificar o desempenho dos CTRs nos diferentes subgrupos.

De acordo com a metodologia do ISOAS, os 22 indicadores representam a análise das características locais, representando 162 pontos possíveis. O CTR Nova Iguaçu obteve 140 pontos (87%) e o CTR São Gonçalo 122 pontos (75%). Esse resultado demonstra que o CTR



Nova Iguaçu apresenta melhor localização. Entretanto, ao analisar os resultados obtidos nas subáreas é possível constatar que em nenhum dos grupos de indicadores o CTR São Gonçalo obteve pontuação superior ao CTR Nova Iguaçu.

No ISOAS, vinte indicadores representam a análise da infraestrutura implantada, representando 169 pontos possíveis. O CTR Nova Iguaçu e o CTR São Gonçalo obtiveram a mesma pontuação, 152 pontos (90%). O resultado demonstra a adoção de cuidadosos critérios técnicos na implantação dos aterros. Vale destacar que, ambos aterros tiveram desempenho máximo na avaliação da infraestrutura implantada.

As condições operacionais são representadas por 36 indicadores perfazendo 304 pontos possíveis. O CTR São Gonçalo obteve 304 pontos (100%) contra 289 pontos (95%) no CTR Nova Iguaçu. Denotando, de acordo com a metodologia utilizada, uma operação de qualidade de ambos no ato da avaliação. Ambos os aterros obtiveram desempenho excelente nas subáreas avaliação dos sistemas de controle e documentos básicos e diretrizes operacionais. Na subárea características operacionais, o CTR Nova Iguaçu obteve 94% de eficiência e o CTR São Gonçalo 100%.

Estes resultados demonstram que, apesar da complexidade técnica-ambiental inerente à operação da atividade e da grande quantidade de indicadores a serem avaliados, os aterros tiveram ótimo desempenho. Desta forma, entende-se que os quesitos técnicos, normativos e legais básicos a serem atendidos para o licenciamento, localização, implantação e operação de aterros sanitários estão sendo atendidos de maneira satisfatória.

Quando se analisa os resultados gerados pelo grupo de indicadores econômicos, verifica-se que o CTR São Gonçalo apresenta maior eficiência, com 42 pontos (80%) em 53 possíveis, contra 37 pontos (70%) do CTR Nova Iguaçu. Vale destacar que o grupo econômico é subdividido nos subgrupos "avaliação da disponibilidade de equipamentos mínimos obrigatórios" e "análise de inadimplência". O desempenho do CTR Nova Iguaçu no primeiro grupo foi superior, com 93% de eficiência, contra 80% do CTR São Gonçalo.

Entretanto, em função de, no momento da aplicação da metodologia, ter sido constatada inadimplência entre 5% e 25% nos valores a serem pagos no último semestre, houve uma redução de 23% no desempenho do aterro, impactando no resultado geral do grupo de indicadores. Cabe frisar que, o CTR São Gonçalo estava com apenas 0,75% de inadimplência no período considerado.

Corroborando com Cunha (2019) entende-se que a análise de inadimplência se mostrou uma ferramenta importante para refletir a



realidade da sustentabilidade operacional dos aterros. Quando são analisados esses resultados, verifica-se que, devido à pontuação negativa de seus indicadores, quanto menor for o percentual obtido, melhor é o desempenho do aterro. Esta é uma condição diametralmente oposta à lógica de todos os demais grupos, subgrupos e subáreas de indicadores da metodologia. Por este motivo, entende-se que este quesito deva ser analisado por dois prismas diferentes, percentual de inadimplência e monetário.

Quando são analisados os resultados dos indicadores econômicos por uma perspectiva financeira, verifica-se que a inadimplência no CTR São Gonçalo soma o montante de R\$ 144.534,00 e no CTR Nova Iguaçu R\$ 8.206.200,00. Factualmente, o CTR em melhor condição neste quesito é o CTR São Gonçalo. O CTR Nova Iguaçu apresenta o pior percentual e o valor monetário de dívida (valores a receber) mais expressivo.

Dessa forma, entende-se que a análise de inadimplência deva ocorrer sob os dois prismas mencionados para que seja realizada uma boa verificação da condição de sustentabilidade operacional dos aterros. Há dois pontos a serem considerados nesta temática. O primeiro ponto se refere à constatação de que, apesar da inadimplência, ambos os aterros sanitários apresentaram, em média, um desempenho de 90% no grupo de indicadores técnico-ambientais. Logo, apesar das dificuldades enfrentadas, entende-se que a atuação dos gestores das unidades vem sendo um diferencial na manutenção da qualidade operacional desses aterros sanitários. O segundo ponto refere-se aos problemas derivados da permanência desta inadimplência, sendo certo que este aspecto varia com maior frequência.

Quando se analisa os resultados gerados pelo grupo de indicadores sociais, verifica-se que o CTR Nova Iguaçu apresenta maior eficiência, com 95 pontos (71%) em 133 possíveis, contra 70 pontos (53%) do CTR São Gonçalo. Vale destacar que a avaliação dos indicadores sociais deriva de pesquisa social *in loco*, realizada por intermédio de questionário estruturado de perguntas fechadas, aplicada junto à população residente e domiciliada na área de influência direta do CTR.

Dentre os possíveis impactos negativos, apenas os incômodos devido ao mau cheiro exalado pela disposição dos resíduos (odor) e devido ao material particulado em suspensão proveniente do intenso tráfego de caminhões pelas vias de acesso e/ou operação regular do aterro foram constatados nos dois CTRs. A percepção do odor foi o impacto negativo de maior relevância nos resultados, tendo sido unanimidade entre os entrevistados no CTR São Gonçalo. Em nenhum



dos casos avaliados há relato ou constatação de contaminação de água superficial ou subterrânea através de alteração de cor, odor e/ou sabor do recurso, assim como não há constatação de vetores terrestres (insetos e roedores) nas residências em função das atividades do CTR.

Entende-se que, a partir da análise integrada procedida, ambos os aterros sanitários tiveram desempenhos satisfatórios. Após interpretação dos resultados, acredita-se que haja oportunidade de desenvolvimento de políticas públicas que valorizem aterros sanitários que atinjam maiores níveis de sustentabilidade. Apesar da essência comercial da prestação do serviço por uma empresa privada contratada ou concedida, em ambos os casos há, direta ou indiretamente, a prestação de um serviço público. Algumas iniciativas como a redução de burocracia para a renovação de licenças ambientais bem como a criação de linhas de crédito específicas para o financiamento de expansões, ampliações e construções de novas unidades podem ser uma base para novas políticas públicas para a valorização de CTRs que apresentem maiores níveis de sustentabilidade operacional. Acredita-se que, a adoção de políticas públicas específicas e direcionadas para aumentar a visibilidade e a transparência acerca da sustentabilidade operacional dos aterros de uma dada região e/ou Estado, seja de extrema relevância para a construção de um sistema de gestão integrada de resíduos mais eficiente, e conseqüentemente, mais seguro socioambientalmente.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados gerados e discussões realizadas, acredita-se haver oportunidades, baseando-se no uso no ISOAS, de desenvolvimento de políticas públicas que valorizem aterros sanitários que atinjam maiores níveis de sustentabilidade. Algumas iniciativas como a redução de burocracia para a renovação de licenças, ou a criação de linhas de crédito específicas para o financiamento de expansões, ampliações e construções de novas unidades podem figurar como indutores para a valorização de aterros sanitários mais sustentáveis, fortalecendo e valorizando as boas práticas de gestão de resíduos adotadas.

A adoção de políticas públicas direcionadas para aumentar a visibilidade e a transparência acerca da sustentabilidade operacional dos aterros de uma dada região, é de extrema relevância para a construção de um sistema de gestão integrada de resíduos mais eficiente, e conseqüentemente, mais seguro socioambientalmente. Desta forma, entende-se que a análise integrada do ISOAS em uma região, produzida por um órgão público ou uma organização não



governamental poderia figurar como uma relevante ferramenta para a gestão pública.

A partir da análise dos resultados nos CTRs de Nova Iguaçu e São Gonçalo, acredita-se que a adoção da metodologia ISOAS nas rotinas operacionais tende a propiciar a identificação de problemas crônicos que, quando resolvidos, promovem a elevação do nível de sustentabilidade. Esta ação pode estabelecer um ciclo de melhoria contínua nos aterros avaliados ou em qualquer aterro que utilize a metodologia como instrumento de gestão.

Destaca-se o bom desempenho percebido na avaliação dos indicadores técnico-ambientais dos dois aterros analisados, denotando sintonia e compromisso com as premissas legais e de licenciamento ambiental. Destaca-se ainda a influência da inadimplência na sustentabilidade operacional dos aterros, trazendo incertezas que demandam atenção do Poder Público e das empresas gestoras. Por fim, a partir dos resultados dos indicadores sociais, destaca-se a relevância de uma operação cuidadosa, que valorize as práticas de recobrimento ao menos diário e de umidificação das vias internas e externas que são sobrecarregadas pelo tráfego de caminhões e maquinários pesados ao longo das rotinas operacionais.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13896:1997**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=WWY3NWxzcG83N0hJZFIGR2xmZ0FYNS9iVjBGZjZSSWdQOURxNDRrRDdhND0=>. Acesso em: 02 jan. 2022.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419:1992**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=M013VFhGUFIBR2V2ZWNycVZIK1Z5R0JZcndrN0FOb3ByWFVMIJEOHY3QT0=>. Acesso em: 02 jan. 2022.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019>. Acesso em: 02 jan. 2022.
- BELL, Simon; MORSE, Stephen. **Sustainability Indicators**: Measuring the immeasurable? 2. ed. London: Earthscan, 2008. Disponível em: [https://www.u-cursos.cl/ciencias/2015/2/CS06067/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=1210909](https://www.u-cursos.cl/ciencias/2015/2/CS06067/1/material_docente/bajar?id_material=1210909). Acesso em: 02 jan. 2022.
- BRASIL. **Decreto nº 11.043**, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: D.O.U. de 14.04.2022, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm). Acesso em: 02 jan. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: D.O.U. de 03.08.2010, p. 3. Disponível em: <http://www>.



planalto.gov.br/ccivil\_03/\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 02 jan. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 01**, de 23 de janeiro de 1986. Estabelece as definições, responsabilidades, critérios básicos e diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília: D.O.U. de 17.02.1986. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=745](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745). Acesso em: 02 jan. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 237**, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre conceitos, sujeição, e procedimento para obtenção de Licenciamento Ambiental, e dá outras providências. Brasília: D.O.U. de 19.12.1997. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/CONAMA%20237\\_191297.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/CONAMA%20237_191297.pdf). Acesso em: 02 jan. 2022.

BRASIL. **Resolução Conama nº 430**, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. Brasília: D.O.U. de 16.05.2011. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=627](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627). Acesso em: 02 jan. 2022.

CUNHA, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**: Múltiplas perspectivas para um gerenciamento sustentável e circular. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2022.

CUNHA, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da. **Proposta de índice de Sustentabilidade Operacional de Aterros Sanitários (ISOAS)**. 2019. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB), Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/16680>. Acesso em: 02 jan. 2022.

CUNHA, Carlos Eduardo Soares Canejo Pinheiro da; RITTER, Elisabeth; FERREIRA, João Alberto. O uso de indicadores de desempenho na avaliação da qualidade operacional dos aterros sanitários do estado do Rio de Janeiro no triênio 2013-2015. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020187467>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/bjFrrCPsptz8tm9jp6MnBts/?lang=pt>. Acesso em: 02 jan. 2022.

PLANARES – **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. [Coordenação Geral de André Luiz Felisberto França e Carlos Roberto Vieira da Silva Filho. Coordenação Técnica de Luiz Gustavo Gallo Vilela; Mariana Miranda Maia Lopes e Ministério do Meio Ambiente]. Brasília: Ministério do Meio Ambiente / Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 31 maio 2022.

SISINNO, Cristina Lucia Silveira; OLIVEIRA, Rosália Maria de. Impacto ambiental dos grandes depósitos de resíduos urbanos e industriais. In: SISINNO, Cristina Lucia Silveira; OLIVEIRA, Rosália Maria de. **Resíduos sólidos, ambiente e saúde**: uma visão multidisciplinar. 3. ed. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2006, p. 59-78.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – Visão Geral Ano de referência 2020**. Brasília: SNIS, dez. 2021. Disponível em: [http://snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_RS\\_SNIS\\_2021.pdf](http://snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf). Acesso em: 12 set. 2022.

UN-Habitat – The United Nations Human Settlements Programme. **World Habitat Day**: Municipal Solid Waste Management, 01 October 2018. Disponível em: [https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/ED\\_Message\\_2.pdf](https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/ED_Message_2.pdf). Acesso em: 02 jan. 2022.



**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO  
BIOGÁS GERADO EM ATERROS  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:  
PANORAMA E PERSPECTIVAS NO BRASIL**

***ENERGY USE OF BIOGAS GENERATED IN  
MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS:  
OVERVIEW AND PERSPECTIVES IN BRAZIL***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

ZANON, Thiago Villas Bôas; BRITO, Danilo Laert Lago. Aproveitamento energético do biogás gerado em aterros de resíduos sólidos urbanos: panorama e perspectivas no Brasil. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

**Thiago Villas Bôas Zanon**

Coordenador de Valorização de Resíduos da Solvi. Engenheiro Ambiental. Mestre em Engenharia Geotécnica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP).

E-mail: tzanon@solvi.com

**Danilo Laert Lago Brito**

Gerente Operacional da Termoverde Salvador. Especialista em Fontes Renováveis de Energia e Eficiência Energética pelo Instituto de Pós-Graduação e Graduação (IPOG). Especialista em Engenharia Elétrica Eletrotécnica pela Faculdade Anhanguera. Graduado em Gestão de Redes de Computadores pela Unifacs.

E-mail: dbrito@termoverde.com.br

**RESUMO**

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios atuais da humanidade. O setor energético e de gestão de resíduos, com suas devidas proporções, podem participar na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) que causam o aquecimento global. O setor de resíduos já conta com tecnologias para geração de energia a partir de resíduos, como o aproveitamento energético do metano do biogás de aterros sanitários. O presente artigo tem como objetivo avaliar o panorama e perspectivas do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários brasileiros. Tal aproveitamento tem crescido gradualmente nas últimas duas décadas, iniciado em 2004 com a queima centralizada em flares enclausurados associados ao impulsionamento do mercado livre, à obtenção de créditos de



carbono, além do desenvolvimento e maior confiabilidade da tecnologia dos motores à combustão para geração de energia elétrica a partir do metano de aterros. Já no início dos anos 2010 houve o crescimento da queima centralizada do metano do biogás em motores para geração de eletricidade em usinas termelétricas (UTE) e aliada à geração de créditos de carbono, solução que conta atualmente com 31 UTE. Em 2015, surgiram as primeiras plantas de produção de biometano a partir de biogás de aterros, atualmente existindo seis plantas no país em operação, porém sem ainda comercialização ativa de créditos de carbono, mas com a expectativa de em breve haver aprovação pela Nações Unidas (ONU) de metodologia específica para possibilitar a comercialização de tais créditos em moldes similares em flare enclausurado ou em UTE. Há grande expectativa do crescimento de número de UTE e plantas de produção de biometano, instaladas de forma conjunta e operadas de forma híbrida, com parte do biogás direcionado para UTE, parte para produção de biometano, fomentadas também pela expectativa de fortalecimento de mercados de créditos de carbono brasileiro e internacionais. Há perspectiva de futuramente haver consolidação tecnológica e surgimento de plantas que produzam hidrogênio verde a partir de biogás ou biometano de aterros, uma vez que tal produção é considerada como uma energia renovável, limpa e de baixa ou nula emissão de GEE.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Resíduos Sólidos Urbanos. Metano. Biogás. Biometano.

## ABSTRACT

Climate changes are one of the greatest current challenges of humanity. The energy and waste management sector can participate in mitigating emissions of greenhouse gases (GHG) that cause global warming. The waste sector has technologies for energy generation from municipal solid waste (MSW), such as the energy use of methane from landfill biogas (LFG). The main objective of this article is assessing the panorama and perspectives of the energy use of LFG from Brazilian MSW landfills. Such use has grown gradually in the last two decades, beginning in 2004 with a centralized burning in enclosed flares associated with the promotion of the electric market, with carbon credits emission, as well as the development and greater reliability of the technology of combustion engines for energy electricity generation from biogas. Around 2010 there was a growth in the centralized burning of biogas in combustion engines for electricity generation in on-site LFG to energy facilities and allied to the generation of carbon credits, a solution that currently has 31 facilities in Brazil. The first biomethane from LFG started in 2015 and currently there are six facilities in operation in Brazil, waiting for United Nations approval of a specific methodology to enable the carbon credits in same way of flare and LFG to energy facilities. There is a great expectation of growth in the number of LFG to energy and biomethane production facilities, installed together and operated in a hybrid way, with part of the LFG directed to the LFG to energy facility, part for biomethane production facility, also promoted by the expectation of strengthening in Brazilian and international carbon credit markets. It's expected a technological consolidation and the emergence green hydrogen production



facilities from LFG or biomethane, once such production is considered as a renewable, clean and low-cost energy with zero GHG emissions.

Keywords: Sanitary Landfill. Municipal Solid Waste. Methane. Biogas. Biomethane.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o setor energético globalmente tem sofrido mudanças sensíveis, buscando-se que a matriz energética migrasse de forma cada vez mais intensa de fontes fósseis para fontes renováveis. A preocupação em relação às mudanças climáticas foi uma das principais causas para tais mudanças, uma vez que o setor é um dos principais emissores globais de gases de efeito estufa (GEE), sendo responsável por 76% das emissões globais em 2019 (WRI, 2022) e 18% das emissões brasileiras em 2021 (Potenza *et al.*, 2021), além de ser responsável por 40% das emissões antropogênicas de metano (IEA, 2022).

O setor de gestão de resíduos tem grande potencial de contribuição para auxiliar nessa transição energética, uma vez que já conta com tecnologias consolidadas para geração de energia a partir de resíduos (como o aproveitamento energético do metano de biogás de aterros sanitários), também conhecida como valorização energética, consideradas como fontes renováveis e que convergem para o conceito de “Economia Circular”. Os resíduos gerados atualmente pelas atividades antrópicas também contribuem nas emissões globais de GEE, sendo responsáveis por 3% das emissões globais em 2019 (WRI, 2022) e 4% das emissões brasileiras em 2021 (Potenza *et al.*, 2021).

O metano (CH<sub>4</sub>) possui potencial de aquecimento global 28 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), considerando-se um período de 100 anos (Canadell *et al.*, 2021), além de que o metano é responsável por cerca de 30% do aumento da temperatura global desde a Revolução Industrial (IEA, 2022). Desta forma, deve-se priorizar a minimização de sua geração, porém quando gerado deve-se buscar a maximização de sua captação e queima adequada para que seja convertido em dióxido de carbono, reduzindo substancialmente sua contribuição no aquecimento global.

Em muitos países do mundo, independentemente do nível de renda, a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em aterros sanitários está presente em maior ou menor participação (Kaza *et al.*, 2018), havendo geração de metano quando há disposição de matéria orgânica em tais aterros. No Brasil, onde o biogás de aterros em



operação possui tipicamente de 40% a 60% de metano, a captação para aproveitamento do biogás gerado tem crescido gradualmente nas últimas duas décadas, auxiliando na minimização da sua emissão, principalmente devido à viabilidade de geração e venda de energia elétrica, purificação do biogás para geração de biometano e geração de créditos de carbono. Diante de recentes mudanças de regulações do setor energético, bem como os avanços da regulamentação do mercado global de créditos de carbono durante à 26ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP26), em Glasgow, o fortalecimento esperado de mercados voluntários de carbono e os compromissos assumidos por diversos países como o Brasil, além da expectativa de fortalecimento de mercado nacional de venda de créditos, além de outros fatores, prevê-se que o aproveitamento do metano de tais aterros cresça substancialmente no país (UN, 2021).

Este artigo tem por objetivo trazer um panorama do aproveitamento energético do biogás gerado nos aterros brasileiros, bem como avaliar as perspectivas das possíveis rotas tecnológicas para tal aproveitamento, seja para geração de eletricidade, biometano, queima centralizada em flares, geração de créditos de carbono e produção de hidrogênio verde. O aproveitamento do biogás de aterro para evaporação de lixiviado de aterro, já utilizado, porém pouco explorado, não será detalhado neste artigo.

## **2 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS**

O aproveitamento do biogás em aterros sanitários é função das seguintes possibilidades: obrigação normativa ou legal, viabilidade econômica ou por voluntariedade do empreendedor na busca de minimização das emissões de GEE. Na maior parte dos estados brasileiros não há obrigação normativa ou legal para aproveitamento do biogás, exceto no estado de São Paulo. Historicamente o aproveitamento do biogás teve início através da queima em flare buscando a obtenção de créditos de carbono, seguido posteriormente pela geração de eletricidade com biogás. Posteriormente surgiram plantas de biometano gerados a partir de biogás e espera-se que futuramente se torne viável a produção de hidrogênio verde a partir de biogás.

Para a viabilidade econômica da captação e aproveitamento do biogás de aterros sanitários no Brasil sempre foi necessária uma quantidade elevada de resíduos dispostas nos aterros, mostrando que a questão da escala é crítica. O processo de aproveitamento ocorreu,



ao longo dos anos, em aterros que recebessem RSU de regiões metropolitanas ou de diversos municípios (estes conhecidos como “aterros regionais”).

Do total de RSU coletado no Brasil, 60% são dispostos adequadamente em aterros sanitários, enquanto 40% inadequadamente em lixões ou aterros controlados (Abrelpe, 2021). Sabidamente nos lixões e aterros controlados não há controle e captação para aproveitamento do metano gerado, enquanto nos aterros sanitários são utilizadas técnicas para minimização de emissões. Diversos aterros possuem aproveitamento do biogás gerado, sendo praticamente a totalidade deles devido à viabilidade econômica. No entanto, o número de aterros com tal aproveitamento representa um percentual relativamente baixo perante uma grande quantidade de aterros sanitários em operação, 766 aterros no total (Abetre, 2020).

Independentemente da forma de disposição final de RSU, ambientalmente adequada ou não, há geração de GEE, uma vez que 45,3% dos RSU brasileiros são formados por matéria orgânica (PNRS – Decreto nº 11.043/2022) que é diretamente relacionada à geração de GEE.

No Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Decreto nº 11.043/2022) são estabelecidas metas graduais que direta ou indiretamente proporcionarão uma redução nas emissões de GEE na gestão de RSU: eliminação da disposição final ambientalmente inadequada até 2024, tratamento biológico; tratamento térmico; e utilização do biogás de digestão anaeróbia e de aterros sanitários.

Considerando a existência no Brasil de 2.565 lixões e aterros controlados (Abetre, 2020), para os quais se propõe que seria necessária a utilização de 740 aterros sanitários existentes e a implantação de 171 aterros novos para eliminarem a disposição final ambientalmente inadequada (Abetre, [2021]), há um grande potencial de aumento do aproveitamento do biogás gerado de curto a longo prazo.

## 2.1 GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

O primeiro grande movimento global buscando limitar os efeitos das mudanças climáticas ocorreu com a criação do Protocolo de Kyoto, em 1997 (promulgado no Brasil pelo Decreto nº 5.445/2005), em âmbito da ONU, gerando um compromisso comum aos países signatários em reduzir as emissões de GEE. Um dos mecanismos que visava tal redução é o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), voltado a países em desenvolvimento. Foi a partir daí que o



aproveitamento energético do metano gerado nos aterros começou a receber os chamados Certificados de Emissões Reduzidas (CER) por cada tonelada métrica de CO<sub>2</sub> não emitida, reduzida ou sequestrada, também conhecidos como “créditos de carbono”, surgindo um ambiente denominado de “Mercado de Carbono”, que permitia a comercialização com movimentações financeiras destes créditos, para projetos, instituições e países, viabilizando assim que os integrantes do tratado cumprissem as suas metas voluntárias em âmbito do referido Protocolo ou em mercados voluntários.

Para a emissão dos CER aplicados ao aproveitamento do metano de aterros, foram sendo formuladas e submetidas metodologias específicas para aprovação em âmbito da ONU. Tais metodologias descreviam procedimentos de cálculo a serem aplicados para estimar a redução da emissão de GEE do projeto, assim como os aspectos de monitoramento que garantissem que os proponentes dos projetos quantificassem efetivamente a redução das emissões (Abrelpe, 2013).

Inicialmente foram propostas metodologias para redução de emissões de metano de aterros em flares enclausurados, o que explica que os primeiros projetos com emissões de créditos de carbono aplicados a aterros sanitários brasileiros tenham sido referentes à queima de metano em tais tipos de flare. A partir de 2008, novas propostas de metodologias para queima em UTE a partir de metano de aterros sanitários foram feitas, sendo que a metodologia específica consolidada foi aprovada em 2012, fomentando e auxiliando na viabilização da implantação de tais UTE associadas à emissão de CER, incluindo no Brasil. Atualmente, para CER associados à produção de biometano, metodologias estão em avaliação pela ONU, sendo esperado que em breve sejam aprovadas.

Existem dois tipos de mercado de carbono: o primeiro é o chamado “mercado regulado”, com transações decorrentes de exigências de cumprimento de restrição normativa em âmbito internacional, regional, nacional ou local, como foi o criado pelo Protocolo de Kyoto e o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS); já o segundo, chamado de “mercado voluntário”, cujas transações decorrem de uma livre decisão do comprador, destacando-se atualmente Verra e Gold Standard (GS).

Paralelamente ao mercado de carbono associado aos Protocolos de Kyoto e aos demais que se seguiram a ele, surgiram também os chamados “mercados voluntários”, sendo que em alguns deles são utilizadas metodologias da ONU, em outras são utilizadas



metodologias próprias e certificadoras independentes. Os mercados voluntários são criados por iniciativas de países, cidades ou empresas, de forma voluntária, buscando a descarbonização de suas economias e atividade.

O Protocolo de Kyoto, assinado em 1997, entrou em vigor em 2005. Apesar de ter prazo de duração até 2020, diante das dificuldades de negociação entre países na aplicação de compromissos obrigatórios de redução de emissões por países mais industrializados e em transição, o Protocolo acabou sendo substituído antecipadamente, em 2015, pelo Acordo de Paris (promulgado no Brasil pelo Decreto nº 9.073/2017), mas sem uma definição de como as contribuições de cada país seriam alcançadas, calculadas ou reportadas, nem de como os mercados de carbono funcionariam, esfriando assim o mercado de carbono em âmbito da ONU, aumentando o interesse dos geradores de créditos de carbono por mercados voluntários.

Em 2021, foi criado o Acordo de Glasgow, onde foi finalizado o chamado "livro de regras" do Acordo de Paris, permitindo a criação de um novo mercado de carbono cujas regras básicas foram definidas por decisão consensual entre os países envolvidos. O Acordo abriu a possibilidade de transferência de Redução Certificada de Emissão (RCE) entre países, incentivando o setor privado a investir em soluções para redução das emissões. Espera-se que, ainda em 2022, na 27ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP27), a ser realizada no Egito, os países participantes estabeleçam metas para redução de suas emissões e que sejam ambiciosas, de forma a minimizar o aquecimento global para patamares aceitáveis. Além disto, como reflexo dessas possíveis metas ambiciosas, espera-se que seja impulsionado um novo e duradouro mercado de carbono internacional com preços atrativos.

O Brasil já conta com programas de redução de emissões. Um deles é o Programa de Certificação de Energia Renovável, que emite créditos (REC = *Renewable Energy Credits / Renewable Electricity Certificates*) para geradores de energia renovável e que permite a comercialização dos créditos com consumidores de energia interessados em comprovar um consumo de energia mais renovável. Tal Programa já emite créditos, ainda num ambiente sem obrigação, de forma voluntária, com preços de créditos ainda considerados baixos, mas com perspectiva a médio e longo prazo com preços mais altos (EPE, 2020).



Também foi estruturado no país o mercado de emissão primária de Créditos de Descarboxinação (CBIO), nos termos da Resolução ANP nº 802/2019, sendo que as distribuidoras de combustíveis deverão comprovar o cumprimento de metas individuais compulsórias por meio da compra de CBIO, ativo financeiro negociável em bolsa, derivado da certificação do processo produtivo de biocombustíveis com base nos respectivos níveis de eficiência alcançados em relação a suas emissões, o que pode fomentar a produção de biometano.

Atualmente nos aterros brasileiros em que há queima centralizada do biogás, seja em flare ou UTE, os créditos de carbono gerados têm sido vendidos em mercados voluntários, porém espera-se que com um novo acordo internacional em âmbito da ONU, com a pressão da sociedade e instituições pela descarboxinação da economia, além do fortalecimento de programas de redução de emissões no Brasil, têm-se como perspectiva o aumento do aproveitamento energético do biogás em aterros no Brasil fomentados pelos mercados "de carbono".

## 2.2 QUEIMA CENTRALIZADA EM FLARE

Uma das alternativas para minimização da emissão de metano em aterros é através da queima centralizada em flares, que podem ser abertos ou enclausurados:

- ♦ *Abertos* se caracterizam pela queima dos gases ocorrer diretamente no ambiente fora da extremidade superior do flare, com ausência assim de controle e da eficiência das condições de queima;
- ♦ *Enclausurados*, conforme exemplo da Figura 1, a queima ocorre internamente no flare, com uma elevada eficiência de combustão do metano (acima de 99%) devido a se propiciar tempo mínimo, temperatura adequada e entrada controlada de oxigênio, além de possibilitar o monitoramento contínuo das variáveis do processo de combustão, como a composição do biogás, a temperatura e a vazão.

Uma vez que para geração de créditos de carbono do metano do biogás de aterros sanitários é imprescindível que se possa monitorar as vazões de entrada e saída dos gases da combustão, no Brasil sempre se optou pela queima centralizada em flares enclausurados, já que a queima centralizada não é obrigatória em âmbito nacional, exceto no estado de São Paulo, onde a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em interpretação do



Decreto nº 59.113/2013, têm exigido o aproveitamento do metano para licenciamento da implantação de novos aterros ou de ampliações de novas fases de aterros.

Figura 1 – Flare enclausurado em aterro sanitário da Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos (CRVR) em São Leopoldo – Rio Grande do Sul



Fonte: Fotografia de Thiago Zanon (2021).

Mesmo em aterros sanitários onde há geração de energia a partir do metano, há a utilização de flares para queima do excedente de metano captado que não é encaminhado para a UTE, mas também para manter a queima do metano quando ocorrem paradas operacionais de parte ou a totalidade do conjunto de motores da UTE. Quando ocorrem tais paradas, um dos motivos para o envio para queima em flare também deve-se à possibilidade de manter a geração de créditos de carbono.



Os primeiros aterros sanitários no Brasil em que houve a queima centralizada em flare foram motivados pela emissão de créditos de carbono dentro do MDL do Protocolo de Kyoto, sendo que o primeiro aterro a ter créditos emitidos foi o Aterro Metropolitano Centro (AMC) localizado em Salvador/Bahia, referente à queima do biogás realizado desde 2004. Na sequência houve diversos outros aterros que instalaram flares, porém no início da década de 2010 observou-se um aumento da instalação de UTE para geração de energia elétrica, atividade que também permite a geração de créditos de carbono.

### **2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

O Brasil sempre se caracterizou por possuir uma matriz elétrica baseada em fontes renováveis, destacando-se a participação da geração de energia hídrica na matriz, ou seja, com elevada dependência das fontes hídricas para a produção de eletricidade. Nas últimas décadas, o país tem experimentado risco de desabastecimento elétrico atrelado principalmente a fatores climáticos, porém essencialmente resultante de uma série de fatores políticos, econômicos e ambientais que permeiam o modelo elétrico, os quais culminaram na crise energética ocorrida em 2001.

Para mitigar os riscos da matriz energética brasileira, intensificou-se a busca pela diversificação das fontes energéticas, buscando-se priorizar outras fontes essencialmente renováveis (limpas) com grande potencial e abundantes no país, como as fontes solar, eólica e biomassa. A energia gerada a partir de biogás de resíduos é considerada como fonte de geração a partir de biomassa.

A maioria dos projetos de aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica em UTE existentes atualmente foram fomentados pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFRA) criado pelo Governo Federal de 2002, sendo o Programa considerado um marco regulatório que promoveu o crescimento da tecnologia nos anos 2000 e 2010. O Programa trouxe o chamado benefício da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão (TUST), permitindo desconto nas tarifas de uso dos sistemas de distribuição e transmissão para fomentar o desenvolvimento e a inserção de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, quando seus preços não eram competitivos na época. As fontes de energia renováveis associadas a tal benefício ficaram conhecidas como “fontes incentivadas”.

Neste contexto, também houve um movimento público para incentivar o crescimento ainda maior do chamado “mercado livre”,



caracterizado pela negociação livre entre fornecedores, comercializadores e consumidores em todo o sistema interligado nacional para grandes consumidores de eletricidade. Especificamente para o aproveitamento de biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica, várias UTE à biogás, a maioria em aterros localizados em regiões metropolitanas, foram implantadas motivadas por condições conjunturais mais atrativas, como o incentivo para impulsionamento do mercado livre, a aprovação na mesma época em âmbito da ONU de metodologia específica para geração de CER, criando uma receita acessória decorrente da venda dos créditos, além de desenvolvimento e maior confiabilidade da tecnologia dos motores à combustão para geração de energia elétrica a partir do metano de aterros. O primeiro aproveitamento do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica ocorreu em 2004 no aterro sanitário Nova Gerar, em Nova Iguaçu/Rio de Janeiro (Nascimento *et al.*, 2019).

Além do fomento ao mercado livre, em 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa Aneel nº 482 que criou a chamada "microgeração e minigeração distribuída", uma das modalidades da chamada "geração distribuída". Neste modelo, a energia elétrica pode ser utilizada desde que o gerador injete a eletricidade na rede da distribuidora, possibilitando a compensação dos créditos em outras unidades consumidoras dentro da área de concessão da mesma distribuidora.

O empreendedor responsável pelo investimento da planta de geração de eletricidade e pela sua operação pode destinar essa eletricidade para unidades consumidoras do Poder Público ou outros consumidores comerciais, e ser remunerado por isso. Para o cliente, a escolha dessa solução deve proporcionar uma redução dos gastos com eletricidade comparada com a compra via distribuidora, devendo, assim, o empreendedor fornecer um "desconto" em relação ao fornecimento convencional.

A geração distribuída é reconhecida por uma maior remuneração e os contratos possuem prazos menores (EPE, 2019). Para as fontes renováveis de energia elétrica, incluindo as UTE à biogás de aterros sanitários, a potência máxima estabelecida para a minigeração distribuída é de 5 MW, fomentando o aproveitamento energético a partir de biogás em aterros fora de regiões metropolitanas, em aterros regionais, conforme exemplificado na Figura 2.

Diante do grande crescimento do mercado livre, o Governo Federal decidiu recentemente pelo fim gradual dos benefícios na



TUSD/TUST para fontes incentivadas, através da Lei nº 14.120/2021, por entender que os subsídios não mais se justificavam. Posteriormente, foi promulgada a Lei nº 14.300/2022, criando o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, aperfeiçoando a Resolução Normativa Aneel nº 482/2012 e estabeleceu o fim gradual dos benefícios na TUSD/TUST para fontes incentivadas conforme prazos estabelecidos; especificamente para microgeradores e minigeradores que protocolarem solicitação de acesso na distribuidora em até doze meses da publicação da Lei, ainda poderiam contar com os benefícios na TUSD/TUST.

Figura 2 – Usina termelétrica de geração de energia a partir de biogás de aterro sanitário em Santa Maria/Rio Grande do Sul, com potência instalada de 1 MW.



Fonte: Biotérmica Energia S/A ([2022]).

Atualmente, no Brasil, existem 31 usinas termelétricas em operação aproveitando o biogás gerado nos aterros sanitários que vendem energia elétrica, possuindo o total de potência outorgada de 225 MW e de potência fiscalizada de 213 MW (Aneel, 2022).



Devido às mudanças regulatórias nas fontes incentivadas, houve a criação de um ambiente de menor atratividade para geração de eletricidade, particularmente de UTE à biogás de aterros sanitários para novas outorgas ou registros, estimulando um ambiente mais atrativo para aproveitamento do biogás de aterro para a produção de biometano. Há expectativa que UTE à biogás de aterros sejam implantadas nos próximos anos, mas que também passem a ser desenvolvidas plantas híbridas nos aterros que já contam com tais termelétricas, com parte do biogás direcionado para tais UTE, parte para produção de biometano, escolhendo-se a quantidade de aproveitamento do metano para cada opção face às melhores condições econômicas na época.

## 2.4 PRODUÇÃO DE BIOMETANO

Uma das alternativas para aproveitamento do potencial do metano do biogás de aterros que vêm crescendo no Brasil e no mundo é através da purificação do biogás objetivando a elevação do seu poder calorífico para patamares de composição próxima ao do gás natural (GN), gerando o chamado biometano.

O biometano pode ter como aplicação o uso veicular, instalações residenciais, industriais e comerciais, além de geração de energia elétrica. A purificação do biogás de aterro eleva o teor de metano em sua composição, reunindo assim características que possibilitam ser intercambiável com o GN em todas as suas aplicações, com potencial para ser injetado em gasodutos, transportado na forma de gás comprimido por meio de caminhão-feixe ou na forma de gás liquefeito, denominado biometano liquefeito (Bio-GNL).

Para processamento de biometano a partir do biogás são necessárias duas etapas: na primeira, de limpeza, são utilizadas tecnologias que removem contaminantes; já na segunda, de purificação, são aplicados processos para ajustar as concentrações dos diversos componentes aos valores exigidos pelos dispositivos legais que regulam a qualidade do biometano.

As tecnologias mais empregadas em escala comercial para limpeza e purificação do biometano são a separação por membrana, absorção física, absorção química, absorção por balanço de pressão (*Pressure Swing Adsorption* – PSA) e lavagem com água pressurizada (*Pressured Water Scrubbing* – PWS) (Coelho *et al.*, 2018).

Diante das recentes mudanças regulatórias no segmento de energia elétrica para fontes renováveis e criação de condições mercadológicas que obrigam uma interdependência do mercado de



combustíveis fósseis e fomentos no mercado combustíveis "verdes", a produção de biometano em aterros, inicialmente usada em escalas menores para autoconsumo, e projetos com utilização dedicada ou vendas direta tiveram sua escala amplificada quando a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) fixou regras de controle de qualidade do combustível de aterros pela Resolução ANP nº 685/2017; e, estabeleceu o exercício da atividade pela Resolução ANP nº 734/2018, resoluções atualmente em processo de revisão.

Paralelamente, para tornar mais atrativo e previsível o processamento de biometano, que esbarrava num mercado sem contratos, "spot", situação que dificultava financiamentos para construção das instalações, foi promulgada a Lei nº 13.576/2017, que versou sobre a Política Nacional de Biocombustíveis e estabelece metas de descarbonização da matriz energética do setor de transportes (EPE, 2019). Também houve avanço significativo na indústria automobilística para produzir veículos não somente leves, mas pesados movidos a gás, aumentando o potencial de aplicação do biometano, sem grandes variações construtivas tecnológicas.

Com condições conjunturais mais atrativas iniciou-se recentemente uma transição tecnológica natural com crescimento da purificação do biogás de aterro com foco na injeção em redes de GN, potencializando uma solução híbrida onde parte do biogás também é utilizado para geração de energia elétrica, resultando em um ponto de equilíbrio entre os dois processos de beneficiamento e, conseqüentemente, em um cenário energético-comercial ideal, quando as tecnologias se complementam e trazem flexibilidade mercadológica. Há ainda a expectativa de, em breve, ser aprovada metodologia para emissão de CER de produção de biometano de aterros, que aumentará ainda mais a atratividade de sua produção.

Os primeiros aterros com geração de biometano iniciaram a produção para mistura com o gás natural: o primeiro foi no aterro de Gramacho, no Rio de Janeiro/RJ, cujo biometano era enviado para uma refinaria de petróleo; na sequência, em aterro em São Pedro da Aldeia/RJ, para envio a uma rede de supermercados em Itaguai/RJ (Nascimento *et al.*, 2019).

Atualmente existem seis aterros sanitários com plantas com produção de biometano, das quais quatro das plantas produzem biometano como aplicação principal (em Fortaleza/Ceará; em São Pedro da Aldeia e em Seropédica, no Rio de Janeiro e em São Paulo/SP) e duas das plantas produzem biometano como aplicação



secundária (Cariacica/Rio Grande do Sul e Chapecó/Santa Catarina), ou seja, nestas é destinada a maior parcela do biogás para gerar energia elétrica (CIBiogás, 2021; 2022b).

Para os próximos anos é esperada a construção de novas plantas de produção de biometano em aterros. Um dos entraves até pouco tempo à expansão da produção de biometano deve-se à restrita malha da rede de gasodutos de distribuição de GN pelo Brasil, entrave este que pode ser superado de forma pontual, quando possível, quando transportado na forma de gás comprimido por meio de caminhão-feixe ou na forma de gás liquefeito. Porém com a recente criação do novo Marco Regulatório do Gás Natural pela Lei nº 14.134/2021 e pelo Decreto nº 10.712/2021, houve incentivo para criação de novos gasodutos, o que deve fomentar ainda mais a produção de biometano em locais próximos à novos gasodutos que surgirão.

## 2.5 HIDROGÊNIO VERDE

O hidrogênio verde, a mais recente das tecnologias, ainda incipiente em escala comercial, consiste em um modal de “purificação” para aproveitamento do biogás. É mais complexo tecnologicamente que o biometano e com grande relevância em aproveitamento energético.

É considerado um combustível do futuro pelo grande potencial energético, abundância, eficiência e baixa toxicidade, já sendo amplamente utilizado como opção em diversos países. É empregado em refinarias de produção de derivados de petróleo, em siderúrgicas e na produção de amônia. Por suas características renováveis e de baixa ou nula emissão de GEE, o hidrogênio verde tem ganhado destaque na produção de energia elétrica. No Brasil o hidrogênio já é produzido por meio da reforma a vapor do gás natural (CIBiogás, 2022a).

Uma das formas de produção de hidrogênio verde é via utilização de biogás como insumo, tendo duas rotas tecnológicas: uma direta, via biogás *in natura*, o qual, por se tratar de um composto rico em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, possui versatilidade para utilização para transformar o biogás em gás síntese (um gás composto essencialmente por monóxido de carbono e hidrogênio) e, subsequentemente, na sua purificação em hidrogênio verde; na outra rota utiliza-se o biometano, que passa por novo processo de purificação para produção do hidrogênio verde (CIBiogás, 2022a).

Para que o hidrogênio verde à base de biogás de resíduos possa se tornar realidade no Brasil, é essencial criação de legislação e marco regulatório para estabelecer as regras para produção,



armazenamento e transporte deste combustível para usos energéticos e não energéticos.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil possui um histórico de aproveitamento do metano de aterros sanitários iniciado há cerca de duas décadas, iniciado com a queima centralizada em flare associada à obtenção de créditos de carbono, posteriormente com queima em motores para geração de energia elétrica e sua venda. Há expectativa de que num futuro próximo haja um salto tecnológico para o aproveitamento do metano através da produção de hidrogênio verde, devido aos grandes benefícios atrelados, como baixa ou nula emissão de GEE.

O panorama nacional mostra um potencial promissor e sinérgico com o momento mundial, onde os produtos e subprodutos do processo de produção de biometano, incluindo a energia elétrica, créditos de carbono e energia térmica, são de elevada demanda. Mesmo com as recentes legislações que tornaram menos atrativa a geração de eletricidade em UTE à biogás de aterros, há grande expectativa do crescimento de número de UTE e plantas de produção de biometano operadas de forma híbrida.

Devido às metas de erradicação de lixões e aterros controlados do Plano Nacional de Resíduos, muitos dos RSU destinados em lixões e aterros controlados passarão a ser destinados em aterros atualmente existentes e em novos a serem criados, o que aumentará as oportunidades de aproveitamento do metano, mesmo que haja metas para reduzir a quantidade de resíduos orgânicos dispostos em aterros.

O histórico de aterros com aproveitamento do metano mostra que ocorrem em aterros de regiões metropolitanas e naqueles regionais, evidenciando a importância da escala para viabilizar tal aproveitamento e de se buscar soluções regionalizadas.

Atualmente nos aterros brasileiros em que há queima centralizada do biogás, seja em flare ou UTE, os créditos de carbono gerados têm sido vendidos em mercados voluntários. Porém, com um novo acordo internacional em âmbito da ONU, com a pressão da sociedade e instituições pela descarbonização da economia, além do fortalecimento de programas de redução de emissões e mercados de venda de créditos no Brasil, espera-se um aumento do aproveitamento energético do biogás em aterros no Brasil, trazendo uma diversificação mais expressiva da matriz energética nacional, com uma importante contribuição do setor de resíduos para minimização das emissões de GEE.



## REFERÊNCIAS

- ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes. **Atlas da destinação final de resíduos** – Brasil 2020. Disponível em: <https://abetre.org.br/atlas-brasil/>. Acesso em: 24 ago. 2022.
- ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos e Efluentes. **Regionalização**. [2021]. Disponível em: <https://abetre.org.br/regionalizacao-3/>. Acesso em: 22 set. 2022.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos**. São Paulo: ABRELPE, 2013. Disponível em: [https://abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/atlas\\_brasileiro.pdf](https://abrelpe.org.br/pdfs/publicacoes/atlas_brasileiro.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 22 set. 2022.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa Aneel nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. D.O., 19.04.2012, p. 53. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Sistema de informações de geração da ANEEL SIGA**. Publicado em: 11.02.2022. Atualizado em: 14.10.2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 23 out. 2022.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 685**, de 29 de junho de 2017. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. D.O.U. de 30.06.2017. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=345545>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 734**, de 28 de junho de 2018. Regulamenta a autorização para o exercício da atividade de produção de biocombustíveis e a autorização de operação da instalação produtora de biocombustíveis. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-734-2018-regulamenta-a-autorizacao-para-o-exercicio-da-atividade-de-producao-de-biocombustiveis-e-a-autorizacao-de-operacao-da-instalacao-produtora-de-biocombustiveis>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 802**, de 05 de dezembro de 2019. Estabelece os procedimentos para geração de lastro necessário para emissão primária de Créditos de Descarbonização, de que trata o art. 14 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e altera a Resolução ANP nº 758, de 23 de novembro de 2018. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-802-2019-estabelece-os-procedimentos-para-geracao-de-lastro-necessario-para-emissao-primaria-de-creditos-de-descarbonizacao-de-que-trata-o-art-14-da-lei-no-13-576-de-26-de-dezembro-de-2017-e-altera-a-resolucao-anp-no-758-de-23-de-novembro-de-2018?origin=instituicaohttps://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-802-2019-estabelece-os-procedimentos-para-geracao-de-lastro-necessario-para-emissao-primaria-de-creditos-de-descarbonizacao-de-que-trata-o-art-14-da-lei-no-13-576-de-26-de-dezembro-de-2017-e-altera-a-resolucao-anp-no-758-de-23-de-novembro-de-2018>



primaria-de-creditos-de-descarbonizacao-de-que-trata-o-art-14-da-lei-no-13-576-de-26-de-dezembro-de-2017-e-altera-a-resolucao-anp-no-758-de-23-de-novembro-de-2018?origin=instituicaoagislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2019/dezembro&item=ranp-802-2019. Acesso em: 12 out. 2022.

BIOTÉRMICA Energia S/A. **Site institucional**. [2022]. Disponível em: <https://biotermicaenergia.com.br/>. Acesso em: 23 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 5.445**, de 12 de maio de 2005. Promulga o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. D.O.U. de 13.05.2005, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2005/decreto/d5445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/decreto/d5445.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 9.073**, de 05 de junho de 2017. Promulga o Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, celebrado em Paris, em 12 de dezembro de 2015, e firmado em Nova Iorque, em 22 de abril de 2016. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/D9073.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 10.712**, de 02 de junho de 2021. Regulamenta a Lei nº 14.134, de 08 de abril de 2021, que dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2021/decreto/D10712.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/D10712.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 11.043**, de 13 de abril de 2022. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. D.O.U. de 14.04.2022, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 13.576**, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. D.O.U. de 27.12.2017, p. 4. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.120**, de 01 de março de 2021. Altera a Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, a Lei nº 5.655, de 20 de maio de 1971, a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, a Lei nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, a Lei nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013, a Lei nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015, e o Decreto-Lei nº 1.383, de 26 de dezembro de 1974; transfere para a União as ações de titularidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) representativas do capital social da Indústrias Nucleares do Brasil S.A. (INB) e da Nuclebrás Equipamentos Pesados S.A. (Nuclep); e dá outras providências. D.O.U. de 02.03.2021, p. 3. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2021/lei/l14120.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14120.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.134**, de 08 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição Federal, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; altera as Leis nºs 9.478, de 06 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999; e revoga a Lei nº 11.909, de 04 de março de 2009, e dispositivo

da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. D.O.U. de 09.04.2021, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2021/Lei/L14134.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14134.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.300**, de 06 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. D.O.U. de 07.01.2022, p. 4. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm). Acesso em: 12 out. 2022.

CANADELL, Josep G.; MONTEIRO, Pedro M. S.; COSTA, Marcos H.; CUNHA, Leticia Cotrim da; COX, Peter M.; ELISEEV, Alexey V.; HENSON, Stephanie; ISHII, Masao; JACCARD, Samuel; KOVEN, Charles; LOHILA, Annalea; PATRA, Prabir K.; PIAO, Shilong; ROGELJ, Joeri; SYAMPUNGANI, Stephen; ZAEHLE, Sönke; ZICKFELD, Kirsten. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks Supplementary Material. In: MASSON-DELMOTTE, Valérie; ZHAI, Panmao; PIRANI, Anna; CONNORS, Sarah L.; PÉAN, Clotilde; CHEN, Yang; GOLDFARB, Lean; GOMIS, Melissa I.; MATTHEWS, J. B. Robin; BERGER, Sophie; HUANG, Mengtian; YELEKÇI, Ozge; YU, Rong; ZHOU, Baiquan; LONNOY, Elisabeth; MAYCOCK, Thomas K.; WATERFIELD, Tim; LEITZELL, Katherine; CAUD, Nada. (ed.). **Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge e New York: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter05\\_SM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05_SM.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

CIBIOGÁS – Energias Renováveis. **Hidrogênio verde: qual a perspectiva do biogás para sua chegada ao Brasil? 2022a**. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/hidrogenio-verde-qual-a-perspectiva-do-biogas-para-sua-chegada-ao-brasil/>. Acesso em: 23 out. 2022.

CIBIOGÁS – Energias Renováveis. **Nota Técnica Nº 001/2021 – Panorama do Biogás no Brasil 2020**. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2021. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/nota-tecnica-panorama-do-biogas-2020-nt-01-2021>. Acesso em: 12 out. 2022.

CIBIOGÁS – Energias Renováveis. **Panorama do Biogás no Brasil 2021**. Relatório Técnico nº 001/2022. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2022b. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/download-panorama-do-biogas-no-brasil-2021>. Acesso em: 12 out. 2022.

COELHO, Suani Teixeira. (coord.); GARCILASSO, Vanessa Pecora; FERRAZ JUNIOR, Antônio Djalma Nunes; SANTOS, Marilin Mariano; JOPPERT, Caio Luca. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**: Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo: IEE-USP, 2018. (Série RCGI/USP/SYNERGIA – Gases Combustíveis e Sustentabilidade). Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/sites/default/files/anexosnoticias/livro-tecnologias-producao-uso-biogas-biometano.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Modelos de negócios para a geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos**. Informe Técnico Série SI Energia nº EPE-DEA-IT-003/2020. Brasília: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-492/Informe%20sobre%20Modelos%20de%20Neg%C3%B3cios%20para%20Eletricidade%20de%20Res%C3%ADduos%20EPE-DEA-003-2020.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.



EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial Energético dos Resíduos Urbanos**. Informe Técnico Série SI Energia nº EPE-DEA-IT-007/2019. Brasília: EPE, 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-492/Informe%20Urbano%20EPE-DEA-007-19%20-%20rev.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

IEA – International Energy Agency. **Global Methane Tracker 2022**. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022>. Acesso em: 21 out. 2022.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA, Perinaz; WOERDEN, Frank Van. **What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Worldbank, 24.10.2018. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>. Disponível em: <https://olc.worldbank.org/system/files/What%20a%20Waste%202.0%20Overview.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa; FREIRE, Elcires Pimenta; DANTAS, Francisco de Assis Souza; GIANSANTE, Miguel Bortoletto. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 1, jan./fev. 2019, p. 143-155. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019171125>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/xLRVKFVf9p46XTX563ztCfJ/>. Acesso em: 12 out. 2022.

POTENZA, Renata Fragoso; QUINTANA, Gabriel de Oliveira; CARDOSO, Anderson Matheus (Imaflora); TSAI, David Shiling; CREMER, Marcelo dos Santos; BARCELLOS E SILVA, Felipe (Iema); CARVALHO, Kaccny; COLUNA, Iris (ICLEI); SHIMBO, Júlia; SILVA, Camila; SOUZA, Edriano; ZIMBRES, Bárbara; ALENCAR, Ane (Ipam); ANGELO, Claudio; AZEVEDO, Tasso (Observatório do Clima). **Análise das emissões brasileiras de gases do efeito estufa e suas implicações para as metas de clima do Brasil 1970-2020**. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa – SEEG, 2021. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/produto/analise-das-emissoes-brasileiras-de-gases-de-efeito-estufa-e-suas-implicacoes-para-as-metas-climaticas-do-brasil-1970-2020>. Acesso em: 21 out. 2022.

SÃO PAULO. **Decreto nº 59.113**, de 23 de abril de 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2013/decreto-59113-23.04.2013.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

UN – United Nations Climate Change. **The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26**. UNFCCC, 2021. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3\\_auv\\_2\\_cover%20decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cma3_auv_2_cover%20decision.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

WRI – World Resources Institute. **Climate watch historical GHG emissions**. Washington: WRI, 2022. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 21 out. 2022.



## DESEMPENHO DA COLETA DE BIOGÁS DE ATERRO SANITÁRIO: *STATUS QUO* E PERSPECTIVAS

### *LANDFILL BIOGAS COLLECTION PERFORMANCE: STATUS QUO AND PERSPECTIVES*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus. Desempenho da coleta de gás de aterro sanitário – *status quo* e perspectivas. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus. (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

#### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). *Master in Business Administration* (MBA) em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ); *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); e *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico). Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos temáticos para o PLANSAB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: [christiane@terramelhor.com.br](mailto:christiane@terramelhor.com.br)

#### **Klaus Fricke**

Professor e Doutor em engenharia. Consultor em gestão de resíduos sólidos e recursos com atividades de projetos nacionais e internacionais. Atuou como *Chief Executive Officer* (CEO) e sócio da *Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH*, com equipe de setenta empregados em escritórios na Alemanha, Reino Unido e Luxemburgo. Foi o inventor da coleta seletiva de orgânicos na Alemanha em projeto desenvolvido na cidade de Witzenhausen, em 1983. Atuou no planejamento e implementação de mais de sessenta plantas de compostagem e biodigestão e, ainda, mais de vinte plantas de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). Atuou, por 25 anos, como Diretor do Departamento de Gestão de Resíduos e Recursos na *Technische Universität Braunschweig* (TUBS), tendo como foco de suas atividades a internacionalização da gestão sustentável de resíduos, especialmente no campo da biotecnologia. Com mais de quarenta anos de experiência, é autor em mais de 250 publicações.

E-mail: [klaus.fricke@tu-bs.de](mailto:klaus.fricke@tu-bs.de)



## RESUMO

O sistema integrado de gestão de resíduos, com base nas tecnologias disponíveis atualmente no mercado, sempre demandará a participação dos aterros sanitários, em menor ou maior intensidade em decorrência da rota tecnológica introduzida. Quando se desenvolve uma análise comparativa com outros países, verifica-se que o aterro sanitário é a técnica que predomina na disposição final dos resíduos, apesar de alguns países, principalmente na Europa, já privilegiarem a reciclagem dos materiais e recuperação energética. Esta situação deve perdurar indefinidamente, pois não há tecnologia disponível no mercado que promova 100% de desvio de massa. Dessa forma, vale priorizar a discussão quanto ao desempenho dos sistemas de drenagem e coleta de gases e suas particularidades no mercado brasileiro, bem como as repercussões relacionadas com a mitigação climática.

**Palavras-chave:** Aterro. Gás. Metano. Coleta. Emissões.

## ABSTRACT

The integrated waste management system, based on the technologies currently available in the market, will ALWAYS require the participation of landfills, to a lesser or greater extent depending on the technological route introduced. A comparative analysis with other countries shows that landfill is the predominant technique for the final disposal of waste, despite the fact that some countries, mainly in Europe, already give preference to the recycling of materials and energy recovery. This situation should endure indefinitely, since there is no technology available on the market that promotes 100% mass diversion. Thus, it is worth prioritising the discussion on the performance of drainage and gas collection systems and their particularities in the Brazilian market, as well as the repercussions related to climate mitigation.

**Keywords:** Landfill. Gas. Methane. Collection. Emissions.

## 1 INTRODUÇÃO

As emissões de metano dos aterros de resíduos sólidos urbanos brasileiros são um dos principais contribuintes para a mudança climática. As políticas governamentais brasileiras passaram a considerar formas de reduzir a emissão de gás metano relacionada à disposição final. Entre outras medidas, devem ser formuladas exigências legais mínimas para a captura de biogás em aterro sanitário, estas asseguradas através de técnicas de engenharia e medidas operacionais durante o aterramento dos resíduos.

## 2 FORMAÇÃO DE BIOGÁS

A formação de biogás em aterros sanitários pode ser dividida em nove fases (BCM, 2010; Lua, 2004; Rettenberger; Mezger, 1992). Na



Tabela 1 e na Figura 1 podem ser observadas tanto as fases quanto sua representatividade temporal.

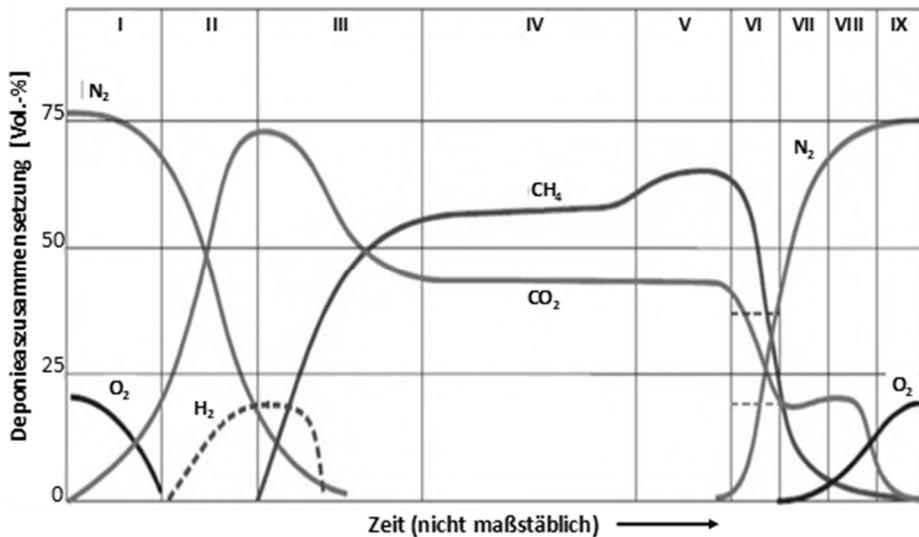
Tabela 1 – Fases de formação de biogás de aterro sanitário

<b>Fases</b>	<b>Condições de contorno</b>	<b>Duração típica</b>
I	Fase aeróbia	Horas até 1 semana
II	Fermentação com ácido anaeróbio, pH baixo, anóxico	1 a 6 meses
III	Fase anaeróbia instável - fermentação em metano	3 meses a 3 anos
IV	Fase anaeróbia estável - fermentação em metano	2 a 40 anos
V	Fase anaeróbia estável - fermentação em metano com concentrações crescentes de CH <sub>4</sub> , relação metano/dióxido de carbono pode alcançar 4.	2 a 40 anos
VI	Fase de penetração do ar: a formação de gás diminui de tal forma que a formação temporária ou o ar pode entrar no aterro sanitário localmente. O conteúdo de metano vai diminuindo, enquanto o teor de dióxido de carbono e nitrogênio aumenta.	até +40 anos
VII	Fase de oxidação do metano, com maior diminuição da penetração do ar de formação de biogás no corpo do aterro sanitário, o CH <sub>4</sub> é oxidado em CO <sub>2</sub> e H <sub>2</sub> O.	até +40 anos
VIII	Fase de dióxido de carbono	até +40 anos
IX	Fase aérea	
Total		10 a +80 anos

Fonte: Elaborada pelos autores (2022) com dados de BCM (2010); Lua (2004); Rettenberger e Mezger (1992).



Figura 1 – Modelo das fases de degradação dos resíduos orgânicos em aterros sanitários



Fonte: Elaborada pelos autores (2022) com dados de BCM (2010); Lua (2004); Rettenberger e Mezger (1992).

A degradação aeróbia das substâncias orgânicas começa imediatamente após a disposição dos resíduos, pois ainda há oxigênio suficiente na superfície dos resíduos e no espaço entre os poros (Fase I). O oxigênio presente no poro é consumido ou deslocado pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Nas áreas onde o oxigênio é completamente removido, a degradação entra na primeira Fase II anaeróbia. Excluem-se as camadas superiores até uma profundidade de 0,4 – 2 m. Esta camada de disposição ainda é formada por um meio aeróbio durante anos devido à difusão de oxigênio atmosférico sobre a superfície. Os produtos finais são  $\text{CO}_2$ , água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e calor resultante da reação química (Rettenberger; Mezger, 1992).

Na segunda etapa, na fermentação ácida, também identificada como fase anóxica, ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono são produzidos através de processos acetogênicos e hidrólise. Quando as moléculas grandes (por exemplo, gorduras, celulose, proteínas) nos resíduos são quebradas, amônia, água e calor também são liberados, de modo que o oxigênio e o nitrogênio presentes no espaço formado pelos poros continuam a diminuir. As bactérias envolvidas neste processo são facultativamente anaeróbias, ou seja, as baixas concentrações de oxigênio não causam a parada



da atividade de degradação. O **CH<sub>4</sub> ainda não está formado nesta fase.**

Durante a Fase III, a **formação do gás metano**, que é relevante para a captura de gás, começa – na Europa Central – após aproximadamente **3 a 6 meses**. Na fase instável do metano, a concentração de CO<sub>2</sub> no biogás do aterro sanitário diminui acentuadamente devido à degradação anaeróbia agora intensificada. Ao mesmo tempo, o conteúdo de CH<sub>4</sub> aumenta acentuadamente devido à alta atividade das bactérias metanogênicas que decompõem os produtos de degradação da fase anterior. Além disso, a água e o calor são liberados.

Na fase estável do metano (Fase IV), as substâncias facilmente degradáveis são decompostas e as concentrações de metano permanecem por longo período na faixa de aproximadamente 60%. No final desta fase, pode-se observar um ligeiro aumento do CH<sub>4</sub> e, ao mesmo tempo, uma ligeira diminuição das concentrações de CO<sub>2</sub>. A proporção de CH<sub>4</sub> para CO<sub>2</sub> é aproximadamente 1,5. A formação de biogás é mais intensa nesta fase, de modo que uma leve pressão interna se forma dentro do corpo do aterro em comparação com a pressão natural do ar, permitindo que o gás escape sem obstáculos sobre a superfície do aterro, a menos que a superfície tenha sido impermeabilizada e a captação passiva de gás tenha sido instalada.

Este ambiente perdura até a próxima fase (Fase V). A concentração de CH<sub>4</sub> está bem acima de 60% com valores de CO<sub>2</sub> correspondentemente mais baixos. A relação CH<sub>4</sub> para CO<sub>2</sub> pode chegar a valores de até 4. Também aqui, a pressão interna no corpo do aterro garante que o gás do aterro escape através da superfície e, assim, impede a penetração do oxigênio atmosférico.

Na Fase VI, a formação de gás diminui fortemente devido à decomposição avançada das substâncias orgânicas, de modo que o ar externo pode entrar lentamente. As concentrações de CH<sub>4</sub> caem para aproximadamente 20 - 40%. Especialmente na área de aterro sanitário, as influências do ar ambiente podem ser determinadas, enquanto dentro do aterro sanitário ainda não é detectável nenhum oxigênio. A taxa de formação de gás diminuiu tanto que a pressão interna também é apenas baixa e, portanto, a descarga através da superfície do aterro também é muito baixa.

Na Fase VII, O<sub>2</sub> penetra cada vez mais no corpo do aterro como resultado da maior diminuição na taxa de formação de gás. CH<sub>4</sub> pode ser oxidado em CO<sub>2</sub>. Isto desloca a relação CH<sub>4</sub> para CO<sub>2</sub> para abaixo de 1. A oxidação do metano procede do exterior para o corpo



do aterro sanitário, de modo que o CH<sub>4</sub> ainda é formado no núcleo do aterro, mas **não** ocorrem mais emissões de CH<sub>4</sub> na superfície do aterro sanitário. Este processo se intensifica na Fase VIII – onde as emissões de CH<sub>4</sub> não são mais registradas.

**A formação e liberação de CH<sub>4</sub> ocorre nas Fases III a VI, contudo, na Fase VI este ocorre apenas em pequenas quantidades e concentrações, denominado assim como gás fraco. A coleta de biogás deve ser planejada segundo estas fases do processo.**

Vale observar que a mensuração da emissão de gás é bastante frágil, entretanto, ainda é possível gerar estimativas mais seguras durante a primeira metade da fase de decomposição, sendo que a segunda metade, essa bastante instável, ocorrerá por longos períodos após o encerramento das atividades operacionais dos aterros, podendo alcançar até 80 anos como demonstrado na Tabela 1. Estas fases são denominadas meia-vida, respectivamente, Half-Life em inglês, e são determinadas segundo o potencial de degradabilidade das frações, veja Tabela 2.

Tabela 2 – Categorias de resíduos segundo potencial de degradabilidade

<b>Categoria de resíduos</b>	<b>Mínima meia-vida</b>	<b>Máxima meia-vida</b>
Resíduos facilmente degradáveis (alimentos e resíduos de jardim etc.)	½ ano	1 ½ ano
Resíduos moderadamente degradáveis (papel etc.)	5 anos	25 anos
Resíduos lentamente degradáveis (frações de resíduos da construção civil e demolição etc.)	10 anos	50 anos

Fonte: Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean (Conestoga-Rovers & Associates, 2004).

Neste sentido, para o clima da Europa Central e especialmente em razão da composição dos resíduos dispostos em aterro, 50% do potencial total de geração de gás a partir da decomposição dos resíduos orgânicos em aterros é estimado entre **5 a 8 anos** (BCM, 2010; Lua, 2004; Rettenberger; Mezger, 1992; Stegmann *et al.*, 2006).

Em climas quentes e úmidos, como os predominantes em grandes partes do Brasil, e especialmente devido à proporção comparativamente alta de componentes de resíduos orgânicos



facilmente degradáveis, é de se esperar um período mais curto, entre **3 a 6 anos**.

A formação de gás e, portanto, sua liberação começa mais cedo em países onde o clima é mais quente. Dessa forma, durante a fase de operação, devido a composição dos resíduos e a condição térmica sua incidência é significativamente maior do que após o encerramento das atividades do aterro. Entretanto, na fase operacional – onde ocorre a disposição constante dos resíduos nas camadas do aterro – a possibilidade técnica de captura de gás é limitada em comparação com a fase após o encerramento do aterro.

### **3 DRENAGEM DE GÁS**

Conhecer a quantidade de gás de aterro que pode realmente ser capturada e recuperada em energia, por exemplo, ou àquela liberada na forma de emissões fugitivas pela superfície do aterro, é essencial para a mensuração da geração de gás de aterro e ao dimensionamento de sistemas de captação e plantas para recuperação energética do metano.

Enquanto a quantidade de gás coletada por sistemas ativos de captação pode ser medida continuamente, a determinação das emissões fugitivas através da superfície do aterro só é possível na prática quando de um grande esforço técnico de medição.

Aspectos decisivos para o sistema de coleta de gás são:

- ♦ Cobertura e impermeabilização da superfície,
- ♦ Sistemas de coleta de gás.

#### **3.1 COBERTURA E IMPERMEABILIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE**

Um elemento importante do aterro sanitário que influencia a eficiência da captura de gás é a cobertura ou impermeabilização da superfície dos aterros, de modo que o tipo de cobertura influencia diretamente a eficiência de captura de gás (3). Para coberturas com solo, deve-se observar que o fluxo de gás é fortemente influenciado pela umidade do próprio solo. Por exemplo, em um solo argiloso, a taxa de captura de gás de um solo seco pode aumentar de 53% para mais de 90% quando o solo está saturado com água.

Na fase de operação, as coberturas devem ser aplicadas diariamente para que índices elevados de coleta sejam alcançados. Neste caso, pode representar um problema a baixa presença de umidade pois tanto os processos aeróbios quanto os anaeróbios precisam de umidade durante os processos biológicos.



Tabela 3 – Taxa de captura de gás para diferentes coberturas de superfície

Cobertura de superfície	Alcance	Média / Padrão
Sem coleta ativa de gás, e sem impermeabilização da superfície	0%*	-
Cobertura de solo diária com coleta ativa de gás	50 - 70%	60%
Cobertura de solo intermediária com coleta de gás	54 - 95%	75%
Impermeabilização de superfície com sistema de argila e/ou geomembrana e coleta ativa de gás	90 - 99%	95%

\* Sem sistema de coleta passiva.

Fonte: Barlaz *et al.* (2009); Reinhart e Barlaz (2010); SCS Engineers (2008).

Existem dois métodos fundamentalmente diferentes para a captura do gás:

- ♦ Captação ativa de gás;
- ♦ Captação passiva de gás.

No primeiro método, uma pressão negativa é estimulada no corpo do aterro sanitário e o gás é ativamente extraído. No segundo método, a pressão do gás acumulada no interior do aterro faz com que o gás flua para a superfície do aterro onde é difundido em uma camada mineral ou em camada de composto para que o metano possa ser oxidado. A vantagem dessa camada de oxidação de metano é a dispensa de energia adicional para o bombeamento do gás, entretanto, só tem eficácia para fluxos baixos de gás. Além disso, ao contrário dos processos ativos, não é possível utilizar o metano para gerar energia.

Dois sistemas de coleta são usados em combinação:

- ♦ Drenos verticais;
- ♦ Drenos horizontais.

A coleta de gás por meio de **drenos verticais** é o método mais comumente utilizado. Por um lado, os drenos podem ser introduzidos posteriormente, ou seja, quando uma camada do aterro já se encontra coberta e finalizada ou mesmo em aterros antigos. Por outro lado, os drenos de gás já podem ser instalados durante a fase de operação do aterro.



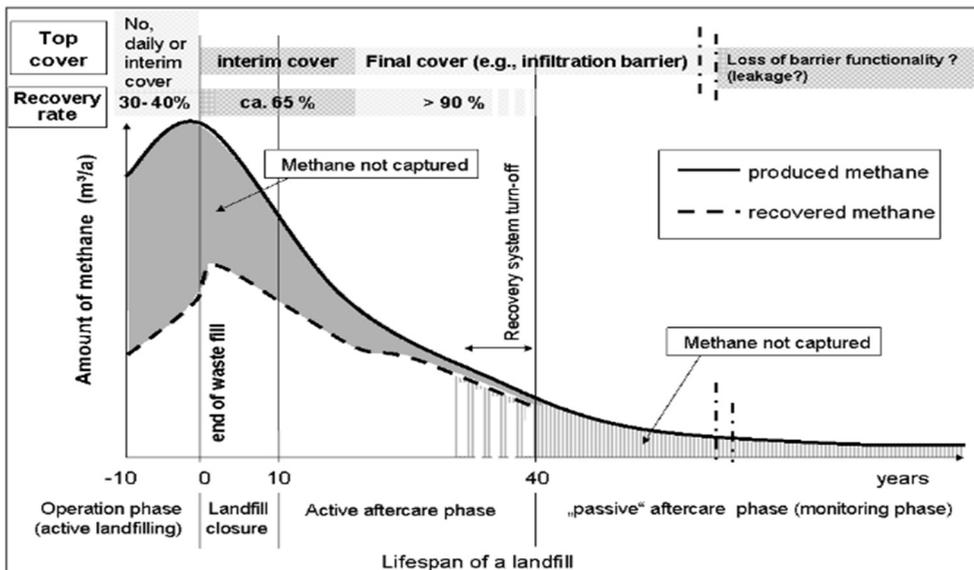
Para reduzir o risco de danos aos drenos durante as operações de instalação, os mesmos devem ser protegidos e sinalizados.

Os **drenos horizontais** são utilizados principalmente durante a fase de implantação, pois permitem a extração abaixo das áreas em operação. A drenagem deve ser colocada na base do aterro e vedada com argila para evitar que o ar externo penetre. A conexão ao tubo coletor de gás deve ser projetada de forma flexível. No entanto, também aqui existe o risco de que o gás seja diluído por ar aspirado. Uma desvantagem é que os tubos podem ser avariados devido a fortes recalques do corpo do aterro ou ainda esmagados devido às altas cargas sobrepostas. Além disso, eles não são adequados para equilibrar o balanço de gás. A fim de evitar o acúmulo de lixiviado, os tubos devem ter uma inclinação na direção do corpo do aterro para que o condensado possa fluir de volta para a massa de resíduos.

#### 4 EFICIÊNCIA DA CAPTURA

A eficiência de captura de gás muda no decorrer das diferentes fases de operação do aterro.

Figura 2 – Produção de metano dependente do tempo e captura ao longo da vida útil de um aterro sanitário em função da cobertura superficial (sem oxidação do metano)



Fonte: Humer-Huber *et al.* (2008).



No início, a produção de gás é muito alta, mas a taxa de captura de gás é baixa porque os sistemas ativos de captura de gás só podem ser operados em uma extensão limitada. Somente após o encerramento da disposição é que a taxa é alta, pois, por um lado, a produção de gás diminui lentamente e, por outro lado, o sistema final de cobertura de superfície é implementado.

Os dados na literatura sobre as quantidades reais de gás CH<sub>4</sub> registradas estão sujeitas a uma variedade de incertezas. A maior incerteza resulta de valores de referência que nem sempre são claramente reconhecíveis. Em particular, a referência ao potencial de formação de gás ou à formação real de gás não é claramente identificável.

As principais emissões de CH<sub>4</sub> acontecem durante o período de operação quando os resíduos são dispostos no aterro.

Os seguintes dados sobre as taxas de captura de gás referem-se à formação real de CH<sub>4</sub>:

- ♦ *Fase de operação do aterro*: 30 - 40% quando da inexistência de cobertura diária;
- ♦ *Fase de operação do aterro*: 40 - 50% quando da existência de cobertura diária;
- ♦ *Fase de carga temporária das células e longo período de repouso*: aproximadamente 65% quando da existência de cobertura temporária;
- ♦ *Fase após a aplicação da impermeabilização final da superfície do aterro*: aproximadamente 90%.

Mesmo em aterros com um alto padrão técnico de captura de gás, apenas **45% do gás do aterro** foi capturado. Para a Áustria, são mencionadas **taxas de captura de 50%**.

Uma revisão bibliográfica aponta taxas de captura que variam de 14 a 95% (BCM, 2010; Bourn *et al.*, 2019; Fathi Aghdam, 2018; Spokas *et al.*, 2006; US EPA, 2008; 2021). Estes dados estão sujeitos a grandes incertezas, principalmente pela fundamentação baseada em estimativas e projeções, e ainda por tomarem como ponto de partida valores de referência formulados ambigualmente, não distinguindo aspectos cruciais de influência, tais como potencial de gás ou potencial de emissão. O período de tempo a que o estudo se refere ou mesmo a fase de operação na qual o gás do aterro foi registrado como valor de referência, também muitas vezes não é claro ou inexistente.

No Brasil, a maior dinâmica de decomposição da matéria orgânica e a formação de gás CH<sub>4</sub> descrita no item 2 e em



consequência o período de decomposição biológica mais curto, provavelmente resultarão em valores **mais baixos**.

No contexto de um estudo encomendado pelo Banco Mundial, foram avaliados os relatórios de 33 projetos Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) para a mitigação do gás de aterro sanitário. Em todos os projetos, as taxas de captura de gás, durante o planejamento dos projetos, foram significativamente menores do que as mensuradas quando da efetiva operação.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma eficiência de captura de gás de aterro está diretamente relacionada com a robustez da infraestrutura disponível e com o período temporal dessa incidência, seja na fase operacional seja na fase pós-encerramento das operações.

Há de se reforçar o papel imprescindível dos aterros sanitários como ferramenta de destinação final, principalmente para àqueles países onde a sustentabilidade econômico-financeira não está garantida bem como enfrentam desafios estruturantes para a introdução dos recursos secundários no mercado.

Isto posto, independentemente da apropriação de técnicas de valorização de resíduos temos o aterro sanitário como protagonista indispensável ao provimento de uma gestão integrada adequada, resultando em último recurso técnico para a disposição final de frações denominadas como rejeitos. O aproveitamento energético do biogás de aterro, quando viável economicamente, poderá representar uma prática para reequilibrar as despesas por meio da geração de receitas acessórias.

Os setores público e privado têm o compromisso, a partir de um diálogo transparente e racional, de desenhar uma melhor solução para garantir um aterramento adequado, com sistemas de coleta e destinação de biogás eficientes, como também, prever práticas que cumpram as premissas de valorização de resíduos previstas no ordenamento jurídico do Brasil.

## REFERÊNCIAS

BARLAZ, Morton A.; CHANTON, Jeff P.; GREEN, Roger B. Controls on Landfill Gas Collection Efficiency: Instantaneous and Lifetime Performance. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 59, n. 12, p. 1399-1404, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1399>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3155/1047-3289.59.12.1399>. Acesso em: 30 ago. 2022.



BCM – BRITISH COLUMBIA MOE, 2010. **Landfill Gas Management Facilities. Design Guidelines**. Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates, Richmond, British Columbia. Disponível em: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/waste-management/garbage/designguidelinesfinal.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

BOURN, M., ROBINSON, R.; INNOCENTI, F.; SCHEUTZ, C. Regulating landfills using measured methane emissions: An English perspective. *Waste Management*, v. 87, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.032>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29937100/>. Acesso em: 12 out. 2022.

CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES. **Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. Energy Sector Management Assistance Programme paper series. Washington, DC: World Bank Group, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/18081> e, em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/18081>. Acesso em: 12 out. 2022.

FATHI AGHDAM, Ehsan. Methane production, recovery and emission from two Danish landfills. Technical University of Denmark, 2018. Disponível em: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/146511197/Thesis\\_online\\_version\\_Ehsan\\_Aghdam.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/146511197/Thesis_online_version_Ehsan_Aghdam.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

HUMER-HUBER, Marion; GEBERT, Julia; HILGER, Helene., 2008. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management and Research**, v. 26, n. 1, p. 33-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X07087977>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/5513044\\_Biotic\\_systems\\_to\\_mitigate\\_landfill\\_methane\\_emissions](https://www.researchgate.net/publication/5513044_Biotic_systems_to_mitigate_landfill_methane_emissions). Acesso em: 12 out. 2022.

LUA, 2004. **Materialien Band 65, Arbeitshilfe Deponiegas**. Konkretisierung der Deponiegasüberwachung gemäß DepSüVO einschließlich Darstellung der eingesetzten Mess- und Auswertverfahren incl. der Fehler- und Grenzwertbetrachtungen. Prepared by G. Rettenberger. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 2004. Disponível em: [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/luamat65\\_web.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/luamat65_web.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

REINHART, Debra R.; BARLAZ, Mort A. Landfill Gas Management: A Roadmap for EREF Directed Research. North Carolina State University and University of Central Florida, 2010.

RETTENBERGER, Gerhard; MEZGER, H. **Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegas –**. Materialien zur Altlastenbearbeitung, 10, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1992. Disponível em: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/29966>. Acesso em: 12 out. 2022.

SCS Engineers. Current MSW Industry Position and State-of-the-Practice on LFG Collection Efficiency, Methane Oxidation, and Carbon Sequestration in Landfills. Prepared for: Solid Waste Industry for Climate Solutions (SWICS), 2008. Disponível em: [https://www.scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Sullivan\\_SWICS\\_White\\_Paper\\_Version\\_2.2\\_Final.pdf](https://www.scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Sullivan_SWICS_White_Paper_Version_2.2_Final.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

SPOKAS, K., BOGNER, J., CHANTON, J.P., MORCET, M., ARAN, C., GRAFF, C., GOLVAN, Y. M. LE, HEBE, I., 2006. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management*, v. 26, n. 5, p. 516-525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.07.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X05002102>. Acesso em: 12 out. 2022.

STEGMANN, Rainer; HEYER, KaiUwe; HUPE, Karsten; WILLAND, Achim. Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien



für die Entlassung aus der Nachsorge, UBA, Förderkennzeichen (UFOPLAN) 204 34 327, 2006.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. **Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills**. Eastern Research Group. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-08/116, 2008. Disponível em: [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NRML&dirEntryId=198363](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRML&dirEntryId=198363). Acesso em: 12 out. 2022.

US EPA – United States Environmental Protection Agency. **LFG Energy Project Development Handbook**, 2021. Disponível em: [www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook](http://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook). Acesso em: 12 out. 2022.





# MINERAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS – É UMA OPÇÃO PARA O BRASIL VISANDO REDUZIR OS IMPACTOS AMBIENTAIS RESULTANTES DA DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS?

## *LANDFILL MINING – AN OPTION FOR BRAZIL AIMED AT REDUCING THE ENVIRONMENTAL IMPACTS RESULTING FROM THE FINAL DISPOSAL OF SOLID WASTE?*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

MÜNNICH, Kai; PEREIRA, Christiane. Mineração de aterros sanitários – é uma opção para o Brasil visando reduzir os impactos ambientais resultantes da disposição final de resíduos sólidos? In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Kai Münnich**

Doutor em Engenharia Civil. Assistente de pesquisa desde 1987 na Technische Universität Braunschweig (TUBS). Professor associado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) no curso de mestrado em engenharia urbana. Professor na TUBS. Responsável pelos módulos de gestão de resíduos na graduação e curso de mestrado “Pró Água”. Líder de grupo de trabalho “Tecnologias de Aterro e Geotécnica” do Instituto Leichtweiss. Responsável pelo Departamento de Laboratório em Geotécnica, Solos, Resíduos e Águas. Ramos de pesquisa: comportamentos hidráulicos em sistemas lineares, resíduos sólidos e solos, comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos (RSU), recalques em aterros, tratamento mecânico-biológico (TMB) de RSU e adaptação de sistemas TMB às condições locais de países em desenvolvimento.

E-mail: k.muennich@tu-bs.de

### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). *Master in Business Administration* (MBA) em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH* (GIZ); *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); e; *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico). Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos



temáticos para o PLANSAB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: [christiane@terramelhor.com.br](mailto:christiane@terramelhor.com.br)

## RESUMO

A disposição de resíduos em lixões ou aterros sanitários tem uma longa história e permanecerá para muitos países durante as próximas décadas a única opção para se livrar dos resíduos. O descarte de resíduos está sempre associado a um impacto ambiental. Muitas vezes, os impactos não podem ser identificados de uma só vez, pois não podem ser observados diretamente. Estes incluem, entre outros, a poluição das águas subterrâneas e superficiais e as emissões de gases, que podem ter um impacto ambiental duradouro. Por outro lado, temos desastres, onde a inclinação de um aterro sanitário desmorona e as massas de resíduos enterram assentamentos e causam vítimas humanas. Estes problemas ocorrem especialmente em aterros sanitários antigos, onde os padrões técnicos são baixos ou inexistentes. Existem diferentes possibilidades para tentar resolver os problemas que ocorrem nos aterros sanitários, uma delas é a denominada mineração em aterros sanitários. A mineração em aterros sanitários, preliminarmente, significa a escavação de todos os resíduos depositados e sua realocação em aterros sanitários que possam oferecer melhores condições ambientais. Uma opção muito melhor é garantir o incremento da atividade de mineração em aterros sanitários, o que significa que após a escavação o foco principal é o tratamento dos resíduos antigos a fim de reciclá-los e reduzir as massas, entretanto frações remanescentes ainda terão que ser dispostas em novos aterros sanitários, já que no momento, ainda há limitação tecnológica para a destinação integral na forma de reciclagem para as frações restantes. Como consequência de uma futura escassez de recursos naturais, bem como um aumento no preço das matérias-primas e energia, a prática de mineração voltada para a captação e processamento das frações recicláveis dos aterros está se tornando cada vez mais objeto de estudos. Neste artigo, a princípio, é dada uma breve visão geral sobre a situação dos resíduos no Brasil. Em seguida, são explicados aspectos gerais da mineração de aterros sanitários abordando suas vantagens bem como desvantagens. Na segunda parte, são apresentados os resultados de um grande projeto de pesquisa realizado na Alemanha. Neste projeto cerca de 8.000 m<sup>3</sup> de resíduos foram escavados de um aterro sanitário e os resíduos foram tratados com diferentes técnicas. O projeto teve como objetivo extrair o máximo de material possível, para seu emprego como matéria-prima secundária ou para fins energéticos. As técnicas utilizadas foram avaliadas sob aspectos ambientais e econômicos. Vale observar que há limitações em transferir para a realidade brasileira os resultados obtidos no projeto realizado na Alemanha, contudo ficará evidente que a tomada de decisão quanto a mineração de aterros demandará embasamento técnico, ambiental e econômico.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Mineração de Aterros Sanitários. Recursos. Meio Ambiente. Clima.



## ABSTRACT

Waste disposal in landfills or dumps has a long history and will remain for many countries for decades to come the only option to waste final destination. Waste disposal is always associated with an environmental impact. Often the impacts cannot be identified all at once as they cannot be directly observed. These include, among others, ground and surface water pollution and gas emissions, which can have a long-lasting environmental impact. On the other hand, we have disasters, where the slope of a landfill collapses and waste masses bury habitations and cause human victims. These problems occur especially in old landfills, where technical standards are low or do not exist at all. There are different possibilities to try to solve the problems that occur in landfills, one of them is called landfill mining. Landfill mining, preliminarily, means the excavation of all the waste deposited and its relocation to landfills that can offer better environmental conditions. A much better option is to ensure the increase of mining activity in landfills, which means that after excavation the main focus is on the treatment of old waste in order to recycle it and reduce masses, however remaining fractions will still have to be disposed of in new landfills, as at the moment there is still technological limitation for full disposal in the form of recycling for the remaining fractions. As a consequence of a future scarcity of natural resources as well as an increase in the price of raw materials, the practice of mining aimed at capturing and processing the recyclable fractions from landfills is becoming an increasing object of study. In this article, at first, a brief overview of the waste situation in Brazil is given. Then, general aspects of landfill mining are explained addressing its advantages as well as disadvantages. In the second part, the results of a large research project carried out in Germany are presented. In this project about 8,000 m<sup>3</sup> of waste was excavated from a landfill site and the waste was treated with different techniques. The project aimed at extracting as much material as possible for use as secondary raw material or for energy purposes. The techniques used were evaluated under environmental and economic aspects. It is worth noting that there are limitations in transferring the results obtained in the project carried out in Germany to the Brazilian reality; however, it will be evident that the decision making regarding landfill mining will require technical, environmental and economic grounding.

**Keywords:** Landfill. Landfill Mining. Resources. Environment. Climate.

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos países para implementar uma gestão sustentável dos resíduos, se deparam com a necessidade de iniciar um processo de transformação onde a intervenção convencional de destinação de resíduos na forma de aterramento, abre espaço para uma implementação gradual de sistemas de valorização de resíduos justificado pela prerrogativa de economia circular.

Independentemente da apropriação de técnicas de valorização de resíduos temos o aterro sanitário como protagonista indispensável ao provimento de uma gestão integrada adequada,



resultando em último recurso técnico para a disposição final de frações denominadas como rejeitos. Reconhecido como atividade de disposição final pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Lei nº 12.305/2010) em seu artigo 3º, inciso VIII,

VIII – disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

O aterro sanitário sempre estará presente em conceitos de gestão de resíduos, sendo a intensidade de sua participação balizada pelas intervenções de valorização de resíduos, que perpassam discussões sobre a preservação de recursos naturais e a proteção do clima, evidenciando a mitigação de impactos ambientais futuros, estes identificados sobretudo após o encerramento do aterro.

Em razão da inafastabilidade de implementar um aterro sanitário ao final de rotação tecnológica, seja aquela que privilegia a reciclagem de materiais seja a que trata termicamente as frações, temos que medidas preventivas e corretivas deverão ser empreendidas tanto na fase de operação de aterro quanto após o seu encerramento.

Neste íterim, discutir os impactos ambientais inerentes às práticas de aterramento que podem ser observadas, tanto na fase de operação quanto na fase de pós-encerramento, são primordiais para compreender que mesmo quando da aplicação das técnicas mais avançadas, durante a operação e fase de encerramento, ainda estas áreas poderão ser enquadradas como passivos ambientais, que demandarão monitoramento e possíveis intervenções de remediação.

Apesar dos aterros sanitários serem teoricamente empreendimentos que utilizam técnicas de engenharia para dispor resíduos de forma correta, o seu uso ainda é uma atividade com alto potencial poluidor, devido à geração do chorume e do biogás que podem contaminar o solo, corpos d'água (subterrâneos e superficiais) e o ar.

Desta forma, o risco de contaminação traz aos empreendimentos de aterro sanitário uma certa insegurança técnica, a ampliação de tempo de monitoramentos ambientais e, conseqüentemente, custos elevados e não previstos.

Estes possíveis impactos reforçam o entendimento de que não basta interromper as atividades do aterro sanitário, será necessário



incutir esforço imediato para reduzir o seu impacto ambiental através de um projeto de encerramento e projeto de remediação.

Estas medidas são onerosas, mas, necessárias para fins de preservar a saúde e a segurança humana, bem como proteger o meio ambiente e representam cerca de 31% do custo total do aterro sanitário segundo FIPE (Sandroni; Cópia, 2017).

De forma geral, no Brasil, a destinação adequada em aterros sanitários no ano de 2020 recebeu 60% dos resíduos sólidos urbanos coletados: 46 milhões de toneladas. O restante (40,5%) foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda estão em operação e receberam quase 40% do total de resíduos coletados (Abrelpe, 2021).

Isto posto temos que compreender que as possibilidades intrínsecas à mineração de aterros têm se mostrado cada vez mais relevante para a mitigação de impactos ambientais e a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos.

## **2 MINERAÇÃO DE ATERROS**

A mineração nos aterros vem sendo aplicada por mais de sessenta anos em diferentes escalas, pelo mundo todo. As razões para a mineração dos aterros têm mudado nas últimas décadas. No passado, os principais objetivos dos projetos de mineração dos aterros eram a remediação dos aterros contaminados e a recuperação de terrenos. A separação das frações de resíduos, antes da disposição final, é raramente executada na prática. Como consequência do esgotamento de nossas reservas de recursos primários, estes se tornarão escassos, provocando um aumento nos preços praticados. Estes aspectos corroboram para a discussão quanto ao processo de mineração dos aterros visando acessar e processar as frações de resíduos recicláveis presentes em seu corpo.

A mineração é pautada na oportunidade de garantir que os resíduos recirculem economicamente, corroborando com o entendimento de que os aterros não são mais espaços de disposição final e sim temporária, ficando os resíduos estocados até que haja um uso sustentável (Ulmans, 2011).

Um diagnóstico das frações presentes no corpo do aterro é o principal fator de influência no que se refere ao balanço econômico e ambiental. Em relação aos materiais recicláveis, o foco está particularmente voltado para a fração calorífica e para os metais. Embora as concentrações de ferro sejam, na maior parte das vezes,



mais elevadas quando comparadas com as concentrações de metais como alumínio ou cobre, a viabilidade econômica da mineração do aterro depende muito mais do conteúdo destes metais porque possuem maiores preços de mercado. Os elementos raros, apesar de suas concentrações muito baixas, algumas vezes, também são considerados.

Na Tabela 1 são mostrados os grupos de materiais que podem ser reciclados e suas opções de reutilização.

Tabela 1 – Grupos de materiais recicláveis de aterros sanitários

<b>Grupo de materiais</b>	<b>Reciclagem</b>
Minerais grossos	Material de construção para construção de estradas e pistas; construção de aterros sanitários
Minerais finos	Construção de aterros sanitários; material de construção reciclado
Mistura de plásticos, têxteis, papel/cartão, borracha, fraldas, madeira etc.	Utilização térmica e/ou energética
Plásticos	Utilização do material
Pneus	Utilização energética na indústria de cimento
Metais	Utilização do material
Material orgânico	Produção de biogás
Vidro	Utilização do material

Fonte: Hölzle (2010).

O grande número de estudos realizados internacionalmente sobre a viabilidade de projetos envolvendo a mineração de aterros ou de projetos já em execução, nos dá uma boa visão em relação ao diagnóstico dos aterros. Os resultados mostram que, sob o ponto de vista de massa dos resíduos, a maior parte, entre 50-70%, é representada pelas frações finas (geralmente materiais < 20 mm) (Prent, 2011; Rettenberger, 2009; Van Vossen).

Entretanto, na maioria dos projetos de mineração de aterros executados até agora, a reciclagem tem se restringido à fração grossa dos resíduos (por exemplo, plásticos, papéis, sucatas e madeiras), enquanto a fração fina dos resíduos retorna para o aterro, sem ou apenas, com um pequeno tratamento adicional.



Uma revisão de 77 projetos mundiais (volume > 10.000 m<sup>3</sup>) mostra que um dos principais motivos para a mineração dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é a proteção das águas subterrâneas (33%), alcançada devido à redução das massas nos aterros a partir do tratamento de frações finas por intermédio da mineração (Budde *et al.*, 2002). Outros motivos são o aumento da vida útil (20%), a recuperação de recursos (13,5%), a construção de aterros internos (13%), a recuperação de áreas de aterramento (12%) e a redução de custos (8%) durante a fase de pós-encerramento.

Dentre todos os projetos citados, comparativamente, apenas uma pequena parcela dos fluxos de materiais foi especialmente direcionada para reciclagem. A maior parte do material é depositado no estado da arte nos aterros. A mineração de aterros, no que se diz respeito à recuperação de recursos, até o momento não foi realizada nem para os resíduos sólidos urbanos e nem em aterros de escórias.

As medidas adotadas até agora mostram que a recuperação de aterros e o tratamento mecânico das frações são basicamente viáveis. O estado da arte ainda não está bem definido. Em algumas áreas, certas técnicas (por exemplo, a de estabilização dos resíduos e técnicas de separação de resíduos) já estão estabelecidas na prática (DWA/VKU, 2012). Entretanto, em muitas áreas, detalhes sobre a aplicação de tecnologias de processos de remediação, tratamento e classificação, reciclagem de embalagens, tratamento e disposição de resíduos, ainda não estão disponíveis de forma clara.

Zeiner *et al.* (2015), em artigo publicado na coletânea: "Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil", elencam os prós e contras às intervenções de mineração:

- ♦ **PRÓS:** rendimentos da extração de matérias-primas secundárias:
  - Rendimentos da reciclagem da terra (por exemplo: alto valor de utilização como a construção de terrenos);
  - A economia nos custos para as fases de fechamento e pós-tratamento (após o encerramento do aterro, geralmente um tratamento do lixiviado e do gás produzido é necessário por pelo menos várias décadas);
  - Melhoria e remediação do aterro (por exemplo: a construção de um sistema de barreira na base). Extensão do tempo de eliminação de resíduos a partir do ganho de volume;
  - Crescente aceitação entre os moradores devido à modernização da área após a conclusão da ação;



- Proteção do clima, ar, água, solo e da paisagem.
- ♦ **CONTRAS:** custos com escavação, processamento, tratamento e redistribuição dos resíduos
- Baixa aceitação da mineração pelos habitantes locais, principalmente devido à emissão de odores e poeira, produção de barulho e congestionamentos;
- Regras legais ainda não estão claras;
- Falta de informações confiáveis para a mineração (por exemplo, entre outras, informações sobre a qualidade dos produtos e economia/ecologia).

Sob o ponto de vista apenas ecológico, a mineração nos aterros, com o objetivo de levar o máximo possível de resíduos de volta para o ciclo de materiais, é certamente discutida de forma controversa. As principais questões discutidas estão voltadas para os aspectos econômicos. As receitas provenientes da venda de matérias primas secundárias, reciclagem da terra e a economia feita durante a fase de fechamento e pós-fechamento precisam ser comparadas com as despesas de mineração, tratamento e disposição final do material restante (Zeiner *et al.*, 2015).

Uma análise econômica mais precisa direciona para o principal aspecto que justifica a mineração, a valorização imobiliária na região do aterro sanitário fechado. Dependendo da situação local, o valor da propriedade pode ser baixo (área rural) ou extremamente alto (área urbana). Consequentemente, a atratividade de iniciar um projeto de mineração em aterro sanitário em áreas urbanas é muito maior, pois os custos totais do projeto podem ser cobertos pelas receitas.

### 3 RESULTADOS DO PROJETO ALEMÃO DE MINERAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS “TÖNSLM”

Embora os primeiros projetos de recuperação de aterros sanitários tenham sido realizados há mais de 65 anos e, portanto, haja uma vasta experiência prática disponível, ainda há controvérsia sobre a viabilidade técnica e os benefícios ecológicos e econômicos.

O objetivo do projeto de mineração de aterros sanitários TÖNSLM, que foi financiado pelo Ministério Alemão de Educação e Pesquisa, era determinar o potencial de recursos em aterros sanitários alemães e avaliar a contribuição dessas matérias-primas secundárias para o fornecimento de materiais e energia.



Dependendo do potencial de recursos e das condições locais do aterro sanitário específico, foram desenvolvidas estratégias de mineração e tratamento, bem como opções para o uso dos materiais reciclados.

Em vista dos materiais a serem investigados, o foco principal foi colocado na fração plástica/calorífica e nos metais, nos quais metais preciosos e elementos de terras raras não foram levados em consideração.

O principal aspecto da separação da fração calorífica é o uso deste material na medida do possível como matéria-prima secundária para novos processos e não como Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Neste contexto, técnicas específicas de separação de resíduos foram adaptadas à situação de materiais muito sujos.

Para a recuperação de metais foram utilizados não apenas separadores magnéticos, mas também foi investigada a aplicação de técnicas clássicas provenientes do processamento de minérios. Estas técnicas também foram investigadas na fração fina do material extraído, a fim de reduzir a massa de material a ser depositada novamente em aterros.

Técnicas de lavagem do solo foram aplicadas para limpar os finos na medida do possível, de modo que estes materiais pudessem preencher os requisitos para o uso como material de construção.

Todas estas abordagens foram avaliadas sob aspectos econômicos e ecológicos.

No final do projeto foi desenvolvido um conceito de avaliação multicritério para fornecer informações para a tomada de decisões e implementação de projetos similares. Os resultados foram publicados em uma diretriz para mineração de aterros sanitários (Krüger *et al.*, 2016).

### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO E DOS RESÍDUOS ESCAVADOS**

O aterro sanitário Pohlsche Heide está situado na parte noroeste da Alemanha. Em uma área de 27 hectares, cerca de 2,5 \*106 m<sup>3</sup> de resíduos foram depositados entre 1988 e 2005. A pesquisa histórica mostra que principalmente resíduos sólidos comerciais classe II (semelhantes a resíduos domésticos), resíduos domésticos e de construção e material de solo foram depositados.

Em uma primeira etapa, foram feitas sete perfurações de teste para investigar, entre outras coisas, a composição dos resíduos e a

situação do lixiviado nas áreas onde os resíduos serão escavados. Foram feitas medições de gás a fim de avaliar a necessidade de uma aeração passiva ou ativa antes da escavação. Foram coletadas amostras e a fração fina (< 40 mm) foi analisada principalmente em vista da atividade biológica remanescente e do conteúdo de metais.

Na área das perfurações foram escavadas três valas com um volume de cerca de 2.600 m<sup>3</sup> cada uma para o tratamento específico do material residual. Os resultados das análises dos gases mostraram que somente uma aeração passiva era necessária.

Os resíduos foram escavados com uma pá-carregadeira que tinha com uma garra para o material grosso e uma retroescavadeira para os finos.

Os resíduos foram transportados para a parte superior do aterro onde foram organizadas áreas para armazenamento temporário e para o primeiro tratamento dos resíduos.

O material residual foi analisado sob vários aspectos, a fim de prover conclusões para a preparação e tratamento posterior necessários, embalagem, bem como disposição de materiais residuais não recicláveis.

Figura 1 – Vista do aterro sanitário Pohlsche Heide com áreas de investigações



Fonte: Technische Universität Braunschweig  
Leichtweiß-Institut (Zeiner *et al.*, 2015).



Materiais de três períodos de tempo diferentes foram escavados e investigados (Figura 1). Na área da vala (K1) e da trincheira 3 (K3) foram depositados resíduos no período de 1989 a 1997. Neste período de tempo, a coleta separada de orgânicos e recicláveis começou e a quantidade de resíduos de construção foi reduzida. A vala 2 (K2) consiste em resíduos do período de 1997 a 2005. Durante este período, a coleta seletiva foi estabelecida em toda a região.

### **3.2 MINERAÇÃO, PROCESSAMENTO, RECUPERAÇÃO E TRATAMENTO**

Uma série de procedimentos compõe a iniciativa de mineração de aterros tais como as técnicas de escavação, aspectos relacionados com a composição dos resíduos, processamento entre outros listados a seguir. Isto significa que não basta escavar os resíduos, intervenções tecnológicas serão necessárias para sua valorização.

#### **3.2.1 Escavação**

O processo de escavação dos resíduos depositados no aterro tem que ser adaptado às condições locais. Fatores decisivos são, entre outros, a composição e a idade dos resíduos, tipo de aterro (abaixo do solo ou na superfície), capacidades de armazenamento, rotas de tráfego existentes.

Já durante as investigações preliminares e o planejamento do projeto de mineração, é preciso verificar se antes de iniciar a escavação é necessária uma aeração dos resíduos. Ao arejar os resíduos, as condições normalmente anaeróbias no aterro são mudadas para condições aeróbias, de modo que as emissões de gases de efeito estufa e maus odores sejam reduzidas. Além disso, o esforço por medidas de segurança no trabalho pode então ser reduzido consideravelmente.

Para o processo de escavação, duas técnicas diferentes podem ser usadas:

- ♦ *Escavação em camadas finas*: sobre grandes áreas são removidas camadas de resíduos de 0,5 a 1 m com uma carregadeira ou trator de esteira. Este procedimento tecnicamente simples pode ser aplicado para todas as configurações de aterro sanitário. A principal desvantagem é a geração de grandes volumes de lixiviado após os eventos de chuva.
- ♦ *Escavação profunda*: a partir da borda do aterro os resíduos são escavados passo a passo do topo para a base em camadas de



cerca de 2 – 3 m. Se emissões de gases relevantes forem esperadas, é necessária uma aeração antes da escavação. A estabilidade da inclinação deve ser assegurada também no caso de emissões de lixiviados. Este procedimento pode ser aplicado para todas as configurações de aterro sanitário.

O material escavado é transportado por caminhão até a área para tratamento posterior.

### **3.2.2 Processamento dos resíduos escavados – pré-condicionamento**

As razões para o pré-condicionamento dos resíduos são as seguintes (Maul; Pretz, 2016):

- ♦ O foco principal do pré-condicionamento é produzir fluxos de material que são condicionados para os seguintes processos de tratamento. Com um triturador poderão ser rompidas frações complexas.
- ♦ Para proteger os equipamentos, as peças individualmente pesadas, como peças de ferro, devem ser removidas antes do tratamento posterior. O objetivo de separação máxima da sucata de Fe- não é alcançado por esta etapa.
- ♦ A etapa de trituração é seguida por uma de peneiramento. Com uma peneira do tipo tambor, os resíduos são separados entre fração grosseira e fina. No projeto foi utilizada uma peneira de 60 mm, mas outras malhas podem ser escolhidas, dependendo das seguintes etapas de tratamento.
- ♦ Com um separador balístico, o material grosso é separado em uma fração pesada, que consiste principalmente de plásticos tridimensionais e uma fração leve feita principalmente de plásticos bidimensionais (plástico filme). Esta etapa pode ser combinada com outro peneiramento para aumentar a eficiência da classificação.

O pré-condicionamento pode ser feito com agregados móveis diretamente no aterro sanitário ou em uma planta de tratamento mecânico de resíduos.

### **3.2.3 Composição dos resíduos**

A composição material dos resíduos escavados é mostrada na Figura 2. A fração fina < 20 mm, que consiste principalmente de solo e material semelhante ao solo, representa quase 50% da massa. A quantidade da fração é ainda maior devido à alta umidade dos

resíduos escavados. Quando o material residual está molhado, é difícil separar as partículas finas dos outros materiais residuais. Uma comparação de peneiramento de resíduos úmidos e secos mostra muito bem este comportamento (Wanka, 2017).

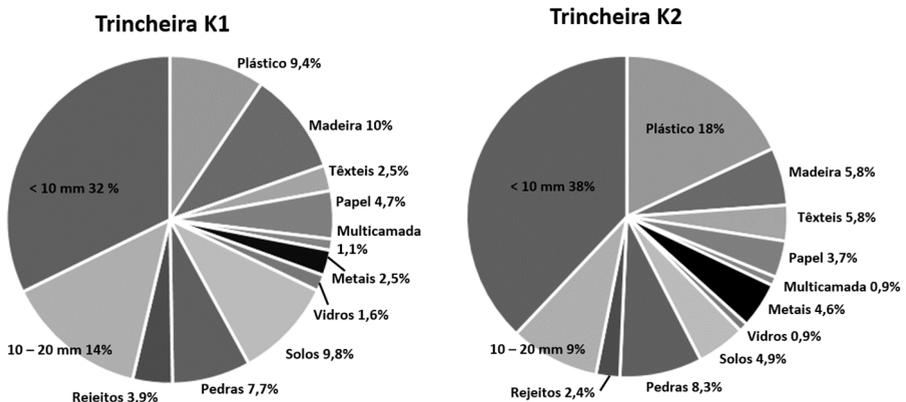
Juntamente com os outros materiais inertes, os componentes minerais representam aproximadamente 76% da massa total de resíduos. As razões para esta alta quantidade de material fino/mineral são múltiplas. Por um lado, a degradação biológica de substâncias orgânicas que resulta em um aumento relativo dos minerais e uma redução do tamanho das partículas. Além disso, grandes quantidades de materiais minerais têm sido utilizadas durante a fase de operação do aterro para a construção de acessos e também para sistemas intermediários de cobertura superior.

O plástico representa o segundo maior grupo de materiais, seguido pela madeira. Ambas as frações formam a parte principal da fração de alto poder calorífico, que junto com as frações de papel/papelão e têxteis compreende de 28 a 32%. Devido à cobertura destes materiais com solos finos, a sua utilização só é possível após um pré-tratamento intenso e dispendioso.

A porcentagem de metais é de 2,5 e 4,6%, esta última relativamente alta.

A qualidade dos metais é influenciada pela presença de solo, processos de corrosão em razão do contato com o lixiviado e/ou gases. Um tratamento adicional desta sucata metálica será necessário a fim de se melhorar suas condições de comercialização.

Figura 2 – Composição dos resíduos escavados

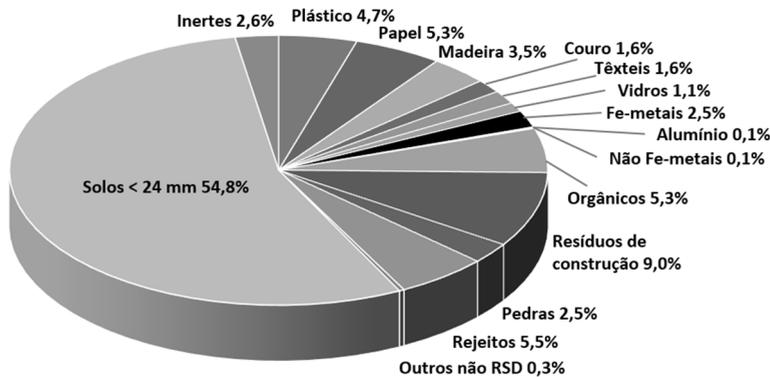




Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O material escavado do aterro sanitário Pohlsche Heide é bastante semelhante aos resíduos de outros projetos de mineração em aterros sanitários (Van Vossen; Prent, 2011). A Figura 3 mostra a composição determinada em 60 projetos de mineração em aterros sanitários.

Figura 3 – Composição média do material proveniente dos resíduos escavados de 60 projetos de mineração em aterros sanitários



Fonte: Van Vossen; Prent (2011).

Uma comparação direta dos diferentes dados da literatura é frequentemente difícil, pois não há especificações uniformes sobre quais grupos de materiais devem ser determinados ou muitas vezes as seções de peneiras utilizadas são diferentes (Münnich *et al.*, 2015).

Para a determinação das análises de peneiras para a distribuição de tamanho de material e para cada fração de peneira, foram realizadas análises extensivas do material. Os resultados mostram que a fração fina < 60 mm constituía cerca de 60 – 68% da massa dos resíduos, cerca de 50% da massa tem um tamanho < 20 mm. A fração calorífica (plástico, papel, têxteis e madeira) pode ser encontrada como esperado na fração grossa > 60 mm.

### 3.2.4 Atividade biológica e potencial de degradação biológica

Na fração fina < 60 mm, vários parâmetros para descrever a substância orgânica foram determinados. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos testes realizados com amostras



coletadas em diferentes momentos durante a escavação e os valores-limite da Portaria Alemã de Aterros Sanitários (DepV., 2016).

A atividade biológica presente na fração fina é baixa. Os valores-limite para a caracterização da atividade biológica como o potencial de formação de gás em condições anaeróbias (GFP<sub>21</sub>), o índice respiratório (RI<sub>4</sub>) e o carbono orgânico total (TOC) estão todos abaixo dos valores-limite. Isto vale também para os valores encontrados nos eluidos resultantes dos resíduos.

Tabela 2 – Parâmetro biológico determinado na fração fina < 60 mm

Trincheira	RI <sub>4</sub> [mg O <sub>2</sub> /g DS]	GFP <sub>21</sub> [l/kg DS]	TOC [%]	COD [mg/l]	DOC [mg/l]	CBO <sub>5</sub> [mg/l]
	Substância sólida			Eluido		
K1	0,49 – 1,44	0,18 – 1,0	9,5 – 19	112 – 176	30 – 48	0,2 – 22
K2	0,29 – 1,0	0,08 – 0,36	5,0 – 15	91 – 125	17 – 33	1,1 – 16
Média	0,69	0,36	12,8	123	30,5	6,9
<b>Valores teóricos de acordo com o DepV. 2016</b>						
	5	20	18	-	300	-

Fonte: Wanka (2017).

Os baixos valores para a atividade biológica na fração fina indicam que este material é mais ou menos inerte. Testes mais detalhados mostram que a substância orgânica restante consiste em compostos dificilmente degradáveis, que quase não são degradáveis sob condições anaeróbias. Isto também é ilustrado pela CBO<sub>5</sub>/COD-ratio.

Um tratamento biológico adicional deste material não é necessário caso a fração fina seja disposta novamente em um aterro sanitário.

Isto posto, não se justifica a recuperação energética por meio da biodigestão anaeróbia para as frações finas < 60 mm. Da mesma forma, não se espera uma redução de massa relevante através de processos de degradação aeróbia.

### 3.2.5 Reciclagem e tratamento da fração grossa > 60 mm

a) Tratamento térmico em plantas de incineração



- A destinação de resíduos escavados em plantas de incineração parece, em princípio, possível. Quando os resíduos escavados são incinerados como uma monocarga sem adição de resíduos frescos, são recomendadas plantas de incineração com grelhas ajustáveis (Rotheut *et al.*, 2016). Deve ser dada atenção especial aos sistemas de purificação de gases de combustão, pois as concentrações de, por exemplo, cloreto de hidrogênio e óxido de enxofre podem ser elevadas. As propriedades flutuantes do material a ser incinerado têm influência sobre a produção de vapor.
- b) Tratamento térmico em plantas de incineração para CDR
- Se o combustível derivado de resíduos (CDR) captado após a escavação for incinerado, recomenda-se escolher uma planta de incineração com grelhas ajustáveis. Recomenda-se ainda a adição de resíduos frescos na proporção 1:1, para evitar picos de concentração no gás de combustão (Rotheut *et al.*, 2016).
- c) Coprocessamento em fábricas de cimento
- O uso do material em plantas com sistemas a montante para tratamento de combustível é considerado exequível. Os testes em larga escala demonstraram que, apesar do cumprimento do tamanho de material exigido, às vezes, podem ocorrer problemas maiores na área de transporte de material – especialmente quando são instalados sistemas pneumáticos – na forma de entupimentos e bloqueios. Em alguns casos, foram observadas concentrações elevadas de cloro. Como o conhecimento da incineração desses resíduos em fábricas de cimento é baixo, recomenda-se fazer testes em larga escala com pelo menos 100 – 200 t de material.
- d) Plásticos que podem ser reciclados como materiais
- Os testes foram feitos com separadores balísticos, o que permite a separação de diferentes frações leve. A separação foi feita nas mesmas condições que as empregadas para os resíduos frescos, contudo a capacidade de triagem por hora foi reduzida a 50%. Os principais resultados foram os seguintes:
    - A umidade torna difícil a separação dos finos através de peneiramento. Foi observada uma aderência de finos de até 7,5% em plásticos tridimensionais e de até 25% em plásticos filmes.
    - A qualidade dos plásticos é reduzida devido à contaminação química e biológica, de longo prazo, no aterro quando ativo. Como consequência, o material tem um mau cheiro e a elasticidade é reduzida.



- Para uma melhor classificação dos diferentes plásticos podem ser necessárias outras etapas de pré-tratamento (por exemplo, lavagem).

e) Reciclagem de material no processador de plástico

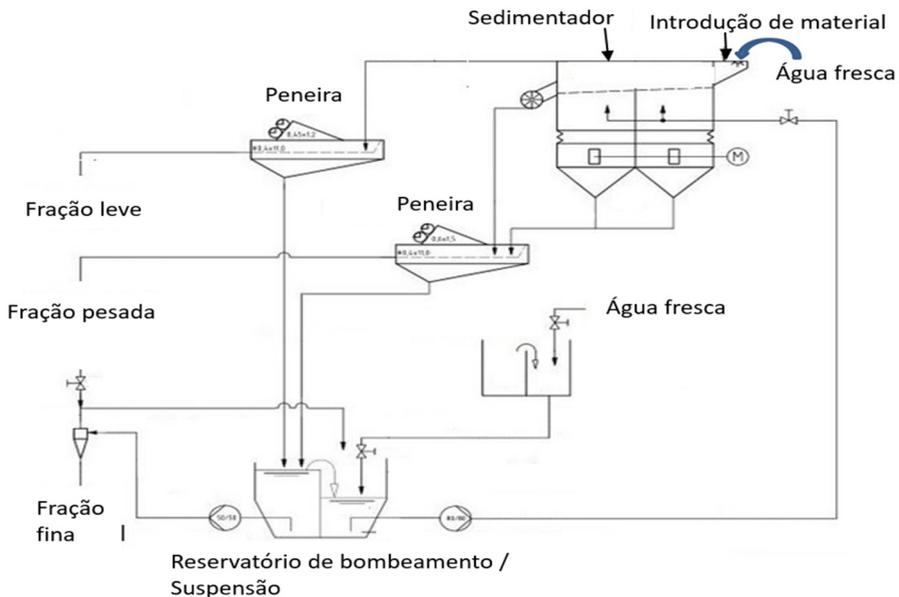
- Sob aspectos técnicos é possível produzir regranulados utilizáveis a partir dos plásticos separados. A utilização em aplicações de moldagem por extrusão e/ou injeção deve ser possível. O uso dos regranulados só é possível em áreas onde a pureza necessária da superfície plástica é baixa.

Dessa forma, as frações > 60 mm poderão ser submetidas a diversos procedimentos tecnológicos voltados quanto para a reciclagem de materiais quanto para a recuperação energética.

### 3.2.6 Reciclagem e tratamento da fração fina < 60 mm

A maioria dos resíduos escavados (ca. 60 – 70%) consiste em material fino não homogêneo < 60 mm, com uma alta presença de substâncias semelhantes ao solo e com um alto nível de contaminantes. Na maioria dos projetos de mineração de aterros sanitários executados até agora, esta fração foi depositada novamente em aterros sem tratamento adicional.

Figura 5 – Esquema simplificado de processo do wet jigger



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Para o projeto foi utilizado um jigger úmido (Figura 5) para o tratamento da fração fina < 60 mm. O método básico do tratamento mecânico úmido é que as impurezas aderentes aos componentes minerais têm uma densidade menor do que os próprios componentes minerais. Ao tratar o material de alimentação por pulsação e fluxo de água e picos de pressão (afrouxamento e limpeza) os componentes flutuantes (plástico, madeira, têxteis) são separados da mistura total e podem ser separados através de um transbordamento (material leve). Componentes pesados, como minerais, vidro ou sedimentos cerâmicos, podem ser posteriormente selecionados. As diferentes composições e as mudanças resultantes nas relações de densidade do material de resíduos alimentados são levadas em conta por uma variação dos parâmetros de vazão do meio de lavagem e da profundidade da água da bacia de ajuste.

Os produtos seguintes foram separados:

- ♦ *Fração leve*: O material leve (10 – 13% do total do material escavado) consiste principalmente de plásticos, materiais compostos, têxteis, borracha e madeira. A quantidade de materiais indesejados (pedras, cerâmicas, vidro) nesta fração é de cerca de 23%. Através de uma otimização do processo de tratamento úmido, a quantidade destas substâncias pode ser reduzida. Com um poder calorífico na faixa de 16 – 19 MJ/kg, este material pode ser tratado termicamente e utilizado para utilização de energia. As concentrações potencialmente altas de cloro, sulfatos e metais pesados (por exemplo, cádmio [Cd], mercúrio [Hg], chumbo [Pb]) têm que ser levadas em consideração quando se pretende um tratamento adicional.
- ♦ *Minerais (10 – 60 mm)*: A porcentagem de minerais grossos é de 8 – 10%, esta relativamente baixa. As concentrações de contaminantes são baixas, de modo que uma utilização para fins de construção pode ser possível. Um ponto frágil relacionado ao emprego do material nas atividades de construção são as impurezas tais como os plásticos, madeiras, têxteis, gesso e concreto. Aqui é necessária uma separação antes do uso. As partículas de vidro que também estão nesta fração podem ser separadas com sensores óticos.
- ♦ *Minerais (0,63 – 2 mm)*: A porcentagem de minerais finos é de cerca de 7%. Este material é o resultado do tratamento da água de lavagem com um hidrociclone. Este material não pode ser usado diretamente para a construção de, por exemplo, estradas, vias, pois a quantidade de impurezas, as concentrações de sulfato e a quantidade de material mais fino, < 0,063 mm, é muito alta. Após

lavar este material uma segunda vez, a porcentagem da fração < 0,063 mm foi reduzida de 27% para apenas 7%. Ao mesmo tempo, as concentrações de material orgânico e sulfatos foram reduzidas significativamente (Wanka, 2017). O material agora pode ser utilizado para fins de construção com certas restrições.

- ♦ *Minerais < 10 mm*: A fração fina < 10 mm que representa cerca de 34% dos resíduos escavados foi separada do fluxo total de material durante o processamento antes da lavagem. O objetivo era tratar esta fração com técnicas provenientes do processamento do minério e separar o ferro deste material, contudo a quantidade de ferro separada foi insignificante. O material fino pode ser utilizado para a construção de aterros sanitários quando do preparo da superfície de cobertura. Devido às elevadas concentrações de metais pesados, cloro e sulfatos, o material não deve ser utilizado na camada de recultivo. Se não puder ser utilizado para fins de construção, é possível depositar este material em aterros para resíduos de construção civil e demolição.

Devido às formas irregulares e da presença de diferentes materiais, o tratamento desta fração é problemático. Como a separação mecânica seca convencional desta fração não funcionou, foi aplicado tratamento mecânico úmido para separar os resíduos finos em diferentes frações segundo fluxo de materiais definido.

### 3.2.7 Balanço de massa

Em teoria, cerca de 90% dos resíduos escavados são recicláveis. Apenas cerca de 10% têm que ser dispostos novamente em aterros sanitários, já que não há possibilidade de reciclagem no momento (Tabela 3). Esta afirmação se justifica em razão das legislações atuais, das alternativas de tratamento e dos requisitos para o preparo de um novo produto. Não são considerados os aspectos econômicos.

Tabela 3 – Fluxo de material durante o tratamento dos resíduos escavados

Fluxo de material / Tamanho do material	Massa [%]	Reciclagem, tratamento, disposição final
Fração > 60 mm, no total	33	
Fração leve (fração calorífica)	31	Tratamento térmico/utilização energética



Fluxo de material / Tamanho do material	Massa [%]	Reciclagem, tratamento, disposição final
Metais	2	Utilização do material
<b>Fração 10 – 60 mm, no total</b>	<b>33</b>	
Fração leve (fração calorífica, > 16 MJ/kg)	12	Tratamento térmico/utilização energética
Fração pesada (minerais 10 – 60 mm)	9	Material de construção
Fração pesada (minerais 0,063 – 2 mm)	4	Material de construção
Resíduos da lavagem da areia	5	Aterro de material de construção
Vidro/metais	3	Utilização do material
<b>Fração &lt; 10 mm, no total</b>	<b>34</b>	
Fração pesada	23	Material de construção
Fração leve (fração calorífica, > 12 MJ/kg)	6	Tratamento térmico/utilização energética
Fração muito fina < 80 µm	5	Aterro de material de construção
<b>Soma do fluxo de materiais potencialmente recicláveis</b>	<b>90</b>	
<b>Soma do fluxo de material para disposição em aterros sanitários</b>	<b>10</b>	

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A Tabela demonstra que, diferentemente das frações grossas, as frações finas < 60 mm tem seu aproveitamento limitado.

### 3.2.8 Avaliação ambiental

O *software* UMBERTO tem sido utilizado para a avaliação ambiental e econômica da mineração de aterros sanitários. Para este fim, o *software* UMBERTO tem que ser adaptado às condições da mineração de aterros sanitários e novas ferramentas têm que ser desenvolvidas para descrever todos os processos e interações. Como exemplo, é mostrada a avaliação do ciclo de vida da escavação de



cerca de 8.000 t de resíduos das três trincheiras durante o projeto de pesquisa. Os cenários a seguir foram considerados:

- ♦ *Cenário de referência* – os resíduos do aterro não são escavados: O gás do aterro sanitário e o chorume são coletados e tratados.
- ♦ *Cenário 1 – Mineração e incineração*: Os resíduos são escavados e o material, no total, é incinerado. A pequena quantidade de energia gerada é utilizada e, também, os metais são reciclados após a incineração. As escórias são usadas como material de construção civil.
- ♦ *Cenário 2 – Mineração e máxima reciclagem*: Escavação dos resíduos, tratamento mecânico completo dos resíduos em uma planta de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). A fração grossa é lavada, separação de diferentes plásticos para reciclagem e separação de metais. Uso térmico dos rejeitos. Da fração fina são extraídos os metais, separação da fração calorífica e seu uso térmico, o material restante é utilizado para fins de construção civil.
- ♦ *Cenário 3 – Mineração e reciclagem mínima*: Escavação dos resíduos, separação em duas frações e separação dos metais. A fração grossa é incinerada e a energia e as escórias são utilizadas. Da fração fina são extraídos os metais, a fração calorífica é utilizada para fins energéticos, a fração fina é lavada e utilizada como material de construção civil.

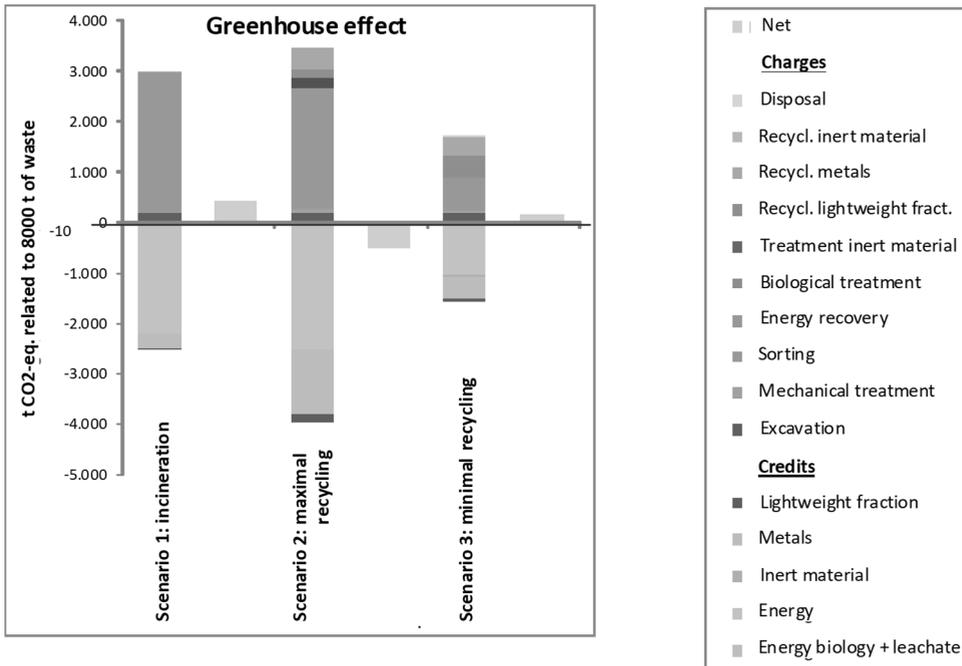
No cálculo, todos os fluxos de entrada e saída (produtos, materiais e energia) foram considerados e o balanço foi avaliado para diferentes categorias de impacto (ou seja, efeito estufa, acidificação, eutrofização) para todo o ciclo de vida. Na Figura 6 são mostrados os resultados do cálculo para a categoria de impacto "Efeito estufa" para os diferentes cenários.

O cenário de referência é a operação contínua do aterro sanitário com captura e utilização do gás do aterro (linha horizontal na Figura 6). Os fatores decisivos aqui são o potencial de formação de gás e a taxa de captura de gás (TCG). Para o aterro sanitário, que foi implementado, com resíduos domésticos, no início dos anos 1990 e está equipado com um sistema de coleta de gás de aterro em funcionamento, pode-se assumir um TCG seja de pelo menos 65%. Para aterros sanitários onde a superfície não foi selada, o TCG é correspondentemente menor. Se o aterro sanitário em consideração for mais jovem, um valor mais alto de gás liberado no aterro pode, portanto, ser aplicado, o que neste caso corresponde a uma menor



taxa de coleta de gás. Se o aterro sanitário for mais antigo, o inverso é verdadeiro devido ao menor potencial de gás de aterro sanitário.

Figura 6 – Avaliação dos efeitos estufa proveniente da mineração em aterros sanitários para diferentes cenários



Fonte: Theis e Knappe (2013).

O próximo parâmetro importante em relação às emissões de gases de efeito estufa é a composição do material do aterro ou a fração valiosa (conteúdo de material reciclável). As análises mostraram que o conteúdo de plástico é o parâmetro decisivo.

Finalmente, a determinação da eficiência energética da planta de reciclagem na qual a fração de alto poder calorífico é utilizada energeticamente é de importância decisiva para a avaliação ambiental. Valores de 22% em relação à eletricidade e 50% em relação ao calor são uma estimativa máxima das eficiências, especialmente das plantas de incineração de resíduos.

Os resultados líquidos ilustram os encargos de tratamento e créditos por substituições resultantes:

- Se o aterro sanitário em consideração tiver um aumento descontrolado da liberação de metano (TCG < 40%), mesmo cenários simples de mineração em aterro sanitário são mais



vantajosos do que a operação contínua do aterro, se o conteúdo de plástico nos resíduos for < 10%.

- ♦ Com baixo conteúdo de plástico < 10%, uma pequena redução no efeito estufa pode ser alcançada mesmo com o processamento adicional dos resíduos finos sem tratamento adicional do material grosso. Para altos teores de metal, o esforço de separação adicional de metal e pirólise vale claramente a pena. Entretanto, independentemente do conteúdo de material reciclável, o alívio significativo só é alcançado se o grão grosso for processado como CDR para que possa ser tratado em motogeradores e fábricas de cimento. Se o conteúdo plástico do aterro for > 10% e o conteúdo de outros materiais recicláveis for baixo, isto se aplica ainda mais fortemente e está então associado a reduções ainda significativamente maiores. Enquanto conteúdos mais altos de plástico tendem a causar cargas nas variantes mais simples, uma vez que as altas cargas decorrentes da reciclagem térmica de plásticos só são contrabalançadas por baixos créditos para fins de baixa eficiência energética.
- ♦ Se uma instalação de incineração de resíduos com maior eficiência energética estiver disponível, uma redução significativa nas cargas está associada a todos os cenários. O ideal é então um método de processamento, no qual o material fino é processado, mas o material grosso não precisa mais ser tratado, exceto para a separação de metais.

Esta análise expõe as fragilidades e desafios a serem superados quando da mineração de aterros, corroborando o entendimento de que não basta quantificar o material e saber se há ou não muita presença de recicláveis. Aspectos inerentes ao aterramento como presença de emissões deverão também ser analisadas para uma tomada de decisão adequada.

### **3.2.9 Avaliação econômica**

A avaliação econômica foi realizada utilizando o método do valor presente líquido. Uma classificação econômica inicial e aproximada pode ser feita com base nos parâmetros de valor do terreno e do volume.

Para os cálculos, foram utilizados os mesmos cenários que para a avaliação ambiental. A fim de levar em conta as diferenças nas técnicas de processamento utilizadas, é feita uma distinção entre (a) e (b) nos cenários.

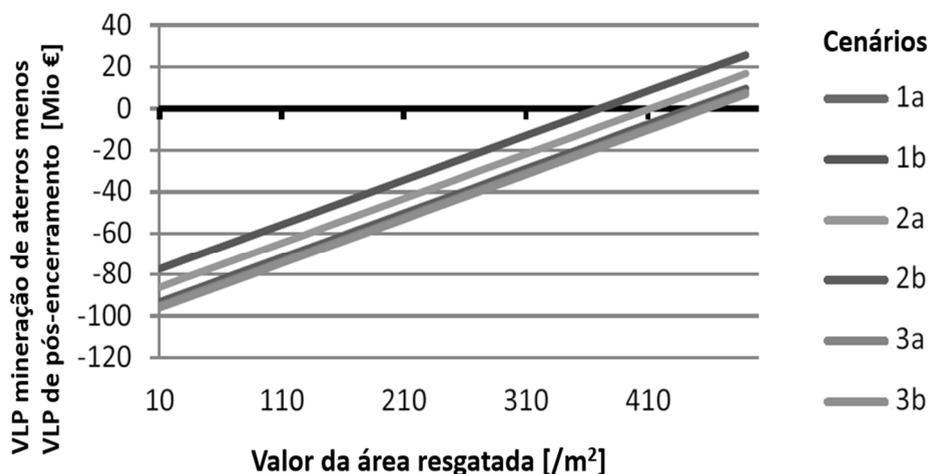


Em primeiro lugar, é preciso determinar se o terreno deve ser vendido para outros usos ou se o aterro sanitário deve permanecer no local e o volume obtido após a mineração deve ser utilizado para uma reutilização da área como aterro sanitário, e que valores podem ser esperados para os conceitos de pós-encerramento.

No âmbito do projeto, foi especificada uma faixa de valores típica para o valor do terreno (10 euros/m<sup>2</sup> – 410 euros/m<sup>2</sup>) e o valor do volume (10 euros/m<sup>3</sup> – 40 euros/m<sup>3</sup>) em cada caso. Na Figura 7 são mostrados os resultados do cálculo.

É óbvio que no caso do aterro sanitário Pohlsche Heide, que está localizado em uma área rural, a partir de valores da área recuperada de cerca de 400 euros/m<sup>2</sup> em diante, as receitas da venda de matérias-primas secundárias, da reutilização do terreno e a economia feita durante a fase de fechamento e pós-fechamento são superiores às despesas de mineração, tratamento e disposição final do material remanescente.

Figura 7 – Variação dos valores do terreno para o aterro sanitário Pohlsche Heide



VLP = Valor Líquido presente

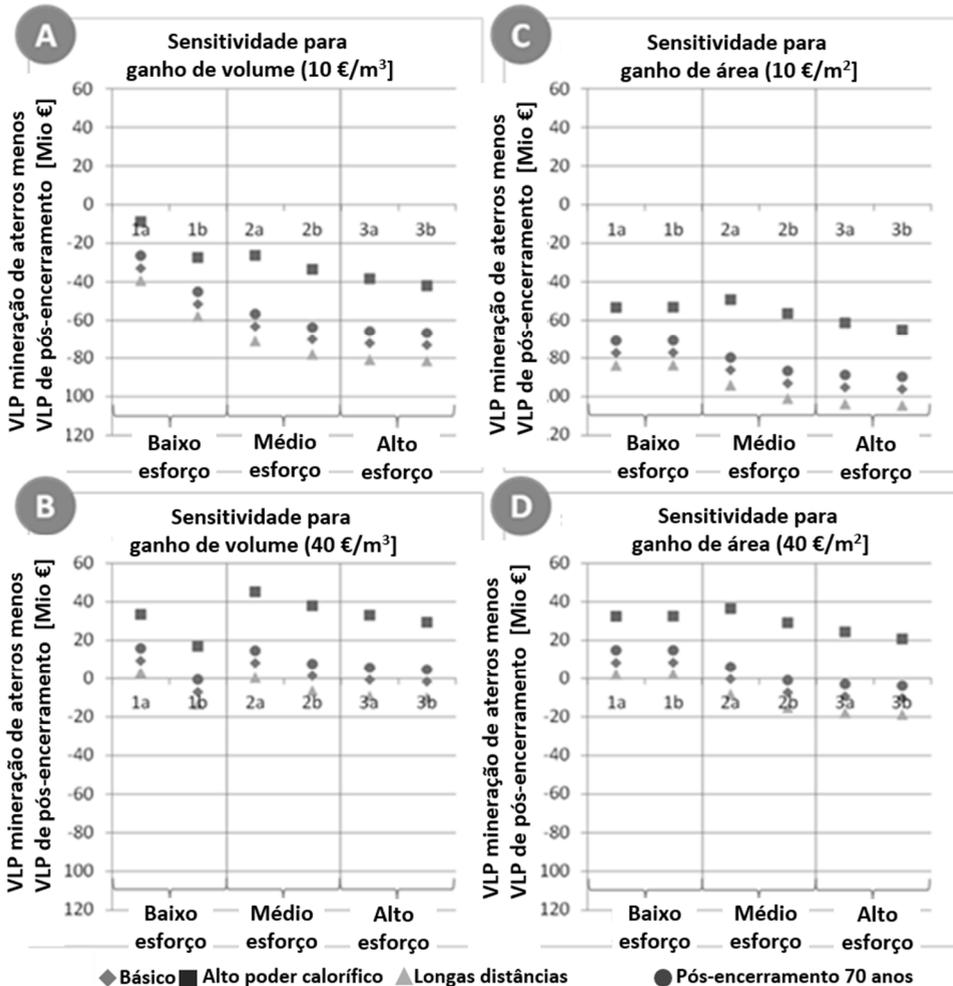
Fonte: Krüger *et al.* (2016).

Este fato é particularmente importante em áreas urbanas, por exemplo, na Índia (Nova Deli) ou na China (Hong Kong), onde o valor do terreno excede 5.000 euros/m<sup>2</sup> (Fricke; Aucar, 2018).

Para o cenário base, ou seja, com valores atuais para os combustíveis, a distância de transporte para estações de tratamento

específicas para o fluxo de materiais e o monitoramento do aterro por 30 anos, o valor presente líquido foi calculado sob variação do esforço de tratamento. A análise de sensibilidade foi então utilizada para calcular como o aumento dos valores dos combustíveis e uma extensão do período de pós-encerramento para 70 anos afetaria o valor presente líquido (Figura 8).

Figura 8 – Avaliação econômica: resultados dos cálculos de sensibilidade



Fonte: Krüger et al. (2016).



A sensibilidade mostra para o aterro investigado que:

- ♦ Para baixos valores de volume e área, o fechamento de aterros sanitários e os cuidados posteriores são geralmente preferíveis à mineração de aterros sanitários do ponto de vista econômico. Se, no entanto, a mineração em aterros sanitários deve ser realizada, cenários bastante simples são economicamente vantajosos. A vantagem de cenários simples também se aplica aos altos preços do terreno. Com o aumento do valor do volume, os cenários caros ganham em vantagem, pois aqui quase todo o volume do aterro pode ser recuperado e comercializado. Em contraste, nos cenários 1, a fração de grão fino é armazenada novamente, de modo que apenas parte do volume do aterro pode ser recuperada. Para o valor do volume de 40 EUR/m<sup>3</sup>, o cenário 2a já executa, assim como o cenário 1a na variante base;
- ♦ Com alto valor calorífico, o cenário 2a geralmente tem melhor desempenho, já que aqui se produz mais combustível do que nos cenários 1a e 1b, mas o esforço técnico e, portanto, também os custos são menores do que nos cenários 2b a 3b;
- ♦ O valor calorífico tem uma grande influência sobre a vantagem econômica da mineração. Em contraste, o cuidado posterior prolongado dos aterros sanitários leva apenas a uma ligeira melhoria em relação à variante de base;
- ♦ No que diz respeito à distância de transporte, os cenários mais caros em particular se deterioram devido às distâncias adicionais de transporte, uma vez que se supõe que existam menos estações de tratamento especial, como a pirólise ou usinas de processamento de combustível derivado de resíduos, do que, por exemplo, as usinas de incineração de resíduos;
- ♦ A influência dos parâmetros "duração dos cuidados posteriores ao aterro" e "distância de transporte" é aproximadamente igualmente significativa.

A viabilidade da mineração dos aterros, especialmente no que diz respeito à viabilidade econômica, tem sido o tema de muitas discussões. Os benefícios resultantes da reciclagem da fração calorífica dos resíduos e dos metais não são suficientes para equilibrar os custos com a própria intervenção de mineração. Do ponto de vista econômico, a intervenção passa a ser vantajosa apenas aglutinando outros benefícios, tais como: menores custos no pós-encerramento e um valor imobiliário representativo do terreno (Van Vossen; Prent, 2011).



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento histórico da gestão de resíduos no Brasil e no mundo corrobora uma enorme oferta de potenciais objetos de mineração em aterros sanitários.

Para a mineração em aterros sanitários, deve-se determinar que é necessária uma ação imediata se houver risco ao bem-estar do público em geral ou aos bens protegidos do solo, água e ar. A extensão do risco deve então ser determinada e as etapas de remediação devem ser iniciadas. Além das medidas técnicas clássicas de remediação ou segurança do local, a ação alternativa de mineração do corpo do aterro também deve ser considerada, devendo então tomar a forma de uma mineração melhorada do aterro, se possível.

Estas são sempre considerações para o respectivo caso individual. Para a tomada de decisões concretas, a classificação do próprio aterro deve ser feita com base nos resultados das análises de sensibilidade ambiental e econômica.

A verificação das vantagens deve privilegiar o levantamento ambiental e em seguida o econômico. Finalmente, deve ser montada argumentação para ponderar qual a melhor alternativa para o aterro sanitário em pauta.

O projeto de pesquisa na Alemanha, que levou em conta as principais condições de fronteira e sensibilidades, mostra o que é possível de acordo com o estado da arte.

Os resultados não podem ser transferidos 1:1 para as condições no Brasil, mas mostram a direção do que é possível. Os principais resultados podem ser resumidos como se segue:

- ♦ A mineração em aterros sanitários é tecnicamente viável e, em princípio, até 90% do material escavado do aterro pode ser reciclado;
- ♦ Para o material restante, que não pode ser reciclado, os aterros sanitários ainda são necessários;
- ♦ A recuperação de materiais recicláveis por si só não constitui um argumento para a recuperação de aterros sanitários na forma de mineração;
- ♦ A mineração de aterros sanitários para aterros de última geração na Alemanha é geralmente vantajosa economicamente quando o valor do terreno do aterro é alto, é necessário um novo volume de aterro sanitário, os custos de fechamento e cuidados posteriores são



muito altos e as vantagens do local (por exemplo, capacidade de tratamento livre, baixos custos de transporte) estão disponíveis;

Isto posto, a mineração em aterros sanitários é sempre ambientalmente vantajosa se a operação continuada do aterro ou a fase de fechamento e de pós-tratamento estiverem associadas às altas emissões de metano e se o esforço necessário para a mineração em aterros sanitários estiver associado a um rendimento relevante proveniente da comercialização de materiais recicláveis.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2021. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 22 set. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. D.O.U. de 03.08.2010, p. 2. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 22 set. 2022.
- BUDDE, Friedrich-Wilhelm; CHLAN, Peter; DÖRRIE, Timo. **Landfill restoration with the BIOPUSTER®-System** Aeration as prerequisite for occupational-, residential and environmental safety. EUROARAB 2002. Inst. LABW, University of Rostock, 2002.
- DepV, 2016: **Verordnung über Deponien und Langzeittlager** (Deponieverordnung – DepV). Vom 27.04.2009, zuletzt geändert durch Verordnung vom 4. März 2016.
- DWA/DVGW. **DWA-Themen T5/2012** – Grundwasserbiologie – Grundlagen und Anwendungen. 2012. Disponível em: <https://webshop.dwa.de/de/dwa-themen-t5-2012-oktober-2012.html>. Acesso em: 12 out. 2022.
- FRICKE, Klaus; AUCAR, Bruno. **Conceito Tecnológico para Tratamento dos Resíduos Domiciliares em Embu**: com foco em produção de CDR. Braunschweig, Alemanha: Technische Universität Braunschweig, 2018.
- HÖLZLE, I. Vom Deponierückbau bis zum landfill mining – eine Synthese internationaler Untersuchungen. From landfill-site remediation to landfill mining – a synthesis of international studies. **Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft**, v. 62, n. 7-8, p. 155-161, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00506-010-0200-7>. Acesso em: 12 out. 2022.
- KRÜGER, Michael; BECKER, Bernd; MÜNNICH, Kai; FRICKE, Klaus. (Hrsg.). Einleitung. In: KRÜGER, Michael; BECKER, Bernd; MÜNNICH, Kai; FRICKE, Klaus. (Hrsg.). **Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining**. Porta Westfalica, 2016. p. 15-21. Disponível em: [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/landfill\\_mining\\_leitfaden.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/landfill_mining_leitfaden.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- MAUL, Anja; PRETZ, Thomas. Vorkonditionierung und Stoffstromtrennung. In: KRÜGER, Michael; BECKER, Bernd; MÜNNICH, Kai; FRICKE, Klaus. (Hrsg.). **(Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining)**. Porta Westfalica, 2016. p. 43-53. Disponível em: [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/landfill\\_mining\\_leitfaden.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/landfill_mining_leitfaden.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- MÜNNICH, Kai; WANKA, Sebastian; FRICKE, Klaus. Neue Deponiekapazitäten durch Deponierückbau? In: WIEMER, Klaus; KERN, Michael; RAUSSEN, Thomas (Hrsg.). **Bio- und Sekundärrohstoffverwertung**. Stofflich, energetisch. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 2015.

RETTEBERGER, Gerhard. Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. (Prospective usage of landfills as resource). In: FLAMME, S.; GALLENKEMPER, B.; GELLENBECK, K.; BIDLINGMAIER, Werner; KRANERT, M.; NELLES, M.; STEGMANN, Rainer. (Ed.). **Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage**, Münster, 10-11 Februar 2009. p. 101-109.

ROTHEUT, Martin; QUICKER, Peter; BREITENSTEIN, Boris; GOLDMANN, Daniel; KRÜGER, Michael; MAUL, Anja; PRETZ, Thomas. Behandlung der Grobfraktion > 60 mm. In: KRÜGER, Michael; BECKER, Bernd; MÜNNICH, Kai; FRICKE, Klaus. (Hrsg.). **Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining**. Porta Westfalica, 2016. p. 54-78. Disponível em: [https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/landfill\\_mining\\_leitfaden.pdf](https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/Broschueren/landfill_mining_leitfaden.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

SANDRONI, Paulo Henrique Ribeiro; COPIA, Carlos Roberto dos Santos. **Aspectos técnicos/econômico-financeiros da implantação, manutenção, operação e encerramento de aterros sanitários**. São Paulo: FIPE, 2017. Disponível em: <https://selur.org.br/wp-content/uploads/2017/06/FIPE-RELAT%C3%93RIO-ASPECTOS-ECONOMICO-FINANCEIROS-ATERROS.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

THEIS, Stefanie; KNAPPE, Florian. Landfill Mining aus ökologischer und ökonomischer Sicht. In: WIEMER, Klaus; KERN, Michael; RAUSSEN, Thomas. (ed.). **Bio- und Sekundärrohstoffverwertung**. VIII stofflich – energetisch. Witzenhausen-Institut, 2013.

ULMANS, L. **Landfill minning: A multi-actor approach on policy preparation**. Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3-7 October 2011.

VAN VOSSSEN, W. J.; PRENT, O. J. **Feasibility study sustainable material and energy recovery from landfills in Europe**. Proceedings Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3-7 October 2011.

WANKA, Sebastian. **Nassmechanische Aufbereitung der Feinfraktion von Deponat mit dem Ziel der Erzeugung verwertbarer Stoffströme**. Diss. an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2017. Disponível em: [https://leopard.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs\\_derivate\\_00044128/Diss\\_Wanka\\_Sebastian.pdf](https://leopard.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00044128/Diss_Wanka_Sebastian.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

ZEINER, Anton. **Ermittlung und Bewertung von Rückbauszenarien für abgelagerte Rückstände der thermischen Behandlung von Hausmüll**. Diss. an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2019. Disponível em: <https://d-nb.info/1205068384/34>. Acesso em: 12 out. 2022.

ZEINER, Anton; MÜNNICH, Kai; WANKA, Sebastian; FRICKE, Klaus. Mineração dos Resíduos Sólidos Urbanos de Aterros Sanitários: redução das massas a serem depositadas, através do tratamento de frações finas. In: FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane; LEITE, Aguinaldo; BAGNATI, Marius. (coords.). **Gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos: transferência de experiência entre a Alemanha e o Brasil**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2015. Disponível em: <http://gsrsu.blogspot.com/2017/01/19.html>. Acesso em: 25 nov. 2022.





# VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VEGETAIS EM SISTEMA DE CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA COM ADIÇÃO DE BIOCARVÃO

## *VALUATION OF FRUIT AND VEGETABLE WASTE IN AN ANAEROBIC CO-DIGESTION SYSTEM WITH BIOCHAR ADDED*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

SICCHIERI, Isabela Mangerino; QUADROS, Thainara Camila Fernandes de; FERNANDES, Fernando; KURODA, Emília Kiyomi. Valorização de resíduos de frutas e vegetais em sistema de co-digestão anaeróbia com adição de biocarvão. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Interseccional e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Isabela Mangerino Sicchieri**

Engenheira Ambiental. Mestre e Doutoranda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Atua na área de saneamento, especificamente na valorização energética de resíduos sólidos orgânicos em sistemas de digestão anaeróbia.

E-mail: isabela.sicchieri@uel.br

### **Thainara Camila Fernandes de Quadros**

Engenheira Ambiental. Mestre em Agricultura Conservacionista. Doutoranda em Engenharia Civil. Atua na área de saneamento, especificamente na valorização energética de resíduos sólidos orgânicos em sistemas de digestão anaeróbia.

E-mail: thainaracquadros@gmail.com

### **Fernando Fernandes**

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Doutor em Engenharia Civil pelo *Institut National Polytechnique de Toulouse* (INPT). Professor associado no Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

E-mail: fernando@uel.br

### **Emília Kiyomi Kuroda**

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC/USP). Doutora em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Professora associada no Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

E-mail: ekk@uel.br



## RESUMO

Os resíduos de frutas e vegetais (RFV) correspondem a cerca de 20% do total de alimentos desperdiçados no mundo. Devido ao seu elevado teor orgânico, umidade e rápida degradação, quando dispostos em aterros sanitários, podem causar efeitos adversos. Portanto, é fundamental uma abordagem eficaz para gestão destes resíduos. Neste sentido uma alternativa viável é o emprego de RFV em processos de digestão anaeróbia, tendo em vista seu uso potencial como biomassa para obtenção de energia renovável. Deste modo este estudo teve como objetivo a valoração energética de RFV, por meio da sua conversão em metano ( $\text{CH}_4$ ). Para isto, foram conduzidos dois ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) conforme as diretrizes da norma VDI 4630, em que foram avaliadas duas estratégias para a intensificação da produção e melhora na qualidade do biogás gerado: a co-digestão anaeróbia (Co-DA) de RFV com a adição de esterco de galinha de postura (EGP) como cosubstrato; e a produção de biocarvão (BC) a partir da fração menos biodegradável dos RFV (cascas, talos e palhas) para adição no processo anaeróbio. As estratégias adotadas apresentaram resultados benéficos, de modo que, o uso de 25% de EGP e a adição de  $10 \text{ g L}^{-1}$  de biocarvão produzido a partir de RFV contribuíram para o equilíbrio dos parâmetros operacionais e de estabilidade, promovendo incremento na produção de metano 6 e 23%, respectivamente. Estes resultados demonstram que as estratégias foram eficientes para a otimização do processo de conversão dos substratos avaliados. Por meio do processo de Co-DA acrescido de BC foi possível viabilizar a valoração dos substratos devido a maior concentração de metano obtida, a qual favorece o posterior emprego do biogás como fonte para produção de energia. Além disso, o processo avaliado demonstra ser uma importante alternativa para o gerenciamento dos resíduos.

Palavras-chave: Metano. Material aditivo. Potencial Bioquímico de Metano (BMP). Esterco de galinha. Alcalinidade.

## ABSTRACT

Fruit and vegetable waste (FVW) corresponds to about 20% of the total food wasted in the world. Due to their high organic content, moisture, and rapid degradation, when disposed of in landfills, they can cause adverse effects. Therefore, an effective approach to the management of these wastes is essential. In this sense, a viable alternative is the use of FVW in anaerobic digestion processes, considering its potential use as biomass to obtain renewable energy. Thus, this study aimed at the energy valuation of FVW, through their conversion into methane ( $\text{CH}_4$ ). For this, two biochemical methane potential (BMP) tests were carried out according to the guidelines of the VDI 4630 standard, in which two strategies were evaluated for the intensification of production and improvement in the quality of the generated biogas: the anaerobic co-digestion (Co-AD) of FVW with the addition of laying chicken manure (LCM) as co-substrate; and the production of biochar (BC) from the least biodegradable fraction of FVW (barks, stalks, and straws) for addition in the anaerobic process. The strategies adopted showed beneficial results, so that the use of 25% of LCM and the addition of  $10 \text{ g L}^{-1}$  of biochar



produced from FVW contributed to the balance of operational parameters and stability, promoting an increase in methane production by 6 and 23%, respectively. These results demonstrate the strategies were efficient for the optimization of the conversion process of the evaluated substrates. Through the Co-AD process with BC, it was possible to enable the valuation of substrates due to the higher concentration of methane obtained, which favors the subsequent use of biogas as a source for energy production. In addition, the evaluated process proves to be an important alternative for the management of waste.

Keywords: Methane. Additive material. Biochemical Methane Potential (BMP). Chicken manure. Alkalinity.

## 1 INTRODUÇÃO

Cerca de 20% do total de frutas e vegetais produzidos mundialmente são perdidos, isto ocorre desde os processos de cultivo até sua comercialização (FAO, 2019). No Brasil, as perdas são de aproximadamente 30% do total produzido no país (Cavicchioli; Silva, 2006), gerando 19 milhões de toneladas de resíduos anualmente (Almeida et al., 2020).

Processos biológicos, como a digestão anaeróbia (DA), podem ser uma alternativa viável para o gerenciamento deste tipo de resíduo (Abrelpe, 2020). No processo de DA a matéria orgânica é degradada por micro-organismos anaeróbios e ocorre a produção do biogás. Este, por sua vez, é composto, principalmente, pelos gases metano – CH<sub>4</sub> (50-70%) e dióxido de carbono – CO<sub>2</sub> (30-50%), o que viabiliza a sua posterior conversão em energia térmica ou elétrica (Angelidaki et al., 2018; Möller; Müller, 2012).

Os resíduos de frutas e vegetais (RFV) possuem composição propícia à aplicação em sistemas de DA, como elevadas concentrações de sólidos orgânicos e umidade. No entanto, a rápida hidrólise dos teores de açúcares presentes nestes resíduos causa instabilidade ao processo de DA perante ao acúmulo de ácidos (Ji et al., 2017; Karlsson et al., 2014).

Este fator poderia ser atenuado por meio da co-digestão anaeróbia (Co-DA) de RFV com um substrato de características complementares, como são os esterco de galinha de postura (EGP), que apresentam alcalinidade em sua composição. Além disso, a Co-DA entre estes substratos pode favorecer o equilíbrio da relação carbono e nitrogênio, tendo em vista que os EGP e RFV contêm elevados teores de nitrogênio e carbono, respectivamente (Bres et al., 2018; Nielsen; Angelidaki, 2008).



O equilíbrio alcançado na Co-DA pode não ser suficiente para substratos como RFV e EGP, com agravantes particulares ao desequilíbrio do sistema. Alternativas têm sido estudadas com vista a otimizar o processo de DA e incrementar a produção de metano, tal como a aplicação de materiais aditivos, como biocarvões (BC). Estes aditivos apresentam características físico-químicas, como porosidade e composição elementar, que permitem a aderência dos microorganismos, formação de biofilme, transferência direta de elétrons entre espécies e equilíbrio elementar, auxiliando também na manutenção da estabilidade do sistema anaeróbio e na maior produção de metano (Abbas et al., 2021; Romero-Güiza et al., 2016).

Apesar da considerável quantidade de estudos a respeito da DA de RFV, ainda não foi reportado pela literatura um estudo visando aproveitar ao máximo este tipo de resíduo no processo de digestão. Deste modo, o presente estudo teve como objetivo a valoração energética de RFV por meio da sua conversão em metano. Para isto, foram investigadas estratégias para a intensificação da produção e melhora na qualidade do biogás gerado, as quais foram a co-digestão de RFV com EGP, e uso da fração menos biodegradável dos RFV para a produção do BC, adicionado ao processo de Co-DA.

## 2 DESENVOLVIMENTO

A valorização dos RFV foi realizada por meio de duas estratégias:

- 1) Co-digestão anaeróbia (Co-DA) de resíduos de frutas e vegetais (RFV) com esterco de galinha de postura (EGP);
- 2) A fração menos biodegradável dos RFV (cascas, talos e palhas) foi pirolisada para a produção de biocarvões (BC), o qual foi adicionado ao processo de Co-DA.

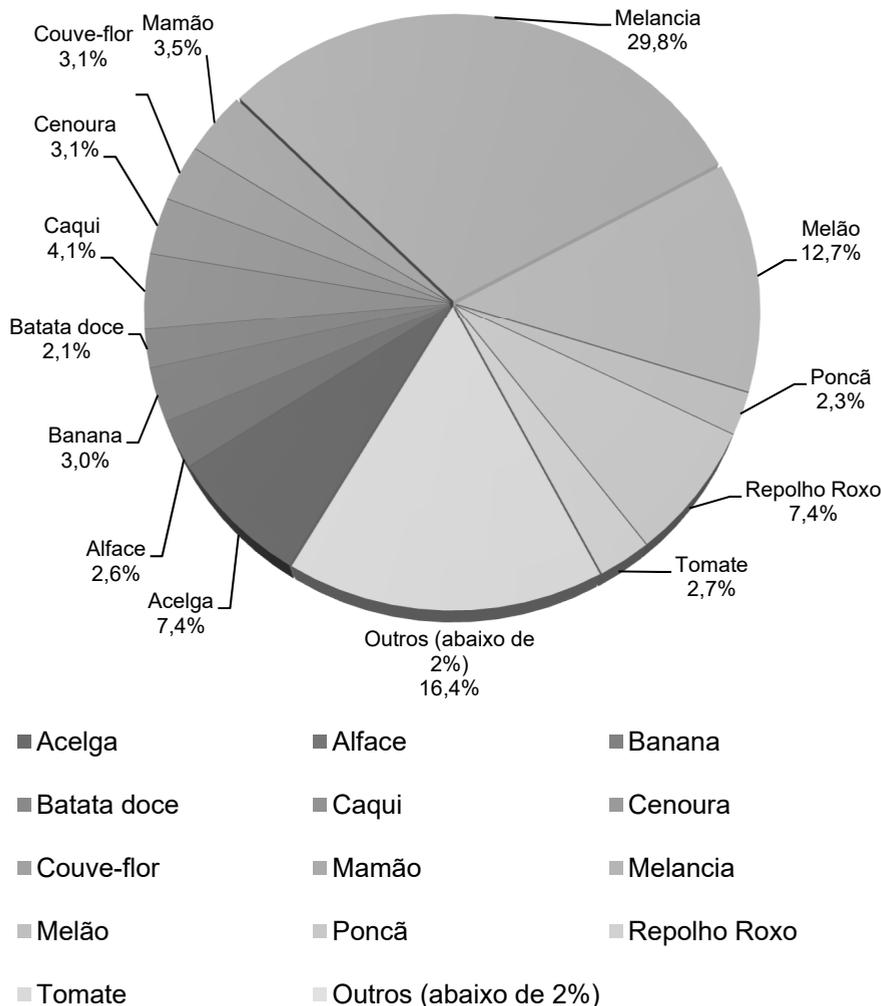
As estratégias foram avaliadas por meio de dois ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP), conforme as diretrizes da norma VDI 4630 (2006).

### 2.1 RESÍDUOS DE FRUTAS E VEGETAIS – RFV

Os RFV, foram coletados na Central de Distribuição de Hortifrutigranjeiros da cidade de Londrina – Paraná/Brasil. A composição gravimétrica do RFV está descrita na Figura 1.



Figura 1 – Composição gravimétrica da amostra de RFV coletada



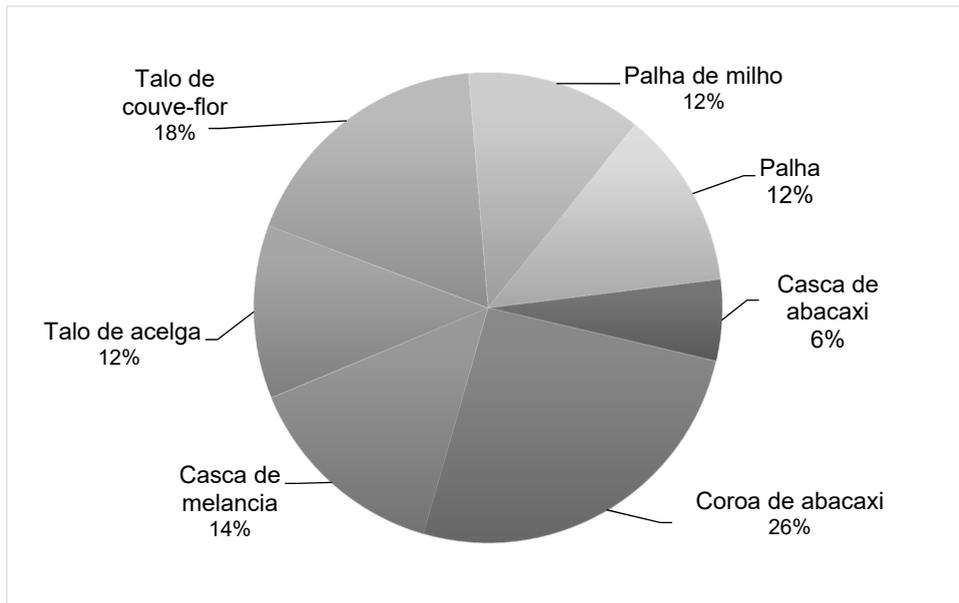
Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Os RFV foram triturados e compostos nas proporções 60% de vegetais, 30% de frutas e 10% de legumes, em volume, considerando à disponibilidade de resíduos de cada categoria no momento da coleta e os dados reportados pela literatura (Edwiges *et al.*, 2018).



A porção de menor biodegradabilidade dos RFV foi selecionada para a produção de biocarvão. Esta foi seca em estufa por 24 horas a 60 °C, pesada (Figura 2), triturada e peneirada (abertura média da malha de 0,84 mm) para homogeneização da granulometria.

Figura 2 – Composição gravimétrica dos RFV utilizada para a produção do BC



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A Figura 2 apresenta a composição gravimétrica dos RFV utilizados para produção do biocarvão. Tal composição corresponde a fração menos biodegradável que compunha os RFV coletados.

A presença de nutrientes nos BC produzidos está diretamente relacionada a esta fração (Tabela 1). Considerando a elevada heterogeneidade dos RFV, relacionada a disponibilidade de frutas e vegetais durante diferentes épocas do ano, esta composição pode sofrer alterações e, portanto, gerar um BC com novas características em relação a composição de nutrientes.

### 2.1.1 Produção de Biocarvão – BC

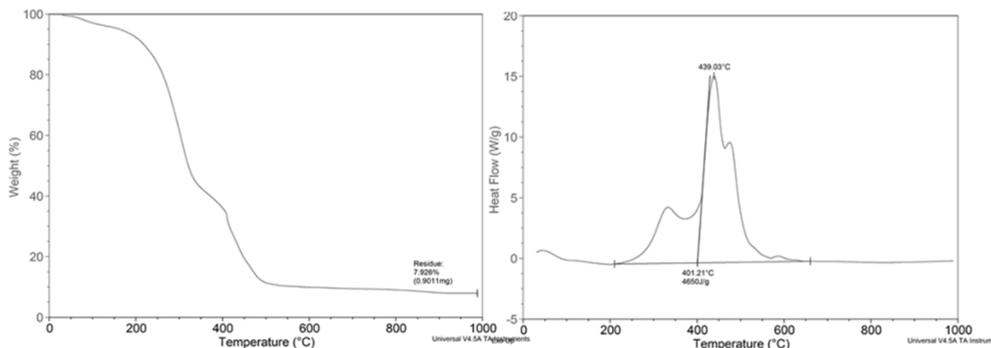
As propriedades do BC, estão intimamente ligadas ao tipo de matéria-prima empregada e a temperatura de pirólise. Para determinação da temperatura da pirólise, os RFV foram analisados



termicamente, por meio de análise termogravimétrica (TG) e de calorimetria diferencial de varredura (DSC).

A análise TG apresenta a curva de degradação da biomassa em função da temperatura, na qual as inflexões relacionam-se aos eventos de degradação do material analisado. Por meio da análise de DSC foi possível identificar com maior precisão os estágios da decomposição térmica. O primeiro estágio está relacionado à perda da umidade; o segundo à combustão primária do material e perda do material volátil (decomposição de hemicelulose, celulose e lignina); e, o terceiro à oxidação do carbono fixo e formação de BC (Chen *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2015). A Figura 3 ilustra os resultados das análises de TG e DSC.

Figura 3 – Análise de termogravimetria (TG) e calorimetria diferencial de varredura (DSC) dos resíduos de frutas e vegetais (RFV)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A análise de TG indicou período de estabilidade na degradação dos RFV sob temperaturas superiores a 400 °C e inferiores a 600 °C, demonstrando o fim da matéria a ser volatilizada. A ocorrência do terceiro estágio de decomposição térmica na análise de DSC também foi indicada nessa faixa de temperatura. A partir desses resultados optou-se pela utilização das temperaturas 450 °C e 550 °C para a produção de BC.

A pirólise foi realizada em cadinhos de porcelana com tampa, em forno mufla, com taxa de aquecimento de 15,90 min<sup>-1</sup>, e tempo de permanência de 30 min.

O BC produzido a 450 °C foi nomeado de FV450 e o produzido à temperatura de 550 °C recebeu a denominação de FV550. Na caracterização dos BC (Tabela 1) foram analisados os parâmetros pH, porcentagem de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo (ASTM



D1762-84, 2013). Além das análises de rendimento gravimétrico (RG) e espectrometria de fluorescência de raios-X (EDX).

Tabela 1 – Caracterização dos biocarvões

<b>Parâmetro</b>	<b>FV550 Biocarvão de frutas e vegetais pirolisado a 550 °C</b>	<b>FV450 Biocarvão de frutas e vegetais pirolisado a 450 °C</b>
Potencial hidrogeniônico – pH	11,3	11,5
Rendimento Gravimétrico	23,64%	30,33%
Teor de Voláteis	0,8%	1,3%
Teor de Cinzas	30,6%	30,1%
Teor de Carbono Fixo	68,6%	68,6%
Carbono	19,14%	33,36%
Sódio	31,44%	25,04%
Potássio	30,35%	21,34%
Silício	4,50%	6,42%
Cálcio	5,08%	3,88%
Cloro	6,56%	5,00%
Magnésio	-	2,31%
Fósforo	1,38%	1,35%

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Os elevados valores de pH identificados para os BC podem auxiliar na elevação do pH da mistura. Mesmo que o efeito da adição não seja imediato, ao longo do processo, os valores de pH podem auxiliar na neutralização dos ácidos graxos voláteis (AGV) formados durante o processo de Co-DA.

Os resultados obtidos com relação ao RG corroboram com literatura que expõe que o rendimento do BC diminui à medida que a temperatura de pirólise aumenta. Isto, porque ocorre o aumento da remoção de matéria volátil com o aumento da temperatura, resultando em carbono estável e fixo (PAN *et al.*, 2019).

A composição química dos BC apresentada na Tabela 1 foi identificada por meio da análise de EDX. Os dados apresentados



correspondem a elementos que apresentaram percentuais maiores que 1%.

Os BC produzidos nesse estudo apresentaram macronutrientes como Carbono, Fósforo, Potássio e Cálcio, os quais são descritos por Romero-Güiza *et al.* (2016) como capazes de fornecer Alcalinidade Total (AT) ao processo de DA, agindo como agente tampão, além de serem indispensáveis aos micro-organismos. Além disso, os BC podem contribuir para o balanceamento de macro e micronutrientes no digestato (Shen *et al.*, 2017).

Deste modo, observa-se que os BC produzidos apresentaram potencial para aplicação em processos anaeróbios de digestão. Além disso, foi possível aproveitar a fração menos degradável nos RFV, reduzindo descartes.

## 2.2 ENSAIOS DE BMP

Os ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) foram conduzidos em batelada, na ausência de luz, com temperatura ( $37 \pm 1$  °C) e agitação contínua (120 rpm). Foram utilizados reatores com volume útil de 120 mL. O biogás gerado foi contabilizado por meio de manômetro e convertido em volume conforme metodologia apresentado por Borth *et al.* (2021). A composição foi analisada por meio de analisador portátil (Dräger – X-AM 7000).

A caracterização físico-química das amostras líquidas foi realizada no início e final de cada ensaio de BMP. Para isto, cada tratamento composto por uma triplicata, foi analisado individualmente.

Os parâmetros analisados correspondem a:

- ♦ pH (APHA/AWWA/WEF, 2017);
- ♦ alcalinidade total – AT (APHA/AWWA/WEF, 2017);
- ♦ série de sólidos (sólidos totais – ST, sólidos totais fixos – STF e sólidos totais voláteis – STV) (APHA/AWWA/WEF, 2017);
- ♦ demanda química de oxigênio – DQO (APHA/AWWA/WEF, 2017);
- ♦ nitrogênio total – NKT e nitrogênio amoniacal –  $N-NH_4$  (APHA/AWWA/WEF, 2017);
- ♦ ácidos graxos voláteis – AGV (Dilallo; Albertson, 1961); e,
- ♦ carbono orgânico total – COT (Jiménez; Garcia, 1992).

Por meio da avaliação dos parâmetros listados, foi possível identificar a estabilidade e a eficiência no desempenho do sistema de co-digestão anaeróbia.



## 2.2.1 Ensaio de BMP I – Co-digestão anaeróbia

Foram conduzidos dois ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) conforme as diretrizes da norma VDI 4630 (2006).

### 2.2.1.1 Caracterização dos substratos

O EGP foi obtido em uma granja localizada no município de Arapongas – Paraná/Brasil. A Tabela 2 apresenta a caracterização dos RFV e EGP quanto a concentração de proteínas, lipídeos, carboidratos, cinzas (Zenebon *et al.*, 2008) e aos parâmetros físico-químicos, descritos no item 2.2.

Os RFV apresentaram pH de 3,85. Edwiges *et al.* (2018) obtiveram o valor médio de pH de 4,2 para RFV em doze coletas durante um ano, comprovando que a acidez é uma característica inerente a este tipo de resíduo. Assim como a reduzida alcalinidade total, observada neste e em outros estudos (Fisgativa *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2020).

Em contrapartida, os EGP apresentaram pH de 8,02 e AT de 9,9, valores relacionados a alimentação típica das aves. As galinhas de postura necessitam de cálcio para a produção dos ovos (Rostagno *et al.*, 2005).

Conforme Li *et al.* (2013) a relação STV/ST está relacionada ao conteúdo orgânico presente no substrato, quanto maior o valor obtido por meio desta relação, maior é a biodegradabilidade do material. Ressalta-se que os substratos RFV e EGP apresentaram valores da relação citada de 92% e 61%, respectivamente, indicando condições favoráveis à biodegradação.

O elevado teor de carboidratos observado no RFV é benéfico ao tratamento dos resíduos por DA. Entretanto, são degradados de forma rápida, podendo acarretar na formação de ácidos orgânicos que, por sua vez, dependendo da concentração, podem também inibir o processo de DA (Edwiges *et al.*, 2018).

Conforme Kelleher *et al.* (2002) dejetos de galinhas apresentam elevados níveis de proteínas, relacionados a alimentação não absorvida pelas aves. Astals *et al.* (2018) alertam que o elevado teor de proteína não digerida é decomposto em amônia livre e íon amônio, os quais, em grandes concentrações são prejudiciais ao sistema anaeróbio, principalmente na fase metanogênica.

Os RFV e os EGP apresentaram baixas concentrações de lipídio, característica já esperada para os resíduos estudados. Cabbai *et al.* (2013) afirmam que um incremento nas concentrações de lipídios



poderia aumentar a produção de metano devido à sua composição macromolecular. No entanto, Chen *et al.* (2008) ressaltam os efeitos inibitórios que podem ser causados pelas cadeias longas de ácidos graxos e amônia decorrentes da hidrólise lipídica.

Tabela 2 – Caracterização dos substratos

<b>Parâmetros</b>	<b>Resíduos de frutas e vegetais – RFV</b>	<b>Esterco de galinhas de postura – EPG</b>
Potencial hidrogeniônico – pH	3,85	8,02
Alcalinidade Total – AT	-	9,9 g L <sup>-1</sup>
Ácidos Graxos Voláteis – AGV	2,3 g L <sup>-1</sup>	6,6 g L <sup>-1</sup>
Sólidos Totais – ST	35,1 g L <sup>-1</sup>	52,2 g L <sup>-1</sup>
Sólidos Totais Voláteis – STV	32,1 g L <sup>-1</sup>	32,1 g L <sup>-1</sup>
Sólidos Totais Fixos – STF	2,9 g L <sup>-1</sup>	2,0 g L <sup>-1</sup>
STV/ST	92%	61%
Umidade	96%	95%
Demanda Química de Oxigênio	41,2 g L <sup>-1</sup>	47,0 g L <sup>-1</sup>
Nitrogênio Total de Kjeldahl – NTK	0,9 g L <sup>-1</sup>	3,8 g L <sup>-1</sup>
Nitrogênio amoniacal – N-NH <sub>4</sub>	0,3 g L <sup>-1</sup>	1,9 g L <sup>-1</sup>
Carbono Orgânico Total	17,9 g L <sup>-1</sup>	17,8 g L <sup>-1</sup>
Relação carbono e nitrogênio – C/N	20	5
Proteínas	16%	45,4%
Lípídeos	2,4%	0,7%
Carboidratos	81,3%	52,3%
Cinzas	0,3%	1,6%

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Deublein e Steinhauser (2008) afirmam com base nas equações químicas de conversão elementar, que a composição química dos substratos influencia na qualidade do biogás produzido e destaca uma produção equilibrada entre CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> para os carboidratos e proteínas e uma maior produção de CH<sub>4</sub> para os lipídios.



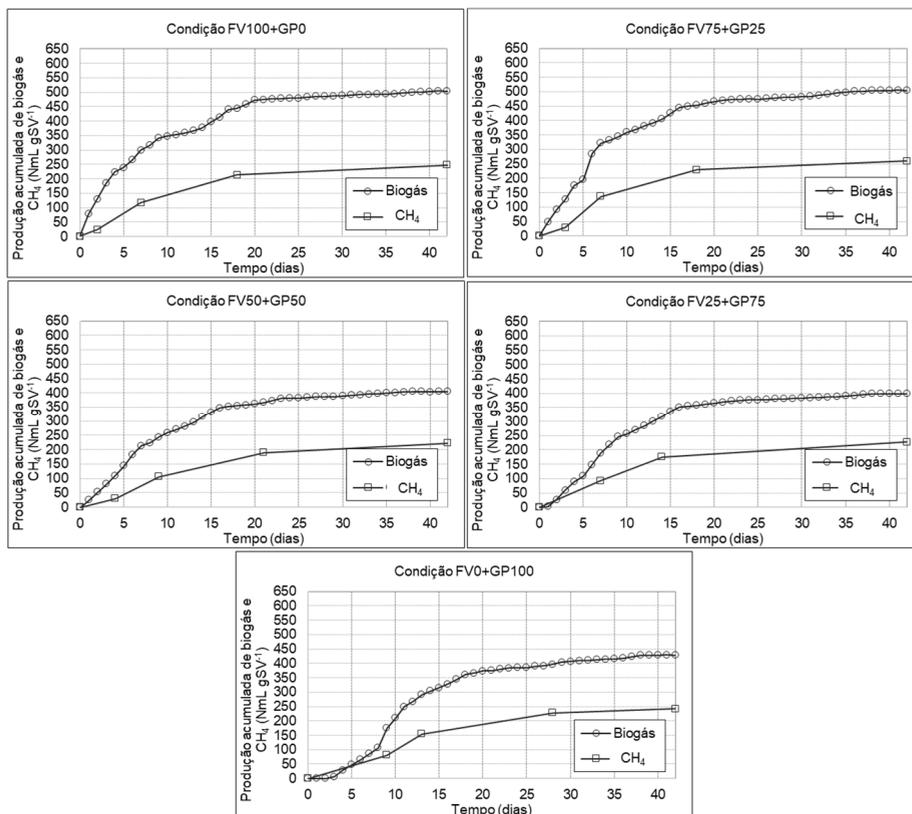
Desta forma observa-se que a co-digestão entre RFV e EGP também pode ser benéfica por promover maior equilíbrio em relação à composição e reação química.

### 2.2.1.2 Desenvolvimento do ensaio de BMP I

Para o ensaio de potencial bioquímico de metano (BMP) os EGP foram diluídos, equalizando os STV com os de RFV. O inóculo utilizado foi uma composição (1:1:1 v%) de efluentes de reatores anaeróbios que tratam esterco bovino, suíno e resíduos alimentares. Este apresentou pH de 7,8, AT de 7,1 g L<sup>-1</sup>, AGV de 0,2 g L<sup>-1</sup>, STV 68%, NKT e N-NH<sub>4</sub> de 2,4 e 1,1 g L<sup>-1</sup>, respectivamente.

O ensaio teve duração total de 42 dias, nos quais foram avaliadas diferentes proporções (% STV) entre os substratos RFV e EGP (100-0, 25-75, 50-50, 25-75 e 0-100). A Figura 4 apresenta a produção específica acumulada de biogás e metano.

Figura 4 – Produção específica acumulada de biogás e metano / BMP I



Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).



A condição que apresentou a maior produção específica acumulada de biogás foi a co-digestão RFV 75 + EGP 25, com 527 NmL gSTV<sup>-1</sup>, assim como a maior produção de metano, 262 NmL gSTV<sup>-1</sup>, seguida pela monodigestão de RFV, que apresentou produção de biogás de 525 NmL gSTV<sup>-1</sup> e produção de metano de 247,2 NmL gSTV<sup>-1</sup>. O elevado rendimento de biogás observado nestas condições está relacionado à maior biodegradabilidade do substrato RFV, em comparação ao EGP (Tabela 2).

No início do experimento todas as condições receberam padronização do pH inicial com solução de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (concentração de 120 g L<sup>-1</sup>) até 8,5, visto a comum redução do pH durante a DA destes resíduos (Bres *et al.*, 2018). O que proporcionou estabilidade ao ensaio, comprovado pelos valores finais de pH, próximos a neutralidade (Tabela 3).

Tabela 3 – Parâmetros de controle operacional e de desempenho / BMP I

Proporção entre substratos		Parâmetros				
RFV [% STV]	EGP [% STV]	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>	AT <sub>i</sub> [g L <sup>-1</sup> ]	AT <sub>f</sub> [g L <sup>-1</sup> ]	AGV <sub>i</sub> [g L <sup>-1</sup> ]
100	0	8,55	7,42	7,2	10,6	1,0
75	25	8,50	7,45	7,1	10,0	1,2
50	50	8,57	7,52	7,6	11,2	1,5
25	75	8,51	7,48	8,4	12,1	2,0
0	100	8,51	7,49	9,2	12,3	2,5

Proporção entre substratos		Parâmetros				
RFV [% STV]	EGP [% STV]	AGV <sub>f</sub> [g L <sup>-1</sup> ]	N-NH <sub>4i</sub> [g L <sup>-1</sup> ]	N-NH <sub>4f</sub> [g L <sup>-1</sup> ]	DQO <sub>f</sub> [%]	STV <sub>f</sub> [%]
100	0	0,7	0,93	1,25	26	26
75	25	0,9	1,10	1,37	27	28
50	50	0,9	1,31	1,47	25	18
25	75	0,9	1,39	1,53	25	19
0	100	1,0	1,57	1,63	22	20

Legenda: **RFV** – Resíduos de frutas e vegetais;



**EPG** – Esterco de galinha de postura;  
**pH** – Potencial hidrogeniônico;  
**AT<sub>i</sub>e<sub>f</sub>** – Alcalinidade total inicial e final [g L<sup>-1</sup>];  
**AGV<sub>i</sub>e<sub>f</sub>** – Ácidos graxos voláteis iniciais e finais [g L<sup>-1</sup>];  
**N-NH<sub>4</sub><sub>i</sub>e<sub>f</sub>** – Nitrogênio amoniacal inicial e final [g L<sup>-1</sup>];  
**DQO<sub>r</sub>** – Porcentagem da Demanda química de oxigênio removida no processo;  
**STV<sub>r</sub>** – Porcentagem dos Sólidos totais voláteis removidos no processo.

Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Em relação à AT, observa-se aumento em todas as condições ao final do experimento. O aumento citado pode ter contribuído para a manutenção da estabilidade do pH e manutenção da concentração de AGV em níveis favoráveis ao processo. Valores de pH próximos à neutralidade representam a estabilidade do processo de Co-DA e a ausência de processos inibitórios decorrentes da acidificação (Mata-Alvarez, 2003).

Conforme Callaghan *et al.* (2002), valores da relação AGV/AT inferiores a 0,4 são considerados ótimos para a DA e valores superiores a 0,6 indicam sobrecarga de alimentação. No início do experimento os valores obtidos por meio da relação supracitada foram de 0,14 a 0,32, indicando estabilidade das condições avaliadas.

Ao término do ensaio, os valores desta relação reduziram em todas as condições, provavelmente em decorrência do equilíbrio no processo de Co-DA, no qual houve consumo e, conseqüente, redução dos AGV, conforme pode ser observado na Tabela 3.

As maiores remoções de DQO e de STV, de 27 e 28%, respectivamente, foram obtidas na condição RFV75 + EGP25. A relação C/N da condição RFV 75 + EGP 25, resultou em 11/1, enquanto os valores ideais reportados pela literatura variam entre 20 e 30/1 (Wang *et al.*, 2012). As concentrações de N aumentaram progressivamente com relação ao aumento do percentual de EGP na composição da Co-DA. Os resultados refletem a composição característica do substrato utilizado (Tabela 2).

Diante dos resultados obtidos com relação a produção de biogás e metano (Figura 4), e levando em consideração a estabilidade do meio (Tabela 3), pode-se afirmar que a Co-DA com RFV 75% e EGP 25% contribuiu para que o processo fosse mais eficiente.



## 2.2.2 Ensaio de BMP II – Adição de biocarvão

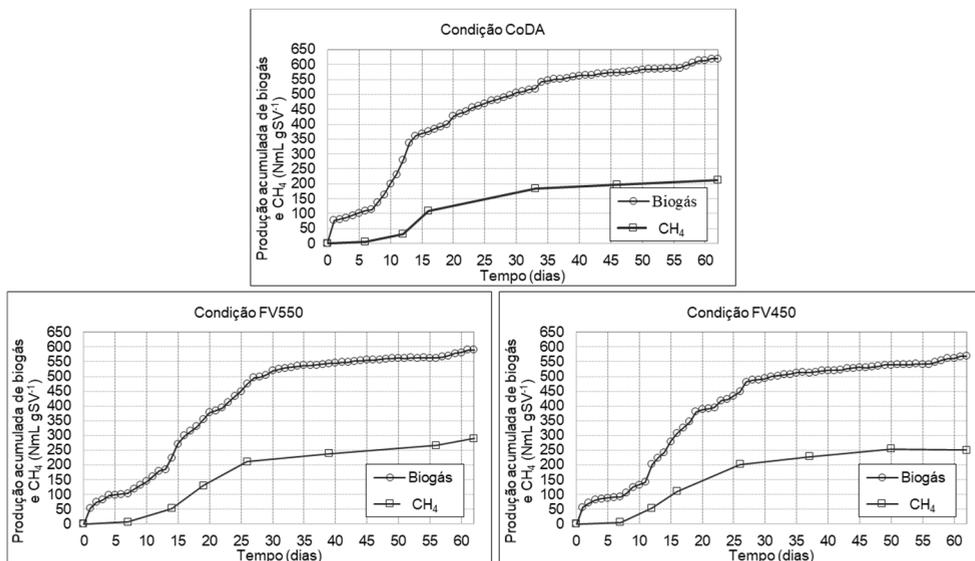
A fim de incrementar a produção de biogás e metano da DA de RFV o ensaio de BMP II, utilizou a Co-DA de RFV75 + EGP25 (selecionada no item 2.2.1.2) e avaliou a adição de 10 g L<sup>-1</sup> dos BC (item 2.1.1).

Foram utilizados os mesmos substratos do ensaio anterior, os quais permaneceram armazenados a -10 °C até utilização. A caracterização físico-química dos substratos foi apresentada na Tabela 2.

O inóculo utilizado foi proveniente de reator de inóculo mantido em laboratório, composto pelos efluentes citados no item 2.2.1.2. Como características, o inóculo utilizado apresentou pH de 7,72, AT de 6,05 g L<sup>-1</sup>, AGV de 0,87 g L<sup>-1</sup>, NKT e N-NH<sub>4</sub> de 2,03 e 1,70 g L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Os gráficos da Figura 5 mostram as curvas das produções específicas acumuladas de biogás e metano das condições com e sem BC.

Figura 5 – Produção específica acumulada de biogás e metano / BMP II



Fonte: Elaborada pelos autores com os dados da pesquisa (2022).

Com relação as produções de biogás as condições não apresentaram diferença significativa ( $p > 0,05$ ). No entanto, com relação a produção de metano as condições com adição de BC proporcionaram um incremento significativo de 23% (FV550) e de 17% (FV450) em relação ao controle (Co-DA).



Conforme Zhang *et al.* (2018) os BC proporcionam aceleração das fases de hidrólise, acidogênese e acetogênese, além de melhorar o crescimento e enriquecimento da atividade celular, o que estimula a maior produção de metano.

Para o controle operacional e avaliação de desempenho das condições analisados no ensaio BMP II foram considerados os valores da Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de controle operacional e de desempenho / BMP II

<b>Materiais Aditivos</b>	<b>pH<sub>i</sub></b>	<b>pH<sub>f</sub></b>	<b>AT<sub>i</sub> [g L<sup>-1</sup>]</b>	<b>AT<sub>f</sub> [g L<sup>-1</sup>]</b>	<b>AGV<sub>i</sub> [g L<sup>-1</sup>]</b>
Co-DA	7,47	7,45	5,2	6,0	0,7
FV550	8,05	7,56	5,2	7,5	0,7
FV450	7,89	7,50	5,2	7,2	0,7

<b>Materiais Aditivos</b>	<b>AGV<sub>f</sub> [g L<sup>-1</sup>]</b>	<b>STV<sub>r</sub> [%]</b>	<b>NKTr [%]</b>	<b>N-NH<sub>4r</sub> [%]</b>	<b>DQOr [%]</b>
Co-DA	0,3	74	14,8	-	48
FV550	0,3	70	20,7	16,7	69
FV450	0,4	68	21,9	20,0	56

Legenda: **pH<sub>i</sub>e<sub>f</sub>** – Potencial hidrogeniônico inicial e final;

**AT<sub>i</sub>e<sub>f</sub>** – Alcalinidade total inicial e final [g L<sup>-1</sup>];

**AGV<sub>i</sub>e<sub>f</sub>** – Ácidos graxos voláteis iniciais e finais [g L<sup>-1</sup>];

**STV<sub>r</sub>** – Porcentagem dos Sólidos totais voláteis removidos no processo;

**NKTr** – Porcentagem de nitrogênio total removido no processo;

**N-NH<sub>4r</sub>** – Porcentagem de nitrogênio amoniacal removida no processo;

**DQOr** – Porcentagem da demanda química de oxigênio removida no processo.

Fonte: Elaborada pelos autores com dados da pesquisa (2022).



Neste ensaio não foi observada a necessidade de elevar o pH no início do experimento, devido a influência imediata da adição do BC. Estes materiais contribuíram para o aumento do pH nas condições avaliadas (Tabela 4). Com o fim do ensaio os valores de pH das condições apresentaram leves decréscimos. Todavia, mantiveram-se próximos a neutralidade, fator de estabilidade indicado por Chernicharo (2016).

Com relação a AT e AGV é possível afirmar que o processo se manteve estável, sem grandes variações entre as condições. As concentrações iniciais de AT das condições estudadas foram acrescidas com o ensaio, sendo maiores para as condições com BC. Já as concentrações iniciais de AGV apresentaram queda e não ultrapassaram  $0,4 \text{ g L}^{-1}$ .

Os valores de remoção de STV para as condições observadas não apresentaram grandes variações entre si, sendo maiores para a condição Co-DA, assim, pode-se inferir que a remoção de STV está relacionada à produção de biogás, e não a sua qualidade. Já os valores de remoção de DQO, sugerem associação à qualidade do gás, visto que os menores valores foram observados na Co-DA.

A utilização de BC com capacidade adsorvente, fornece a DA maior segurança de estabilidade, como observado na Tabela 4. A condição controle (Co-DA) apresentou aumento de 12,9% de  $\text{N-NH}_4$  comparado ao início do ensaio, já as condições com BC apresentaram percentuais de remoção. Gerardi (2003) sugerem concentrações de  $\text{N-NH}_4$  inferiores a  $1500 \text{ mg L}^{-1}$  para DA, no presente estudo tal valor foi ultrapassado somente para condição Co-DA.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estratégias adotadas apresentaram resultados benéficos, de modo que, o uso de 25% de esterco de galinha de postura (EGP) e a adição de  $10 \text{ g L}^{-1}$  de biocarvão de resíduos de frutas e vegetais (RFV) contribuíram para o equilíbrio dos parâmetros operacionais e de estabilidade, promovendo incremento na produção de metano 6% e 23%, respectivamente. Estes resultados demonstram que as estratégias foram eficientes para a otimização do processo de conversão dos substratos avaliados.

Por meio do processo de Co-Da acrescido de BC foi possível viabilizar a valoração dos substratos devido a maior concentração de metano obtida, a qual favorece o posterior emprego do biogás como fonte para produção de energia. Além disso, o processo avaliado



demonstra ser uma importante alternativa para o gerenciamento dos resíduos utilizados como substratos neste estudo.

Sugere-se, para futuros estudos, que seja avaliada a viabilidade da aplicação do efluente do processo de Co-DA contendo BC, como biofertilizante.

## REFERÊNCIAS

- ABBAS, Yassir; YUN, Sining; WANG, Ziqi; ZHANG, Yongwey; ZHANG, Xianmei; WANG, K. Recent advances in bio-based carbon materials for anaerobic digestion: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110378, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110378>. Disponível em: <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S1364032120306663>. Acesso em: 04 abr. 2022.
- ABRELPE – Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- ALMEIDA, Edmilson Igor Bernardo; FERRÃO, Gregori da Encarnação; MARQUES, Jordânio Inácio; SOUSA, Washington da Silva. **Perdas pós-colheita de frutas e hortaliças no Maranhão: estimativas, causas, impactos e soluções**. São Luís: EDUFMA, 2020. 160 p. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Renato-Dantas-2/publication/344477772\\_Perdas\\_Pos-Colheita\\_de\\_Frutas\\_e\\_Hortalicas/links/5f7b430f299bf1b53e0e723f/Perdas-Pos-Colheita-de-Frutas-e-Hortalicas.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Renato-Dantas-2/publication/344477772_Perdas_Pos-Colheita_de_Frutas_e_Hortalicas/links/5f7b430f299bf1b53e0e723f/Perdas-Pos-Colheita-de-Frutas-e-Hortalicas.pdf). Acesso em: 13 abr. 2022.
- ANGELIDAKI, Irini; TREU, Laura; TSAPEKOS, Panagiotis; LUO, Gang; CAMPANARO, Stefano; WENZEL, Henrik; KOUGIAS, Panagiotis G. Biogas upgrade and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975018300119>. Acesso em: 20 abr. 2022.
- APHA/AWWA/WEF – American Public Health Association, American Water Works Association. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Denver: Water Environment Federation, 2017. Disponível em: <http://www.standardmethods.org/>. Acesso em: 05 abr. 2022.
- ASTALS, Sergi; PECES, Miriam; BATSTONE, Damien John; JENSEN, Paul D.; TAIT, Stephan. Characterising and modelling free ammonia and ammonium inhibition in anaerobic systems. **Water Research**, v. 143, p. 127-135, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.021>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135418304652>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- ASTM Standard D1762-84. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2013. Disponível em: <http://www.astm.org/Standards/D1762.htm>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- BORTH, Priscila Lianne Biesdorf; PERIN, Jessica Klarosk Helenas; TORRECILHAS, Arthur Ribeiro; PAN, Nicole Caldas; KURODA, Emília Kiyomi; FERNANDES, Fernando. Biochemical methane potential of food and garden waste co-digestion with variation in solid content and inoculum:substrate ratio. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, p. 1974-1983, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01270-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-021-01270-z>. Acesso em: 30 abr. 2022.



BRES, Patricia; BEILY, María Eugenia; YOUNG, Brian Jonathan; GASULLA, Javier; BUTTI, Mariano; CRESPO, Diana; CANDAL, Roberto; KOMILIS, Dimitri. Performance of semi-continuous anaerobic co-digestion of poultry manure with fruit and vegetable waste and analysis of digestate quality: A bench scale study. **Waste Management**, v. 82, p. 276-284, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18306597>. Acesso em: 24 abr. 2022.

CABBAL, Valentina; BALLICO, Maurizio; ANEGGI, Eleonora; GOI, Daniele. BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. **Waste Management**, v. 33, n. 7, p. 1626-1632, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X13001621>. Acesso em: 15 abr. 2022.

CALLAGHAN, Fergal J.; WASE, D. A. John; THAYANITHY, Kuganakathan; FORSTER, Christopher F. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 1, p. 71-77, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00057-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953401000575>. Acesso em: 15 abr. 2022.

CAVICCHIOLI, Bianca; SILVA, Rafaela Cristina da. Direto do Campo – Técnicas modernas de pós colheita podem garantir o frescor do produto da roça ao consumidor. **Hortifruti Brasil**, v. 5, n. 49, p. 6-11, 2006. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/acessar/direto-do-campo-tecnicas-modernas-podem-garantir-o-frescor-do-campo-ao-consumidor.aspx>. Acesso em: 13 abr. 2022.

CHEN, Ye; CHENG, Jay J.; CREAMER, Kurt S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407001563>. Acesso em: 17 abr. 2022.

CHEN, Yong; MORI, Shigekatsu; PAN, Wei-Ping. Studying the mechanisms of ignition of coal particles by TGDTA. **Thermochimica Acta**, v. 275, n. 1, p. 149-158, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02727-0](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02727-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0040603195027270>. Acesso em: 03 abr. 2022.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Reatores Anaeróbios**. v. 5. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2016.

DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from waste and renewable resources**. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. Disponível em: [https://chemistry.pixel-online.org/files/ed\\_pack/04/further03/Deublein%20D.%20Steinhauser%20A.-Biogas%20from%20Waste%20and%20Renewable%20Resources.pdf](https://chemistry.pixel-online.org/files/ed_pack/04/further03/Deublein%20D.%20Steinhauser%20A.-Biogas%20from%20Waste%20and%20Renewable%20Resources.pdf). Acesso em: 17 abr. 2022.

DILALLO, Rosemarie; ALBERTSON, Orris E. Volatile Acids by Direct Titration. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, v. 33, n. 4, p. 356-365, 1961. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25034391>. Acesso em: 12 mar. 2022.

EDWIGES, Thiago; FRARE, Laercio; MAYER, Bruna; LINS, Leonardo; TRIOLO, Jin Mi; FLOTATS, Xavier; COSTA, Mônica Sarolli Silva de Mendonça. Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v. 71, p. 618-625, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/>



j.wasman.2017.05.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17303574>. Acesso em: 04 abr. 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of Food and Agriculture**: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction. Roma: FAO, 2019. Disponível em: <https://www.fao.org/3/ca6030en/ca6030en.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2022.

FISGATIVA, Henry; TREMIER, Anne; DABERT, Patrick. Characterizing the variability of food waste quality: a need for efficient valorization through anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 50, p. 264-274, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.041>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16300411>. Acesso em: 12 abr. 2022.

GERARDI, Michael H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471468967>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471468967>. Acesso em: 12 abr. 2022.

Ji, Chao; KONG, Chui-Xue; MEI, Zi-Li; LI, Jiang. A Review of the Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Waste. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 183, n. 3, p. 906-922, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12010-017-2472-x>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12010-017-2472-x>. Acesso em: 10 abr. 2022.

JIMÉNEZ, Emeterio Iglesias; GARCIA, Vítor Pérez. Relationships between organic carbon and total organic matter in municipal solid wastes and city refuse composts. **Bioresource Technology**, v. 41, n. 3, p. 265-272, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(92\)90012-M](https://doi.org/10.1016/0960-8524(92)90012-M). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085249290012M>. Acesso em: 10 abr. 2022.

KARLSSON, Tommy; KONRAD, Odorico; LUMI, Marluci; SCHMEIER, Nara Paula; MARDER, Munique; CASARIL, Camila Elis; KOCH, Fabio Fernandes; PEDROSO, Albari Gelson. **Manual Básico de Biogás**. Lajeado: Univates, 2014. Disponível em: [https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf\\_71.pdf](https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf). Acesso em: 10 abr. 2022.

KELLEHER, Brian P.; LEAHY, James J.; HENIHAN, Anne Marie, O'DWYER, Thomas Francis; SUTTON, David; LEAHY, Martin J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 27-36, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00133-x](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-x). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085240100133X>. Acesso em: 12 abr. 2022.

LI, Yeqing; ZHANG, Ruihong; LIU, Xiaoying; CHEN, Chang; XIAO, Xiao; FENG, Lu; HE, Yanfeng; LIU, Guangqing. Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Co- digestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure. **Energy & Fuels**, v. 27, n. 4, p. 2085-2091, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef400117f>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef400117f>. Acesso em: 10 abr. 2022.

MATA-ALVAREZ, Joan. Biomethanization of organic fraction of municipal solid waste. **IWA Publishing**. London: IWA, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780402994>. Disponível em: <https://iwapon-line.com/ebooks/book/149/Biomethanization-of-the-Organic-Fraction-of>. Acesso em: 10 abr. 2022.

MÖLLER, Kurt; MÜLLER, Torsten. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: a review. **Engineering in Life Sciences**, v. 12, n. 3, p. 242-257, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/elsc.201100085>. Acesso em: 23 mar. 2022.



NIELSEN, Henrik Bangsø; ANGELIDAKI, Irini. Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7995-8001, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.049>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852408002927>. Acesso em: 13 abr. 2022.

PAN, Justing; MA, Junyi; LIU, Xiaoxia; ZHAI, Limei; OUYANG, Xihui; LIU, Hongbin. Effects of different types of biochar on the anaerobic digestion of chicken manure. **Bioresource Technology**, v. 275, p. 258-265, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.068>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085241831736X>. Acesso em: 15 abr. 2022.

ROMERO-GÜIZA, Maycoll S.; VILA, Joaquim; MATA-ALVAREZ, Joan; CHIMENOS, Joseph María; ASTALS, Sergi. The role of additives on anaerobic digestion: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1486-1499, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.094>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211501477X>. Acesso em: 17 abr. 2022.

ROSTAGNO, Horacio Santiago; ALBINO, Luiz Fernando Teixeira; DONZELE, Juarez Lopes; GOMES, Paulo César; OLIVEIRA, Rita Flávia de; LOPES, Darci Clementino; FERREIRA, Aloizio Soares; BARRETO, Sergio Luiz de Toledo. **Tabelas brasileiras para aves e suínos: Composição de alimentos e exigências nutricionais**. Viçosa: UFV – Departamento de Zootecnia, 2005. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Tabelas+brasileiras+-+Rostagno\\_000gy1tqym602wx7ha0b6gs0xfzo6pk5.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Tabelas+brasileiras+-+Rostagno_000gy1tqym602wx7ha0b6gs0xfzo6pk5.pdf). Acesso em: 17 abr. 2022.

SANTOS, Liliana Andréa dos; VALENÇA, Rebeca Beltrão; SILVA, Leandro César Santos da; HOLANDA, Sávio Henrique de Barros; SILVA, Anderson Felipe Viana da; JUCÁ, José Fernando Thomé; SANTOS, André Felipe Melo Sales. Methane generation potential through anaerobic digestion of fruit waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120389, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120389>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620304364>. Acesso em: 12 mar. 2022.

SHEN, Yanwen; FORRESTER, Sara; KOVAL, Jason; URGUN-DEMIRTAS, Meltem. Yearlong semi-continuous operation of thermophilic two-stage anaerobic digesters amended with biochar for enhanced biomethane production. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 863-874, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.135>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261731079X>. Acesso em: 12 mar. 2022.

VEREINS DEUTSCHER INGENIEURE – VDI. **VDI 4630: Fermentation of organic materials: characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. Düsseldorf: VDI- Handbuch Energietechnik, 2006. Disponível em: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4630-fermentation-of-organic-materials-characterization-of-the-substrate-sampling-collection-of-material-data-fermentation-tests>. Acesso em: 11 mar. 2022.

WANG, Xiaojiao; YANG, Gaihe; FENG, Yongzhong; REN, Guangxin; HAN, Xinhui. Optimizing feeding composition and carbon-nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw. **Bioresource Technology**, v. 120, p. 78-83, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.058>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852412009625>. Acesso em: 23 abr. 2022.

WANG, Zhanghong; GUO, Haiyan; SHEN, Fei; YANG, Gang; ZHANG, Yanzong; ZENG, Yongmei; WANG, Lilin; XIAO, Hong; DENG, Shihuai. Biochar produced from



oak sawdust by Lanthanum (La)-involved pyrolysis for adsorption of ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), and phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). **Chemosphere**, v. 119, p. 646-653, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.084>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653514009473>. Acesso em: 23 abr. 2022.

ZENEBON, Odair; PASCUET, Neus Sadocco; TIGLEA, Paulo. (coord.). **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Disponível em: [http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016\\_3\\_19/analisedealimentosial\\_2008.pdf](http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016_3_19/analisedealimentosial_2008.pdf). Acesso em: 12 abr. 2022.

ZHANG, Jishi; ZHAO, Wenqian; ZHANG, Huiwen; WANG, Zejie; FAN, Chuanfang; ZANG, Lihua. Recent achievements in enhancing anaerobic digestion with carbon-based functional materials. **Bioresour. Technol.**, v. 266, p. 555-567, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.076>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418309854>. Acesso em: 23 abr. 2022.



# **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO DE RESÍDUOS DE RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO E OPERAÇÃO DE REATOR EM ESCALA REAL**

## ***ASSESSMENT OF THE PRODUCTION POTENTIAL OF METHANE FROM UNIVERSITY RESTAURANT WASTE AND REAL SCALE REACTOR OPERATION***

Como citar [ABNT 6023:2018]:

CHALLIOL, Adriana Zemiani; PERIN, Jessica Klarosk Helenas; BORTOLOTI, Mauricio Aparecido; BORTH, Priscila Liane Biesdorf; NAVARRO, Betina Ludwig; KURODA, Emília Kiyomi; FERNANDES, Fernando. Avaliação do potencial de produção de metano de resíduos de restaurante universitário e operação de reator em escala real. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersectorial e Inovação: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos**. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

---

### ***Adriana Zemiani Challiol***

Engenheira Ambiental. Mestra em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Doutoranda em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL).

E-mail: [adrianazemiani@gmail.com](mailto:adrianazemiani@gmail.com)

### ***Jessica Klarosk Helenas Perin***

Engenheira Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Mestra e Doutoranda em Engenharia Civil pela UEL. Estudante de Engenharia Civil pela Faculdade Pitágoras de Londrina.

E-mail: [jessica.klarosk@hotmail.com](mailto:jessica.klarosk@hotmail.com)

### ***Mauricio Aparecido Bortoloti***

Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário de Adamantina (Unifai). Mestre e Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL).

E-mail: [mauricio.bortoloti@hotmail.com](mailto:mauricio.bortoloti@hotmail.com)

### ***Priscila Liane Biesdorf Borth***

Engenheira Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro). Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestra em Engenharia de Edificações e Saneamento pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Doutora em Engenharia Civil pela UEL.

E-mail: [pr\\_biesdorf@hotmail.com](mailto:pr_biesdorf@hotmail.com)



### **Betina Ludwig Navarro**

Engenheira Civil pela Universidade de Marília (Unimar). Mestra em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina (UEL).

E-mail: betinanavarro12@gmail.com

### **Emília Kiyomi Kuroda**

Engenheira Civil pela Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (EESC/USP). Mestra e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Professora Associada no Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

E-mail: ekkuroda@uel.br

### **Fernando Fernandes**

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Mestre e Doutor em Engenharia Civil pelo Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT). Professor Associado no Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina (UEL), vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

E-mail: fernando@uel.br

## **RESUMO**

A quantidade de resíduos produzidos a partir das mais diversas atividades antrópicas representa um dos maiores problemas enfrentados nos dias atuais, especialmente em países em desenvolvimento. A gestão falha dos resíduos resulta em imensos depósitos de materiais abandonados, que podem degradar o ambiente e acarretar inúmeros problemas de saúde pública. Neste contexto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabeleceu um novo modelo na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos no Brasil. Entre as mudanças apresentadas, uma das mais relevantes é a que prioriza o não aterramento da fração orgânica e a recuperação energética dos resíduos. Neste sentido, o emprego de tecnologias adequadas para gestão e tratamento destes resíduos é fundamental para a correta estabilização da matéria orgânica existente. Assim, a digestão anaeróbia surge como uma alternativa viável para o tratamento destes resíduos, considerando os aspectos de saneamento e energia e promovendo a reciclagem orgânica dos nutrientes. Esta tecnologia gera o biogás, que representa uma opção de energia renovável para o país. Desta forma, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho da biodigestão anaeróbia de resíduos alimentares de restaurante universitário, considerando aspectos de geração de biogás e metano e remoção da matéria orgânica. Inicialmente, para verificar a biodegradabilidade dos resíduos alimentares e avaliar a produção específica de metano, foram realizados ensaios do Potencial Bioquímico de Metano (BMP), em escala de bancada. Avaliou-se, também, o desempenho da digestão dos resíduos alimentares em reator anaeróbio em escala real (58 m<sup>3</sup>), com foco na análise quali-quantitativa do biogás e do efluente gerados e eficiência geral do processo.



Palavras-chave: Tratamento de Resíduos Sólidos Orgânicos. Digestão Anaeróbia. Valorização Energética de Resíduos. Biogás. Metano.

## ABSTRACT

The amount of waste produced from human activities represent one of the biggest environmental problems of modern society, especially in developing countries. Poor waste management results in huge deposits of abandoned materials, that can degrade the environment and lead to numerous public health problems. In this context, the National Solid Waste Policy, in Brazil, established a new model for the management of solid waste. Among the changes presented, one of the most relevant is the need to prioritize the non-grounding of the organic fraction and the energy recovery of waste. Thus, the use of appropriate technologies for the management and treatment of these residues is essential for the correct stabilization of organic matter. Hence, anaerobic digestion appears as a viable alternative for the treatment of these residues, considering the aspects of sanitation and energy and promoting the organic recycling of nutrients. This technology generates biogas, which represents a renewable energy option for the country. In this sense, this study aims to evaluate the performance of anaerobic digestion of food waste from a university restaurant, considering aspects of biogas and methane generation and removal of organic matter. Initially, to verify the biodegradability of food residues and to evaluate the specific production of methane, Biochemical Methane Potential (BMP) experiments were conducted, on bench scale. The performance of digestion of food waste in an anaerobic reactor on a real scale (58 m<sup>3</sup>) was also evaluated, focusing on the qualitative-quantitative analysis of the biogas and effluent generated and the general efficiency of the process.

Keywords: Treatment of Organic Solid Waste. Anaerobic digestion. Energy Recovery of Waste. Biogas. Methane.

## 1 INTRODUÇÃO

A pandemia do Covid-19 promoveu mudanças no estilo de vida da população e influenciou diretamente na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, alcançando uma marca de 82,5 milhões de toneladas geradas em 2020, com uma considerável e crescente taxa de geração de resíduos *per capita* (1,07 kg dia<sup>-1</sup>). Ao passo que a fração orgânica destes resíduos representa, em média, 50% dos resíduos gerados no país, o contexto ao qual se insere tal questão torna-se, cada vez mais, motivo de preocupação da sociedade, que busca aplicar políticas baseadas na preservação dos recursos naturais e manutenção da sustentabilidade ambiental (Abrelpe, 2021).

Estudos técnicos e científicos provaram que a destinação final baseada no aterramento dos resíduos contribui de maneira significativa para as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Assim, fica evidente que o uso inadequado do aterro sanitário promove



inúmeros impactos sociais, ambientais e de saúde pública (Paula *et al.*, 2019). Neste contexto, torna-se fundamental a fomentação e disseminação de soluções tecnológicas que promovam a valorização dos resíduos, recuperando matéria e energia (Probiogás, 2016).

O tratamento biológico, por meio da digestão anaeróbia, é uma das tecnologias indicadas para a fração orgânica dos resíduos. Ao encaminhar os resíduos orgânicos, até então enviados aos aterros sanitários, para a digestão anaeróbia, geram-se subprodutos passíveis de utilização, como biogás, biofertilizante e composto orgânico (Rodrigues *et al.*, 2019). O aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica, térmica e biometano vem ganhando espaço no mundo, sobretudo por ser uma fonte renovável de energia. Em 2020, o potencial nacional de produção de biogás bruto calculado foi de, aproximadamente, 83 bilhões de metros cúbicos ao ano, considerando apenas setores sucroenergético, agroindustrial e de saneamento (CIBiogás, 2021).

Desta forma, este estudo surge como parte do projeto de pesquisa intitulado "Geração de energia elétrica por metanização e gaseificação a partir de resíduos sólidos orgânicos", executado no âmbito da Chamada Pública VPDE Copel DIS 001/2017 do Projeto prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D PD2866-0472/2017, financiado pela Companhia Paranaense de Energia – Copel (Contrato de Cooperação Técnico-Científica nº 4600013405), visando implementar na Universidade Estadual de Londrina (UEL) uma solução técnica viável para o manejo adequado dos resíduos orgânicos gerados, assegurando a minimização dos possíveis impactos ao meio ambiente.

## 2 DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

A digestão anaeróbia (DA) é um processo biológico, que ocorre na ausência de oxigênio, no qual diferentes grupos de microrganismos decompõem materiais orgânicos biodegradáveis. Diversas reações metabólicas estão envolvidas neste processo de biodegradação anaeróbia, como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Zhang *et al.*, 2014).

A DA é uma alternativa de tratamento biológico que apresenta um futuro promissor, uma vez que contribui para a solução de dois problemas: produção de resíduos e disponibilidade de energia (Borth *et al.*, 2022). O uso desta tecnologia para tratamento de resíduos alimentares tem sido realizado em alguns países com bons resultados, pois a conversão da matéria orgânica por micro-organismos



anaeróbios gera um resíduo estabilizado e passível de ser utilizado como fertilizante, enquanto produz uma fonte energética, o biogás, capaz de ser utilizado de diferentes formas (Ren *et al.*, 2018).

Li *et al.* (2018) afirma que muitos trabalhos estão sendo realizados visando a melhoria na estabilidade e eficiência da digestão anaeróbia de resíduo alimentar, como a utilização de aditivos, pré-tratamento, co-digestão com outros resíduos, digestores e condições operacionais diferenciadas (temperatura; tempo de detenção hidráulica – TDH; e, recirculação).

## **2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO E OPERAÇÕES DE REATORES EM ESCALA REAL**

Como não existem Normas Técnicas Brasileiras (NBRs) específicas para determinação da produção de biogás, alguns métodos de monitoramento dos principais fatores de degradação dos resíduos foram selecionados, avaliados e testados e possibilitaram a criação de uma proposta de procedimento para mensurar o potencial de geração de biogás e metano (CH<sub>4</sub>) de resíduos orgânicos (SILVA *et al.*, 2016).

Este procedimento, conhecido como ensaio de Potencial Bioquímico do Metano (BMP) é realizado a partir de estudos experimentais desenvolvidos em reatores em escala de bancada, com o objetivo de degradar o substrato de estudo e quantificar a produção específica de metano da amostra (Gueri, 2017). Trata-se de um método amplamente utilizado para determinação da produção de biogás a partir da biodegradação de determinado resíduo, possibilitando o estudo da otimização de condições operacionais para aplicação em maiores escalas (Borth *et al.*, 2021).

Aplicar o resultado de ensaios de bancada em escalas maiores representa um desafio para quem deseja implementar o processo de digestão anaeróbia em reatores tamanho real. Inúmeras são as questões operacionais que tornam o processo delicado e precisam de atenção, como o start up do digestor, a variação de carga orgânica do sistema, as características do substrato de alimentação, os modelos de homogeneização e aquecimento disponíveis, uso de diferentes substratos, o sistema de captação e purificação do biogás gerado, entre outros. Assim, bibliografias confiáveis e aplicáveis sobre o tema ainda são escassas no Brasil e representam uma lacuna do conhecimento para ser preenchida.



## **2.2 POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO – BMP**

Esta etapa experimental teve por objetivo avaliar o melhor inóculo para a digestão anaeróbia do Resíduo Alimentar (RA), proveniente do Restaurante Universitário (RU) da Universidade Estadual de Londrina (UEL). O teste de potencial de geração de metano foi realizado nas dependências do Laboratório de Tratamento de Águas e Resíduos, parte integrante do Departamento de Hidráulica e Saneamento do CTU da UEL.

### **2.2.1 Inóculos e Substrato**

Os inóculos utilizados no experimento referem-se ao dejetos suíno (DS) proveniente do fundo de um reator anaeróbio e o lodo presente no fundo de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Londrina – lodo de esgoto (LE). Após a coleta, os inóculos permaneceram por quatro dias em repouso em temperatura ambiente para a desgaseificação.

O substrato utilizado foi o RA proveniente do RU da UEL, composto por restos de alimentos que sobram das bandejas dos alunos e funcionários que frequentam o local. Os resíduos foram coletados no RU em bombonas plásticas, encaminhados ao laboratório, onde passaram por tritura em liquidificador para garantir melhor homogeneização e menor granulometria. Posteriormente, foram congelados a -4 °C até a sua utilização.

### **2.2.2 Caracterização físico-química**

Foram realizadas amostragens antes da incubação dos BMPs e ao final do experimento. Os parâmetros analisados foram: pH, alcalinidade total (AT), sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV) e demanda química de oxigênio (DQO), descritas conforme *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2017). O RA foi caracterizado quanto aos teores de proteína e carboidratos, conforme metodologia de FAO (2016). O teor de lipídios na amostra foi realizado pelo método do Instituto Adolfo Lutz (Zenebon *et al.*, 2008).

### **2.2.3 Ensaio de Potencial Bioquímico de Metano – BMP**

A verificação do potencial de geração de biogás foi obtida pelo ensaio de BMP, em escala de bancada. Os reatores utilizados foram montados em frascos de borossilicato com volume total de 310



mL, com tampa rosqueada de nylon tecnil em cada frasco. Os reatores foram preenchidos com 120 mL de amostras, restando nos frascos 190 mL de volume, chamado de *headspace*, para o armazenamento do biogás produzido.

Os reatores anaeróbios foram conduzidos em batelada, temperatura constante de  $36\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$  e agitados manualmente e diariamente, garantindo um maior contato entre os microrganismos e o substrato, e permaneceram na estufa (Angelidaki *et al.*, 2009).

Este experimento baseou-se em quatro tratamentos realizados em triplicatas, totalizando doze frascos (Tabela 1).

Tabela 1 – Planejamento experimental do Ensaio BMP

Tratamentos	Proporção (inóculo: substrato da mistura)	g STV adicionado mL <sup>-1</sup>
Dejeto suíno (DS)	1:0	1,89
Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (LE)	1:0	1,52
DS + Resíduo alimentar (RA)	1:1	3,22
LE + RA	1:1	3,19

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

### 2.2.4 Coleta e Análise dos Dados de Produção do Biogás

O biogás produzido foi caracterizado com o equipamento Dräger® modelo X-am 7000, fornecendo em percentual os valores referentes aos gases: CH<sub>4</sub> (gás metano), CO<sub>2</sub> (gás carbônico) e H<sub>2</sub>S (gás sulfídrico). A expurga dos BMPs foi realizada quando pelo menos um reator da triplicata atingisse a pressão mínima de 0,75 kgf cm<sup>-2</sup>. O gás gerado foi convertido em volume de biogás, conforme metodologia apresentada por Borth *et al.* (2021).

### 2.2.5 Digestão anaeróbia de resíduos alimentares em escala real

A Unidade de Pesquisa em Biogás da Universidade Estadual de Londrina (UP-BioUEL) foi utilizada como protótipo em escala real para



aplicação dos conhecimentos e tecnologias desenvolvidas no âmbito dos laboratórios de pesquisa. O reator, principal componente da unidade, foi montado com placas pré-fabricadas em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), com diâmetro interno de 5 m, altura de 3 m e volume total de 58 m<sup>3</sup>.

Por característica, trata-se de um modelo de reator tipo mistura completa (CSTR = Continuous-flow Stirred Tank Reactors). Possui acoplado à sua estrutura sistemas periféricos de movimentação de volumes hidráulicos, controle de temperatura por recirculação de água aquecida em serpentinas internas. Outros sistemas periféricos compõe a unidade, sendo os sistemas de preparo do substrato, transporte, armazenamento, purificação do biogás e conversão energética.

### **2.2.5.1 Inoculação, coleta e tratamento dos substratos e start do processo**

Como fonte de microrganismos para inoculação do sistema foram consideradas duas fontes distintas, sendo dejetos suínos e bovinos digeridos em biodigestores modelo canadense, em operação nas cidades de Arapongas-PR e Leópolis-PR, respectivamente. Os inóculos foram coletados e 12 m<sup>3</sup> de cada fonte inseridos ao reator (cerca de 60% do volume deste), onde permaneceram por 10 dias sob agitação intermitente (10 minutos sob agitação em 800 rpm com 4 horas de repouso) e elevação gradual da temperatura para a faixa mesófila (36 °C ± 2).

Como fonte de material orgânico, foram aplicados três substratos. Inicialmente o proposto era tratar todo o Resíduo Alimentar (RA) do Restaurante Universitário da UEL (RU), porém, com a instalação da situação pandêmica devido ao COVID-19, o fornecimento deste material foi interrompido, sendo necessário a utilização, de Dejetos Suínos (DS) produzidos na unidade experimental de suínos da UEL. Com o fim do fornecimento do DS, retornou-se com a utilização de RA advindos do Hospital Universitário da UEL (HU), utilizando também no início do processo quando ocorreu o recesso acadêmico de final de ano da UEL. Para RU e HU, a geração ocorre por resíduos do preparo e pós-consumo, enquanto o DS é proveniente da limpeza das baias de criação dos animais.

Para operação do sistema, os RA das duas fontes foram triturados para redução do tamanho das partículas e homogeneização. A diluição do substrato foi realizada com água



durante o *start* e, na condução dos Tempos de Detenção Hidráulica (TDHs), utilizou-se o efluente do processo clarificado, onde permaneceu em repouso por 48 horas – ou mais – para sedimentação e retirada dos sólidos. O DS foi aplicado conforme foi coletado.

A alimentação do sistema ocorreu com frequência de três vezes por semana (segundas, quartas e sextas-feiras). A carga aplicada variou de acordo com a disponibilidade de substrato, em função dos cardápios e quantidade de refeições servidas no RU e HU. Considerou o *start* do sistema o período de dezoito dias, no qual as alimentações foram suficientes para elevar o volume da mistura interna de 24 m<sup>3</sup> (inóculo) para 40 m<sup>3</sup> (volume útil do sistema). Durante este período não foram realizadas retiradas de efluente do reator. Após o volume útil estar completo, iniciou-se o período de operação e monitoramento do sistema, considerando como TDH o período de 40 dias. Com base no TDH estipulado, a vazão de alimentação foi de 2,3 m<sup>3</sup>, ajustada devido ser realizada três vezes na semana apenas, tanto para alimentação, quanto para descarte de efluente, sendo este destinado ao reciclo como efluente clarificado.

Em dado momento da operação, todas as fontes de substrato foram exauridas, optando-se, então, por operar o sistema por um período sem a adição de novas cargas orgânicas, período este que perdurou por 20 dias e foi denominado de período ocioso (PO).

O período total monitorado considerou seis TDHs, sendo quatro após o *start* do processo e dois após o PO, para verificação da resposta do sistema ao período sem alimentações.

### **2.2.5.2 Monitoramento do desempenho do processo de DA**

As análises físico-químicas dos parâmetros de controle, monitoramento e desempenho foram realizadas em amostras de líquido afluente e efluente duas vezes por semana. Foram avaliados os parâmetros pH, alcalinidade total (AT), intermediária (AI) e parcial (AP), ácidos graxos voláteis (AGV), série de sólidos.

As concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub> no biogás foram quantificadas por meio de um analisador portátil MRU<sup>®</sup> Optima 7 Biogas e seu volume medido com um medidor de gás G2.5 – Aépio<sup>®</sup>.

## **2.3 RESULTADOS OBTIDOS – POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO**

A seguir, resultados de controle, desempenho e de produção de biogás e metano do Ensaio BMP.



### 2.3.1 Parâmetros de controle e desempenho operacional

A Tabela 2 apresenta a caracterização dos tratamentos realizados neste experimento quanto aos parâmetros de pH e AT, no início e no final do experimento. O pH inicial dos tratamentos ficou próximo de 8,0 devido a adição de tampão. O pH básico inicial pode ter garantido valores de pH próximos a neutralidade ao final do experimento.

Tabela 2 – Caracterização inicial e final dos tratamentos para os parâmetros pH e alcalinidade total, em gramas por litro

Tratamento	pH		Alcalinidade Total em gramas por litro AT [g L <sup>-1</sup> ]	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Dejeto suíno (DS)	8,01	7,52	4,93	7,24
Lodo de ETE (LE)	9,01	7,40	2,30	3,80
DS + Resíduo alimentar (RA)	8,02	7,32	4,48	6,67
LE + RA	8,70	7,80	2,00	3,81

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A AT inicial dos tratamentos ficou dentro da faixa considerada recomendável para favorecimento da digestão anaeróbia, entre 1 e 5 g L<sup>-1</sup>. Em relação a AT ao final do experimento, observa-se que houve aumento da concentração de CaCO<sub>3</sub> em todas as amostras. O aumento da AT pode ter ocorrido devido a atividade das bactérias formadoras de metano que, ao consumirem os ácidos voláteis, produzem alcalinidade, mantendo o pH e fazendo com que o meio permaneça estável para as condições de biodegradação (Gerardi, 2003). A Tabela 3 mostra os resultados ST, STV e DQO das condições estudadas nesta fase experimental.



Tabela 3 – Caracterização inicial e final dos tratamentos para os parâmetros Sólidos Totais, Sólidos Totais Voláteis e Demanda Química de Oxigênio Total em gramas por litro

Tratamento	Sólidos Totais (ST) [g L <sup>-1</sup> ]	
	Inicial	Final
Dejeto suíno (DS)	27,64	24,54
Lodo de ETE (LE)	55,75	38,61
DS + Resíduo alimentar (RA)	38,09	17,42
LE + RA	35,16	21,66

Tratamento	Sólidos Totais Voláteis (STV) [g L <sup>-1</sup> ]		
	Inicial	Final	% remoção
Dejeto suíno (DS)	15,46	14,12	8,70
Lodo de ETE (LE)	59,20	16,70	42,80
DS + Resíduo alimentar (RA)	26,85	10,01	62,70
LE + RA	26,59	11,65	56,20

Tratamento	Demanda Química de Oxigênio Total (DQO <sub>t</sub> ) [g L <sup>-1</sup> ]		
	Inicial	Final	% remoção
Dejeto suíno (DS)	34,87	27,25	21,80
Lodo de ETE (LE)	43,59	31,76	27,10
DS + Resíduo alimentar (RA)	37,78	32,00	19,60
LE + RA	42,96	27,44	36,10

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Os STV na condição DS + RA tiveram uma remoção de 62,7%, reduzindo de 26,85 g L<sup>-1</sup> para 10,01 g L<sup>-1</sup>, resultado esperado para esta condição, pois a mesma obteve uma boa produção de biogás devido a biodegradação da matéria orgânica presente. A condição LE + RA teve uma remoção final de 56,2%, reduzindo de 26,59 g L<sup>-1</sup> para 11,65 g L<sup>-1</sup>.

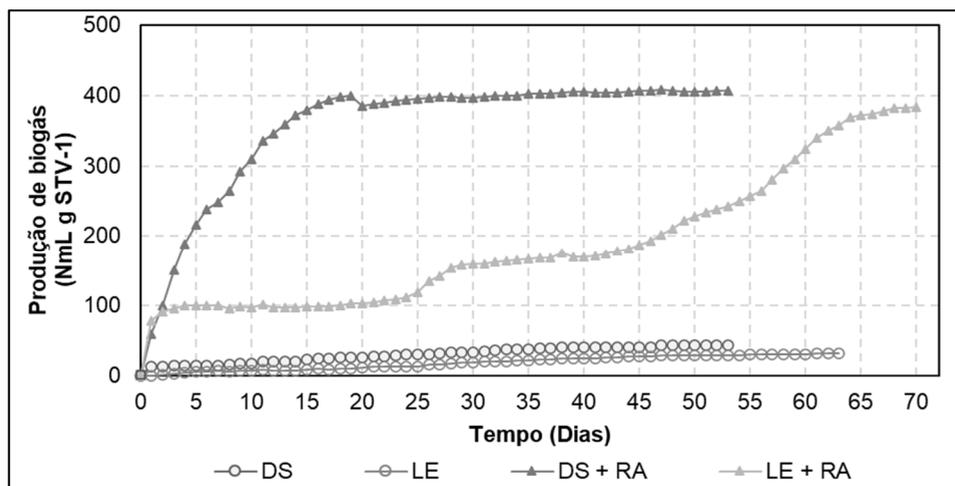


A concentração de DQOt inicial foi maior no inóculo LE com  $43,59 \text{ g L}^{-1}$ , porém obteve uma remoção maior ao final do tratamento de 27,1%, quando comparado com o inóculo DS. A condição LE + RA foi a que apresentou maior concentração inicial de DQOt, com  $42,96 \text{ g L}^{-1}$ , obtendo 36,1% de remoção ao final do experimento. No entanto, esta condição não foi a que obteve maior produção de biogás e metano, podendo ser explicado pelas características do inóculo e do substrato.

### 2.3.2 Produção de biogás e metano

A produção acumulada de biogás do ensaio é apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Produção acumulada de biogás



Legenda: **DS** – Dejeito suíno;

**LE** – Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto;

**RA** – Resíduo alimentar;

**NmL g STV<sup>-1</sup>** – Normal mililitro por grama de sólido total volátil adicionado.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O experimento durou, em sua totalidade, 70 dias, sendo que à medida em que a produção diária de metano durante três dias consecutivos fosse inferior a 1% do volume acumulado, a condição era finalizada (VDI 4630, 2006). Desta forma, a condição de inóculo DS e mistura DS + RA foram encerradas aos 55 dias, a condição de LE foi encerrada aos 63 dias e a condição de LE + RA foi encerrada aos 70 dias.



O tratamento DS + RA apresentou maior produção de biogás acumulada, com uma 406,54 NmL g STV<sup>-1</sup>, o LE + RA apresentou uma produção de 249,17 NmL g STV<sup>-1</sup> no mesmo período de incubação da condição DS + RA (55 dias), porém, como a produção diária continuava em crescimento, o experimento foi conduzido até o 70º dia, com uma produção acumulada final de 383,28 g STV<sup>-1</sup>.

A produção acumulada de biogás para os inóculos resultaram em 44 NmL g STV<sup>-1</sup> para o DS (55 dias de operação) e 31,75 NmL g STV<sup>-1</sup> para o LE (63 dias de operação). Em relação à produção de biogás, os inóculos atingiram valores muito próximos, porém, ao adicionar o substrato, percebe-se uma diferença com relação ao comportamento da produção. Isso pode ter ocorrido devido ao fato do consórcio de microrganismos presente em cada inóculo serem de origens distintas e cada classe favorecer a biodegradação de um determinado composto.

Analisando o comportamento da condição DS + RU em relação a produção acumulada de biogás, observa-se uma rápida adaptação dos microrganismos ao meio, havendo um crescimento linear na produção até o dia 20. Neste período, é provável que tenha ocorrido o consumo de compostos mais biodegradáveis, como os carboidratos, presentes em grande quantidade no RU e, após este dia, houve uma tendência de estabilização, que se estendeu por 35 dias, até a finalização do experimento.

A condição LE + RU apresentou um comportamento distinto, demonstrando que o inóculo pode ser fator determinante na produção de biogás, pois mesmo com um substrato de mesmas características, a produção de biogás manteve-se baixa até o 25º dia e, a partir de então, começou a apresentar um crescimento que perdurou até o dia 70. Este fato também pode ser explicado pela fase de latência dos microrganismos, que pode ter sido mais demorada quando comparado ao consórcio de microrganismos presentes no DS. Além disso, o fato da condição LE + RA ter demorado 70 dias para atingir as condições para finalizar o experimento leva a uma questão importante para a aplicação em escala real, pois o tempo de biodegradação irá influenciar no cálculo do tempo de detenção hidráulica (TDH) e no volume do reator. Logo, em condições de escala real, a operação de um reator utilizando LE como inóculo teria um TDH maior do que uma operação utilizando o DS.

Os inóculos tiveram uma taxa pequena de produção de biogás, o que já era esperado, uma vez que antes da adição do substrato e incubação ambos ficaram em repouso por quatro dias para



desgaseificação e consumo da matéria orgânica de fácil degradação.

A principal composição do biogás produzido em cada condição experimental está apresentada na Tabela 4. Os cálculos foram realizados relacionando a produção de metano, o gás de principal interesse, pela quantidade de STV adicionado. Os outros gases foram apresentados sem porcentagem para fins de conhecimento quantitativo.

Tabela 4 – Características da geração de biogás para os tratamentos

Tratamento	Biogás acumulado [NmL]	Produção específica [NmL CH <sub>4</sub> g STV <sup>-1</sup> ]
Dejeto suíno (DS)	81,76	9,89
Lodo de ETE (LE)	141,15	7,96
DS + Resíduo alimentar (RA)	1310,00	161,26
LE + RA	1082,00	146,56

Tratamento	Teor médio		
	CH <sub>4</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [%]
Dejeto suíno (DS)	22,5	12,00	0,002
Lodo de ETE (LE)	19,20	9,22	0,002
DS + Resíduo alimentar (RA)	48,00	36,00	0,025
LE + RA	43,21	23,00	0,104

Legenda: **NmL CH<sub>4</sub> gSTV<sup>-1</sup>** – Normal mililitro de metano por grama de sólido total volátil adicionado.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Com base nos resultados apresentados, observa-se que o teor de CH<sub>4</sub> situou-se ente 43,21 e 48% para as condições em que o RA foi adicionado.

A produção específica foi de 161,26 NmLCH<sub>4</sub> g STV<sup>-1</sup> para a condição DS + RA e 146,56 NmLCH<sub>4</sub> g STV<sup>-1</sup> para LE + RA. Com relação aos inóculos, a produção específica de CH<sub>4</sub> foi de 9,89 NmLCH<sub>4</sub> g STV<sup>-1</sup> e 7,96 NmLCH<sub>4</sub> g STV<sup>-1</sup> para DS + RA e LE + RA, respectivamente.



Com os resultados obtidos nesta etapa experimental foi possível a elaboração de uma estratégia para partida e operação de um reator em escala real instalado na Fazenda Escola do *Campus* Universitário da UEL. Os resultados da operação e monitoramento da escala real serão apresentados nos tópicos seguintes.

### 2.3.3 Digestão anaeróbia em escala real

Diferentemente do que ocorreu em laboratório, as cargas aplicadas não foram estáveis variando a cada alimentação, estando condicionadas ao volume de resíduo gerado (Tabela 5).

Tabela 5 – Carga orgânica média aplicada em cada período e desvio padrão

Período	Parâmetro COV média aplicada	Unidade kg STV m-3 d <sup>-1</sup>
<b>Start</b>	1,33	± 0,46
<b>TDH 1</b>	0,7	± 0,34
<b>TDH 2</b>	0,39	± 0,21
<b>TDH 3</b>	0,72	± 0,63
<b>TDH 4</b>	0,19	± 0,09
<b>PO</b>	-	-
<b>TDH 5</b>	0,36	± 0,11
<b>TDH 6</b>	0,2	± 0,08

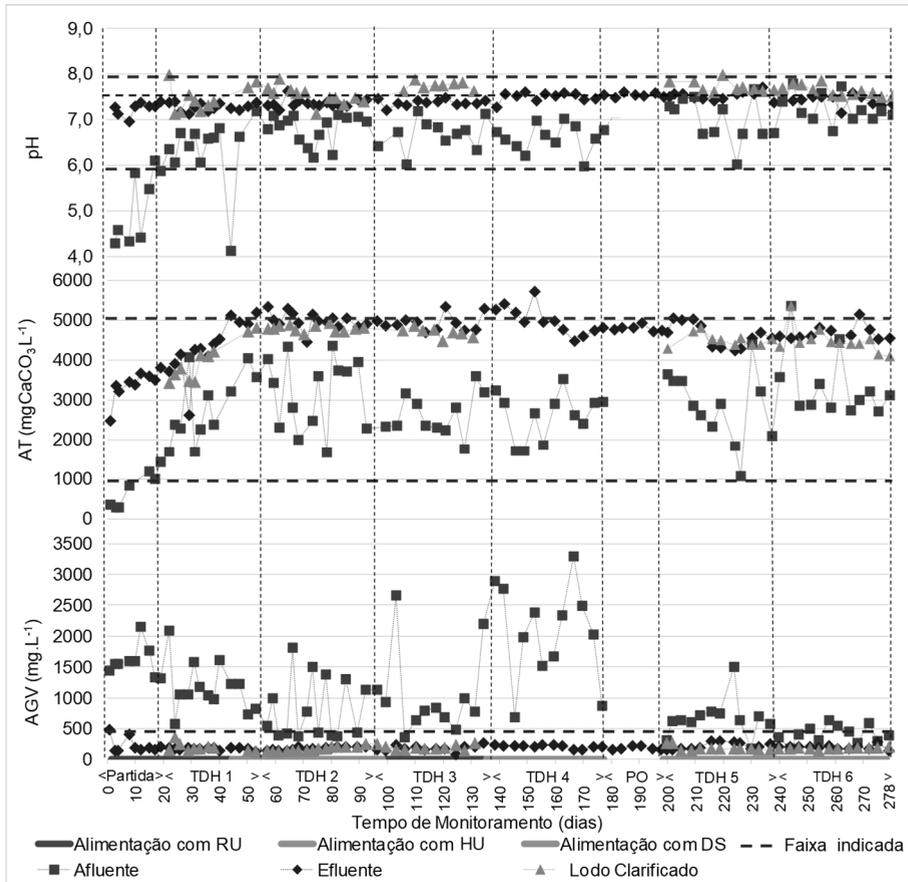
Legenda: **COV** – Carga orgânica volumétrica;  
**TDH** – Tempo de Detenção Hidráulica;  
**PO** – Período Ocioso;  
**kg STV m-3 d<sup>-1</sup>** – Quilograma de sólidos voláteis por metro cúbico dia.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Apesar das recomendações de Mirmohamadsadeghi *et al.* (2019) para que as cargas aplicadas sejam estáveis, as variações não desencadearam danos perceptíveis a estabilidade do processo (Figura 2), onde os principais parâmetros de estabilidade mantiveram-se dentro das faixas indicadas (Chernicharo, 2016; Metcalf; Eddy, 2016; Zickefoose; Hayes, 1976).



Figura 2 – Parâmetros pH, AT e AGV das amostras de Entrada (afluente), Saída (efluente) e lodo clarificado, referentes ao monitoramento do reator



Legenda: **AGV** – Ácidos graxos voláteis;  
**mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>** – Miligramas de carbonato de cálcio por litro;  
**AT** – Alcalinidade total;  
**mg L<sup>-1</sup>** – Miligramas por litro;  
**TDH** – Tempo de Detenção Hidráulica;  
**PO** – Período ocioso;  
**RU** – Restaurante Universitário;  
**HU** – Hospital Universitário;  
**DS** – Dejeito suíno.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A manutenção dos valores de pH dentro da faixa entre 6,0 e 8,0 garante condições adequadas para conversão do material



orgânico em percentuais elevados de metano (Chernicharo, 2016). Do mesmo modo, a manutenção da alcalinidade total entre 1.000 e 5.000 mgCaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> garante condições favoráveis para o pleno desenvolvimento dos organismos envolvidos na bioconversão dos orgânicos (Mata-Alvarez, 2003; Metcalf; Eddy, 2016).

Com as fases em equilíbrio, a concentração de ácidos orgânicos tende a permanecer em patamares adequados, indicando que a fase metanogênica está ocorrendo em equilíbrio com a fase hidrolítica. Nesse caso, valores de AGV inferiores a 400 mg L<sup>-1</sup> indicam que o processo aconteceu de forma estável (Zickefoose; Hayes, 1976), e que os ácidos gerados na hidrólise do material foram convertidos em biogás de forma eficiente.

Apesar do material de alimentação do sistema apresentar valores baixos para pH e alcalinidade e valores elevados de AGV, o processo foi eficiente na metabolização destes subprodutos da degradação anaeróbia, mantendo a mistura interna do reator em valores adequados ao processo. Estudos mostram que RA possuem por características pH ácido, AT reduzida e elevada concentração de AGVs (Xu *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2014). Tal condição caracteriza os RA como de rápida conversão em biogás, com bons valores de metano, devido não só as características de elevada participação de carboidratos (Pramanik *et al.*, 2019), mas também ao fato de já estarem pré-tratados termicamente pela cocção dos cereais para consumo humano.

A manutenção da alimentação sem grandes variações e de forma contínua é altamente recomendada (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019). Assim como grande variabilidade quantitativa do substrato afluente, a manutenção da periodicidade destes eventos também foi testada no PO. Esta condição, apesar de imposta à revelia, forneceu dados importantes sobre o equilíbrio dinâmico do processo, indicando que paralisações na alimentação do sistema por certos períodos podem ser suportadas até certo ponto, uma vez que a estabilidade do processo foi mantida, mas a eficiência foi comprometida.

### **2.3.4 Produção e qualidade do biogás**

As variações de carga orgânica aplicadas ao processo não interferiram na produção do biogás nem na sua qualidade. Os valores referentes a produção específica (PE) do biogás e de metano durante a condução do experimento, são descritos na Tabela 6.

Consideram-se percentuais entre 50 e 70% de metano no biogás como valores adequados (Deublein; Steinhäuser, 2008).



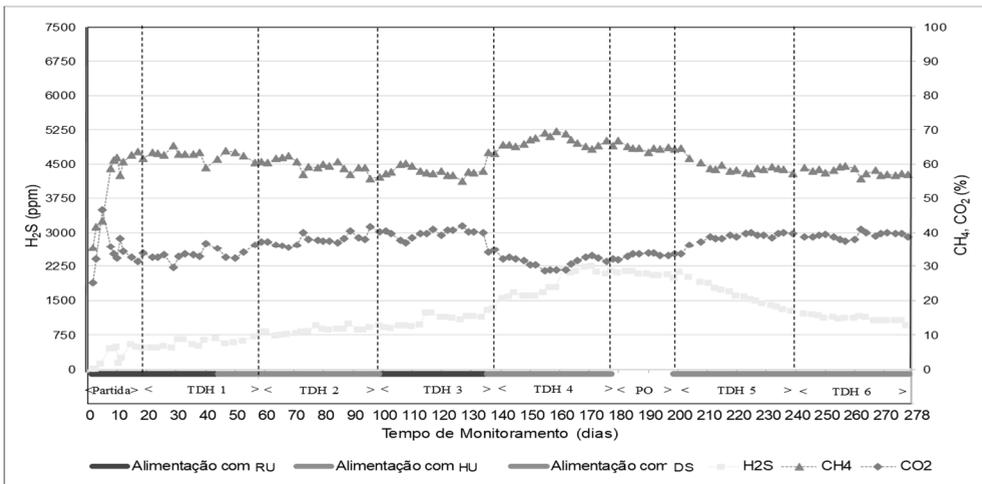
Tabela 6 – Análise da geração e qualidade do biogás por TDH e substrato em função da COV e massa de STV adicionado

Parâmetro	STV adicionado	PE	CH <sub>4</sub>		PECH <sub>4</sub>
Unidade	Kg TDH <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> kg STV <sup>-1</sup>	%		m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> kg STV <sup>-1</sup>
<b>Start</b>	945,7	0,38	54,55	±1,35	0,22
<b>TDH 1</b>	843,2	1	62,56	±1,84	0,62
<b>TDH 2</b>	564,3	0,58	59,52	±1,53	0,34
<b>TDH 3</b>	1038,4	0,63	58,29	±2,18	0,36
<b>TDH 4</b>	241,3	0,93	66,6	±1,53	0,61
<b>PO</b>	-	-	64,83	±1,00	-
<b>TDH 5</b>	459,1	0,36	59,53	±2,22	0,24
<b>TDH 6</b>	278,5	0,64	57,71	±1,02	0,33

Legenda: **PO** – Período Ocioso; **PE** – Produção Específica;  
**CH<sub>4</sub>** – Teor de metano;  
**PECH<sub>4</sub>** – Produção Específica de metano.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Figura 3 – Concentração dos gases componentes do biogás referentes ao monitoramento do reator



Legenda: **TDH** – Tempo de Detenção Hidráulica;  
**PO** – Período ocioso;



**RU** – Restaurante Universitário;  
**HU** – Hospital Universitário;  
**DS** – Dejeito suíno;  
**ppm** – Partes por milhão;  
**CH<sub>4</sub>** – Gás metano;  
**H<sub>2</sub>S** – Gás sulfídrico ou sulfeto de hidrogênio;  
**CO<sub>2</sub>** – Gás carbônico ou dióxido de carbono.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Conforme a Figura 3, que apresenta a concentração dos gases componentes do biogás, em todas as fases conduzidas no processo, o percentual do gás de maior interesse esteve presente em participações adequadas, indicando que o processo não foi inibido por interferência da carga aplicada ou mesmo do uso do reciclo do efluente clarificado, que pode ocasionar o acúmulo de nutrientes, sendo que elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal podem inibir a ação microbiológica dos organismos envolvidos no processo (Gerardi, 2003).

Após o período sem alimentações (PO) foi verificada uma redução no percentual de metano, assim como na produção volumétrica de biogás. Tal fato indica a redução da atividade enzimática após a retomada das alimentações. Neste contexto, períodos sem a adição de alimentos aos microrganismos podem culminar na redução da eficiência do processo, no entanto, a manutenção do processo em contínua produção de biogás indica que, apesar da redução dos parâmetros de eficiência, tal paralisação manteve o sistema em operação, podendo ser uma estratégia eficiente em situações de escassez de matéria orgânica.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos experimentos em escala de bancada, o tratamento DS + RA apresentou melhores remoções de STV (62,7%), enquanto o tratamento LE + RA apresentou melhores resultados de remoção de DQO (36,1%). No entanto, quando avaliada a produção de biogás e metano, a melhor condição experimental foi DS + RA, com valores de 406,54 NmL g STV<sup>-1</sup> e 161,26 NmLCH<sub>4</sub> g STV<sup>-1</sup>, respectivamente.

Estes dados auxiliaram na seleção da estratégia de partida do reator em escala real. O monitoramento dos parâmetros de controle do sistema indicou estabilidade no processo e condições adequadas para conversão do material orgânico em biogás. Da mesma forma, os resultados dos parâmetros de desempenho sugeriram que, embora o reator anaeróbico estivesse produzindo biogás de maneira constante, a



aplicação variável de carga orgânica promoveu uma oscilação nesta geração. No entanto, este fato não prejudicou a qualidade do biogás, que manteve percentuais de metano com valores adequados em toda a fase experimental (50-70%).

Com estes resultados, é possível concluir que a digestão anaeróbia representa uma opção viável para tratamento de resíduos orgânicos, bem como valoração energética destes, representando uma alternativa sustentável para manutenção da qualidade ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 15 jul. 2022.
- ANGELIDAKI, Irini; ALVES, Madalena; BOLZONELLA, David; BORZACCONI, Liliانا; CAMPOS, José Luis; GUWY, Alan; KALYUZHNYI, Sergey; JENICEK, Pavel; LIER, Jules Van. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. **Water Science & Technology**, v. 59, n. 5, p. 927-934, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19273891/>. Acesso em: 05 abr. 2022.
- APHA/AWWA/WEF – American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environment Federation. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. 23<sup>rd</sup> ed. Washington: American Public Health Association, 2017. Disponível em: <http://yabesh.ir/wp-content/uploads/2018/02/Standard-Methods-23rd-Perv.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2022.
- BORTH, Priscila Liane Bisdorf; PERIN, Jessica Klarosk Helenas; TORRECILHAS, Arthur Ribeiro; LOPES, Daiane Dias; SANTOS, Samantha Christine; KURODA, Emília Kiyomi; FERNANDES, Fernando. Pilot-scale anaerobic co-digestion of food and garden waste: Methane potential, performance and microbial analysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 157, 106331, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106331>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953421003664>. Acesso em: 07 abr. 2022.
- BORTH, Priscila Liane; PERIN, Jessica Klarosk Helenas; TORRECILHAS, Arthur Ribeiro; PAN, Nicole Caldas; KURODA, Emília Kiyomi; FERNANDES, Fernando. Biochemical methane potential of food and garden waste co-digestion with variation in solid content and inoculum:substrate ratio. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, p. 1974-1983, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01270-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-021-01270-z>. Acesso em: 09 abr. 2022.
- CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia sanitária e ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2016.
- CIBIOGÁS. **Nota Técnica: N° 001/2021** – Panorama do Biogás no Brasil 2020. Foz do Iguaçu, março de 2021. Disponível em: [https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1\\_1.pdf](https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1_1.pdf). Acesso em: 11 jul. 2022.
- DEUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika; **Biogas from waste and renewable resources**. WILEY-VCH. Weinheim, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527632794>. Acesso em: 11 jul. 2022.



FAO – Food and Agriculture Organization of United Nations. **Food Losses and Waste in Latin America and the Caribbean**. Newsletter 3, 2016. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i5504e/i5504E.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2022.

GERARDI, Michael H. **The microbiology of anaerobic digesters**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471468967>. Acesso em: 11 jul. 2022.

GUERI, Matheus Vitor Diniz. **Avaliação do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares em reatores batelada e semi-contínuo**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Toledo, Cascavel, 2017. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/2904>. Acesso em: 11 jul. 2022.

LI, Lei; PENG, Xuya; WANG, Xiaoming; WU, Di. Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. **Bioresource Technology**, v. 248, p. 20-28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.012>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28711296/>. Acesso em: 15 abr. 2022.

MATA-ALVAREZ, Joan. **Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes**. Cornwall, UK: IWA Publishing Press, 2003, p. 302-320. Disponível em: <https://www.iwapublishing.com/books/9781900222143/biomethanization-organic-fraction-municipal-solid-wastes>. Acesso em: 11 jul. 2022.

METCALF, Leonard; EDDY, Harrison p. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre, RS: McGraw-Hill Educação, 2016.

MIRMOHAMADSADEGHI, Safoora; KARIMI, Keikhosro; TABATABAEI, Meisam; AGHBASHLO, Mortaza. Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X19300921>. Acesso em: 02 maio 2022.

PAULA, Alaim Silva; PEREIRA, Christiane; VILELA, Gustavo Gallo; FRICKE, Klaus; KASPER, Olga. **Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos – Caderno Temático**. [Coordenado por Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH com apoio da Technische Universität Braunschweig]. Brasília: PLANSAB – Plano Nacional de Saneamento Básico, 2019. Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos\\_PDF/plansab/3-CadernotematicoRecuperacaoEnergeticadeRSU.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/plansab/3-CadernotematicoRecuperacaoEnergeticadeRSU.pdf). Acesso em: 11 jul. 2022.

PRAMANIK, Sagor Kumar; SUJA, Fatimah Binti; ZAIN, Shahrom Md; PRAMANIK, Biplob Kumar. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraints. **Bioresource Technology Reports**, v. 8. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X19302002>. Acesso em: 10 maio 2022.

PROBIOGÁS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil (Projeto de Cooperação Técnica Bilateral entre a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades – SNSA / MCidades e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável – GIZ). **Viabilidade econômica de projetos de valorização integrada de RSU com produção de biogás**. [Organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH]. [Autores: Luis Felipe de Dornfeld Braga Colturato (Methanum), Felipe Correia de Souza Pereira Gomes (Methanum), Tathiana Almeida Seraval (Methanum), Thiago Dornfeld Braga Colturato (Methanum)]. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. (Coleção de publicações do PROBIOGÁS Série Aproveitamento Energético de Biogás de



- Resíduos Sólidos Urbanos; 2). Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosNSA/probiogas/Viabilidade\\_RSU.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosNSA/probiogas/Viabilidade_RSU.pdf). Acesso em: 11 jul. 2022.
- REN, Yuanyuan; YU, Miao; WU, Chuanfu; WANG, Qunhui; GAO, Ming; HUANG, Qiqi; LIU, Yu. A comprehensive review on food waste anaerobic digestion: research updates and tendencies. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1069-1076, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.109>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417316747>. Acesso em: 10 maio 2022.
- RODRIGUES, Cássio Araujo de Oliveira; PERTUSSATTI, Caroline Alvarenga; PEREIRA, Christiane; CARVALHO, Eduardo Costa; REICHERT, Geraldo Antônio; MOREIRA, Hélinah Cardoso; PROENÇA, Lúcio Costa; COLTURATO, Luis Felipe Dornfeld; MOREIRA, Marcelo Chaves; VIANA, Maria Otília Bertazi; SILVA, Mariana; PADOVANI, Paula Wernecke; FREITAS, Thainah Pereira. **Valorização de resíduos orgânicos – Caderno Temático**. [Coordenado por Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH com apoio da Technische Universität Braunschweig]. Brasília: PLAN SAB – Plano Nacional de Saneamento Básico, 2019. Disponível em: [https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosNSA/Arquivos\\_PDF/plansab/4-CadernotematicoValorizacaoResiduosOrganicos.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosNSA/Arquivos_PDF/plansab/4-CadernotematicoValorizacaoResiduosOrganicos.pdf). Acesso em: 11 jul. 2022.
- SILVA, Gardenia Azevedo; MORAIS JR, Jacio de Araujo; ROCHA, Elisangela Maria Rodrigues. Proposta de procedimento operacional padrão para o teste do Potencial Bioquímico do Metano aplicado a resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 11-16, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41520201600100134484>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/301344970\\_Proposta\\_de\\_procedimento\\_operacional\\_padrao\\_para\\_o\\_teste\\_do\\_Potencial\\_Bioquimico\\_do\\_Metano\\_aplicado\\_a\\_residuos\\_solidos\\_urbanos](https://www.researchgate.net/publication/301344970_Proposta_de_procedimento_operacional_padrao_para_o_teste_do_Potencial_Bioquimico_do_Metano_aplicado_a_residuos_solidos_urbanos). Acesso em: 11 jul. 2022.
- VEREINS DEUTSCHER INGENIEURE – VDI. **VDI 4630**: Fermentation of organic materials: characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. Düsseldorf: VDI- Handbuch Energietechnik, 2006. Disponível em: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4630-fermentation-of-organic-materials-characterization-of-the-substrate-sampling-collection-of-material-data-fermentation-tests>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- XU, Fuqing; LI, Yangyang; GE, Xumeng; YANG, Liangcheng; LI, Yebo. Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1047-1058, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417315687>. Acesso em: 05 maio 2022.
- ZENEON, Odair; PASCUET, Neus Sadocco; TIGLEA, Paulo. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Edição IV. [1ª edição digital]. Coordenadores. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/nutricao-bromatologia/files/2013/07/NormasADOLFOLUTZ.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- ZHANG, Cunsheng; SU, Haijia; B. Jan; TAN, Tianwei. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 383-392, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114003633>. Acesso em: 10 maio 2022.
- ZICKEFOOSE, Chuck; HAYES, R. B. Joe. **Anaerobic sludge digestion**: operations manual. EPA 430/9-76-001, US National Technical Information Service. Office of Water Program Operations, U.S. Environmental Protection Agency. Springfield, VA, Washington, 1976.



# ABORDAGENS SOCIAIS E DE GÊNERO PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR INCLUSIVA

## *SOCIAL AND GENDER APPROACHES TOWARDS AN INCLUSIVE CIRCULAR ECONOMY*

Como citar [ABNT 6023:2018]:

SANTOS, Priscilla; BURGOS, Rayana. Abordagens sociais e de gênero para uma economia circular inclusiva. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

### **Priscilla Santos**

Advogada. Mestra em Natureza, Sociedade e Política Ambiental pela Universidade de Oxford. Consultora em mudanças climáticas e interseccionalidades.

E-mail: santoss.priscilla@gmail.com

### **Rayana Burgos**

Cientista política. Consultora em mudanças climáticas, gênero e raça.

E-mail: burgosraycp@gmail.com

## **RESUMO**

Este artigo propõe-se a ampliar a discussão sobre o setor de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) através do olhar de uma economia circular inclusiva. A partir da apresentação do panorama atual das abordagens sociais e de gênero no setor de RSU no Brasil, evidencia-se que a questão social é normalmente focada em catadores e na etapa de reciclagem. Nesse sentido, apresenta-se a economia circular como uma oportunidade para a incorporação de abordagens sociais e de gênero de maneira mais abrangente e através de colaboração intersetorial. Além disso, são elencados argumentos para a adoção de uma gestão mais estratégica de resíduos, que contribui com uma maior redução de emissões, ao mesmo tempo que reduz desigualdades sociais e de gênero, fatores relevantes a serem considerados no contexto de uma emergência climática. Para a efetiva implementação de uma economia circular inclusiva, sugere-se que os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) sirvam como um guia, que deve ser aplicado através de uma abordagem interseccional, que considere critérios de gênero, raça e classe. A partir de uma revisão da literatura nacional e internacional, este trabalho elenca alguns dos principais desafios para implementação deste modelo de economia no Brasil. A fim de contribuir com o fortalecimento de uma gestão de resíduos e de uma agenda urbana de clima no país, o artigo apresenta recomendações de próximos passos para implementação da economia



circular, bem como metas e indicadores, com foco na atuação de gestores municipais e na inclusão de grupos em situação de vulnerabilidade. No geral, a revisão bibliográfica aponta para a carência de dados desagregados e informações específicas para informar a adoção de políticas públicas de gestão de resíduos no Brasil que façam frente aos desafios impostos, principalmente a nível municipal. Assim, o planejamento e a implementação de políticas responsivas às desigualdades sociais e de gênero e com vistas a aumentar a resiliência climática no âmbito das cidades precisa caminhar paralelamente à construção de capacidades, conhecimento e dados desagregados, visando um melhor entendimento do contexto sociopolítico de cada município e intervenções de políticas mais adequadas para o alcance da justiça social e climática.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Economia circular. Abordagens sociais e de gênero. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Interseccionalidade.

### ABSTRACT

This article aims to broaden the discussion about the Urban Solid Waste (MSW) sector through the perspective of an inclusive circular economy. Through the presentation of the current scenario of social and gender approaches in the MSW sector in Brazil, it is evident that the social issue is usually focused on collectors and the recycling stage. In this sense, the circular economy is presented as an opportunity to incorporate social and gender approaches more comprehensively and through intersectoral collaboration. In addition, arguments are listed for the adoption of more strategic waste management, which contributes to a greater reduction in emissions, while reducing social and gender inequalities, relevant factors to be considered in a context of climate emergency. For the effective implementation of an inclusive circular economy, it is suggested that the Sustainable Development Goals (SDGs) serve as a guide, which must be applied through an intersectional approach that considers gender, race and class criteria. Based on a review of national and international literature, this work lists some of the main challenges for implementing this model of economy in Brazil. In order to contribute to the strengthening of waste management and an urban climate agenda in the country, the article presents recommendations for next steps to implement the circular economy, as well as goals and indicators, focusing on the performance of municipal managers and the inclusion of vulnerable groups. Overall, the literature review points to the lack of disaggregated data and specific information to inform the adoption of public policies for waste management in Brazil that face the challenges imposed, especially at the municipal level. Thus, the planning and implementation of responsive policies to social and gender inequalities and with a view to increasing climate resilience within cities needs to go hand in hand with building capacities, knowledge and disaggregated data, aiming at a better understanding of the socio-political context of each municipality and more appropriate policy interventions to achieve social and climate justice.

Keywords: Urban solid waste. Circular economy. Social and gender approaches. Sustainable Development Goals. Intersectionality.



## 1 INTRODUÇÃO

O debate sobre a questão social e de gênero no setor de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil é ainda bastante focado na inclusão de catadores e na etapa da reciclagem. Essa visão é limitada e desconsidera o potencial de um olhar estratégico e de uma interlocução com diferentes atores e setores para uma gestão de resíduos mais alinhada com os desafios das cidades no presente e nas próximas décadas e com soluções que contribuam com mudanças estruturais necessárias.

Essa discussão precisa ser ampliada através da perspectiva da economia circular. Em contraposição à economia linear – característica de uma cadeia produtiva marcada pela extração de matéria-prima, produção e descarte dos produtos – a economia circular promove um olhar mais holístico sobre o setor de RSU, conectando as políticas tradicionais setoriais a de outros setores da economia com impacto significativo sobre a produção e gestão de resíduos. Esse novo padrão de economia promove o desenvolvimento econômico, ambiental e social associado a um melhor uso de recursos naturais, por meio de novos modelos de negócios e oportunidades de atuação com menor dependência de matéria-prima virgem, priorizando insumos mais duráveis e recicláveis (Portal da Indústria, [2021]). Trata-se, portanto, de uma gestão mais sustentável e inclusiva a longo prazo, que se dá através de planejamento e intervenções mais integradas e intersetoriais.

Como a economia circular defende abordagens inclusivas e responsivas aos impactos sociais do modelo de produção, a discussão social e de gênero não pode estar desconectada desse tema. Considerando o contexto de emergência climática e a necessidade de se avançar na implementação de planos de mitigação e adaptação que façam frente a seus impactos, é muito importante que as pessoas sejam colocadas no centro do debate, em particular aquelas em situação de maior vulnerabilidade social e, portanto, desproporcionalmente impactadas.

Para o combate às mudanças climáticas de maneira responsiva às desigualdades sociais, os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) servem como importante ferramenta para pautar o planejamento e a implementação de políticas públicas através de uma abordagem interseccional. Esse conceito reconhece que as pessoas afetadas pelas políticas são impactadas de diferentes formas, dependendo de marcadores sociais relacionados a gênero, raça, classe e território. No que tange a debates setoriais relevantes, como



os relacionados à logística reversa e rotas tecnológicas, por exemplo, seu planejamento deve ser visto como uma oportunidade para geração de emprego e renda, focando na inclusão social e de gênero na gestão de resíduos.

De maneira a contribuir com a implementação de uma agenda urbana sustentável no Brasil, este artigo propõe apresentar um panorama sobre como tem se dado a discussão social e de gênero no setor de RSU e até que ponto o conceito de economia circular tem sido incorporado nas políticas públicas no Brasil. Em seguida, apresenta-se a importância de uma abordagem interseccional para o planejamento e implementação de políticas responsivas às desigualdades para uma gestão mais inclusiva, considerando os impactos sociais e econômicos da pandemia e da crise climática.

Ademais, destacam-se alguns desafios e oportunidades para implementar a economia circular, abordando temas relevantes para o manejo de resíduos, como a logística reversa e rotas tecnológicas, assim como a necessidade de um planejamento integrado de setores relevantes da economia brasileira, com impacto significativo sobre a produção de resíduos. Estratégias intersetoriais consistem em um caminho importante para aumentar a eficiência da gestão de insumos.

Por fim, são apresentados potenciais próximos passos para aprofundar a discussão social e de gênero para uma economia circular inclusiva no Brasil. Nesse sentido, são apresentados metas e indicadores, que podem ser adaptados à realidade dos municípios, a fim de apoiar o avanço de abordagens interseccionais nas políticas públicas. A partir de uma visão macro baseada na economia circular e na busca por cidades mais justas, inclusivas e sustentáveis, espera-se que as reflexões levantadas neste artigo possam contribuir com um debate qualificado com a sociedade, especialistas e atores interessados sobre temas ainda pouco explorados na agenda urbana de clima.

## **2 PANORAMA SOBRE A DISCUSSÃO SOCIAL E DE GÊNERO NO SETOR DE RSU NO BRASIL**

A gestão de RSU tem se destacado como um dos grandes desafios para a sustentabilidade na agenda urbana dos países em desenvolvimento e dos governos subnacionais ao redor do mundo. O Panorama da Gestão de Resíduos na América Latina e no Caribe (ONU Meio Ambiente, 2018) aponta que cerca de 40 milhões de pessoas na região não possuem acesso à coleta de resíduos, com 90% dos resíduos não reaproveitados. A má gestão e o descarte incorreto



dos resíduos expõem 170 milhões de pessoas a contaminações e a condições de saneamento precárias (GIZ, 2021).

No Brasil, a discussão sobre economia circular ainda é incipiente e a gestão de RSU tende a ser feita de forma mais isolada de outros setores e sem considerar as abordagens sociais e de gênero. Apesar de centrais para a implementação de políticas locais e na garantia do cumprimento de medidas para promover um manejo adequado de resíduos sólidos, até 2017, somente 54% dos municípios do Brasil tinham elaborado um Plano Municipal de Gestão de Resíduos, como previsto pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei Federal 12.305/2010 (Júnia, 2018).

Dentro de um contexto de baixa implementação de políticas públicas estruturais, as cidades brasileiras enfrentam desafios tanto para a implementação da gestão de resíduos, quanto para políticas que aumentem a resiliência frente às mudanças climáticas e às vulnerabilidades sociais. Quanto melhor o gerenciamento dos resíduos, maior o potencial de redução das emissões associadas, tendo ambos os fatores influência direta nas condições de vida da população e no seu grau de vulnerabilidade às mudanças climáticas.

Comparado a outros setores como agricultura e transportes, em escala nacional, as emissões oriundas de RSU cresceram cerca de 187% desde 1990 (SEEG, 2020). O setor foi o que mais aumentou proporcionalmente em níveis de emissões desde então. Por isso, ao propor políticas que lidam de forma eficiente com a destinação dos resíduos, as cidades avançam no combate à crise climática, ao mesmo tempo em que tornam a população mais resiliente, à medida em que a qualidade de vida e a saúde melhoram.

Considerando as atribuições das prefeituras de elaborar políticas que guiam o desenvolvimento local – tais como o Plano Diretor da Cidade e o Plano Plurianual Municipal – é importante garantir que estas estejam alinhadas com os ODS, principalmente o combate às mudanças climáticas (ODS 13) e com a redução das desigualdades sociais e de gênero (ODS 10 e 5, respectivamente). Estimular um desenvolvimento de baixo carbono, pautado em uma economia circular e regenerativa para o meio ambiente e para a sociedade nas cidades brasileiras torna-se fundamental para garantir a integração de abordagens sociais no setor de RSU a nível local.

As cidades precisam de um planejamento que leve em conta o fortalecimento da resiliência frente aos crescentes riscos climáticos, que afetam os ecossistemas, as pessoas e a infraestrutura nas cidades, e tem o potencial de exacerbar as vulnerabilidades socioambientais



existentes. Dessa forma, instrumentos que possam guiar a atuação de governos locais no combate às mudanças climáticas através de políticas que consideram abordagens sociais e de gênero de forma transversal são de extrema relevância.

De maneira geral, pode-se dizer que o setor de RSU no Brasil já é pautado por abordagens sociais. Porém, essas abordagens são predominantes somente na ponta da cadeia produtiva, sendo as catadoras e catadores responsáveis por quase 90% do resíduo reciclado no país (Falluh *et al.*, 2019). Essas pessoas são em sua maioria (cerca de 60%) negras, de baixa escolaridade e moradoras de comunidades periféricas, conforme o Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis (MNCR, 2013). Isso sem contar que parte da população de catadores não entra nas estatísticas porque não possuem domicílio fixo, ou moram de maneira irregular, principalmente próximos aos lixões. Essa dificuldade no mapeamento gera uma invisibilidade desses grupos e um viés de dados referentes a essa população, dificultando a identificação dessas pessoas e comprometendo o planejamento e a implementação de políticas que reduzam as desigualdades sociais no setor.

Além disso, apesar da relevância da atividade desempenhada por catadores, essa ainda é uma tarefa desprotegida, exercida de forma precarizada, sem acesso a direitos básicos e exposta a condições de insalubridade extremas. A atividade dos catadores é marcada por acidentes de trabalho, adoecimento crônico não transmissíveis e uso contínuo de medicamentos devido à falta de Equipamentos de Proteção Individual e à insalubridade do serviço (Souza; Martins, 2018).

Quanto às abordagens de gênero, estimativas de 2010 do MNCR (2014) indicam um número de 800 mil trabalhadores em atividade no Brasil, dentre os quais 70% eram mulheres. A atuação das mulheres é normalmente voltada ao trabalho de triagem e classificação dos materiais. Essa etapa é considerada parte principal do processo de coleta e seleção dos resíduos, mas é pouco valorizada em comparação a funções consideradas culturalmente e reforçadas por estereótipos de gênero como mais “masculinas”, como a operação de maquinário, deslocamento, carregamento e transporte de materiais.

Apesar do protagonismo das mulheres no setor de RSU, isso ainda não foi traduzido em melhores condições de vida e trabalho para elas. É necessário criar mecanismos para que as prefeituras avancem no mapeamento, formalização e capacitação de



associações e cooperativas, assegurando um trabalho digno e garantia de direitos, reconhecendo o empreendedorismo e a liderança feminina nessas atividades.

Por outro lado, ainda é comum associar atividades de cuidado, limpeza e saúde – as quais são relacionadas à triagem de resíduos – como sendo obrigações que cabem somente às mulheres e, portanto, não dependem de remuneração ou devam ser vistas como atividades complementares. A realização dessas funções precisa ser reconhecida através do estabelecimento de empregos formais e remuneração justa e inserção em um ambiente de trabalho seguro, que garanta a possibilidade de desenvolvimento pessoal e profissional.

O protagonismo feminino deve ser fomentado em diversos níveis, desde cargos de liderança (como prefeitas, gestoras públicas e privadas), a mulheres trabalhando com o manejo direto de resíduos. No entanto, em 2016, somente 12% dos municípios brasileiros eram liderados por mulheres. Apesar disso, cerca de 70% dessas prefeitas ocuparam durante a sua trajetória cargos públicos não eletivos principalmente nas áreas de assistência social, saúde e educação, demonstrando seu compromisso com essas pautas.

Além disso, 88% das prefeitas tinham atuação política antes de serem eleitas, com destaque na participação em conselhos municipais de políticas públicas (Instituto Alziras, [2020]). Esses dados revelam que existe um interesse das mulheres em ocupar espaços públicos e participar do processo político nos seus municípios, mesmo antes de se tornarem prefeitas. Assim, garantir a participação de mulheres é um passo para também fomentar a representação feminina em cargos eletivos, e fomentar a liderança de mulheres em todos os âmbitos políticos, econômicos e sociais.

As abordagens sociais e de gênero devem fomentar o empreendedorismo feminino no setor como um todo, desde o planejamento estratégico setorial – garantindo mulheres em posições de liderança, por exemplo – até a implementação das rotas tecnológicas – levando em consideração o potencial de inserção de mulheres nas cadeias dos resíduos abrangidos por essas rotas. Ademais, garantir o acesso a financiamento para apoiar modelos de negócios inovadores no setor, seguindo parâmetros que levem em conta critérios de gênero, raça e classe devem ser priorizados.

Nesse sentido, a incorporação dos ODS pode contribuir como um guia para intervenções mais estratégicas, contribuindo para que abordagens sociais e de gênero sejam efetivamente incluídas em cada uma das etapas da gestão de resíduos. Além disso, a lógica da



economia circular pode servir como uma engrenagem para gerar emprego e renda, reduzir a pobreza e ao mesmo tempo contribuir com a redução de desigualdades sociais e de gênero e no combate às mudanças climáticas.

Ademais, questões sociais e de gênero precisam ser amplamente pautadas porque a maior parte da população que lida diretamente com o manejo dos resíduos é negra, periférica, de baixa renda e escolaridade, e majoritariamente, formada por mulheres (MNCR, 2014). Ignorar como as políticas setoriais afetam essas pessoas arrisca potencializar ainda mais desigualdades estruturais pré-existentes.

Assim, faz-se necessário olhar para esses desafios como uma oportunidade de associar desenvolvimento sustentável à melhoria de condições de vida principalmente dessas pessoas. Para isso, é primordial garantir a segurança do trabalho para reduzir a exposição daqueles que atuam no setor, bem como melhorar a qualidade dos serviços oferecidos à população, capacitando os municípios e atores interessados a estarem aptos para gerir os resíduos de forma eficiente e sustentável. Um passo importante nesse sentido é a elaboração participativa de planos e políticas municipais que dialoguem com os ODS, incorporando o conceito de economia circular e abordagens sociais e de gênero de maneira transversal, garantindo uma transição justa, verde e inclusiva no setor.

### **3 A NECESSIDADE DE UMA ABORDAGEM INTERSECCIONAL PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ECONOMIA CIRCULAR INCLUSIVA**

Apesar de concomitantes crises – climática, sanitária provocada pela COVID-19 e econômica – afetarem a população em sua totalidade, as pessoas não são impactadas da mesma forma. Condições relacionadas a gênero, raça, classe e territórios que essas pessoas vivam desempenham um papel importante na capacidade de enfrentar a pandemia e os impactos socioeconômicos dela decorrentes. Além disso, outras variabilidades como idade, renda, tipo de emprego, grau de instrução, raça, deficiência mental ou física também são determinantes. Esses fatores afetam sua capacidade de resiliência e de obter acesso a serviços básicos, como educação, saúde e renda e outros recursos sociais e econômicos (UNEP, [2020]).

Uma abordagem interseccional leva em conta justamente essas variáveis, reconhecendo que as pessoas que vivem em diferentes realidades sofrem impactos da mudança climática e da pandemia de



maneiras diversas, devido à sua situação em estruturas de poder, com base em contextos específicos e nas dinâmicas sociais. A interseccionalidade não somente se reduz a um olhar para os desiguais, mas oferece um caminho que permite a inclusão das diversas categorias sociais no centro das tomadas de decisões climáticas. O conceito serve para demonstrar como as estruturas de poder podem ser reforçadas por políticas não responsivas às desigualdades, mas também desafiadas e renegociadas em busca da equidade e inclusão social (Davis, 2008).

No contexto da pandemia da COVID-19, as graves desigualdades sociais e os desafios das cidades brasileiras ficaram ainda mais expostos. O baixo acesso aos serviços básicos, como saneamento e saúde, agravou a situação dos mais pobres. No Brasil, quase 35 milhões de pessoas não têm acesso à água potável e cerca de 100 milhões não têm serviço de coleta de esgotos no país, dificultando a rotina de higiene necessária para enfrentar a pandemia (Martins, 2021). Além de serem mais criticamente afetados pela pandemia, jovens, mulheres, pessoas em situação de vulnerabilidade social – como populações periféricas, negras e LGBTQIA+ (lésbicas, gays, bissexuais, transgêneros, *queer*, intersexuais, assexuais etc.) – estão também mais expostos aos efeitos das mudanças climáticas (Iglesias; Hollands, 2019).

Segundo levantamento feito pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), a taxa dos jovens que nem estudam nem trabalham, “nem-nem”, de 20 a 24 anos foi de 28,6%, no último trimestre de 2019, para 35,2%, no segundo trimestre de 2020. Para a faixa etária de 25 a 29 anos, o percentual foi de 25,5% para 33% (Neri; Hecksher, 2021).

Levantamento do Conselho Nacional de Saúde (CNS) mostra que as mulheres são as mais afetadas pela pandemia, pois além de estarem mais expostas ao risco de contaminação, estão socialmente mais vulneráveis ao desemprego, violência, falta de acesso aos serviços de saúde, aumento da pobreza e sofrendo mais com a sobrecarga, exaustão, estresse e até solidão (Think Olga, 2021).

A pandemia do novo coronavírus atingiu de forma acentuada as comunidades e periferias de grandes cidades brasileiras. Os efeitos são múltiplos, e estão relacionados tanto às consequências econômicas da crise como aos impactos sanitários da doença (Roubicek, 2020).

Isto porque as desigualdades estruturais que esses grupos enfrentam reduzem sua capacidade de adaptação aos efeitos da alteração do clima, os quais formam uma rede complexa de



interações que podem ser potencializadas, a depender do contexto socioeconômico em que a pessoa está inserida (AdaptaCLIMA, 2018).

Neste contexto, denomina-se de fenômeno da dupla exposição a sobreposição espacial entre grupos populacionais muito pobres e com alta privação de acesso a recursos (vulnerabilidade social) e áreas de risco ou degradação ambiental (vulnerabilidade ambiental) (Peiter *et al.*, 2011). Por exemplo, o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos aumenta também o risco de deslizamentos de terra, enchentes e enxurradas; e sete a cada dez pessoas que moram em locais irregulares no Brasil são pessoas negras ou pardas (IBGE, 2020).

Como a crise de saúde coloca em risco o desenvolvimento sustentável, a implementação dos ODS fica ameaçada, principalmente nos países em desenvolvimento. Por isso, é necessário que os governos locais adotem medidas de recuperação econômica que contribuam com a geração de emprego e renda, mobilizando fontes de financiamento e engajando múltiplos atores na busca de soluções intersetoriais, focadas em sinergias entre o setor de RSU e demais setores com impacto na agenda urbana para lidar com as consequências imediatas da pandemia, assim como para contribuir com reformas estruturais e econômicas de longo prazo (Cepal, 2020).

A ação governamental pode estabelecer diretrizes, normas e incentivos que viabilizem a atuação do setor privado, estimulando o investimento em atividades econômicas sustentáveis, inclusivas e que facilitem a transição para uma economia circular. Além disso, a relação entre empresas, universidades e institutos de pesquisa também pode desempenhar um papel importante na produção de conhecimento e inovação para uma economia circular e de baixo carbono. A cooperação entre esses atores é essencial para fortalecer uma cadeia de desenvolvimento que apoie mudanças estruturais e que ao mesmo tempo combata os efeitos das mudanças climáticas e da pandemia.

Diante do contexto de crises que se retroalimentam, as políticas e projetos meramente econômicos e emergenciais não dão conta de resolver os desafios para deixar as cidades menos desiguais e vulneráveis e mais acolhedoras para todas as pessoas e resilientes. Dessa forma, intervenções eficientes precisam combinar medidas de retomada econômica com a proteção do meio ambiente, o fortalecimento de uma economia circular e ações efetivas no combate às desigualdades estruturais pré-existentes de gênero, raça e classe.



Os esforços para garantir igualdade de gênero apresentam sinergias com outros objetivos, como acabar com a pobreza (ODS 1); cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11); e redução de desigualdades (ODS 10). Sendo assim, políticas e medidas de incentivo à igualdade de gênero contribuem fortemente para o desenvolvimento dos municípios e devem ser priorizadas em esforços de retomada econômica (Nieuwenhuis *et al.*, 2018).

Essa retomada pode ser uma alavanca essencial para inserir jovens, mulheres e pessoas desfavorecidas na economia, reduzindo a vulnerabilidade desses grupos em diversas frentes, ao mesmo tempo em que geram inclusão, emprego e renda e contribuem para uma transição justa para uma economia de baixo carbono. Incluir as necessidades das pessoas através de uma abordagem interseccional é fundamental para garantir o alcance da justiça climática.

Através da perspectiva da economia circular, entende-se que descarte e reciclagem de resíduos consistem em uma parte importante da cadeia produtiva, mas que para atingir padrões de produção, consumo e descarte consciente e sustentável é necessário ir além. Neste modelo, os insumos devem ser reduzidos, repensados, reaproveitados, reciclados ou recusados. Os insumos devem, portanto, *circular* na economia e isso somente é possível através de abordagens intersetoriais.

Esse formato pode contribuir com benefícios sociais para os municípios, sendo guiado a partir de uma abordagem interseccional. Compreender a gestão de RSU através da economia circular permite um maior ciclo de vida dos insumos, abre espaço para criação de novos negócios e movimentação da economia em uma escala mais ampla. Dessa forma, novas funções de trabalho podem ser criadas e as pessoas podem ter a oportunidade de adquirir habilidades e conhecimentos circulares, gerando mais empregos e renda. Por outro lado, concentrar-se em apenas uma parte dos processos de produção pode dificultar o entendimento do organismo social como um todo, o qual abrange sociedade, economia e meio ambiente (Galvão, 2017).

#### **4 DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A IMPLEMENTAÇÃO DE UMA ECONOMIA CIRCULAR NO BRASIL**

Em contraste com o modelo linear, que foca em usar e descartar, uma economia circular é regenerativa por design e visa desacoplar gradualmente o crescimento do consumo de recursos finitos (EMF, 2017a). Assim, inovar na gestão de resíduos é possível unindo desenvolvimento econômico ao melhor uso de recursos



naturais, por meio de práticas que priorizam o uso de produtos mais duráveis, recicláveis e renováveis, aumentando as possibilidades de uso e a durabilidade dos objetos, ao mesmo tempo em que gera uma quantidade mínima de resíduos.

Além de mais sustentável, esse novo modelo de economia também é crucial para uma retomada econômica inclusiva, uma vez que fomenta novos modelos de produção, negócios e tecnologias, favorecendo a criação de um ambiente propício para a capacitação e inserção de pessoas trabalhando com a gestão de resíduos em uma cadeia muito mais abrangente. Conforme empresas, governos e demais atores se adaptam a um formato de produção e consumo sob a ótica da economia circular, surgem novas oportunidades de interação e possibilidades de atuar no mercado de trabalho.

Considerando que alguns grupos em situação de maior vulnerabilidade social – como jovens e mulheres – foram desproporcionalmente afetados pela pandemia e pela crise econômica decorrente dela, eles devem ser priorizados na alocação de capacitação e empregos nas políticas setoriais de RSU. Cerca de 28% dos jovens brasileiros em 2020 relatam que não houve dinheiro suficiente para comprar a comida necessária e a mesma taxa era 16,8% em 2011-2014 e 25,6% em 2015-2018. O cenário de recessão econômica faz com que a maioria dos jovens brasileiros afirme que sairia do país se tivesse oportunidade, considerando as baixas perspectivas de vida e emprego (Neri; Hecksher, 2021). Além disso, a crise impactou particularmente as brasileiras: 40% delas afirmam que a pandemia e a situação de isolamento social colocaram a renda e a sustentação da casa em risco, sendo a maioria das entrevistadas (55%) mulheres negras (Silva; Leão, 2021).

A efetiva implementação da economia circular no Brasil exige estratégias que contam com a interação entre múltiplos atores da sociedade e setores da economia. Iniciativas que olhem para o setor de RSU de forma isolada, sem considerar suas interações intersetoriais e a ação integrada de atores interessados têm potencial de impacto limitado e visão de curto prazo.

As indústrias e empresas precisam se adaptar ao modelo circular de produção e de negócios, assim como os governos e tomadores de decisão devem pautar uma regulação eficiente da gestão de resíduos, além de incentivos fiscais e financiamento para viabilizar a atuação efetiva de atores não governamentais. Esses atores, em parceria com os governos, são essenciais para contribuir com processos de educação e conscientização de consumidores



sobre o uso e o destino correto dos insumos, mudanças de comportamento e aumento da demanda por padrões de produção e consumo mais sustentáveis.

#### **4.1 A ECONOMIA CIRCULAR E A NECESSIDADE DE ABORDAGENS INTERSETORIAIS PARA UMA GESTÃO DE RESÍDUOS MAIS ESTRATÉGICA**

A economia circular demanda que o modelo econômico seja visto de modo abrangente, permitindo que as políticas públicas sejam pensadas considerando a relação de causa e efeito na sociedade e no meio ambiente. No Brasil, os setores da agropecuária e indústria são grandes pilares da economia, representando 26,6% (Cepea, 2020) e 20,4% do Produto Interno Bruto, respectivamente (Portal da Indústria, 2022). No entanto, apesar da contribuição significativa à economia, as mudanças no uso da terra e a agropecuária correspondem a 72% dos gases de efeito estufa emitidos no país (SEEG, 2020).

O setor da indústria, por sua vez, é responsável pela poluição industrial, que afeta sobremaneira as cidades e a saúde humana (Campos, 2019). Estudos apontam que as prefeituras perdem milhões em receita ao ano por causa da destinação irregular de resíduos industriais no Brasil, uma vez que somente cerca de 25% de todo resíduo gerado no setor produtivo industrial é tratado corretamente, de acordo com a Confederação Nacional dos Municípios (CNM, 2016). Dessa forma, é possível perceber que os dois setores possuem um passivo ambiental que se relaciona diretamente com a gestão inadequada de resíduos.

O Brasil desperdiça aproximadamente 30% dos alimentos que produz, a agricultura e gestão florestal são marcadas por uma alta geração de resíduos agrícolas e de pastagens (WFP, 2018). Dessa forma, repensar a produção de alimentos pode promover a regeneração da biodiversidade, diminuição da produção de resíduos e do desperdício de alimentos. Entretanto, o país enfrenta uma dificuldade de transferência de novos conhecimentos e habilidades para garantir a efetiva adoção de novos modelos regenerativos e no compartilhamento de ativos e distribuição de subprodutos (EMF, 2017b). O desperdício de alimentos pode ser evitado a partir da redistribuição do excedente de alimentos, e os subprodutos alimentares não comestíveis e resíduos humanos podem se tornar insumos para novos produtos. Diante desse desafio, a discussão sobre a gestão de resíduos, alinhada ao fortalecimento de práticas de agricultura sustentável e gestão florestal, tem o potencial de colocar as mulheres no centro do debate de políticas intersetoriais.



As mulheres desempenham um papel fundamental na agricultura familiar e na restauração, sendo responsáveis pela transmissão de conhecimento e saberes técnicos, como o manejo agroecológico, a seleção de sementes, a reprodução de plantas e os usos medicinais de ervas (WMR, 2020). No entanto, elas ainda encontram barreiras para desempenhar essas atividades, como a dificuldade no acesso à terra – somente cerca de 15% das mulheres detém a posse das terras as quais trabalham no Brasil – e aos recursos financeiros que possam viabilizá-las (Nobre; Hora, 2017).

Nesse sentido, os governos municipais podem estabelecer parcerias com outros atores do setor privado e terceiro setor a fim de apoiar a criação de negócios regenerativos, principalmente em áreas degradadas, por meio do apoio à agricultura sustentável e ativos da biodiversidade, que podem oferecer um descarte adequado dos resíduos e fortalecer a autonomia das mulheres e fornecimento de linhas de crédito específicas para as mulheres.

Quanto ao setor da indústria, em que pese o papel de nortear a atuação industrial, exercido pelo setor público, o setor privado possui um grande potencial de contribuição. Empresas podem agregar compromissos relacionados a critérios Ambientais, Sociais e de Governança (ASG) às políticas de gestão de resíduos sólidos para fortalecer a economia circular.

Uma pesquisa da Confederação Nacional da Indústria (CNI) em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai) demonstra que mais de 88% dos empresários avaliam a economia circular como muito importante para a indústria brasileira. Além disso, 60% das empresas entendem que a prática pode gerar empregos (CNI, [2019]). Nesse contexto, os municípios podem criar condições atrativas para o estabelecimento de indústrias em seus territórios, através da isenção de impostos e concessão de benefícios, caso estas se comprometam com a adoção de práticas responsáveis à gestão de resíduos e geração de emprego para a comunidade local.

A indústria – assim como a agricultura – pode ser reprogramada para produzir insumos com menos ou zero desperdício nos seus diferentes nichos de produção. Assim, um planejamento integrado deve ser capaz de incorporar estratégias intersetoriais para buscar não somente políticas de reaproveitamento de insumos nesses setores (inclusive para a produção energética através de biodigestores, por exemplo), mas a descarbonização da economia como um todo, através de uma transição justa.



## 4.2 A GESTÃO DE RESÍDUOS E A LOGÍSTICA REVERSA NAS CIDADES

A logística reversa baseia-se no retorno dos produtos à empresa e indústrias após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos. A ideia central é a de que grandes geradores de resíduos do setor empresarial devem estruturar e implementar sistemas para recolher seus produtos para garantir um reaproveitamento no ciclo produtivo ou outra destinação final ambientalmente adequada. Embora a PNRS determine que os sistemas de logística reversa dos produtos sejam de responsabilidade do setor empresarial, não houve, até então, a implementação efetiva desses sistemas em escala considerável (Szigethy; Antenor, 2020).

Com a pandemia, o consumo de plásticos descartáveis e de materiais hospitalares disparou. A regulação – principalmente sobre a redução de produtos de uso único, como plásticos e embalagens descartáveis – é uma das principais questões com grande potencial de impacto sobre o perfil de produção, gestão e reciclagem de resíduos nas cidades. A necessidade de normas se justifica por dados recentes alarmantes.

Em 2019, o país foi o 4º maior produtor de lixo plástico no mundo, com 11,3 milhões de toneladas (WWF, 2019). Além disso, dados de 2020 demonstram que 70% dos resíduos encontrados nos mares brasileiros são plásticos, o que revela que a produção de lixo plástico e a má gestão de RSU afeta particularmente as cidades costeiras – onde reside a maior parte da população – e os ecossistemas marinhos (Bocchini, 2021).

A criação de marcos regulatórios sobre a gestão de resíduo plástico e de outros materiais deve ser potencializada com soluções inovadoras para tratamento e substituição de resíduos, as quais constituem promissores caminhos para pesquisa e desenvolvimento de novos negócios. Tais como agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; pilhas e baterias; pneus; óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; produtos eletroeletrônicos e seus componentes e embalagens plásticas, metálicas ou de vidro, e aos demais produtos e embalagens, considerando, prioritariamente, o grau e a extensão do impacto à saúde pública e ao meio ambiente dos resíduos gerados (Lei nº 12.305/2010).

Por isso é necessário garantir a implementação da logística reversa pelo setor privado. Além disso, outra forma de garantir uma gestão eficiente dos resíduos sólidos em parceria com o setor privado



é através dos acordos setoriais. Esses acordos são previstos pela PNRS e funcionam como uma espécie de contrato entre poder público e fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, com o objetivo de compartilhar a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos (Szigethy; Antenor, 2020).

Iniciativas de responsabilização do setor privado podem ser implementadas em parceria com os municípios, buscando melhores estratégias para implementação dessa logística. Segundo a Confederação Nacional dos Municípios (CNM), os gestores municipais esbarram em dificuldades. Por um lado, existe a cobrança de realização da coleta seletiva pelo Poder Público. Por outro, também existe o entendimento de que os municípios não podem onerar os cofres públicos com ações de coleta seletiva dos resíduos que se aplicam à logística reversa – que são de responsabilidade do setor empresarial (CNM, 2020). Assim, parcerias público-privadas devem ser viabilizadas para se avançar na coleta seletiva de produtos de plástico, pilha, bateria, pneus, lâmpadas e eletrônicos nos municípios brasileiros. Em 2012, o Brasil era o segundo maior gerador de resíduos de equipamento eletroeletrônico do mundo, com 1,4 milhão de toneladas de lixo eletrônico (o equivalente a 7 kg por pessoa) naquele ano (Baldé *et al.*, 2015).

Além do excesso de resíduos, o contato com materiais de plástico e microplásticos também é um risco para a saúde da população, em especial às mulheres. As toxinas contidas nos plásticos têm efeitos diferentes em homens e mulheres, porque os corpos das mulheres contêm mais gordura que os dos homens e, portanto, ao longo da vida, acumulam mais produtos químicos solúveis em óleo, como plastificantes de ftalato (Heinrich Boll Brasil, 2020).

Análises cada vez mais detalhadas apontam para o caráter onipresente desses fragmentos, esferas, pedacinhos de filmes ou de fibras de plástico com até 5 milímetros de diâmetro ou extensão e frequentemente micrométricos. Eles já foram encontrados não apenas no ar que se respira, em ambientes terrestres, marinhos e reservas de água doce, mas também na água de torneira e engarrafada, no sal marinho, no mel, na cerveja, nos frutos do mar e em peixes consumidos pelo homem e, por consequência, nas fezes humanas (Jones, 2019).

Dado esse contexto, as políticas públicas devem garantir que empresas apliquem princípios da economia circular e logística reversa envolvendo o apoio aos ciclos que possam manter materiais, componentes e os produtos em circulação em seu mais alto valor e nível de utilidade pelo maior tempo possível.



### 4.3 ROTAS TECNOLÓGICAS NO SETOR DE RSU

Outra forma de fomentar a implementação da economia circular nos municípios é através da implementação de rotas tecnológicas na gestão dos resíduos sólidos urbanos. Rota tecnológica é o conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos desde a sua geração até a sua disposição final, envolvendo circuitos de coleta de resíduos de forma indiferenciada e diferenciada e contemplando tecnologias de tratamento dos resíduos com ou sem valorização energética. Inicia-se na geração dos resíduos e encerra-se com a disposição final (em aterro sanitário) (Reichert, 2019).

Essas rotas consistem em diferentes caminhos tecnológicos para tratamento de cada um dos tipos de resíduos. Assim, cada rota tecnológica apresenta impactos ambientais e sociais distintos, os quais devem ser considerados no seu desenho e implementação.

Apesar dessas tecnologias estarem disponíveis, os altos custos e a falta de uma maior integração na gestão dos RSU são fatores que impedem a expansão das rotas tecnológicas nos municípios brasileiros. É comum os países caminharem para investir em tecnologias avançadas na gestão de RSU e alinhar essas medidas aos aterros sanitários e biodigestores para geração de energia. Porém, no Brasil, a falta de uma gestão integrada faz com que o cenário na gestão de RSU seja similar ao de antes da elaboração da PNRS.

A PNRS previu que os entes federativos deveriam se adequar a algumas práticas, tais como a elaboração de planos microrregionais, intermunicipais e municipais de gerenciamento de resíduos sólidos. Esses planos devem fomentar a inovação no setor e a adoção de tecnologias que promovam o desenvolvimento sustentável e criem oportunidades para resgatar e elevar o valor incorporado nos resíduos, aproveitando-os antes de chegarem aos aterros. No entanto, muitos desses planos ainda não foram implementados.

Somado a isso, a reutilização, reciclagem, compostagem, recuperação e aproveitamento energético dos resíduos ainda não foram implementados em larga escala ao ponto de se tornarem atividades econômicas rentáveis (Szigethy; Antenor, 2020). Assim, faz-se necessário diversificar as rotas tecnológicas municipais para aumentar os benefícios econômicos, sociais e ambientais que podem ser decorrentes da gestão sustentável dos resíduos.

O planejamento dessas rotas precisa responder a questões-chave para compreender como esses caminhos podem causar danos à saúde pública. Alguns aspectos a serem considerados são o potencial de geração de emprego e renda – uma vez que seja



implementada; quem seriam os maiores beneficiados diretamente com o serviço; quem deveria ser capacitado para ser empregado nessa atividade, entre outras questões relevantes em um contexto territorial específico.

Dessa forma, esse planejamento deve ser acompanhado por um mapeamento de vulnerabilidade social, para que o governo possa identificar quem são os trabalhadores informais já atuantes no setor, onde estão as cooperativas e associações, quais são as reais necessidades dos trabalhadores, bem como os custos e benefícios de adotar uma determinada rota.

A reciclagem e compostagem são vistas com grande potencial de atingir os setores sociais, populações marginalizadas e movimentar a economia pela ótica da economia circular. A reciclagem é reconhecida como a rota mais eficiente para reduzir a quantidade de resíduos que chega aos aterros e, ao mesmo tempo, é responsável por inserir novamente os produtos no mercado, movimentando a economia (Szigethy; Antenor, 2020).

A compostagem, por sua vez, permite a valorização dos resíduos orgânicos. Nesse caso, as prefeituras podem investir na criação de rotas tecnológicas que comportem espaços de compostagem urbana, capacitando mulheres, jovens e moradores de comunidades vulneráveis e periféricas para trabalharem nessa atividade. O adubo oriundo dessas compostagens pode ser comercializado e também redirecionado para espaços de agricultura urbana, em parcerias com associações e grupos de moradores.

Assim, o planejamento de rotas pode ser fortalecido por abordagens intersetoriais, fomentando a geração de receita, já que tanto a compostagem quanto a agricultura urbana geram insumos e alimentos que podem ser comercializados em feiras de produtores rurais nas cidades e vendidos em parceria com outros estabelecimentos. Além do potencial de redução de emissões decorrente dessas intervenções, elas ilustram como a economia circular funciona na prática: através da adoção de políticas intersetoriais que se conectam a todo um ciclo econômico, que se movimenta a partir de um resíduo que teve um descarte correto, aumenta o número e a renda de pessoas empregadas em diferentes setores – desde a triagem e manejo dos resíduos, até em postos comerciais – e fomenta a segurança alimentar e padrões de consumo sustentáveis. Tudo isso em prol de uma sociedade mais resiliente e inclusiva e de uma economia de baixo carbono e regenerativa.



Por fim, implementar a economia circular é oportuno porque oferece oportunidades de investir em diálogos com diferentes atores, como setor privado e sociedade civil, assim como permite o fortalecimento de abordagens sociais e intersectoriais, envolvendo a indústria, agricultura e na implementação de diferentes rotas tecnológicas.

## **5 RECOMENDAÇÕES DE ABORDAGENS SOCIAIS E DE GÊNERO PARA A GESTÃO PÚBLICA MUNICIPAL**

Nessa seção, elencamos recomendações de próximos passos que podem ser priorizados para impulsionar a implementação de uma economia circular com abordagens interseccionais, com foco nos governos municipais, ressaltando as possibilidades de atuação conjunta e parcerias com outros atores.

- a) Elaborar planos e políticas municipais com abordagens interseccionais;
  - Os governos podem criar um Plano de Economia Circular, com metas, objetivos e indicadores relacionados ao cumprimento dos ODS, para apoiar a melhoria na gestão de resíduos; e, ao mesmo tempo, realizar um mapeamento de vulnerabilidade social, coletando dados desagregados por gênero, raça, idade, escolaridade para identificar quem são as pessoas que atuam na gestão de resíduos sólidos e como aumentar a profissionalização e empregabilidade no município;
- b) Participar de redes, fóruns e consórcios intermunicipais e governamentais;
  - As Prefeituras podem aderir a redes nacionais como a Frente Nacional de Prefeitos (FNP) para impulsionar a discussão sobre clima e desenvolvimento sustentável no âmbito municipal, e também integrar grupos internacionais, como o Pacto Global dos Prefeitos pelo Clima e a Energia, a fim de atuar mais diretamente na relação entre resíduos e aproveitamento energético para abastecer comunidades que residem ao redor de aterros e de outras rotas tecnológicas;
- c) Apoiar a criação de um ambiente atrativo para o setor privado, com maiores oportunidades de geração de emprego e renda, considerando critérios de gênero, raça e classe;
  - Facilitar a implementação de novas cooperativas e microempresas especializadas na gestão de resíduos, coleta seletiva e reciclagem, ao mesmo tempo em que reduzem vulnerabilidades sociais concernentes às mulheres, jovens,



pessoas negras e periféricas que já atuam no setor; e também oferecer, em parceria com o setor privado e/ou terceiro setor, programas de treinamento, capacitação e mentoria dos moradores para aumentar a empregabilidade em atividades relacionadas à economia circular;

- d) Elaborar estratégias para gerenciar os resíduos orgânicos, visando reduzir a insegurança alimentar das comunidades periféricas e populações mais vulneráveis;
  - Criar políticas de compostagem nas creches e escolas públicas e incentivar o tratamento adequado de resíduos orgânicos de forma pedagógica e inclusiva, contribuindo para a conscientização ambiental de meninas e meninos durante a formação escolar; e também viabilizar que os grandes geradores de resíduos orgânicos tenham parcerias firmadas com cooperativas cadastradas pela prefeitura;
- e) Criar estratégias para fomentar a liderança de mulheres e de outros grupos na implementação da economia circular;
  - As Prefeituras podem avançar no mapeamento, cadastro, formalização e capacitação de associações e cooperativas, assegurando um trabalho digno e garantia de direitos, reconhecendo o empreendedorismo e a liderança feminina nessas atividades.

Dessa forma, seguindo essas recomendações, os governos conseguem caminhar para implementar medidas interseccionais na economia circular nos seus municípios.

## 5.1 METAS E INDICADORES

Além das recomendações, apresentamos dez metas e indicadores que podem ser adaptados conforme a realidade de cada município do Brasil, a fim de impulsionar uma economia circular inclusiva. A maior parte dessas metas e indicadores está voltada para 2030, considerando o horizonte temporal da Agenda 2030 e a implementação dos ODS como norteadores. Contudo, muitas dessas questões devem ser priorizadas antes desse marco temporal através do estabelecimento de indicadores intermediários, a fim de que as políticas de resíduos possam focar no alcance de metas que vão desde o curto ao longo prazo.

É primordial que se reconheça a lacuna significativa de estatísticas desagregadas nos municípios brasileiros. Entre os diversos fatores que contribuem para isso, podemos citar as limitações



financeiras e de recursos humanos, além do baixo investimento em ciência e tecnologia por parte das instituições municipais, principalmente no contexto da pandemia. No entanto, o levantamento de dados desagregados deve ser priorizado para informar a elaboração e implementação de políticas públicas responsivas a abordagens sociais e de gênero nos setores relacionados à gestão de resíduos, a fim de embasar a criação de metas e indicadores nas cidades ao longo do tempo.

Visando otimizar o levantamento e a utilização desses dados, governos municipais podem atuar em parceria com outros entes públicos, organizações da sociedade civil, instituições de pesquisa e acadêmicas e organizações da cooperação internacional. Além disso, esses dados devem ser desagregados (por gênero, raça, classe, idade, território etc.), públicos e de fácil acesso para propiciar o monitoramento e a implementação dos indicadores, assim como para impulsionar a pesquisa e a produção de conhecimento sobre a eficácia de políticas municipais.

No que tange a gênero, todos os indicadores devem visar a paridade entre homens e mulheres (50%), apesar de metas intermediárias serem aplicáveis, desde que visem à paridade de gênero como objetivo final.

Vale ressaltar que cada município deve adotar indicadores aplicáveis à sua realidade, com base em dados sociodemográficos disponíveis, mapeamento de resíduos e social e orçamento. Nesse sentido, o Quadro 1 apresenta uma lista de indicadores sugeridos que devem ser vistos como ponto de partida para a discussão a partir da realidade local.

Quadro 1 – Metas e indicadores para a gestão municipal mais inclusiva

Meta	Exemplo de indicador
1. Garantir a participação efetiva e a inclusão em processos de tomada de decisão relacionados à gestão de resíduos por parte de mulheres, jovens, pessoas negras e demais grupos em situação de vulnerabilidade social.	Número de consultas e/ou audiências públicas realizadas com a participação de grupos, organizações e associações da sociedade civil representativas das pautas de gênero, raça e classe.



<b>Meta</b>	<b>Exemplo de indicador</b>
<p>2. Fortalecer a capacitação de pessoas – em particular, de mulheres, jovens, pessoas negras e demais grupos em situação de vulnerabilidade social – para atividades relacionadas à economia circular.</p>	<p>Número de programas de mentoria criados, envolvendo mentores acadêmicos e profissionais da área de RSU, focados na mentoria de jovens e mulheres. (Prioridade para pessoas baseadas nas regiões com menor densidade de profissionais atuantes na área, contribuindo também para a redução de desigualdades regionais.)</p>
<p>3. Aumentar a empregabilidade de mulheres, jovens, pessoas negras e demais grupos em situação de vulnerabilidade na gestão de RSU.</p>	<p>Porcentagem de mulheres, pessoas negras, jovens e demais grupos vulneráveis inseridos no mercado de trabalho e/ou promovidos após X anos decorrentes depois de treinamento e mentoria na área de RSU.</p>
<p>4. Ampliar campanhas de educação ambiental para toda a população, com foco na gestão de RSU e na economia circular.</p>	<p>Número de projetos de extensão apoiados, realizados através de parcerias entre governo municipal e universidades, com foco na educação ambiental em comunidades vulneráveis.</p>
<p>5. Ampliar espaços de compostagem e hortas urbanas, favorecendo a criação de novos empregos e a segurança alimentar.</p>	<p>Número de espaços de compostagem e hortas urbanas criados em bairros e comunidades periféricas, favorecendo a produção de alimentos orgânicos e que podem ser comercializados nos municípios, gerando emprego e renda para aqueles que trabalharem diretamente nesses espaços, priorizando a empregabilidade seguindo critérios de gênero, raça e classe.</p>
<p>6. Apoiar o funcionamento e a manutenção das centrais de reciclagem e espaços em que ocorrem a coleta seletiva.</p>	<p>Porcentagem de cobertura de energia renovável implementada para cobrir a manutenção e o funcionamento de espaços de reciclagem até 2030, favorecendo a criação de novas competências e empregos seguindo critérios de gênero, raça e classe.</p>



Meta	Exemplo de indicador
7. Ampliar o serviço de catação e coleta seletiva nos municípios, com o objetivo de fazer chegar às cooperativas de catadores o material reciclável descartado domesticamente e por grandes produtores de resíduos.	Porcentagem de resíduos recicláveis domiciliares encaminhados para cooperativas que sejam chefiadas por mulheres ou tenham 50% de mulheres em seu quadro de colaboradores até 2030.
8. Fomentar a autonomia financeira de pessoas trabalhando no setor de RSU, seguindo critérios de gênero, raça e classe.	Volume de microcréditos e subsídios fiscais com critérios de gênero, raça e classe, ofertados a pequenos e médios empreendedores de impacto social no setor de RSU, que colaborem com a recuperação econômica verde, contribuindo diretamente para a inclusão social e redução de desigualdades.
9. Incentivar a produção de conhecimento e inovação no setor de RSU seguindo critérios de gênero, raça e classe.	Quantidade de programas de imersão e incentivo ao conhecimento nas áreas de Ciência, Tecnologia e Inovação ofertados ao longo do ensino fundamental para estudantes de escola pública até 2030, com número mínimo de meninas.
10. Garantir a expansão dos serviços básicos essenciais, como acesso à coleta de resíduos e saneamento, seguindo critérios de gênero, raça e classe.	Número de pessoas beneficiadas com a ampliação do acesso à coleta de resíduos e saneamento, seguindo critérios de gênero, raça e classe, a fim de reduzir a contaminação e transmissão de doenças e aumentar a qualidade de vida de populações mais vulneráveis.

Fonte: Elaborado pelas autoras (2022).

Assim, adaptando essas metas e indicadores para sua realidade, os municípios conseguem implementar ferramentas que ampliam a inclusão de abordagens sociais e de gênero na economia circular.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de uma gestão de RSU integrada e eficiente ainda é vista como um desafio no Brasil e no mundo. No entanto, há oportunidades para se avançar na transição para uma economia circular através de esforços para uma retomada econômica verde e inclusiva pós-pandemia.

Adotando o conceito da economia circular, os municípios podem ampliar a perspectiva sobre as atividades do setor de RSU para além das funções de coleta seletiva, reciclagem e de catadores e, assim, criar estratégias de implementação de rotas tecnológicas, da logística reversa e de abordagens intersectoriais, com potencial de fomentar a geração de emprego e renda, ao mesmo tempo em que fortalecem a resiliência das cidades – tanto climática, quanto econômica e social. Planejar e implementar intervenções intersectoriais com abordagens interseccionais é mais do que necessário para reduzir vulnerabilidades sociais existentes, uma vez que a maior parte dos profissionais e catadoras são mulheres, negras e periféricas e que esses grupos foram particularmente afetados pela pandemia.

De modo geral, as prefeituras têm um papel relevante na gestão de RSU, mas as obrigações e responsabilidades devem ser compartilhadas com outros atores, assim como previsto pela PNRS. Desta forma, é importante estabelecer esferas de governança em parceria com o governo federal, setor privado, sociedade civil e academia, de modo que estejam claros os papéis de cada um na realização de uma gestão de resíduos eficiente e sustentável.

No Brasil, alguns municípios já demonstram protagonismo e exemplos de boas práticas. Porém, a maioria é concentrada nas regiões Sul e Sudeste. Nesse sentido, maior atenção e investimentos são necessários para a elaboração de estratégias de regionalização, principalmente nos estados do Norte e Nordeste, a fim de garantir que a transição para uma economia circular seja justa e inclusiva em todas as regiões do Brasil, em particular aquelas com índices de desenvolvimento humano e indicadores sociais mais comprometidos.

Por fim, para avançar na gestão de resíduos no Brasil, recomenda-se que o planejamento e a implementação sejam guiados pelos ODS, principalmente com os objetivos relacionados à redução de desigualdades sociais e de gênero, ação climática e cidades sustentáveis, considerando a realidade socioeconômica de cada município. Nesse sentido, uma gestão responsiva aos desafios sociais, ambientais e econômicos deve ser acompanhada de medidas que possuam uma abordagem interseccional.



Essas medidas devem ser baseadas em dados transparentes e de fácil acesso e implementadas com base em indicadores monitorados e avaliados com periodicidade, a fim de contribuir com um desenvolvimento comprometido com o alcance da justiça social e climática.

## REFERÊNCIAS

- ADAPTACLIMA. Povos e populações vulneráveis no contexto da mudança do clima. **AdaptaCLIMA**, última atualização: julho de 2018. Disponível em: <http://adaptaclima.mma.gov.br/povos-e-populacoes-vulneraveis-no-contexto-da-mudanca-do-clima>. Acesso em: 13 maio 2022.
- BALDÉ, Cornelis P.; WANG, Feng; KUEHR, Ruediger; HUISMAN, Jaco. **The Global E-waste Monitor 2014**: quantities, flows and resources. Bonn, Germany: United Nations University, IAS – SCYCLE, 2015. Disponível em: <https://i.unu.edu/media/ias.unu.edu-en/news/7916/Global-E-waste-Monitor-2014-small.pdf>. Acesso em: 13 maio 2022.
- BOCCHINI, Bruno. Estudo mostra que 70% dos resíduos do mar brasileiro são plástico. **Agência Brasil**, Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-03/estudo-mostra-que-70-dos-residuos-do-mar-brasileiro-sao-plastico>. Acesso em: 02 jun. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 13 maio 2022.
- CAMPOS, Jefferson de Matos. **Poliuição industrial e saúde humana**: limitações e potencialidade do uso de bancos de dados públicos em pesquisas empíricas. 2019. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Comunicação e Informação Científica e Tecnológica em Saúde, Programa de Pós-graduação em Informação e Comunicação em Saúde, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/icict/39946/2/jefferson\\_campos\\_icict\\_mest\\_2019.pdf](https://www.arca.fiocruz.br/bitstream/icict/39946/2/jefferson_campos_icict_mest_2019.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.
- CEPAL – Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe. **Construir um novo futuro**: uma recuperação transformadora com igualdade e sustentabilidade. Trigésimo Oitavo Período de Sessões da Cepal. Santiago: Nações Unidas, 2020. Disponível em: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46619/1/S2000668\\_pt.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46619/1/S2000668_pt.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.
- CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB-AGRO/CEPEA**: com avanço de 24,3% no ano, PIB Agro alcança participação de 26,6% no PIB Brasileiro em 2020. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-com-avanco-de-24-3-no-ano-pib-agro-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020.aspx>. Acesso em: 02 jun. 2022.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Pesquisa sobre economia circular na indústria brasileira**. Brasília, DF: CNI, [2019]. Disponível em: [https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/a5/ab/a5abebbb-3bc9-4aed-9f2f-8914358d2f00/economia\\_circular\\_-\\_pesquisa\\_cni\\_2.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/a5/ab/a5abebbb-3bc9-4aed-9f2f-8914358d2f00/economia_circular_-_pesquisa_cni_2.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.
- CNM – Confederação Nacional de Municípios. **10 anos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**: importância da logística reversa nos Municípios



brasileiros. Brasília, DF: CNM, 2020. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/10-anos-da-pnrs-importancia-da-logistica-reversa-nos-municipios-brasileiros>. Acesso em: 02 jun. 2022.

CNM – Confederação Nacional dos Municípios. **Prefeituras perdem R\$ 600 milhões em arrecadação com destinação irregular de resíduos industriais**. Brasília, DF: CNM, 2016. Disponível em: <https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/prefeituras-perdem-600-milhoes-em-arrecadacao-com-destinacao-irregular-de-residuos-industriais>. Acesso em: 02 jun. 2022.

DAVIS, Kathy. Intersectionality as buzzword: A sociology of science perspective on what makes a feminist theory successful. **Feminist Theory**, London, v. 9, n. 1, p. 67-85, 2008. <https://doi.org/10.1177/1464700108086364>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1464700108086364>. Acesso em: 02 jun. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **The circular economy in detail**. Ellen MacArthur Foundation, 2017a. Disponível em: <https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>. Acesso em: 02 jun. 2022.

EMF – Ellen MacArthur Foundation. **Uma economia circular no Brasil: uma abordagem exploratória inicial**. Produto da inteligência coletiva dos membros da rede CE100 Brasil. Ellen MacArthur Foundation, 2017b. Disponível em: [https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil\\_Uma-Exploracao-Inicial.pdf](https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/languages/Uma-Economia-Circular-no-Brasil_Uma-Exploracao-Inicial.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.

FALLUH, Carolina; BATISTA, Deborah Camara; CARDOSO, Monique; MILIONI, Sabine. **Os desafios da reciclagem e da logística reversa de embalagens: contribuições para discussão e análise de cenários diante do PLS 90/2018**. São Paulo: FGV EAESP, 2019. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=8064565&ts=1594014008848&disposition=inline>. Acesso em: 22 maio 2022.

GALVÃO, Desirêe. Economia regenerativa: em busca de negócios que ajudem a curar o planeta. **Época**, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://epoca.oglobo.globo.com/ciencia-e-meio-ambiente/blog-do-planeta/noticia/2017/07/economia-regenerativa-em-busca-de-negocios-que-ajudem-curar-o-planeta.html>. Acesso em: 02 jun. 2022.

GIZ – Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. **Guía para la recuperación verde en las ciudades de América Latina: estudios de caso en los sectores de agua, energía, residuos y transporte**. Bonn: GIZ, 2021. Disponível em: [https://ciudadesytransporte.mx/wp-content/uploads/2022/03/guia\\_para\\_la\\_recuperacion\\_verde\\_de\\_las\\_ciudades\\_de\\_america\\_latina.pdf](https://ciudadesytransporte.mx/wp-content/uploads/2022/03/guia_para_la_recuperacion_verde_de_las_ciudades_de_america_latina.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.

HEINRICH BÖLL BRASIL. **Atlas do plástico: fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos**. Rio de Janeiro: Heinrich Böll Brasil, 2020. Disponível em: <https://br.boell.org/sites/default/files/2020-11/Atlas%20do%20PI%3%A1stico%20-%20vers%C3%A3o%20digital%20-%2030%20de%20novembro%20de%202020.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101760.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2022.

IGLESIAS, Luis; HOLLANDS, Ruth. Por que as mudanças climáticas são uma questão LGBTQIA+?. **Empodera Clima**, 2019. Disponível em: <https://www.empoderaclima.org/pt/base-de-dados/artigos/mudancas-climaticas-lgbtq>. Acesso em: 02 jun. 2022.



INSTITUTO ALZIRAS. **Perfil das Prefeitas no Brasil (2017-2020)**. [Rio de Janeiro, 2020]. Disponível em: <http://preefeitas.institutoalziras.org.br/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

JONES, Frances. A ameaça dos microplásticos: Fragmentos de plásticos com dimensões micrométricas estão em todos os lugares e impõem desafios ao seu controle. **Pesquisa Fapesp**, São Paulo, n. 281, 2019. Disponível em: <https://revista.pesquisa.fapesp.br/a-ameaca-dos-microplasticos/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

JÚNIA, Raquel. IBGE: 54% dos municípios brasileiros não têm plano de descarte de resíduos. **Agência Brasil**, Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/acervo/geral/audio/2018-07/ibge-54-dos-municipios-brasileiros-nao-tem-plano-de-descarte-de-residuos/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

MARTINS, Leandro. [Rádio Nacional]. O Brasil tem 35 milhões de pessoas sem água potável. **Agência Brasil**, Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/saude/audio/2021-03/saneamento-basico>. Acesso em: 02 jun. 2022.

MNCR – Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis. **Negros e negras são maioria entre os catadores de materiais recicláveis**. São Paulo, 19.11.2013. Disponível em: <https://www.mnrc.org.br/noticias/noticias-regionais/negros-e-negras-sao-maioria-entre-os-catadores-de-materiais-reciclaveis>. Acesso em: 02 jun. 2022.

MNCR – Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis. **Mulheres são maioria entre os catadores de materiais recicláveis**. São Paulo, 21.03.2014. Disponível em: <https://www.mnrc.org.br/noticias/noticias-regionais/mulheres-sao-maioria-entre-catadores-organizados-em-cooperativas>. Acesso em: 02 jun. 2022.

NERI, Marcelo; HECKSHER, Marcos. **Jovens: percepções e políticas públicas**. Rio de Janeiro: FGV Social, 2021. Disponível em: <https://cps.fgv.br/JovensPercebe>. Acesso em: 02 jun. 2022.

NIEUWENHUIS, Rense; MUNZI, Teresa; NEUGSCHWENDER, Jörg, Heba; PALMISANO, Flaviana. **Gender Equality and Poverty are intrinsically linked: a contribution to the continued monitoring of selected Sustainable Development Goals**. New York, NY: UN Women, 2018. Disponível em: <https://www.unwomen.org/sites/default/files/Headquarters/Attachments/Sections/Library/Publications/2018/Discussion-paper-Gender-equality-and-poverty-are-intrinsically-linked-en.pdf>. Acesso em: 13 maio 2022.

NOBRE, Miriam; HORA, Karla; BRITO, Claudia; PARADA, Soledad. **Atlas de las mujeres rurales de América Latina y el Caribe: al tiempo de la vida y los hechos**. Santiago de Chile: FAO, 2017. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i7916s/i7916s.pdf>. Acesso em: 13 maio 2022.

ONU MEIO AMBIENTE. **Panorama da gestão de resíduos na América Latina e no Caribe**: resumo para tomadores de decisão. Cidade de Panamá: ONU Meio Ambiente, 2018. Disponível em: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26436/Waste\\_summary\\_PT.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26436/Waste_summary_PT.pdf?sequence=5&isAllowed=y). Acesso em: 02 jun. 2022.

PEITER, Gleyse; MALUF, Renato S.; ROSA, Teresa da Silva (Coord.). **Mudanças climáticas, vulnerabilidade e adaptação**: parte 1 – Mobilização e iniciativas de adaptação; parte 2 – Populações vulneráveis e agenda pública no Brasil. Rio de Janeiro: COEP, 2011. 288 p. (Coleção COEP. Cidadania em rede 5). Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/20167>. Acesso em: 13 maio 2022.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **A importância da Indústria para o Brasil**. Brasília, DF, 18.03.2022. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/>. Acesso em: 02 jun. 2022.



PORTAL DA INDÚSTRIA. **Economia circular**: entenda o que é, suas características e benefícios. Brasília, DF, [2021]. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/economia-circular/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

REICHERT, Geraldo Antônio. **Tecnologias e rotas tecnológicas para RSU**. Curitiba: ProteGEer, 2019. Disponível em: [http://protegeer.gov.br/images/documents/461/Tecnologias%20para%20Valoriza%C3%A7%C3%A3o%20de%20Org%C3%A2nicos%20e%20Recicl%C3%A1veis%20e%20Rotas%20Tecnol%C3%B3gicas\\_Geraldo%20A.%20Reichert.pdf](http://protegeer.gov.br/images/documents/461/Tecnologias%20para%20Valoriza%C3%A7%C3%A3o%20de%20Org%C3%A2nicos%20e%20Recicl%C3%A1veis%20e%20Rotas%20Tecnol%C3%B3gicas_Geraldo%20A.%20Reichert.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.

ROUBICEK, Marcelo. Os efeitos mais graves da pandemia nas periferias, em 4 pontos. **Nexo**, São Paulo, 02.06.2020. [Atualizado em 03.06.2020]. Disponível em: <https://www.nexojournal.com.br/expresso/2020/06/02/Os-efeitos-mais-graves-da-pandemia-nas-periferias-em-4-pontos>. Acesso em: 02 jun. 2022.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. **Emissões por atividade econômica no Brasil**: diagrama Sankey. [S.l.], 2020. Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/sankey>. Acesso em: 19 ago. 2021.

SILVA, Vitória Régia; LEÃO, Natália. Na pandemia, mulheres ficam mais vulneráveis e são maioria entre desempregados. **Gênero e Número**, 2021. Disponível em: <https://www.generonumero.media/mulheres-trabalho/>. Acesso em: 02 jun. 2022.

SOUZA, Jeová Alves de; MARTINS, Maria Fatima. Mapa de riscos em cooperativas de catadores de materiais recicláveis no Município de Campina Grande-PB.

**Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 13, n. 2, p. 232-245, 2018. DOI: <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2018.v13n2.1385>. Acesso em: 02 jun. 2022.

SZIGETHY, Leonardo; ANTENOR, Samuel. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. **Ipea**, Brasília, DF, Publicado em 09.07.2020 – Última modificação em 01.10.2021. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>. Acesso em: 02 jun. 2022.

THINK OLGA. **Relatório saúde das mulheres**. O laboratório Think Olga de exercícios de futuro. Think Olga, 2021. Disponível em: [https://lab.thinkolga.com/wp-content/uploads/2021/04/TOG\\_Relatorio-Saude-Mulheres.pdf](https://lab.thinkolga.com/wp-content/uploads/2021/04/TOG_Relatorio-Saude-Mulheres.pdf). Acesso em: 02 jun. 2022.

UNEP – United Nations Environment Programme. **Human Rights, the environment and COVID-19**: key messages. Nairobi: UNEP, [2020]. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33510/HRE1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 jun. 2022.

WFP – World Food Programme. **Como reduzir o desperdício de alimentos por meio da alimentação escolar**. Brasília, DF: Centro de Excelência contra a Fome, 13.04.2018. Disponível em: <https://centrodeexcelencia.org.br/como-reduzir-o-desperdicio-de-alimentos-por-meio-da-alimentacao-escolar/>. Acesso em: 12 maio 2022.

WMR – Movimento Mundial pelas Florestas Tropicais. Mulheres, territórios e posse da terra: reflexões vindas do México sobre por que e para que nós, mulheres, queremos a terra. **Boletim WRM**, Montevideu, n. 248, 05.03.2020. Disponível em: <https://www.wrm.org.uy/pt/artigos-do-boletim/mulheres-territorios-e-posse-da-terra-reflexoes-vindas-do-mexico-sobre-por-que-e-para-que-nos-mulheres>. Acesso em: 02 jun. 2022.

WWF – World Wide Fund for Nature. **O Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico**. Brasília, DF, 04.03.2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 02 jun. 2022.



## RESÍDUOS E CLIMA

### WASTE AND CLIMATE

Como citar [ABNT 6023:2018]:

FRICKE, Klaus; DEHOUST, Günter; BULACH, Winfried; PFEIFFER, Andrea; PEREIRA, Christiane. Resíduos e clima. In: PEREIRA, Christiane; FRICKE, Klaus (coord.). **Cooperação Intersetorial e Inovação**: ferramentas para a gestão sustentável de resíduos sólidos. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, 2022.

#### **Klaus Fricke**

Professor e Doutor em engenharia. Consultor em gestão de resíduos sólidos e recursos com atividades de projetos nacionais e internacionais, atuando a mais de quatro décadas. Foi *Chief Executive Officer* (CEO) e sócio da *Ingenieurgemeinschaft Witzenhausen Fricke & Turk GmbH* atuando com o apoio de cem empregados em escritórios na Alemanha, Reino Unido e Luxemburgo. Foi o inventor da coleta seletiva de orgânicos na Alemanha em projeto desenvolvido na cidade de Witzenhausen, em 1983. Atuou no planejamento e implementação de mais de cem plantas de compostagem e biodigestão e, ainda, mais de vinte plantas de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). Desde 1999, atua como Diretor do Departamento de Gestão de Resíduos e Recursos na *Technische Universität Braunschweig* (TUBS), tendo como foco de suas atividades a internacionalização da gestão sustentável de resíduos, especialmente no campo da biotecnologia.

E-mail: klaus.fricke@tu-bs.de

#### **Günter Dehoust**

Engenheiro ambiental, tem trabalhado como pesquisador sênior no Öko-Institut desde 1990. Seu trabalho se concentra no gerenciamento de resíduos, avaliações do ciclo de vida, controle da poluição do ar e análises de fluxo de materiais. Durante este tempo ele liderou inúmeros projetos de pesquisa importantes sobre estes tópicos para a UBA, BMU(B), BMBF e clientes privados. Por muitos anos, tem trabalhado na avaliação ecológica de cargas ambientais em conexão com uma ampla gama de processos, especialmente no que diz respeito à coleta, processamento e reciclagem de várias frações de resíduos. Antes de ingressar no Öko-Institut, trabalhou por cerca de cinco anos com as autoridades ambientais da cidade de Düsseldorf e no Conselho Regional de Darmstadt, onde foi responsável pelo gerenciamento de locais contaminados, pela proteção das águas subterrâneas e pela aprovação e controle de estações de tratamento de resíduos.

E-mail: G.Dehoust@oeko.de

#### **Winfried Bulach**

Engenheiro químico com doutorado em engenharia ambiental, atua como pesquisador sênior no Öko-Institut desde 2015. Antes de ingressar no Öko-Institut, ele trabalhou como assistente de pesquisa no Instituto de Tecnologia de Karlsruhe (desde 2011), onde concluiu sua tese de doutorado sobre "Gestão do fluxo de materiais de resíduos domésticos biogênicos". Seu trabalho se concentra em



matérias-primas críticas, economia circular, avaliações de ciclo de vida e análises de fluxo de materiais. Tem mais de dez anos de experiência no campo de gerenciamento de resíduos.

E-mail: w.Bullach@oeko.de

### **Andrea Pfeiffer**

Engenheira ambiental, obteve seu mestrado em 2015. De 2013 a 2022 ela trabalhou como assistente de pesquisa na Technische Universität Braunschweig no Instituto de Engenharia Hidráulica, Departamento de Gerenciamento de Resíduos e Recursos.

E-mail: andrea.pfeiffer@tu-bs.de

### **Christiane Pereira**

Engenheira Civil. Advogada. Doutora em engenharia e especialista em tecnologias para gestão sustentável de resíduos sólidos pela Technische Universität Braunschweig (TUBS). *Master in Business Administration (MBA)* em gestão empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) e Direito Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Ministra aulas de tecnologias e gestão sustentável de resíduos sólidos no curso de mestrado em Engenharia Urbana da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Consultora da *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ)*; *KfW Bankengruppe* (Banco Estatal Alemão de Investimento e Desenvolvimento); Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID); e; *Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)* (DAAD = Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico). Com mais de duas décadas de experiência, atuou em mais de dez países promovendo a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos. Desenvolveu proposta para a Resolução Conama Compostagem, e cadernos temáticos para o PLANSAB. Autora de diversas publicações relacionadas com a reciclagem de materiais e recuperação energética.

E-mail: christiane@terramelhor.com.br

## **RESUMO**

Este artigo apresenta informações básicas sobre o tema resíduos e clima, começando com algumas informações gerais sobre a mudança climática. Com base nisto, abordagens metodológicas são apresentadas a partir do emprego de exemplos. Serão, ainda, apresentados aspectos importantes relacionados com as atividades de gerenciamento de resíduos sólidos, inclusive gerando um comparativo com as particularidades do mercado brasileiro. Procedimentos de não geração e de redução não serão abordados apesar de sua relevância na hierarquia de procedimentos ditada pela legislação e seus elevados potenciais de mitigação de impactos ambientais. São mostradas as diferentes condições estruturais brasileiras para o cálculo de possíveis serviços de mitigação para o Brasil, em comparação com a Alemanha.

Palavras-chave: Mudança climática. Gases de efeito estufa. Potencial de aquecimento global. Mitigação de GEE. Avaliação  
<https://www.instagram.com/direct/t/118872292833688/climatica>.



## ABSTRACT

This article presents basic information on the topic of waste and climate, starting with some general information on climate change. Building on this, methodological approaches to accounting are explained using examples. Here, the essential fields of action of aftercare waste management are shown. Where relevant, references to Brazil are shown. The effects of the hierarchical levels of waste avoidance and reuse are not considered, knowing full well that these fields of action have the highest mitigation fields. The different Brazilian framework conditions for calculating possible mitigation services for Brazil compared to Germany are shown.

Keywords: Climate change. Greenhouse gases. Global warming potential. GHG-Mitigation. Climate assessment.

## 1 FUNDAMENTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

### 1.1 O QUE É EXATAMENTE O CLIMA?

O clima pode ser definido como o estado médio da atmosfera em uma determinada área durante um período prolongado sendo descrito por quantidades estatísticas (o "curso" que as condições climáticas tomam). As quantidades estatísticas usadas para sua caracterização podem incluir média, frequência, duração e extremos meteorológicos. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial, pelo menos trinta anos é o ciclo clássico para estabelecer levantamentos estatísticos. Em contraste com o clima, "condições climáticas" descreve, em um sentido mais restrito, o caráter médio das condições atmosféricas em um período mais curto dentro de uma área espacial mais limitada. As condições atmosféricas referem-se ao caráter médio do clima em um período de tempo mais curto, ou seja, de vários dias a semanas, enquanto a meteorológica em geral descreve o estado atual das condições prevalentes em um determinado lugar por um período de algumas horas a alguns dias. Parâmetros meteorológicos característicos para descrever o clima podem ser temperatura do ar, pressão do ar, velocidade e direção do vento, assim como umidade, cobertura de nuvens e precipitação.

### 1.2 MUDANÇA CLIMÁTICA

O clima sofreu flutuações e mudanças significativas no passado (por exemplo, a Era do Gelo). Portanto, as causas das mudanças climáticas podem ter origens diferentes. As mudanças na superfície terrestre (deriva continental, mudanças no uso da terra) podem causar mudanças climáticas (UBA, 2014). A distribuição da terra e do mar influencia tanto o transporte de energia na Terra quanto a circulação atmosférica e oceânica (HBS, 2018).



Alterações nos parâmetros geostrofísicos, como a constante solar (irradiação extraterrestre) e os elementos orbitais da Terra (propriedades da órbita da Terra ao redor do Sol), também podem influenciar o clima.

Além disso, mudanças no equilíbrio de massa da atmosfera (por exemplo, conteúdo de gases de efeito estufa ou aerossóis) podem levar a mudanças climáticas. Estas podem ser de origem natural e antropogênica (ou seja, causadas pelo homem) (UBA, 2014).

### 1.3 GASES DE EFEITO ESTUFA

Os gases são considerados como tendo influência sobre o clima se absorverem e reemitirem (termicamente) a radiação infravermelha. Além disso, eles têm um tempo de retenção suficientemente longo para se tornarem uniformemente distribuídos na atmosfera. Os gases de efeito estufa incluem dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), clorofluorcarboneto (CFC), ozônio ( $\text{O}_3$ ) e água. Deve ser feita uma distinção entre gases naturais e antropogênicos (Weischet; Endlicher, 2008).

A água é decisiva no efeito estufa natural, mas desempenha apenas **um papel menor** no efeito estufa **antropogênico**. Em contraste com o  $\text{CO}_2$ , nossa atmosfera só pode absorver uma certa quantidade de vapor de água. Portanto, os seres humanos só podem influenciar o conteúdo de água da atmosfera de forma limitada, especialmente porque este efeito é menos duradouro do que o de outros gases de efeito estufa. Além disso, a quantidade de vapor de água na atmosfera é fortemente dependente da temperatura e das condições regionais. Portanto, não é possível calcular a eficácia globalmente.

Desde a Revolução Industrial, a atividade humana tem causado um aumento significativo dos gases de efeito estufa. As concentrações de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , CFC e  $\text{O}_3$  aumentaram em comparação com seus níveis pré-industriais (Weischet; Endlicher, 2008).

### 1.4 EFEITO ESTUFA

O efeito estufa é ilustrado graficamente na Figura 1. A fonte de energia mais importante para o efeito estufa (e/ou para o clima) é o Sol. Os raios solares penetram na atmosfera quase sem obstáculos, especialmente na faixa de onda curta (alta energia), faixa visível. Os raios são absorvidos ou refletidos apenas parcialmente; assim, uma certa porcentagem é interceptada antes de penetrar em nossa atmosfera. O ozônio estratosférico nas camadas mais altas da

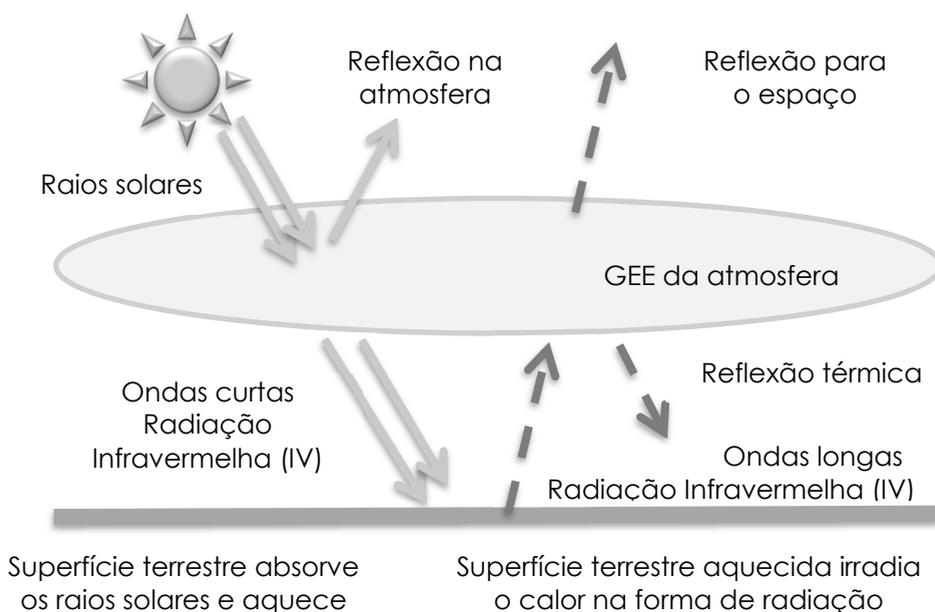


atmosfera absorve a faixa ultravioleta (UV) de 0,01 a 0,38  $\mu\text{m}$ , o que o torna um filtro UV forte. A reflexão pode ocorrer na atmosfera, nuvens e aerossóis (partículas sólidas ou líquidas em suspensão, como poeira ou névoa).

Quando os raios de onda curta não controlados e de alta energia atingem a superfície da Terra, eles são absorvidos e convertidos em energia térmica. A superfície terrestre então emite radiação térmica, ou seja, radiação infravermelha de onda longa, e encontra nitrogênio, oxigênio, ozônio, dióxido de carbono e vapor de água, assim como suspensões líquidas e sólidas (nuvens e aerossóis) na atmosfera. Embora a radiação de onda curta seja propagada, a radiação de onda longa é absorvida por substâncias e gases (por exemplo, vapor de água, ozônio, gases de efeito estufa) e emitida como radiação térmica contrária em todas as direções, inclusive em direção à superfície terrestre (UBA, 2013; Weischet; Endlicher, 2008).

Os gases de efeito estufa decorrente de causas naturais são responsáveis pelo efeito estufa (natural). Isto assegura que a temperatura média global da superfície terrestre seja aumentada de -18 °C para cerca de +15 °C. Sem este fenômeno, a vida na Terra não seria possível.

Figura 1 – O Efeito Estufa



Fonte: Adaptado pelos autores (2022) de "Klimawandelblogger" (2018).



O efeito estufa está se intensificando devido ao aumento dos gases vestigiais relevantes ao clima, também conhecidos como gases de efeito estufa (GEE), que resultam de atividades antropogênicas. Isto intensifica ainda mais a radiação térmica contrária, resultando no aumento das temperaturas (MPI, 2018).

## 1.5 POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (PAG)

Os GEE aquecem a Terra absorvendo energia e diminuindo a velocidade com que a energia escapa para o espaço; eles agem como um cobertor isolando a Terra. Diferentes GEE podem provocar efeitos diversos no aquecimento da Terra. Estes efeitos podem ser classificados de duas formas, sendo a capacidade de absorver energia (sua "eficiência radiante"), e quanto tempo eles permanecem na atmosfera (também conhecida como sua "vida útil").

O Potencial de Aquecimento Global (PAG = GWP – *Global Warming Potential*) foi desenvolvido para permitir comparações quanto aos impactos do aquecimento global a partir de diferentes gases.

Especificamente, é uma medida de quanta energia as emissões de 1 tonelada de um gás irão absorver durante um determinado período de tempo, em relação às emissões de 1 tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Quanto maior o PAG, mais um determinado gás aquece a Terra em comparação com o CO<sub>2</sub>. O período de tempo normalmente utilizado para o PAG é de cem anos. O PAG fornece uma unidade de medida comum, que permite aos analistas somar estimativas de emissões de diferentes gases (por exemplo, para compilar um inventário nacional de GEE), e permite aos formuladores de políticas comparar oportunidades de redução de emissões entre setores e gases (US-EPA, 2022).

- ♦ CO<sub>2</sub>, por definição, tem um PAG de 1, independentemente do período de tempo utilizado, pois é o gás que está sendo utilizado como referência. O CO<sub>2</sub> permanece no sistema climático por um tempo muito longo: as emissões de CO<sub>2</sub> provocam aumentos nas concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> que durarão milhares de anos.
- ♦ Estima-se que o metano (CH<sub>4</sub>) tenha um PAG de 27-30 ao longo de 100 anos. O CH<sub>4</sub> emitido hoje dura em média cerca de uma década, o que é muito menos tempo do que o CO<sub>2</sub>. Mas o CH<sub>4</sub> também absorve muito mais energia do que o CO<sub>2</sub>. O efeito líquido da vida útil mais curta e da maior absorção de energia se reflete no PAG. O PAG do CH<sub>4</sub> também é responsável por alguns efeitos



indiretos, como o fato de que o CH<sub>4</sub> é um precursor do ozônio, e o próprio ozônio é um GEE.

- ♦ O óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) tem um PAG 273 vezes o do CO<sub>2</sub> por um período de 100 anos. N<sub>2</sub>O emitido hoje permanece na atmosfera por mais de 100 anos, em média.

Tabela 1 – Potencial de aquecimento global de vários gases de efeito estufa de acordo com os Relatórios 5 e 6 do IPCC

Gás	PAG 100 anos (AR5)	PAG 100 anos (AR6)
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub>	28	28
N <sub>2</sub> O	298	273

Fonte: IPCC (2013); IPCC (2020).

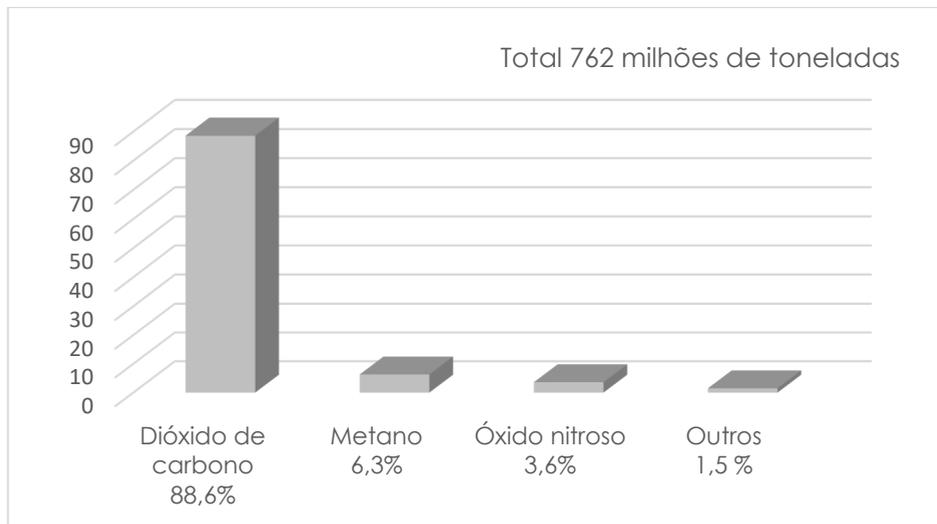
O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC = *Intergovernmental Panel on Climate Change*) é o órgão líder mundial na avaliação das mudanças climáticas, atualmente com 195 países como membros. Foi fundado em 1988 pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

O objetivo era apresentar cientificamente o estado do conhecimento sobre a mudança climática e seus impactos potenciais, assim como avaliar informações. Uma das tarefas centrais do IPCC é a preparação de relatórios de avaliação que representam o estado do conhecimento sobre a mudança climática. Desde sua criação, produziu cinco relatórios de avaliação (AR1-AR6).

A Figura 2 mostra a contribuição percentual para o efeito estufa feita pela concentração existente de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa na atmosfera. Com 88,6%, o CO<sub>2</sub> (seguido pelo metano a 6,3%) representa atualmente a maior proporção.



Figura 2 – Contribuição de vários gases de efeito estufa para o efeito estufa calculado em CO<sub>2</sub> – equivalente na Alemanha em 2021



Fonte: Adaptado pelos autores (2022) de UBA (2022).

## 2 BALANCEAMENTO ECOLÓGICO DE CRÉDITOS E DEDUÇÕES

### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Uma avaliação do ciclo de vida (ACV = LCA – *life cycle assessment*) é uma análise sistemática dos impactos ambientais de produtos ou serviços durante todo o seu ciclo de vida ("desde o berço até a cova"). Isto significa que todos os impactos ambientais durante a produção, a fase de uso e o descarte do produto, bem como os processos a montante e a jusante associados (por exemplo, produção de matérias-primas, consumíveis e suprimentos) são avaliados e "equilibrados". O termo "balanceamento" é usado na avaliação do ciclo de vida no sentido de uma justaposição, onde há sempre uma comparação entre dois produtos ou serviços com o mesmo benefício.

Uma avaliação do ciclo de vida pode contribuir para:

- Identificar formas de melhorar o desempenho ambiental de produtos em diferentes estágios de seu ciclo de vida;
- Informar aos tomadores de decisão na indústria, organizações governamentais ou não governamentais no planejamento estratégico, estabelecimento de prioridades, desenvolvimento de produtos ou processos ou redesenvolvimento relacionado;



- ♦ Selecionar indicadores relevantes das características ambientais, incluindo os métodos de medição associados;
- ♦ Comercialização, por exemplo, implementar um rótulo ecológico, fazer uma declaração ambiental ou preparar uma declaração ambiental para um produto.

## 2.2 ABORDAGEM

O procedimento para a avaliação do ciclo de vida é regido pelas normas DIN EN ISO 14040 (2018) e 14044 (2006).

De acordo com a DIN EN ISO 14040, um estudo de avaliação do ciclo de vida compreende quatro fases:

1. Definição de objetivos e escopo;
2. Análise do inventário do ciclo de vida;
3. Avaliação de impacto;
4. Interpretação.

Ao definir o escopo do estudo, é descrito o sistema a ser incluído na análise do inventário do ciclo de vida e são definidos os limites do sistema. Em outras palavras, ele determina o que é considerado na avaliação do ciclo de vida e o que não é. A unidade funcional também é definida. A unidade funcional é a referência relacionada a todos os fluxos de substância, bem como os impactos ambientais considerados. Se for necessário comparar dois produtos, uma unidade funcional que cumpra a mesma função deve ser selecionada em cada caso. Geralmente não é suficiente simplesmente comparar 1 kg de cada um dos materiais a serem investigados, pois diferentes quantidades de entrada dos materiais podem ser usadas durante a produção.

**Exemplo:** Ao tomar uma decisão entre o papelão e o plástico filme de polietileno de baixa densidade (PEBD) como material de embalagem, deve ser selecionada uma unidade funcional (UF) que atenda ao mesmo propósito em cada caso. Esta poderia ser, por exemplo, embalagem de 1.000 unidades de produto. A utilização do plástico filme de PEBD pode exigir muito menos material do que papelão.

A análise de inventário do ciclo de vida registra todos os fluxos de entrada e saída dentro dos limites definidos pelo sistema. Balanços completos de massa e energia são elaborados para as matérias-primas, consumíveis e suprimentos utilizados, bem como para os processos de extração e fabricação, processamento e transporte das matérias-primas. Na prática, muitos destes dados são desconhecidos; a melhor aproximação possível é, portanto, o objetivo. Após a modelagem dos



fluxos de energia e massa, todo material e energia extraída (entrada) junto com as emissões e resíduos (saída) liberados no meio ambiente devem ser registrados com o máximo de detalhes possíveis.

A avaliação de impacto resume as diferentes substâncias na análise do inventário do ciclo de vida (os resultados da análise do inventário do ciclo de vida) de acordo com seus impactos ambientais em diferentes categorias de impacto.

A interpretação é a fase final do procedimento da ACV, na qual os resultados de uma análise de inventário de ciclo de vida ou de uma avaliação de impacto, ou ambos, são discutidos e resumidos de acordo com o objetivo e o escopo do estudo como base para conclusões, recomendações e ferramentas de tomada de decisão.

### **2.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO**

Na avaliação de impacto, os resultados da análise do inventário do ciclo de vida são atribuídos a um impacto potencial. Por exemplo, os GEE – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O – são atribuídos à categoria de impacto "mudança climática" de acordo com seu efeito.

Várias categorias de impacto devem sempre ser consideradas para uma ACV, a fim de evitar mudanças nos impactos ambientais. Em uma comparação, o sistema A pode ter um desempenho muito melhor que o sistema B na categoria de impacto PAG. Na categoria de impacto toxicidade humana, entretanto, o sistema A seria significativamente pior do que o sistema B. Negligenciar a categoria de toxicidade humana (dependendo do assunto em questão) seria, portanto, impraticável.

### **2.4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA/CLIMA NA GESTÃO DE RESÍDUOS**

A avaliação do ciclo de vida no gerenciamento de resíduos começa com a entrada de resíduos no sistema. A "vida passada" dos resíduos é irrelevante. O "tratamento de uma tonelada de resíduos" é muitas vezes especificado como a UF. Dependendo do problema em questão, no entanto, outras UF também podem ser definidas a quantidade total de resíduos tratados, que deve ser a mesma em cada um dos cenários considerados. Os resíduos passam então por um caminho de tratamento (que pode diferir dependendo do tipo de resíduo e do sistema de resíduos).

As emissões do tratamento de resíduos ocorrem como emissões diretas do tratamento (por exemplo, durante a incineração) ou indiretamente das cadeias à montante de energia e matérias-primas (por



exemplo, para consumíveis durante a incineração ou fusão). As emissões são geradas durante a produção da eletricidade necessária para um processo de reciclagem. Essas emissões também devem ser avaliadas.

## 2.5 CRÉDITOS

O benefício definido da gestão de resíduos é a eliminação de objetos/materiais que se tornaram resíduos. Dependendo do método de tratamento de resíduos, um benefício adicional resulta além deste benefício principal (por exemplo, produtos secundários resultantes da reciclagem ou geração de eletricidade em plantas de incineração de resíduos). Para contabilizar adequadamente este benefício adicional, ele é atribuído como um "crédito" na avaliação do ciclo de vida.

**Exemplo:** O plástico recuperado dos resíduos é reciclado para produzir plástico reciclado, que pode então ser reutilizado em novos produtos. Isto significa que nenhum novo "plástico primário" precisa ser produzido. Estas economias ecológicas são assim creditadas aos resíduos plásticos ou à reciclagem do plástico.

Por outro lado, se os resíduos são tratados em uma planta de incineração de resíduos, as emissões resultantes da incineração são "deduzidas" da planta de incineração de resíduos devido ao seu impacto negativo. Se a planta de incineração de resíduos produz eletricidade e calor a partir da energia liberada durante a incineração, a quantidade de CO<sub>2</sub> que teria sido gerada se essa quantidade de energia tivesse sido gerada por uma usina elétrica é creditada à usina de incineração de resíduos como "CO<sub>2</sub> evitado".

A reciclagem resulta em produtos reciclados que podem ser reutilizados como novos produtos (por exemplo, o papel usado torna-se papel reciclado). Quando o resíduo é incinerado, pode-se obter energia que pode substituir a energia de outras fontes. Desta forma, a eletricidade das plantas de incineração de resíduos pode alimentar a rede elétrica. Se uma planta específica de produção de eletricidade for substituída no exemplo de avaliação, o crédito de eletricidade pode ser determinado exatamente para esta instalação. Na maioria dos casos, porém, a eletricidade proveniente da incineração de resíduos é encaminhada para alimentar a rede elétrica. Neste caso, não é possível identificar as parcelas exatas que compõem a rede de eletricidade que serão substituídas. É por isso que a composição média de eletricidade do país ou região é normalmente usada para calcular o crédito. O calor também pode ser encaminhado para a rede de aquecimento distrital, substituindo assim fontes de calor existentes. Entretanto, o calor também



pode ser transferido para uma fábrica vizinha, reduzindo assim o uso de carvão, óleo de aquecimento ou gás natural.

O resultado líquido decorrente do tratamento de resíduos é calculado a partir das emissões relacionadas ao tratamento, bem como quaisquer créditos adicionais, de acordo com a seguinte fórmula:

### ***Resultado líquido = Emissões - Créditos***

Em termos puramente matemáticos, valores negativos podem ocorrer como resultado do método de nota de crédito. Estes valores negativos de impacto ambiental devem ser entendidos como reduções do impacto ambiental em comparação com o sistema de referência.

No entanto, isto não significa que quanto mais resíduo for produzido, mais créditos e, portanto, melhor. A produção de resíduos é sempre precedida pela produção dos bens que se tornaram resíduos e, portanto, pelo consumo de recursos. A avaliação é utilizada para avaliar vários caminhos de tratamento de resíduos, cujos efeitos não podem ser considerados isoladamente do resto do sistema Terra como um todo. Isto significa que se a produção dos bens que se tornaram resíduos fosse considerada, um impacto negativo surgiria no total (produção + tratamento de resíduos). Neste caso, aplica-se o seguinte: Quanto mais mercadorias, mais resíduos, maior será o impacto negativo.

## **3 GASES DE EFEITO ESTUFA E GESTÃO DE RESÍDUOS – HISTÓRICO**

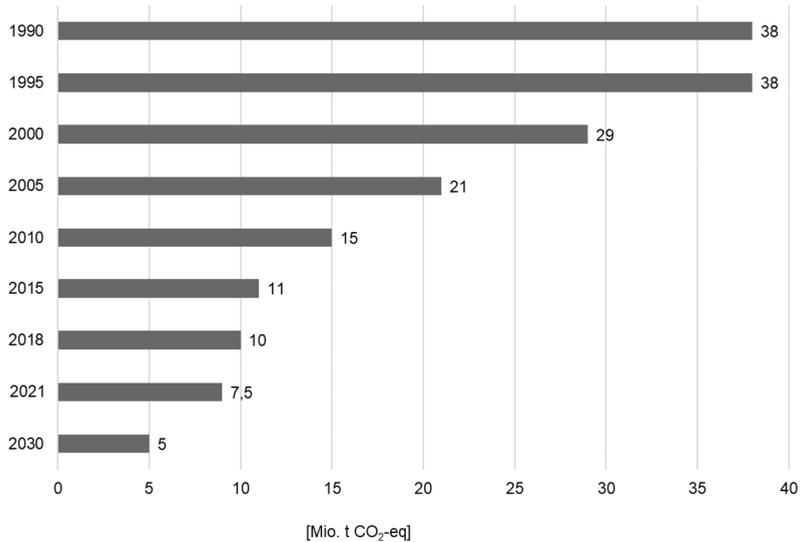
O gerenciamento de resíduos tornou-se um setor importante para a proteção do clima. Em 1990, na Alemanha, o setor contribuiu com cerca de 37 milhões de toneladas de equivalentes de CO<sub>2</sub>, o que correspondia a uma participação de cerca de 3,1% do total de emissões de GEE da Alemanha. Em 2021, as emissões decorrentes da gestão de resíduos foram reduzidas em 30 milhões de toneladas, assim atualmente contribuem apenas com 7,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq, representando 1,1% das emissões totais (UBA, 2022).

O motivo principal para este resultado caminho foi a redução significativa dos gases de aterro motivada pelo tratamento integral dos resíduos. Por um lado, desde 2005, apenas podem ser aterrados rejeitos, e por outro, foram estabelecidas medidas de reciclagem que já atingiram taxas de 59% em 2021 (UBA, 2022). Especificamente, a remoção de frações com alto potencial de formação de gás, como é particularmente



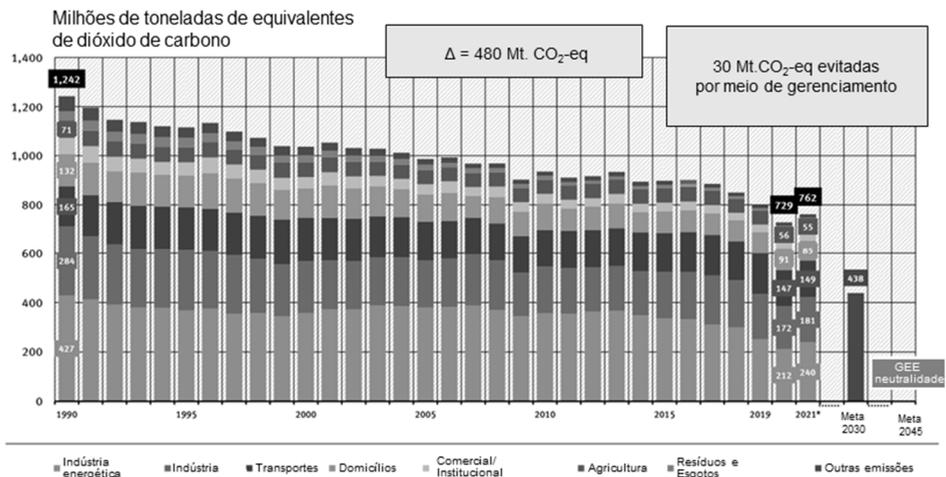
o caso dos resíduos orgânicos, tem contribuído significativamente para a redução das emissões de GEE dos aterros (ver Figura 3).

Figura 3 – Involução das emissões de GEE do setor de resíduos na Alemanha, 1990 – 2021 – sem créditos



Fonte: Adaptado pelos autores (2022) de UBA (2022).

Figura 4 – Desenvolvimento das emissões de GEE na Alemanha, com especial atenção à gestão de resíduos



Fonte: Adaptado pelos autores (2022) de UBA (2022).



Entretanto, a contribuição do setor de resíduos para a mitigação da mudança climática é muito maior do que a indicada pelo Relatório de Inventário Nacional (NIR – *National Inventory Report*), que, de acordo com as regras do IPCC para o setor de resíduos, considera principalmente as emissões de aterros sanitários. Os créditos de GEE da eletricidade e do calor gerado pelas plantas de incineração de resíduos, são contabilizados no setor energético e nos serviços de reciclagem com impacto climático no setor industrial. A contribuição do setor de gerenciamento de resíduos para a proteção do clima não é, portanto, claramente enfatizada e devidamente reconhecida.

De acordo com um estudo do Öko-Institut (2014), o setor de gestão de resíduos gerou créditos adicionais de emissão de gases de efeito estufa de quase 20 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq em 2011. Estes créditos de GEE são essencialmente baseados em economia de energia ou fornecimento de energia. A maior redução no nível de reciclagem é alcançada pela fração de papel e papelão, seguida pelas embalagens leves e frações metálicas. A recuperação de energia de resíduos de madeira e a incineração de resíduos também são altamente relevantes (ver Tabela 2).

Tabela 2 – Créditos GEE de medidas individuais de gerenciamento de resíduos a partir de 2011 e projetados para 2030 (otimizados)

Medidas de gestão de resíduos	2011	2030 otimizado
<b>Aterro Sanitário</b>	163	0
<b>Incineração de resíduos</b>	-1,691	-2
<b>Tratamento mecânico-biológico (TMB)</b>	-951	-5,473
<b>Reciclagem</b>		
- Resíduos orgânicos	-180*	Até -2,600*
- Resíduos verdes	-14	-183
- Papel e papelão	-6,120	-9,290
- Vidro	-1,232	-1,155
- Embalagens leves	-2,100	-5,301
- Metais	-1,781	-1,842
- Resíduos eletrônicos	-764	1,076
Madeira (Plantas de força com biomassa)	-5,060	-5,624
<b>Total</b>	<b>-19,731</b>	<b>-32,546</b>

\*novos dados próprios.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022) a partir de Öko-Institut (2014).



O aumento das taxas de reciclagem no período de 2011 a 2021 levou a um aumento nos créditos, de acordo com a própria estimativa de 5 milhões de toneladas adicionais de CO<sub>2</sub>-eq. A quantidade total de créditos em 2021 compreende 25 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq.

O potencial teórico total de mitigação da reciclagem é estimado, segundo cálculos próprios, entre 42 e 45 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq. Assim, o potencial total de mitigação das reduções e créditos de emissão de GEE no setor de gestão de resíduos foi, em média, de cerca de 81 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq. Isto corresponde a uma participação de 6,4% do total de emissões de GEE na Alemanha em 1990.

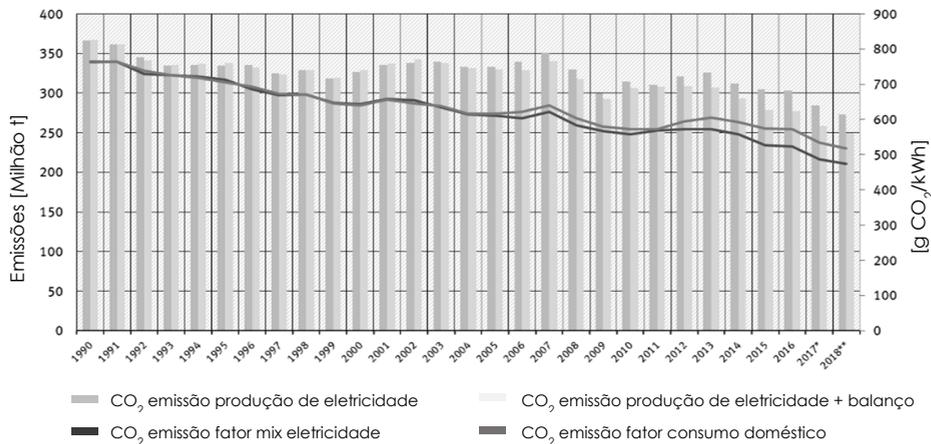
A base para o cálculo dos créditos para energia gerada ou economizada são os chamados fatores de emissão de CO<sub>2</sub> para o mix de eletricidade e calor da Alemanha. Quanto menores forem as emissões da eletricidade substituída (calor), menores serão os créditos para a eletricidade e o calor da planta de incineração de resíduos. Para um mundo descarbonizado, no qual a maior parte da eletricidade (calor) vem de energia renovável, isto significa que as plantas de incineração de resíduos receberão cada vez menos créditos pela eletricidade (calor).

O fator de emissão para a mistura de eletricidade alemã está diminuindo fortemente devido ao aumento da participação das energias renováveis (Figura 5). Segundo Statista (2022), ainda era de 764 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh em 1990, mas em 2021 tinha sido reduzido para 420 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh sem cadeias a montante ou emissões a montante. Como a participação das energias renováveis também aumentará no futuro, o aumento dos créditos através da otimização das medidas de gestão de resíduos em reciclagem e recuperação de energia presumivelmente não será mais possível ao mesmo ritmo dinâmico. Aumentos massivos serão então possíveis principalmente através de medidas para evitar e reutilizar – cujo desempenho será logicamente localizado fora do gerenciamento de resíduos.

$$\begin{aligned}
 & \textit{Emissions intensity Electr. (GER)} \left[ \frac{\textit{g CO}_2\text{-eq}}{\textit{kWh}} \right] \\
 & = \frac{\textit{m CO}_2 \textit{ emissions Electr. (GER)}}{\textit{Electr. consumption (GER)}} \#
 \end{aligned}$$



Figura 5 – Desenvolvimento do fator de emissão na Alemanha



Fonte: UBA (2019).

Até agora, apenas as emissões de combustão direta do consumo de eletricidade na Alemanha foram consideradas. Entretanto, os limites do sistema podem ser reduzidos a uma análise de ciclo de vida expandida, de modo que sejam consideradas, tanto as emissões diretas como as emissões indiretas fora dos processos de conversão nas chamadas cadeias a montante ou emissões a montante, por exemplo, na produção de instalações para conversão de energia ou na extração e fornecimento de fontes de energia primária e secundária. Incluindo as emissões a montante, o fator de emissão para a mistura de eletricidade alemã é de 485 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh em 2021 (Icha; Lauf; Kuhs, 2022).

O nível dos fatores de emissão determina o nível de créditos alcançáveis através de medidas de reciclagem. Eles diferem para cada país, dependendo do tipo de eletricidade e mistura de calor. O Brasil (energia hidrelétrica) e especialmente a França (energia nuclear) têm fatores de emissão comparativamente baixos. A quantidade de créditos alcançáveis no Brasil através de medidas de reciclagem é, portanto, correspondentemente menor do que na Alemanha devido aos fatores de emissão comparativamente mais baixos.



Tabela 3 – Fatores de emissão para eletricidade

<b>Eletricidade</b>	<b>Fatores de emissão (créditos) para 1 kWh</b>
Mistura de eletricidade alemã	0,42 kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh
Mistura de eletricidade francesa	0,06 kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh
Mistura de eletricidade brasileira	0,29 kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh
Eletricidade lignite	1,22 kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh

Fonte: Icha, Lauf e Kuhs (2022); UBA (2020).

Em 2021, as emissões anuais de GEE em todos os setores na Alemanha poderiam ser reduzidas em 480 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq em 1990 para 762 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq.

- ♦ Na Alemanha, 6,4% de todos os GEEs são gerados a partir do setor de gerenciamento de resíduos.
- ♦ O potencial total de mitigação das reduções e créditos de emissão de GEE no setor de gerenciamento de resíduos era, em média, de cerca de 81 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq.
- ♦ O desempenho de mitigação no setor de gerenciamento de resíduos foi de 30 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq/a em 2021, em comparação com o ano de referência de 1990, somente com consideração da redução das emissões dos processos de gerenciamento de resíduos. A redução dos gases dos aterros sanitários foi decisiva aqui.
- ♦ Além disso, 25 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq/a poderiam ser reduzidas através de medidas de reciclagem e da utilização energética dos resíduos na forma de créditos através dos chamados créditos.
- ♦ Em 2021 a redução total no setor de resíduos foi de 55 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq, ou 0,66 Mg CO<sub>2</sub> per capita.
- ♦ Na Alemanha, quase 11,5% de todas as realizações de redução de GEE nos últimos 31 anos foram alcançadas através de medidas de gerenciamento de resíduos.
- ♦ Desde 1990, as emissões nos setores de resíduos e serviços ambientais diminuíram em cerca de 68%.



## 4 EXEMPLOS DE CÁLCULO (SIMPLIFICADO)

### 4.1 RECICLAGEM DE RESÍDUOS SECOS

Energia e consumíveis são necessários para a reciclagem. As emissões se originam diretamente do próprio processo de reciclagem, mas sobretudo das cadeias a montante dos consumíveis ou da energia usada (Tabela 4).

Tabela 4 – Critérios-chave de reciclagem para energia e GEE

	Reciclagem de Emissões [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg] Entrada em reciclagem	Perdas com a reciclagem [%]	Matéria-prima substituída [-]	Créditos [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg] matéria-prima
PEAD	0,37	25	PEAD	2,03
PEBD	0,69	30	PEBD	2,18
PP	0,37	25	PP	2,06
PET	0,43	30	PET, amorfo	3,13
PS	0,32	15	PS	3,60
Papel	0,37	32	Fibra (pasta química/mecânica)	1,11
Vidro	0,02	10	Fragmentos de vidro	0,46
Metal	0,42	5	Aço, baixa liga	1,91
Alumínio	0,57	5	Alumínio, liga forjada	9,55

Legenda: **PEAD** – Polietileno de Alta Densidade;  
**PEBD** – Polietileno de Baixa Densidade;  
**PP** – Polipropileno;  
**PET** – Tereftalato de Polietileno;  
**PS** – Poliestireno.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

**Exemplo:** Considerando um simples processo de reciclagem de PET. A entrada é 1 kg de PET que se tornou resíduo. A reciclagem deste 1 kg de PET requer 0,7 kWh de eletricidade. Isto é obtido a partir da rede elétrica alemã. Quando o PET é processado, há uma perda de 5% do



insumo, de modo que 0,95 kg de PET reciclado é produzido a partir do 1 kg de resíduos de PET.

Não há emissões geradas durante o processo em si, mas as emissões geradas a partir da produção da eletricidade utilizada também devem ser calculadas no balanço. Um fator de emissão é usado para calcular estas emissões. Este pode ser extraído de bancos de dados para muitos processos e indica o volume de emissões geradas por unidade de um produto ou serviço.

O fator de emissão para eletricidade da rede elétrica alemã e para produzir PET primário foi retirado do banco de dados "ecoinvent". Eles equivalem a:

- ♦ 0,40 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh eletricidade,
- ♦ 3,13 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh PET.

Isto resulta nas seguintes emissões para reciclagem:

$$\text{Emissions from recycling} = \text{Electricity} * EF (\text{Elec.})$$

$$= 0.7 \text{ kWh} * 0.40 \text{ kg} \frac{\text{CO}_{2\text{-eq}}}{\text{kWh}} = 0.28 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}\#$$

Os créditos resultam do esforço de produção evitado para o PET primário:

$$\text{Credits for PET} = m (\text{Avoided PET}) * EF (\text{Prim. -PET})$$

$$= 0.95 \text{ kg} * 3.13 \text{ kg} \frac{\text{CO}_{2\text{-eq}}}{\text{kg PET}} = 2.97 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}\#$$

Em termos líquidos, a Fórmula 1 dá um resultado para a reciclagem de:

$$= 0.28 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}} - 2.97 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}} = -2.69 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}\#$$

O resultado é negativo. Isto significa que a reciclagem de 1 kg de PET economiza 0,95 kg de PET primário e, portanto, 2,69 kg de CO<sub>2</sub>-eq em comparação com a nova produção de PET.

## 4.2 RECICLAGEM DE RESÍDUOS ORGÂNICOS POR MEIO DA COMPOSTAGEM E FERMENTAÇÃO

### 4.2.1 Fundamentos – compostagem, fermentação e GEE

Devido à complexa cadeia de processos envolvidos na compostagem e digestão anaeróbia, devem ser levadas em consideração emissões e créditos extensivos (Tabela 5). Detalhes sobre



as emissões e créditos específicos são descritos na categoria "Biotecnologias". Neste capítulo, são apresentados apenas os dados necessários para o cálculo dos GEE.

Nem todas as etapas individuais do processo listadas na Tabela 3 devem ser consideradas para o balanceamento. O fator decisivo é se emissões/créditos adicionais estão envolvidos ou se eles substituem processos comparáveis como uma alternativa. Neste último caso, cálculos comparativos são necessários para o balanceamento.

$$\sum_{i=1}^n E_i = E_{Collection} + E_{Transport} + E_{Compost\ process} +$$

$E_{Composting\ energy\ consum.} + E_{Compost\ transport} + E_{Compost\ application}$

$$\sum_{k=1}^n E\ Credits_k = E\ Credits_{Energy\ Supply} + E\ Credits_{Nutrients} + E\ Credits_{Humus\ C}$$

Tabela 5 – Emissões de GEE e créditos quando da compostagem e fermentação

<b>Emissões de GEE</b>	<b>Créditos GEE</b>
Emissão de CH <sub>4</sub> formada nos containers de orgânicos, não há dados disponíveis	Fornecimento de energia
Transporte de resíduos orgânicos, não considerado por causa da coleta alternada	Fornecimento de nutrientes
Processo de tratamento biológico (CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O) e aplicação	Fornecimento de Húmus-C
Consumo de energia do processo de tratamento	Indireto: Mitigação das emissões de GEE de aterros sanitários através da medida de reciclagem de resíduos orgânicos e verdes
Transporte de produtos de compostagem, não considerado por comparação com fertilizantes orgânicos (NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O)	
Aplicação de composto (N <sub>2</sub> O)	

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

#### 4.2.2 GEE emissões

As tabelas 6 e 7 mostram o equilíbrio dos gastos energéticos. Deve-se notar aqui que a recuperação de calor do processo de degradação aeróbia não é considerada. Quaisquer despesas adicionais para coleta seletiva e aplicação de composto também não são consideradas.



Tabela 6 – Emissões através do consumo de energia  
– Compostagem extensiva e intensiva

	Consumo de energia [MJ/t]	Tipo de energia [MJ/t]	Espec. GEE emissões [kg CO <sub>2</sub> -eq/MJ]	GEE emissões [kg CO <sub>2</sub> -eq/t] resíduos orgânicos
Gastos energéticos – compostagem extensiva, grau de maturação IV	170	90% diesel	0,093	<b>16,81</b>
		10% eletricidade	0,152	
Gastos energéticos – compostagem intensiva, grau de maturação IV	300	30% diesel	0,093	<b>40,29</b>
		70% eletricidade	0,152	

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Tabela 7 – Emissões através do consumo de energia  
– fermentação e compostagem

Gastos e créditos	Consumo de energia [MJ/t]	Tipos de energia [MJ/t]	Espec. GEE emissões [kg CO <sub>2</sub> -eq/MJ]	Emissões de GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/t] resíduos orgânicos
Gastos energéticos – fermentação e compostagem intensiva, grau de maturação IV	300	20% diesel	0,093	42,60
		80% eletricidade	0,152	
<b>Soma</b>				<b>42,60</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



O resultado mostra que há grandes diferenças no gasto de energia entre os processos de compostagem extensiva e intensiva. As plantas de fermentação estão no mesmo nível de energia que os processos intensivos de compostagem. O tipo de energia utilizada também difere significativamente. A energia química, como o diesel, domina em processos extensivos utilizando equipamentos móveis, como pá-carregadeiras, trituradores, revolvedores de leiras e peneiras. O fator de emissão específico é cerca de 40% menor para a energia química utilizada do que para a eletricidade.

As emissões relevantes de GEE das plantas de compostagem e fermentação e as emissões através da aplicação de composto são mostradas na Tabela 8 e na Tabela 9. Os valores foram definidos com base nos dados da UBA (2015).

Tabela 8 – Emissões do processo de compostagem e fermentação

<b>Metano</b>	<b>Unidades</b>	<b>Compostagem</b>	<b>Fermentação</b>
Carga espec.	[kg CH <sub>4</sub> /t resíduos orgânicos]	1,4	2,8
PAG	[-]	25	25
CO <sub>2</sub> -eq	[kg CO <sub>2</sub> -eq/t resíduos orgânicos]	35	70

<b>Óxido nítrico</b>	<b>Unidades</b>	<b>Compostagem</b>	<b>Fermentação</b>
Carga espec.	[kg N <sub>2</sub> O/t de resíduos biológicos]	0,05	0,05
PAG	[-]	298	298
CO <sub>2</sub> -eq	[kg CO <sub>2</sub> -eq/t resíduos orgânicos]	14,9	14,9
<b>Soma</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/t resíduos orgânicos</b>	<b>49,9</b>	<b>84,9</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 9 – Emissões por aplicação de composto (não consideradas no balanço geral)

Metano	Unidades	Composto	Resíduos orgânicos *
Carga espec.	[g CH <sub>4</sub> /t]	<< 1	
PAG	[-]	25	
CO <sub>2</sub> -eq	[kg CO <sub>2</sub> -eq/t]	<< 1	<< 1
Óxido nitroso mais 10% de 76,2 g de NH <sub>3</sub>	Unidades	Composto	Resíduos orgânicos *
Carga espec.	[g N <sub>2</sub> O/t]	39,3 + 7,6	
PAG	[-]	298	
CO <sub>2</sub> -eq	[kg CO <sub>2</sub> -eq/t]	14	
<b>Soma</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq/t]</b>		<b>5,39</b>

\*GEE créditos.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

### 4.2.3 GEE Créditos

#### 4.2.3.1 Emprego de biogás utilização e recuperação energética de rejeitos do processamento de resíduos orgânicos

Em 71% das plantas de compostagem de resíduos há uma presença baixa de rejeitos, entre 5 e 15% do total descarregado, oriundos do tratamento mecânico e do refinamento; 19% das plantas geram rejeitos do peneiramento na ordem de 15 a 20% e 11% das plantas registram uma quantidade de mais de 20%. O descarte das frações sobressalentes do peneiramento representa um fator de custo relevante, fazendo com que seja uma prática comum à sua reintrodução no sistema na forma de material estruturante após a segregação de impurezas.

Outro método é a utilização energética em plantas de biomassa e plantas de incineração de resíduos. Para o cálculo do crédito é aplicada uma quantidade de 8% (80 kg/t de resíduos



biológicos) para a recuperação energética (Tabela 10). A nota de crédito totaliza 15,15 kg de CO<sub>2</sub>-eq/t de resíduos orgânicos.

Tabela 10 – Créditos através de recuperação energética de resíduos do processamento de resíduos orgânicos

	Resíduos em massa [kg/t resíduos orgânicos]	PCI* [MJ/kg]	Energia/resíduos orgânicos [MJ/t]	Relação de eficiência $\varepsilon$ [%]
Créditos calor	80	10,2	816	33,5 <sup>(1)</sup>
Créditos eletricidade	80	10,2	816	11,3 <sup>(1)</sup>
<b>Soma</b>				

	Produção de energia [MJ/t]	Espec. Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/MJ]	Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/t resíduos orgânicos]
Créditos calor	273	0,0645	17,65
Créditos eletricidade	92	0,152	14,00
<b>Soma</b>			<b>31,65</b>

\* Poder calorífico inferior.

<sup>(1)</sup> Flamme *et al.* (2018).

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

#### 4.2.3.2 Créditos através do emprego de biogás

A quantidade de biogás produzida (m<sup>3</sup> biogás por kg de resíduos) e seu conteúdo de metano (m<sup>3</sup> de metano por m<sup>3</sup> de biogás) dependem da composição dos resíduos e do gerenciamento da planta.

Na Alemanha, o biogás é utilizado principalmente em motogeradores. Uma eficiência elétrica média ( $\varepsilon_{el}$ ) de 38% (abordagem conservadora) e uma eficiência térmica ( $\varepsilon_{th}$ ) de 46% são empregadas nos cálculos. Com estas eficiências, as quantidades de eletricidade e calor listadas na Tabela 10 são produzidas em plantas



alemãs de fermentação para o processamento de resíduos orgânicos (Fricke *et al.*, 2014).

$$\text{Quantity CH}_4 = m (\text{Waste}) * \frac{m^3 \text{ Biogas}}{kg \text{ Waste}} * \frac{m^3 \text{ CH}_4}{m^3 \text{ Biogas}} \#$$

O crédito para eletricidade e calor na unidade motogerador é calculado de forma semelhante ao das plantas de incineração de resíduos:

$$\text{Credit for electricity} = \text{Quantity CH}_4 * \text{LCV CH}_4 * \varepsilon_{el} * \text{EF (Electricity)} \#$$

$$\text{Credit for heat} = \text{Quantity CH}_4 * \text{LCV CH}_4 * \varepsilon_{th} * \text{EF (Heat)} \#$$

Onde:

$\text{LCV (CH}_4\text{)}$  Menor valor calorífico do metano [MJ/kg ou kWh/kg]

$\varepsilon_{el}$  Eficiência elétrica [-]

$\varepsilon_{th}$  Eficiência térmica [-]

$\text{EF}$  Fator de emissão [kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh] ou [kg CO<sub>2</sub>-eq /MJ]

O crédito para a utilização do biogás é de 204,13 kg CO<sub>2</sub>-eq/t resíduos orgânicos (Tabela 10).

Tabela 11 – Créditos através do fornecimento de energia do processo de fermentação – biogás

Fornecimento de energia	Produção de energia [kWh/t resíduos orgânicos]	Espec. Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/MJ]	Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/t resíduos orgânicos]
Produção de energia elétrica	235 (848)*	0,15182	128,4
Produção de calor	323 (1,156)*	0,06456	74,61
<b>Soma</b>			<b>203.05</b>

\* em [MJ/t de resíduos orgânicos] com kWh = 3,6 MJ.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

#### 4.2.3.3. Aplicação do composto

O fornecimento de nutrientes e ingredientes que melhoram o solo, utilizando composto, resulta em economia de energia e créditos



de GEE, que são levados em conta nos balanços energético e de GEE. Para calcular os créditos de energia e GEE usando nutrientes e ingredientes que melhoram o solo, o efeito de economia por massa de ingredientes relevantes deve ser determinado primeiro.

O primeiro passo é determinar os componentes fertilizantes no composto ou no digestato. Estes são determinados por análises definidas como parte do monitoramento ou garantia da qualidade pela Bundesgütegemeinschaft e.V. (Associação Federal de Qualidade). Os nutrientes individuais estão presentes em diferentes compostos. São utilizados como unidades de quantificação para compostos e produtos de compostagem para os componentes fertilizantes:

- ♦ Nitrogênio ( $N_{\text{tot}}$ )
- ♦ Fósforo (P), Pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ )
- ♦ Potássio (K), Óxido de potássio ( $K_2O$ )
- ♦ Cálcio (Ca), Óxido de cálcio
- ♦ Magnésio (Mg), Óxido de magnésio ( $MgO$ ).

Na próxima etapa, os fluxos e processos apropriados para a produção dos respectivos fertilizantes devem ser identificados nos bancos de dados de avaliação do ciclo de vida, tais como o banco de dados de avaliação do ciclo de vida "ecoinvent" (Ecoinvent, 2017).

Também deve ser verificado se o processo selecionado reproduz realmente os componentes fertilizantes 1:1 ou se o composto produzido é apenas um composto precursor ou um composto químico, que deve ser convertido no composto medido. No caso do óxido de cálcio ( $CaO$ ), não há processos de fabricação equivalentes nos quais este composto é produzido. Os ingredientes contendo cal em produtos compostos são determinados e indicados como óxido de cálcio, embora a fertilização com cal utilizada na agricultura seja na forma de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ). Para fornecer 1 kg de óxido de cálcio, são necessários 2,1 kg de calcário; isto deve ser considerado no cálculo.

Várias abordagens estão sendo seguidas para o efeito de condicionador de solo da matéria orgânica ou carbono contido no composto e seu efeito em possíveis créditos energéticos. Dados confiáveis estão disponíveis para o Húmus-carbono (Húmus-C).

Em comparação com a substância orgânica do composto, o carbono húmico tem uma estabilidade significativamente maior e, portanto, um melhor efeito a longo prazo. De acordo com Bulach (2016), um fator de 0,3 deve ser aplicado para converter a substância orgânica em Húmus-C.



A Tabela 12 mostra as várias abordagens de crédito, os fluxos de ecoinvent, os processos utilizados e as unidades de fluxo de processo necessárias em cada caso, tais como áreas utilizadas para processos de processamento agrícola, massas, energias ou GEE dos produtos/serviços a serem creditados para o cálculo do crédito. Para a utilização de palhadas, apenas o crédito da eletricidade e do calor gerados pela incineração de palhadas é mostrado.

Tabela 12 – Créditos através do fornecimento de fertilizantes – nutrientes

Nutrientes	Composto finalizado [% DM]	Composto finalizado [kg/t DM]	Composto finalizado <sup>(1)</sup> [kg/t FM]
Nitrogênio (N <sub>ges.</sub> )	1,49	14,9	9,69
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,75	7,5	4,88
Potássio (K <sub>2</sub> O)	1,27	12,7	8,26
Magnésio (MgO)	0,71	7,1	4,62
Cálcio (CaO)	4,86	48,6	31,59
<b>Soma</b>			

Nutrientes	Resíduos orgânicos <sup>(2)</sup> [kg/t FM]	Espec. Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg de nutriente]	Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/t resíduos orgânicos]
Nitrogênio (N <sub>ges.</sub> )	3,88	8,85	32,07
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1,95	2,30	4,19
Potássio (K <sub>2</sub> O)	3,30	2,26	7,00
Magnésio (MgO)	1,85	1,20	2,07
Cálcio (CaO)	12,64	0,028	0,33
<b>Soma</b>			<b>45,66</b>

(1) Fator de conversão do teor de nutrientes em matéria seca (DM = dry matter) para matéria fresca (FM = fresh matter) = 0,65.

(2) Fator de conversão do teor de nutrientes no composto em relação ao material de palhada para compostagem = 0,4.

(3) Códigos de acordo com Bulach (2017): cultura intermediária 15%; sob semeadura 5%; substituto da turfa 30%; utilização de palhada 50%.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Os créditos de GEE do fornecimento de nutrientes totalizam 45,66 CO<sub>2</sub>-eq/t de entrada de resíduos orgânicos na planta de compostagem (Tabela 12). Os créditos de GEE do fornecimento de ingredientes que melhoram o solo (Húmus-C) transportam 156,23 CO<sub>2</sub>-eq/t de entrada de resíduos orgânicos na planta de compostagem (Tabela 13).

O altíssimo crédito através da substituição da palhada por adubo e a possível utilização energética da palhada é basicamente possível e razoável, mas mal é praticada.

Tabela 13 – Créditos através do fornecimento de fertilizantes – Húmus-C

Húmus-C	Resíduos orgânicos <sup>(2)</sup> [kg/t FM]	Espec. Créditos GEE [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg Húmus-C]	Créditos GEE <sup>(3)</sup> [kg CO <sub>2</sub> -eq/t resíduos orgânicos]
Cultivo entre culturas	37,44	1,60	8,39
Sob serragem	37,44	0,35	0,66
Substituto da turfa	37,44	3,74	42
Utilização da palhada	37,44	5,59	104,6
<b>Soma</b>			<b>156.23</b>

- (1) Fator de conversão do teor de nutrientes em matéria seca (DM = *dry matter*) para matéria fresca (FM = *fresh matter*) = 0,65.
- (2) Fatores de conversão do teor de nutrientes no composto em relação ao material de palhada para compostagem = 0,4.
- (3) Códigos de crédito de acordo com Bulach (2017): Cultura intermediária 15%; sob semeadura 5%; substituto da turfa 30%; utilização da palhada 50%.
- (4) kg de matéria orgânica corresponde a 0,3 kg de Húmus-C de acordo com Bulach (2017).

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

#### 4.2.4 GEE equilíbrio da compostagem e fermentação

As Tabelas 14 a 16 mostram os balanços de GEE, diferenciados de acordo com a compostagem extensiva e intensiva, bem como a fermentação com a compostagem a jusante. A Figura 8 ilustra o resultado geral graficamente. Como esperado, a maior redução de



GEE é obtida através de uma combinação de fermentação e compostagem.

Tabela 14 – Balanço da compostagem – extensiva

<b>Emissões</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq t resíduos orgânicos]</b>	<b>Créditos</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq t resíduos orgânicos]</b>
Consumo de energia pelo processo de tratamento	16,81	Utilização energética de rejeitos do peneiramento	-31,65
Emissões do tratamento biológico (CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)	55,29	Fornecimento de nutrientes	-45,66
		Fornecimento de Húmus-C	-156,24
<b>Balanço</b>			<b>-161,44</b>

O transporte e a aplicação de adubo não são considerados.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Tabela 15 – Balanço da compostagem – intensiva

<b>Emissões</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq t resíduos orgânicos]</b>	<b>Créditos</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq t resíduos orgânicos]</b>
Consumo de energia pelo processo de tratamento	40,29	Utilização energética de rejeitos do peneiramento	-31,65
Emissões do tratamento biológico (CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)	55,29*	Fornecimento de nutrientes	-45,66
		Fornecimento de Húmus-C	-156,24
<b>Balanço</b>			<b>- 137,96</b>

\* O transporte e a aplicação de adubo não são considerados.

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Tabela 16 – Balanço da fermentação com posterior compostagem

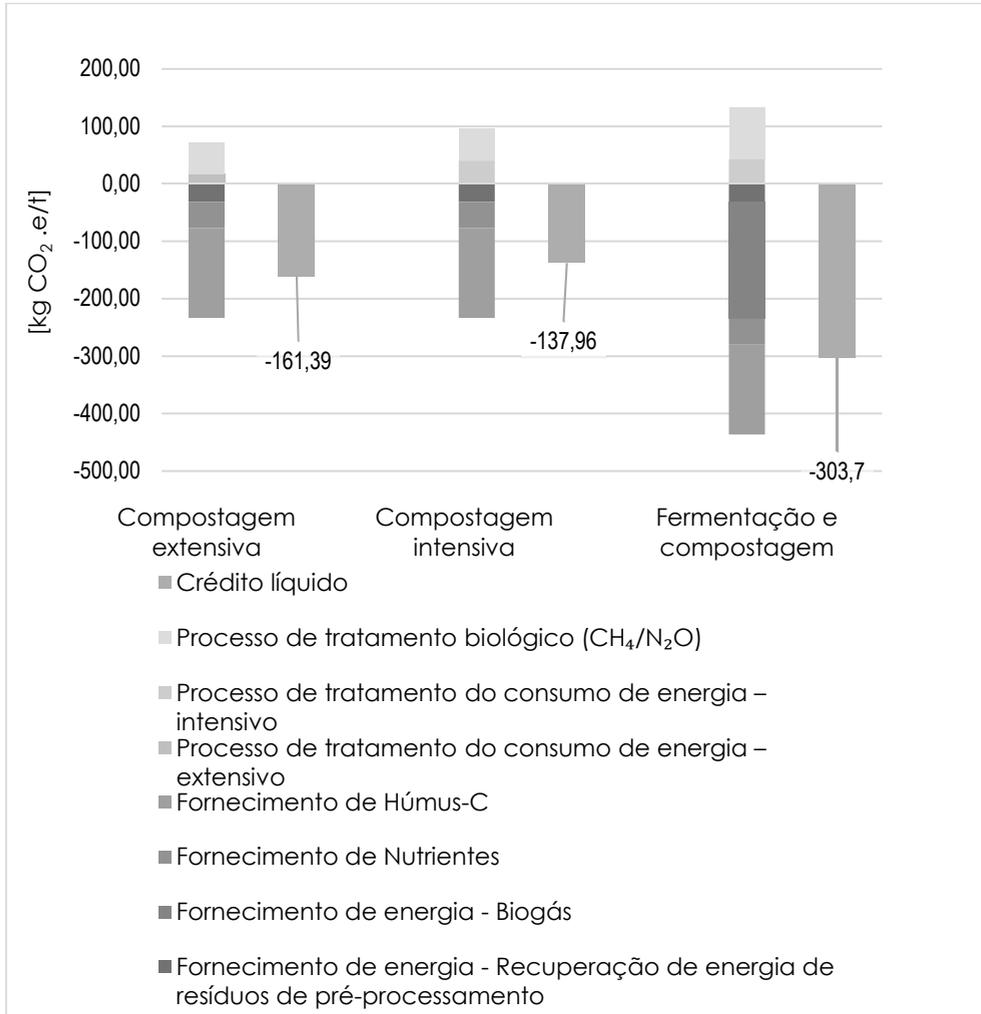
<b>Emissões</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq t resíduos orgânicos]</b>	<b>Créditos</b>	<b>[kg CO<sub>2</sub>-eq t resíduos orgânicos]</b>
Consumo de energia pelo processo de tratamento – intensivo	42,6	Utilização energética de resíduos de tela  Biogás	-31,65  -203,05
Emissões do tratamento biológico (CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O)	90,29	Fornecimento de nutrientes	-45,66
		Fornecimento de Húmus-C	-156,23
<b>Balanço</b>			<b>- 303,07</b>

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A Figura 6 mostra os balanços globais de GEE, diferenciados de acordo com a compostagem extensiva e intensiva e a fermentação com posterior compostagem. Como esperado, o maior desempenho de mitigação de GEE é alcançado pelo processo de combinação de fermentação e compostagem.



Figura 6 – Balanço de GEE compostagem e fermentação de resíduos orgânicos

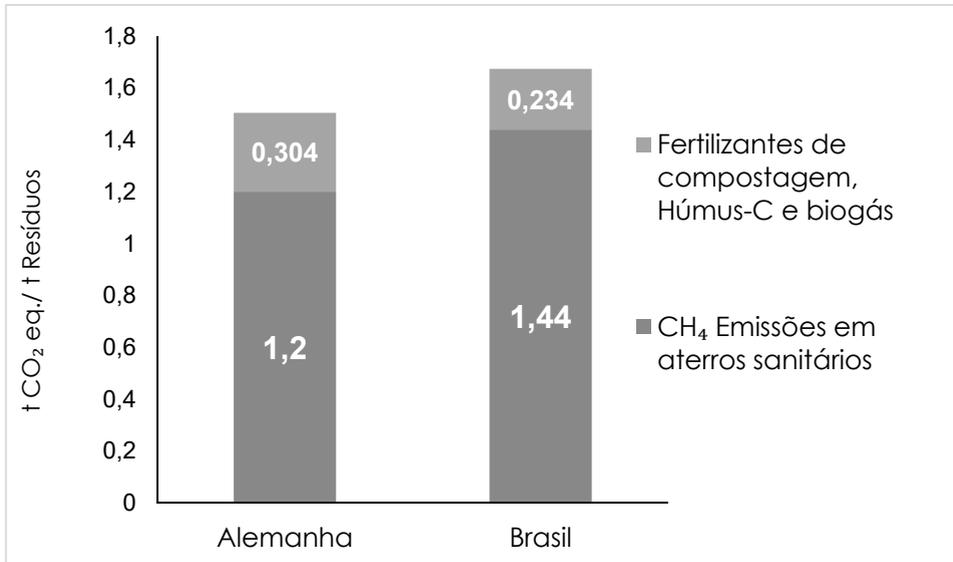


Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

A Figura 7 também inclui a não-geração de GEE em aterros sanitários quando da redução da presença de frações orgânicas. Entretanto, esta abordagem de equilíbrio só é aplicável quando não foi realizada nenhuma forma de tratamento anterior ao aterramento, como o TMB ou processos térmicos. Devido à maior presença de resíduos orgânicos no Brasil, os créditos para reciclagem, assim como os créditos para aterro são maiores.



Figura 7 – Redução de GEE por compostagem e fermentação, considerando também a redução das emissões de GEE provenientes de aterros sanitários – Alemanha e Brasil



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

As taxas de mitigação específicas "aterro sanitário" são mais altas no Brasil do que na Alemanha, devido ao maior conteúdo orgânico presente nos resíduos domiciliares brasileiros. Os resíduos orgânicos originados pelas atividades de "cozinha" detêm elevado potencial de geração de biogás, dessa forma, atividades de tratamento que antedecem o aterramento eleva o potencial de mitigação de GEE. Por outro lado, os menores fatores de emissão causam menores benefícios de mitigação através do fornecimento de biogás, fertilizantes e condicionadores de solo.

#### 4.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS EM PLANTAS INCINERADORAS

O resultado geral da incineração de resíduos depende de:

- ♦ Emissões diretas durante a incineração dos resíduos;
- ♦ Emissões indiretas das cadeias a montante de consumíveis e suprimentos;
- ♦ Créditos concedidos para a produção de eletricidade e calor.

As emissões diretas dependem do teor de carbono fóssil dos resíduos e são calculadas usando a seguinte fórmula:



$$\text{Direct CO}_2\text{Emissions} = m(\text{Waste}) * C_{fos} * \frac{44}{12} \#$$

Onde:

$m(\text{Waste})$	Massa dos resíduos incinerados	[kg]
$C_{fos}$	Teor de carbono fóssil dos resíduos	[kg C <sub>fos</sub> /kg]
$\frac{44}{12}$	Razão de massa de dióxido de carbono para carbono	[kg CO <sub>2</sub> /kg]

Os consumíveis e suprimentos nas plantas de incineração de resíduos incluem carvão ativado, amônia, NaOH ou gás natural para queima auxiliar/co-incineração. Os fatores de emissão podem ser extraídos de bancos de dados de avaliação do ciclo de vida ([www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)) para calcular as emissões diretas de suas cadeias a montante.

A incineração dos resíduos libera energia que é convertida em eletricidade e calor (ou apenas uma das duas), decorrendo créditos que são considerados durante a avaliação. A quantidade creditada depende do valor:

- ♦ A eficiência da planta de incineração de resíduos (isso pode variar dependendo da tecnologia aplicada e da idade da instalação);
- ♦ O poder calorífico inferior (PCI = LCV = *lower calorific value*) dos resíduos.

#### 4.3.1 Fator de emissão da substituição de eletricidade e calor

Os créditos para eletricidade e calor são calculados de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Credit for electricity} = m(\text{Waste}) * LCV(\text{Waste}) * \varepsilon_{el} * EF(\text{Electricity})\#$$

$$\text{Credit for heat} = m(\text{Waste}) * LCV(\text{Waste}) * \varepsilon_{th} * EF(\text{Heat})\#$$

Onde:

$LCV(\text{Waste})$	Poder calorífico inferior dos resíduos	[MJ/kg ou kWh/kg]
$\varepsilon_{el}$	Eficiência elétrica	[-]
$\varepsilon_{th}$	Eficiência térmica	[-]
$EF$	Fator de emissão	[kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh ou por MJ]



A planta de incineração de resíduos recebe créditos para eletricidade e calor, já que estes não precisam ser gerados externamente. Na maioria dos casos, a eletricidade da rede é creditada para eletricidade e o aquecimento distrital para aquecimento. Entretanto, outros sistemas (por exemplo: eletricidade de lignite pura etc.) também podem ser contabilizados como créditos. Isto depende do sistema em consideração e do problema em questão. Os respectivos fatores de emissão para os sistemas de referência de eletricidade e calor podem ser extraídos de bancos de dados de avaliação do ciclo de vida.

Em particular, deve-se ter em mente que a quantidade a ser creditada (além da eficiência da planta de incineração de resíduos e do poder calorífico inferior dos resíduos) depende do respectivo sistema de referência. Isto significa que o crédito muda significativamente dependendo da quantidade de emissões que teria sido gerada para a eletricidade (ou calor) substituída.

**Exemplo de cálculo:** 10 toneladas de resíduos são processadas em uma planta de incineração de resíduos. Os parâmetros dos resíduos são:

- ♦ Poder calorífico inferior: 9 MJ/kg;
- ♦ Conteúdo fóssil C: 0,09 kg C<sub>foss</sub> /kg de resíduos.

A planta de incineração de resíduos produz eletricidade com eficiência de 0,1 e calor com eficiência de 0,3 a partir da energia recuperada. A eletricidade da rede elétrica alemã (EF = 0,4 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh) e a mistura de aquecimento urbano (EF = 0,27 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh) será substituída.

$$Emissions = 10,000 \text{ kg} * 0.09 \frac{\text{kg } C_{foss}}{\text{kg}} * \frac{44}{12} = 3300 \text{ kg } CO_2\#$$

$$\begin{aligned} Credit \text{ for electricity} &= 10,000 \text{ kg} * 9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ kWh}}{3.6 \text{ MJ}} * 0.1 * 0.4 \frac{\text{kg } CO_2 - eq}{\text{kWh}} \\ &= 1,000 \text{ kg } CO_2 - eq \# \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Credit \text{ for heat} &= 10,000 \text{ kg} * 9 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ kWh}}{3.6 \text{ MJ}} * 0.3 * 0.27 \frac{\text{kg } CO_2 - eq}{\text{kWh}} \\ &= 2,025 \text{ kg } CO_2 - eq \end{aligned}$$

$$Net \text{ result} = Emissions - Credits = 3,300 - 1,000 - 2,025 = -275 \text{ kg } CO_2 - eq\#$$



Isto significa que ao utilizar eletricidade e calor de 10 toneladas de resíduos, - 275 kg de CO<sub>2</sub>-eq é emitido neste exemplo, valor inferior a produção típica para gerar a mesma quantidade de eletricidade e calor.

### **4.3.2 Outras emissões além de CO<sub>2</sub>**

Para outras emissões relevantes (por exemplo: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, HF, HCl, PM<sub>10</sub>, N<sub>2</sub>O), as concentrações no gás de combustão são parametrizadas, pois não há uma correlação simples com a composição dos resíduos devido às diferentes tecnologias utilizadas no pós-tratamento do gás de combustão. Quantos gramas das substâncias são emitidos por metro cúbico de gás de combustão podem ser encontradas na literatura relevante. Durante a combustão, também são emitidos íons de metais pesados, como mercúrio ou cádmio. Entretanto, estes raramente são considerados na avaliação do ciclo de vida. A questão específica em questão também desempenha um papel aqui.

## **4.4 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA EM FÁBRICAS DE CIMENTO**

### **4.4.1 Fundamentos – fabricação de cimento e GEE**

Um componente essencial do concreto, argamassa ou betonilha é o cimento aglutinante. O processo de queima resulta em clínquer, um produto intermediário que é moído junto com os chamados agregados para formar aglutinantes conformes ao padrão, os cimentos. O cimento é um dos materiais de construção mais utilizados em todo o mundo.

Na Alemanha, aproximadamente 33,7 milhões de toneladas de cimento foram produzidas em 53 locais em 2018 (VDZ, 2019). Em 2018, 4,1 bilhões de toneladas de cimento foram produzidas em todo o mundo (Statista, 2019). Nos últimos trinta anos, a produção mundial anual de cimento subiu de 1 bilhão de toneladas para mais de 4 bilhões de toneladas. A produção mundial de cimento atingiu seu nível mais alto até hoje em 2014, em torno de 4,4 bilhões de toneladas. Durante três anos, o volume de produção estagnou a um nível de 4,1 a 4,2 bilhões de toneladas por ano (Tabela 17).

As emissões de CO<sub>2</sub> liberadas na Alemanha em 2018 foram de cerca de 19 milhões de toneladas, o que corresponde a uma parte das emissões de CO<sub>2</sub> liberadas em toda a Alemanha de cerca de 2%. Desde 2005, as emissões específicas de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento produzido foram reduzidas de 0,65 para 0,57 toneladas por meio de



várias medidas de otimização, reduzindo assim as emissões de CO<sub>2</sub> na produção de cimento em cerca de 12%. As emissões específicas de CO<sub>2</sub> dos cimentos produzidos em todo o mundo estão entre 0,57 e 0,95 t CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento. Com base em várias estimativas, um valor médio de 0,68 t CO<sub>2</sub> pode ser assumido. Isto resulta em um volume total de emissões de CO<sub>2</sub> liberado mundialmente pela produção de cimento de 2,8 bilhões de toneladas em 2018 (Tabela 17). As emissões de CO<sub>2</sub> podem ser alocadas essencialmente a três áreas de processo:

- Emissões de CO<sub>2</sub> durante a descarbonização ou desacidificação durante a queima do clínquer do produto intermediário;
- Uso de energia elétrica para serviços mecânicos (trituração de matéria-prima, resfriamento e moagem de cimento);
- Transporte de matérias-primas e entrega aos clientes.

Aproximadamente 49% das emissões de CO<sub>2</sub> são causadas pelo processo de descarbonização ou queima, aproximadamente 51% são derivadas pela entrada de energia (subdivididas em 35% de combustível, 12% de eletricidade e 4% de transporte).

Com os custos energéticos representando mais de 50% do valor agregado bruto – dos quais aproximadamente 40 a 50% são custos de eletricidade e 50 a 60% são custos de combustível – a produção de cimento é um dos processos que consome mais energia.

Tabela 17 – Principais números sobre a produção de cimento e emissões de CO<sub>2</sub> na Alemanha e no mundo

	<b>Alemanha</b>	<b>Mundo</b>
Produção anual de cimento	33,7 milhões t <sup>(1)</sup>	4,100 milhões de t <sup>(2)</sup>
Emissão anual CO <sub>2</sub>	19,2 milhões t	2,800 milhões t CO <sub>2</sub> /ano
CO <sub>2</sub> – produção por tonelada de cimento	0,57 t	0,57 – 0,95 t
Participação da produção de cimento na emissão global anual de GEE	2,2%	aproximadamente 5 – 8%

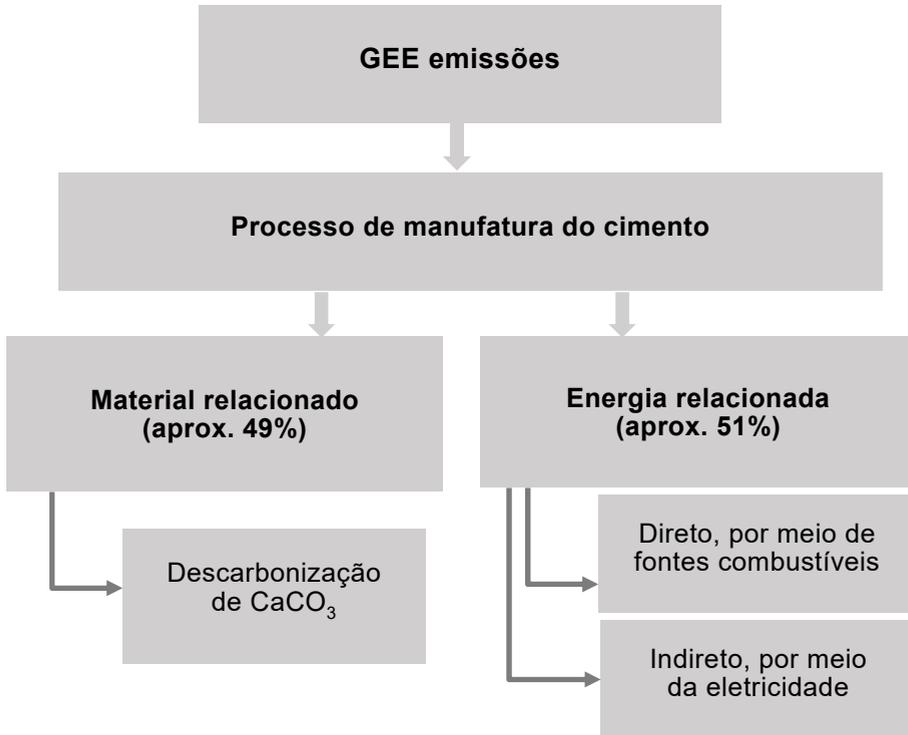
<sup>(1)</sup> em 2018 (VDZ, 2019)

<sup>(2)</sup> em 2018 (Statista, 2019)

Fonte: Elaborada pelos autores (2022).



Figura 8 – Processo de atribuição das emissões de GEE geradas na produção de cimento



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

#### 4.4.2 Potencial de mitigação durante a produção de cimento

##### 4.4.2.1 Segmento de processo "energia"

- ♦ **Redução do consumo de combustível:** A demanda de combustível pode ser reduzida através da redução da razão clínquer/cimento, utilizando agregados adequados no clínquer;
- ♦ **Redução da demanda de energia:** Nas usinas modernas é possível gerar eletricidade utilizando o calor desperdiçado, a chamada recuperação de calor residual;
- ♦ **Melhoria do fator de substituição de energia:** Devido ao uso de combustíveis substitutos úmidos, aproximadamente 20% mais combustíveis devem ser adicionados ao processo hoje, o que leva ao aumento do consumo de energia dos sopradores de gás de escape (tecnologia de tratamento orientada à demanda necessária).



#### 4.4.2.2 **Utilização de combustíveis secundários derivados de resíduos ricos em biomassa**

Até 2018, o grau de substituição térmica por combustíveis alternativos na Alemanha foi aumentado para uma média de 68%. Os combustíveis fósseis, sobretudo lignite e carvão, estão sendo cada vez mais substituídos por combustíveis alternativos (baseados em resíduos) (VDZ, 2019). Entretanto, uma redução decisiva de CO<sub>2</sub> através do uso de combustíveis alternativos só pode ser alcançada se a quota de biomassa for a mais alta possível. Dos cerca de 2 milhões de toneladas, apenas 42% são combustíveis de biomassa (Tabela 18).

Através do emprego de plantas de tratamento mecânico-biológico com secagem integrada, já é possível produzir combustíveis alternativos de alta qualidade com uma proporção muito alta de componentes de biomassa. A conversão relativamente simples, de curto prazo e econômica das plantas de tratamento mecânico-biológico existentes poderia produzir até 800.000 toneladas desses combustíveis ricos em biomassa somente a partir de resíduos domésticos. Outras fontes são, por exemplo, componentes de resíduos ricos em madeira.

#### 4.4.2.3 **Segmento de processo "descarbonização"**

- ♦ **Redução de matérias-primas contendo CO<sub>2</sub>:** Utilizando componentes alternativos de matérias-primas na produção de clínquer e cimento, a quantidade de matéria-prima a ser descarbonizada pode ser reduzida, minimizando assim as emissões de CO<sub>2</sub> liberadas pelo processo químico da descarbonização;
- ♦ **Redução da relação clínquer-cimento:** Substituindo o componente clínquer por agregados hidráulicamente ativos adequados, tais como pozolana, escória granulada de alto-forno, cinzas volantes ou xisto de óleo queimado, as emissões de CO<sub>2</sub> por tonelada de cimento padrão podem ser reduzidas ainda mais. Pesquisas mais recentes também se referem às escórias processadas provenientes da incineração de resíduos;
- ♦ **Armazenamento e uso de CO<sub>2</sub>:**
- ♦ **Vários métodos para armazenamento de CO<sub>2</sub> (CCS = Carbon Capture and Storage) e utilização de CO<sub>2</sub> (CCU = Carbon Capture and Utilization)** estão sendo desenvolvidos e testados atualmente. A curto prazo, nenhum desempenho relevante de mitigação pode ser esperado aqui, pois estes métodos ainda não estão suficientemente testados ou economicamente maduros.



Tabela 18 – Combustíveis alternativos (AF = *alternative fuel*) na Alemanha e a participação de biomassa

AF utilizada na fabricação de cimento alemão em 2016	Quantidades [t/a]	Proporção biomassa [%]
Pneus usados (os pneus consistem em 40% de borracha, aprox. 70% dos quais são feitos de borracha sintética)	201.000	12
Resíduos oleosos	66.000	0
Frações de resíduos pré-processados:		
– Polpa, papel, papelão	81.000	100
– Plásticos e embalagens	640.000	aprox. 10
– Têxteis	7.000	40
– Outros	116.300	?
Farinha de carne e ossos, gordura	145.000	100
AF e seus derivados para calcinador e forno	283.000	50
Resíduos de madeira	< 1.000	100
Solventes	126.000	0
Lodo de esgoto seco	463.000	100
Outros: lodo de óleo, resíduos da destilação etc.	58.000	0
<b>Soma</b>	<b>2.187.300</b>	<b>aprox. 42</b>

Fonte: “Energy sources 2016” utilizadas pelos membros da VDZ (2017).

Tabela 19 – Fator de emissão de diferentes combustíveis

Recurso energético	Fatores de emissão [t CO <sub>2</sub> /TJ]
Carvão marrom	113
Lignite	98
Pneus sucateados	88
Óleo pesado	81
Gás natural	56
Plásticos	61
RSU	45
Combustível alternativo (AF rico em biomassa)	10 – 25*
Biomassa sólida	4
Lodo de esgoto	3

\*Dados próprios

Fonte: Elaborada pelos autores (2022) com dados de UBA (2016; 2022) e dados próprios.



### 4.4.3 Cálculo de GEE

As emissões diretas de CO<sub>2</sub> são geradas quando os resíduos são incinerados. As emissões diretas de CO<sub>2</sub> da incineração dos resíduos resultam da proporção de carbono fóssil (C<sub>foss</sub>) e são calculadas de forma análoga à incineração.

As emissões evitadas como resultado da substituição dos combustíveis fósseis primários utilizados de outra forma na fábrica de cimento (sobretudo carvão) são contabilizadas como um crédito. A substituição é baseada em um fator de substituição de valor calorífico equivalente inferior a 1. Isto significa que toda a energia utilizada para incinerar os resíduos também é utilizada. O resíduo que fornece um total de 10.000 MJ de energia substitui a quantidade correspondente de carvão que forneceria essa quantidade de energia. A massa do carvão substituído é calculada de acordo com a seguinte fórmula:

$$m (\text{Primary fuel}) = \frac{\text{Energy from waste}}{\text{LCV (Carbon)}}$$

Onde:

m            Combustível primário (lignite)        [kg]  
LCV           Conteúdo energético específico [MJ/kg]

As emissões evitadas de CO<sub>2</sub> são novamente calculadas utilizando a massa do combustível primário substituído. Não apenas as emissões de CO<sub>2</sub> da incineração direta são evitadas, mas também as emissões que resultariam da cadeia a montante de combustíveis primários (mineração, transporte e processamento de carvão ou coque). Os fatores de emissão para as cadeias a montante podem ser encontrados em bancos de dados de avaliação do ciclo de vida.

**Exemplo:** 1.000 kg de resíduos com um H<sub>u</sub> de 14 MJ/kg fornecem um total de 14.000 MJ de energia. O conteúdo de C fóssil dos resíduos é de 0,09 kg de C<sub>foss</sub>/kg. Este substituto, por exemplo, lignite com um H<sub>u</sub> de 21 MJ/kg e um conteúdo de C fóssil de 0,66 kg de C<sub>foss</sub>/kg de carvão:

1. Emissões provenientes da incineração dos resíduos:

$$\text{Emissions} = 1,000 \text{ kg} * 0,09 \frac{\text{kg C}_{foss}}{\text{kg}} * \frac{44}{12} = 330 \text{ kg CO}_2\#$$

2. Massa de combustível primário substituído, com base na quantidade de energia:



$$m (\text{Subst. primary fuel}) = \frac{14,000 \text{ MJ}}{21 \text{ MJ/kg}} = 667 \text{ kg Primary fuel \#}$$

3. Emissões de CO<sub>2</sub> evitadas do carvão não queimado (as emissões indiretas da cadeia a montante são desconsideradas aqui):

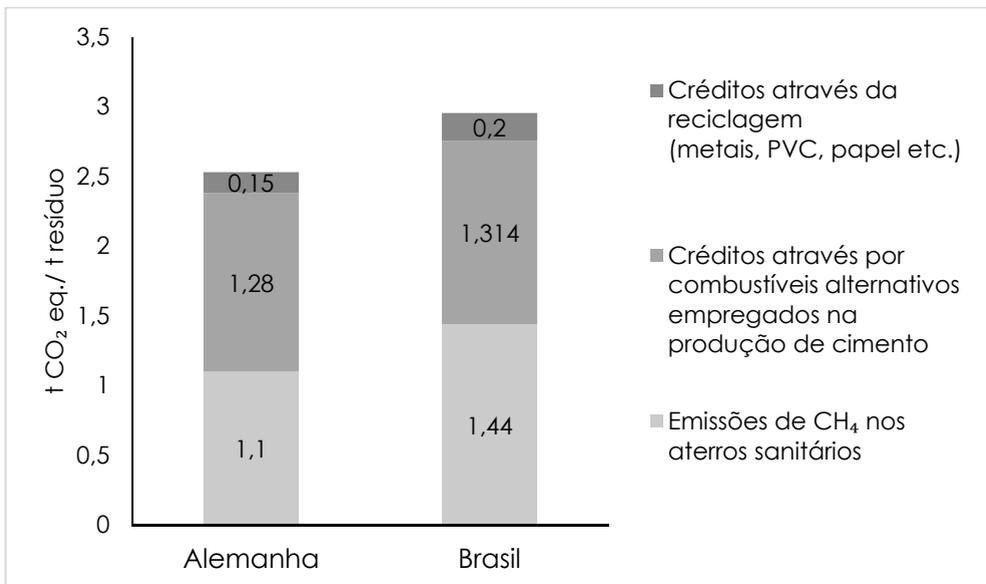
$$\text{Credits} = 667 \text{ kg} * 0.66 \frac{\text{kg } C_{fos}}{\text{kg Carbon}} * \frac{44}{12} = 1,614 \text{ kg CO}_2 \#$$

4. Resultado líquido:

$$\text{Net result} = 330 \text{ kg CO}_2 - 1,614 \text{ kg CO}_2 = -1,284 \text{ kg CO}_2 \#$$

A redução de CO<sub>2</sub> pode ser significativamente maior quando se utiliza combustíveis ricos em biomassa. Uma condição para isso é que os processos de secagem sejam integrados durante o processamento de combustíveis derivado de resíduos.

Figura 9 – Redução de GEE pelo uso de AF na indústria de cimento, considerando também a redução das emissões de GEE de aterros sanitários – Alemanha e Brasil



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Como no caso da reciclagem de resíduos orgânicos, as taxas de mitigação específicas de "aterro" no Brasil são mais altas do que na



Alemanha, devido ao maior conteúdo orgânico dos resíduos domiciliares brasileiros. A maior proporção de resíduos de cozinha ricos em biogás também aumenta o potencial de mitigação ao reduzir os resíduos orgânicos antes da disposição final em aterro. Por outro lado, os menores fatores de emissão resultam em menores potenciais de mitigação, devido ao fornecimento de AF e metais.

#### **4.4.4 Outras emissões atmosféricas de exaustão (poluentes)**

NO<sub>x</sub> é produzido principalmente termicamente a partir de oxigênio e nitrogênio atmosférico. Qualquer entrada de N associada com o combustível é, portanto, desprezível.

As emissões de SO<sub>2</sub> dependem da entrada de enxofre associada ao combustível (e às matérias-primas). Embora a entrada dependente do combustível esteja totalmente integrada no clínquer de cimento, uma alta proporção de sulfetos voláteis na respectiva matéria-prima (por exemplo, pirita, marcasita) pode levar a emissões mais elevadas de SO<sub>2</sub>. O nível de emissões de SO<sub>2</sub>, portanto, dificilmente depende do uso dos combustíveis, mas sim das matérias-primas utilizadas, independentemente de estas serem primárias ou secundárias.

O mercúrio (Hg) é um poluente muito nocivo. É por isso que estão sendo feitos esforços consideráveis internacionalmente para reduzir as emissões de mercúrio. Nenhum poluente é descarregado em fábricas de cimento. Tudo que entra numa fábrica de cimento ou acaba no cimento ou é emitido para o ar. Devido a suas propriedades voláteis, o mercúrio nas fábricas de cimento é quase exclusivamente liberado no ar a partir da incineração. Em contraste com as usinas de incineração de resíduos ou usinas de energia de combustível substituto, as fábricas de cimento não empregam a limpeza dos gases de combustão para a separação seletiva do mercúrio. Nas avaliações clássicas do ciclo de vida, no entanto, o mercúrio não é geralmente considerado. Portanto, os balanços de avaliação de resíduos contendo mercúrio em fábricas de cimento devem ser ampliados para incluir as emissões de mercúrio. Quando os resíduos são reciclados em fábricas de cimento, é ainda mais importante que o teor de mercúrio seja reduzido ao máximo e que a carga de mercúrio não seja aumentada utilizando combustíveis secundários em relação aos combustíveis primários. Independentemente disso, a separação e descarga do mercúrio das fábricas de cimento deve ser assegurada.

Além disso, o teor de cromo e cloro dos combustíveis secundários e matérias-primas deve ser reduzido e controlado. O



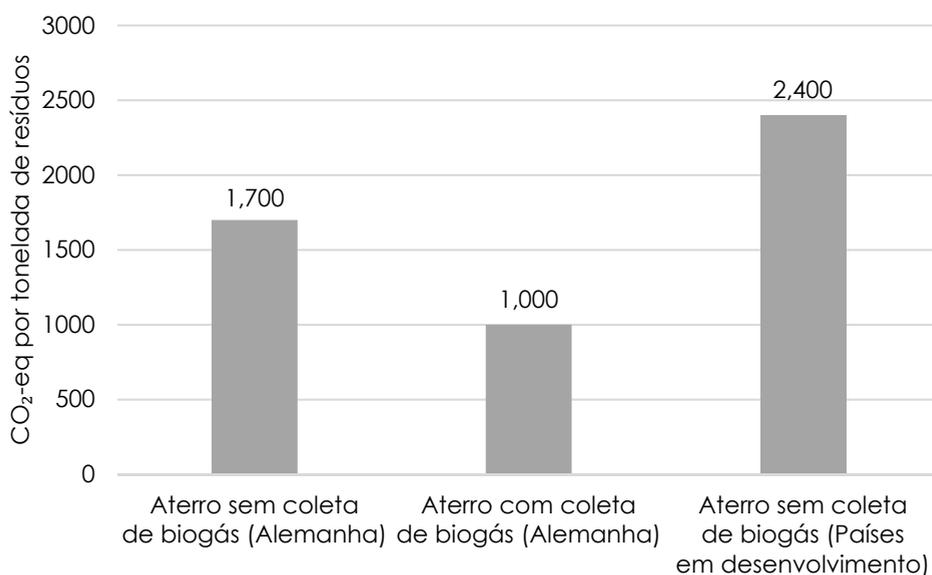
chromo, por outro lado, raramente é emitido para o ar nas fábricas de cimento; ele acaba quase exclusivamente no cimento. Isto é muito problemático devido a suas propriedades tóxicas (o chromo causa eczema no cimento). Durante a incineração de resíduos contendo cloro, por exemplo, PVC, o cloro é liberado e leva à corrosão e entupimentos nas fábricas.

## 4.5 DISPOSIÇÃO FINAL EM ATERRO VERSUS TRATAMENTO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS

### 4.5.1 Fundamentos

Em última análise, o fator de emissão varia dependendo do tipo de resíduo, idade da zona climática do aterro, tipo de operação e altura do maciço de armazenamento. Isto explica a ampla gama de tecnologias individuais.

Figura 10 – Emissão de gases de aterro na Alemanha e países em desenvolvimento

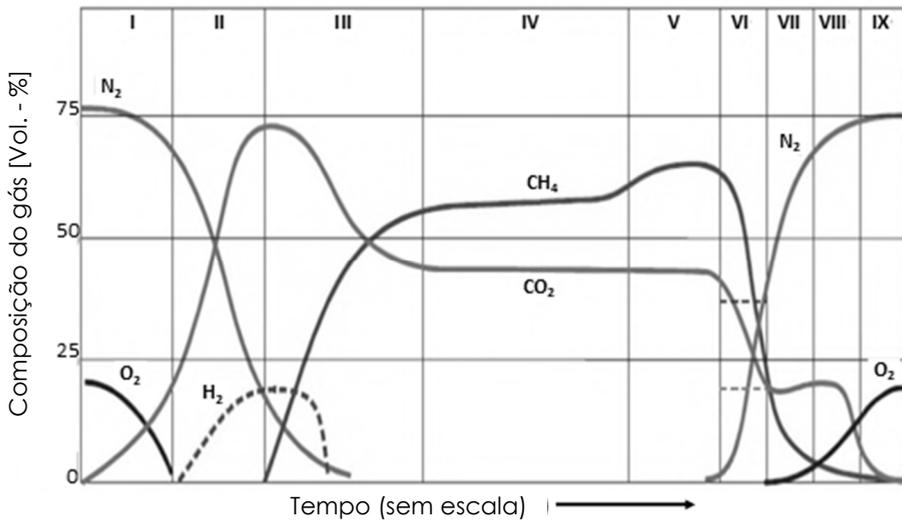


Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

Nos países em desenvolvimento, a proporção de resíduos orgânicos facilmente degradáveis nos resíduos a serem depositados em aterros é até 60 a 80% maior do que na Europa Central. Portanto, o potencial de gás dos aterros sanitários nos países em desenvolvimento é muito maior (Figura 10).

A Figura 11 mostra o progresso do processo de degradação com os correspondentes reagentes a gás. Para os climas da Europa Central, os períodos de meia-vida para o processo de degradação em aterros sanitários são estimados entre seis e sete anos. Em climas quentes e úmidos, a meia-vida está entre quatro e cinco anos. Assim, a liberação de gás durante a fase de operação é ainda mais grave.

Figura 11 – Modelo das fases de degradação dos resíduos orgânicos em aterros sanitários

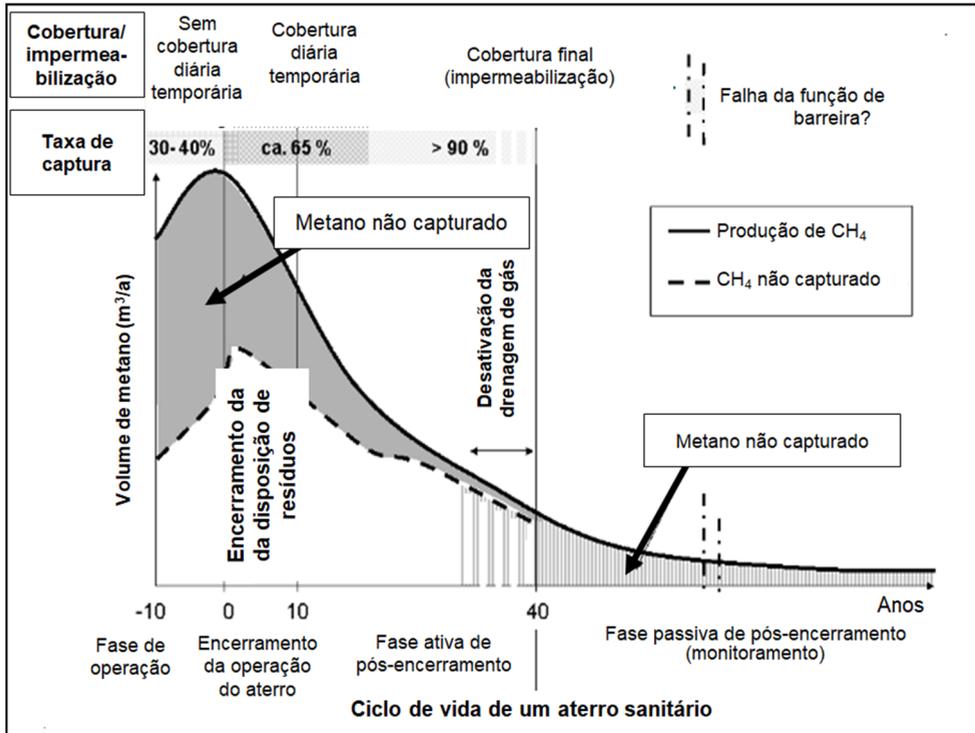


Fase	Condições de contorno	Duração típica
I	Aeróbio	Horas até 1 semana
II	Anóxico, baixo valor de pH	1 a 6 meses
III	Anaeróbio, metanogênico, não estável	3 meses a 3 anos
IV	Anaeróbio, metanogênico, estável	8 a 40 anos
V	Fase de longo prazo	8 a 40 anos
VI	Fase de intrusão de ar	1 a 40 anos ou mais
VII	Fase de oxidação do metano	1 a 40 anos ou mais
VIII	Fase de dióxido de carbono	1 a 40 anos ou mais
IX	Fase aérea	
<b>No total</b>		<b>10 a 80+ anos</b>

Fonte: Elaborada pelos autores de acordo com Rettenberger; Mezger (1992); British Columbia MOE (2010).

Mesmo em aterros com altos padrões de captura de gás, um máximo de 45% do gás do aterro é capturado. A maior parte dele é emitida durante a fase de operação e, portanto, tem um impacto relevante sobre o clima (Figura 12).

Figura 12 – Produção de metano dependente do tempo e da captura ao longo da vida útil de um aterro sanitário, dependendo da cobertura superficial, sem oxidação do metano



Fonte: Humer-Huber *et al.* (2008)

#### 4.5.2 Modelos para calcular a formação/emissão de gases de aterro

Para fins de determinação do volume de gás de aterro sanitário (LFG = *Landfill Gas*) que pode ser liberado ou que está sendo liberado dos resíduos, caso o objetivo seja planejar uma planta de desgaseificação de aterros, deve-se avaliar a emissão de gases do aterro que influenciam o clima ou estimar o período de manutenção posterior do aterro. As estimativas são feitas utilizando modelos, pelos quais deve ser sempre considerado que os volumes de emissão de gás



calculados nunca coincidirão com os volumes de formação de gás calculados.

Uma avaliação geral precisa do volume de LFG formado em um corpo de aterro sanitário requer o conhecimento preciso dos seguintes parâmetros:

- ♦ Volume de gás coletado;
- ♦ Emissões de gases através da superfície não coletadas;
- ♦ Oxidação do metano;
- ♦ Migração lateral de gás;
- ♦ Mudanças no volume de gás armazenado.

O volume de gás coletado é o único parâmetro que pode ser medido com um alto grau de precisão. Os outros parâmetros são geralmente desconhecidos. Portanto, qualquer tentativa de validar um modelo usando os dados medidos está sujeita a erro, pois muitas variáveis que influenciam o resultado são desconhecidas.

Nas últimas décadas, inúmeros modelos foram desenvolvidos para calcular a formação de gás e, principalmente, para traçar curvas de tempo, tais como:

- ♦ **Modelo de ordem zero (modelo padrão):** A taxa de formação de gás é constante ao longo do tempo. Diminuição na produção de gás quando da não avaliação do grau de degradação dos resíduos.
- ♦ **Modelo de primeira ordem (FOD = *First-order model*):** O efeito da idade dos aterros sanitários na produção de LFG é considerado ao levar em conta a diminuição exponencial da produção de gás ao longo do tempo. Este é o modelo mais comumente utilizado, pois muitas mudanças nos parâmetros podem ser feitas para adaptar o modelo às condições locais.
- ♦ **Modelo multifásico:** Modelo FOD no qual são consideradas frações individuais de resíduos com diferentes comportamentos de degradação.
- ♦ **Modelo Scholl Canyon:** O modelo FOD mais amplamente aceito e utilizado, onde as duas primeiras fases de degradação microbiana não são consideradas, ou seja, não é assumido nenhum tempo de atraso e o valor máximo de produção de gás no momento da deposição é conhecido. Este modelo não leva em conta nenhuma variável influenciadora, como a umidade.
- ♦ **Modelo estequiométrico:** Este modelo calcula a produção de gás com base na equação estequiométrica, onde o resíduo é expresso como uma fórmula química empírica. Entretanto, este modelo



fornece apenas uma estimativa da quantidade total de gás gerado, mas não dá nenhuma indicação da taxa de geração ao longo do tempo. Outra desvantagem deste modelo é que a composição química exata dos resíduos deve ser determinada por meio de análises extensivas.

A abordagem mais difundida na Europa é o modelo Tabarasan/Rettenberger, que também é descrito na diretriz alemã VDI 3790. Nos EUA, na maioria dos casos, é utilizado o modelo *LFG Emission Model* (LandGEM) da US-EPA. Um padrão internacional é o modelo IPCC de disposição de resíduos sólidos (2006), que será examinado mais detalhadamente. Todos os três modelos são modelos FOD e os dois últimos foram adaptados às condições locais, em vista da composição dos resíduos e das condições climáticas.

Antes de aplicar o modelo IPCC (2006), o banco de dados no qual a estimativa deve ser baseada deve ser esclarecido. O modelo permite três etapas:

- ♦ **Etapa 1:** Os valores padrão dados pelo modelo são utilizados primeiramente.
- ♦ **Etapa 2:** Apenas alguns dos parâmetros padrão são utilizados; em outros lugares, são utilizados dados de alta qualidade específicos do país sobre as operações atuais e antigas de aterros sanitários. Dados históricos cobrindo um período de pelo menos dez anos devem estar disponíveis e baseados em estatísticas, estudos ou outras fontes similares específicas de cada país.
- ♦ **Etapa 3:** Suplemento ao Tier 2:
  - (1) Aplicação de valores específicos do país para os parâmetros chave de meia-vida e potencial de formação de metano (Lo) ou DOC- que está sendo minerada (9i)  
ou:
  - (2) Aplicação de parâmetros específicos do país derivados de medições. O uso de um método específico do país só é permitido se for equivalente ou de qualidade superior ao nível 3 abaixo da aplicação do método FOD.

O Manual do Modelo IPCC (2006), que pode ser baixado livremente do *website* do IPCC, fornece informações detalhadas sobre a seleção do método apropriado (IPCC, 2020).

As emissões de metano de um aterro sanitário podem ser calculadas para um único ano usando a equação:



$$CH_4 \text{ Emissions} = \left[ \sum_x CH_4 \text{ generated}_{x,T} - R_T \right] * (1 - OX_T) \#$$

Onde:

$CH_4 \text{ Emissions}$	Emissões de metano no ano T	[Gg]
$CH_4 \text{ Generated}$	CH <sub>4</sub> volume de material degradável	[Gg]
$T$	Ano de inventário	[-]
$x$	Categoria/tipo/material do resíduo	[-]
$R_T$	CH <sub>4</sub> coletado no ano T	[Gg]
$OX_T$	Fator de oxidação no ano T	[-]

Parte do metano produzido é oxidado na cobertura do aterro sanitário ou coletado para recuperação de energia ou incinerado usando um sistema de queima. Esta fração capturada deve ser subtraída da quantidade de metano resultante; somente a fração não capturada pode ser oxidada na cobertura.

O volume de CH<sub>4</sub> formado a partir de material degradável é calculado utilizando a seguinte fórmula:

$$L_0 \text{ Generated} = DDOC_{m \text{ decomp}T} * F * \frac{16}{12} \#$$

Onde:

$L_0 \text{ Generated}$	CH <sub>4</sub> volume de material degradável	[Gg]
$DDOC_{m \text{ decomp}T}$	Massa de DOC degradável depositada, que se decompõe no ano T	[Gg]
$F$	Teor de metano no gás do aterro formado (ou seja, a proporção do carbono degradado que é convertido em metano)	[-]
$\frac{16}{12}$	Relação de peso molecular de CH <sub>4</sub> /C	[-]

A seguinte fórmula é usada para calcular a massa do DOC<sub>m</sub> degradável depositado:

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF \#$$

Onde:

$W$	Massa dos resíduos depositados	[Gg]
-----	--------------------------------	------



<i>DOC</i>	O conteúdo biogênico de carbono dos resíduos depositados	[%]
<i>DOC<sub>f</sub></i>	A proporção de carbono degradado por ele ao longo do tempo	[%]
<i>MCF</i>	Fator de correção do metano levando em conta o tipo de aterro sanitário	[-]

O potencial de gás ainda presente no aterro pode ser estimado se, ao invés do  $DDOC_m$ , a massa de carbono degradável ainda presente em um determinado momento (" $DDOC_{ma}$ ") for usada na fórmula. Cálculos adicionais são realizados assumindo a cinética de decomposição de primeira ordem (FOD).

O cálculo pode então ser realizado utilizando as seguintes equações simples:

- ♦ Massa disponível de  $DDOC_m$  no aterro sanitário no final do ano T

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} * e^{-k})\#$$

- ♦ No aterro sanitário, massa degradada de  $DDOC_m$  no final do ano T

$$DDOCm_{decomp}_T = DDOCma_{T-1} * (1 - e^{-k})\#$$

Onde:

<i>DDOCma<sub>T</sub></i>	$DDOC_m$ em massa disponível no aterro sanitário no final do ano T	[Gg]
<i>DDOCma<sub>T-1</sub></i>	$DDOC_m$ em massa disponível no corpo do aterro sanitário no final do ano	[Gg]
<i>DDOCmd<sub>T</sub></i>	$DDOC_m$ [Gg] aterrado em massa no ano T	[Gg]
<i>DDOCm<sub>decomp</sub><sub>T</sub></i>	$DDOC_m$ em massa degradada anaerobiamente no ano T	[Gg]
<i>T</i>	Ano para o qual o cálculo é realizado	[-]
<i>k</i>	Taxa de decaimento constante = $\ln(2)/t_{1/2}$	[1/a]
<i>t<sub>1/2</sub></i>	Meia-vida	[a]

Finalmente, a quantidade de metano resultante da fração  $DDOC_m$  decomposta é obtida multiplicando-a pela fração volumétrica de  $CH_4$  no LFG e a relação dos pesos moleculares de  $CH_4$  para C:



$$CH_4 generated_T = DDOC_m decomp_T * F * 16/12\#$$

Para os principais parâmetros empregados nas fórmulas apresentadas, ou são usados dados específicos do país, ou os valores padrão de acordo com o IPCC. Muitas vezes não há valores disponíveis para o DOC; em tais casos, este valor é calculado com base nas composições de resíduos específicas do país, em conjunto com as características das frações de resíduos.

Exemplos de valores padrão de acordo com o IPCC (2007):

- ♦  $DOC_f = 50\%$  (valor médio para todos os resíduos que também podem conter lignina)
- ♦ Teor de metano = 50%
- ♦ Fator de correção do metano:
  - Aterro sanitário controlado – anaeróbio = 1
  - Aterro não controlado – altura (> 5 m) e/ou alto nível de água = 0,8
  - Semi-aeróbio, aterro controlado – plano (< 5 m) = 0,5
  - Altura de operação de aterro não controlada < 5 m = 0,4
- ♦ Fator de oxidação (OX) = 0%
  - OX = 0,1 para a camada de oxidação
- ♦ Valores padrão para a meia-vida e taxa de decaimento constantes, dependendo das condições climáticas do local
- ♦ DOC: gama de valores para diferentes tipos de resíduos
- ♦ Quantidade de gás recuperada R = 0

A simplicidade do modelo IPCC (2006) também inclui algumas incertezas quanto à metodologia e aos dados/parâmetros operacionais a serem utilizados (IPCC, 2006; Rettenberger *et al.*, 2014). Os pontos mais críticos são:

- ♦ A abordagem simples da cinética de degradação de primeira ordem (modelo FOD) pode não refletir corretamente os complexos processos de biodegradação.
- ♦ Podem ocorrer erros significativos se a quantidade e/ou composição dos resíduos depositados sofrerem grandes alterações.
- ♦ No entanto, de acordo com os dados do IPCC, os erros que podem resultar da metodologia do modelo são muitas vezes menores do que os erros que podem resultar da seleção de parâmetros inadequados.
- ♦ O intervalo dos valores padrão dados no modelo.



**Nota:** Mais detalhes sobre estes cálculos podem ser encontrados no Relatório IPCC, 2006 e/ou no módulo *Landfill Gas*.

No caso de aterros sanitários onde os resíduos biodegradáveis são depositados, o LFG deve ser coletado até que o operador possa provar que isso não é mais necessário, ou seja, que a influência ambiental ou os efeitos adversos e riscos para a saúde humana foram minimizados (Diretiva de Aterros Sanitários da UE, 1999). Quando o LFG é capturado, a exploração do gás para fins energéticos tem prioridade.

Se a geração de gás for alta, é necessária uma captura ativa de gás com poços verticais e/ou horizontais. Ao aplicar um vácuo no corpo do aterro sanitário, o gás é ativamente extraído. Fora do corpo do aterro, o gás é transportado para a planta de utilização de gás. Dependendo do uso posterior do gás, diferentes etapas de tratamento podem ser necessárias para purificar o gás.

O LFG é ideal para gerar energia e calor, pois tem um alto poder calorífico de aproximadamente 19 MJ/m<sup>3</sup> (CH<sub>4</sub> concentração 50% em volume) e o dióxido de carbono ao invés do metano é liberado na atmosfera graças à combustão completa, resultando em um impacto positivo líquido sobre o equilíbrio climático. Além disso, o uso de LFG para gerar energia serve como um substituto para outros combustíveis fósseis.

Na maioria dos casos, o LFG é explorado para gerar energia elétrica, contudo a eficiência energética entre 20 – 40% é bastante baixa. Portanto, a energia térmica gerada também deve ser explorada (calor e energia combinados = motogerador). O calor pode ser utilizado para fins de aquecimento (aquecimento distrital ou aquecimento local) ou para processos de produção (calor de processo). A eficiência energética geral pode então ser aumentada para até 90%.

Se for aplicado um alto grau de purificação, em termos de qualidade, o LFG é indistinguível do gás natural, dessa forma podendo alimentar as redes de gás natural. O gás pode até mesmo ser utilizado diretamente em veículos motorizados. Às vezes, também, é utilizado como fonte de calor para a produção de biocombustíveis (biodiesel, etanol). Também pode ser usado diretamente como matéria-prima para a produção de combustíveis alternativos – por exemplo, gás comprimido (GNV), gás líquido (GNL) ou metanol. Estas vantagens são



compensadas pelos gastos significativamente maiores associados à purificação do LFG.

Se o volume de LFG produzido como resultado dos processos de biodegradação de substâncias orgânicas for baixo por causa da idade do aterro sanitário ou do descarte de material TMB, então deve ser instalado um sistema passivo para coleta dos gases. As pequenas diferenças de pressão e temperatura fazem com que o gás migre em direção à superfície dos resíduos, o fluxo total de gás em níveis baixos. O LFG pode ser coletado sem consumir energia adicional instalando um coletor de gás na área superior de um aterro sanitário – um sistema de desgaseificação existente também pode ser usado para este fim. A instalação e operação (especialmente o monitoramento) de sistemas passivos como estes são, portanto, menos caros do que os sistemas ativos. A aplicabilidade e eficácia específicas, no entanto, depende fortemente das condições climáticas ambientais e da cobertura da superfície do aterro sanitário. Sob certas circunstâncias, eles não podem ser utilizados para fluxos de gás altamente seletivos (*hotspots*).

O gás contido nos sistemas passivos pode ser convertido em dióxido de carbono neutro para o clima usando chamas ou camadas de oxidação de metano (MOL). O método mais econômico é uma chama aberta, onde o gás só é queimado. Como o suprimento de ar e a temperatura não são controlados, apenas 50 – 75% do gás não são destruídos. Numa queima fechada mais técnica estes parâmetros são controláveis, e a temperatura é  $> 750$  °C e o tempo de retenção do gás é maior para que todos os compostos de gás sejam queimados.

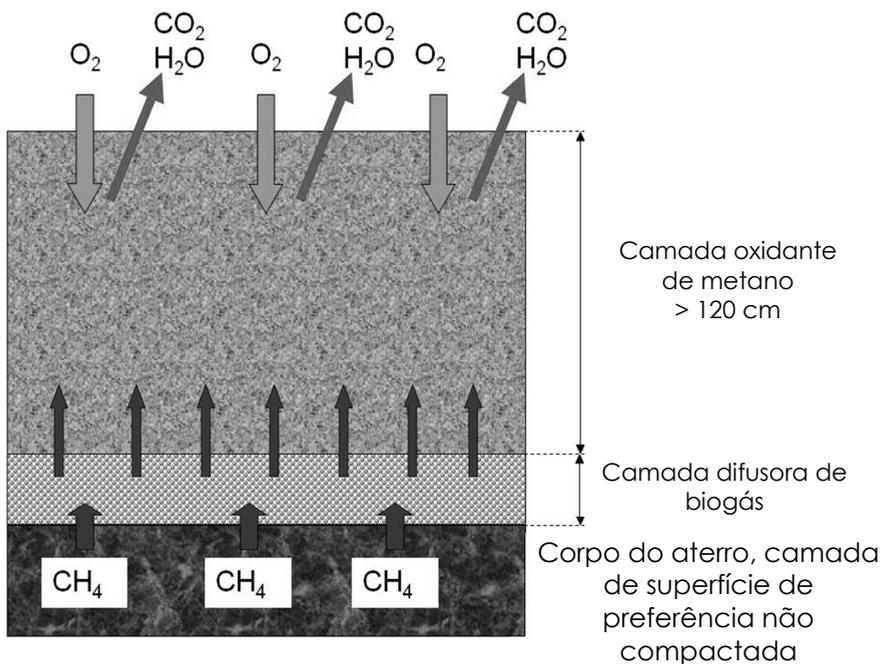
Em uma camada de oxidação do metano (MOL), microorganismos decompositores de metano (bactérias metanotróficas) convertem metano em água e dióxido de carbono ou biomassa microbiana na presença de oxigênio, ao mesmo tempo em que produzem energia e liberam energia. Importante é a boa permeabilidade ao gás do MOL, de modo que o ar possa se difundir sobre a superfície para o solo/substrato (Figura 13). Além disso, um tempo de residência do metano na camada tem que ser determinado para que a decomposição ao dióxido de carbono possa ocorrer completamente.

A eficiência com que as bactérias realizam esta tarefa é fortemente influenciada pelas condições ambientais, tais como temperatura, teor de umidade da camada de cobertura, suprimento de metano e oxigênio, presença de nutrientes (nitrogênio, fosfato) e inibidores (nitrito, amônio).



A camada de oxidação do metano é um tipo de cobertura de superfície de recultivo que consiste em uma camada de distribuição de gás localizada abaixo da cobertura do solo/substrato. Esta camada se destina a equilibrar o fluxo de gás que sai dos resíduos – tanto em termos de fluxo quanto de concentração – a fim de evitar *hotspots*. A alta permeabilidade do MOL ao gás é crucial para permitir a difusão do ar através da superfície para o solo/substrato (Figura 13). Além disso, um tempo específico de retenção do metano na camada deve ser quantificado para que o metano possa ser completamente degradado ao dióxido de carbono.

Figura 13 – Diagrama esquemático da estrutura de uma camada de oxidação do metano



Fonte: Adaptado pelos autores (2022) de Scheutz *et al.*, 2009.

A oxidação ocorre principalmente nos 20 cm mais altos da camada e depois diminui acentuadamente até 40 cm abaixo da superfície superior. Nas camadas subjacentes, a concentração de metano não é mais influenciada pelos processos de oxidação.

O metano no MOL deve ser completamente decomposto. Para que isto seja possível, a carga de metano do LFG de entrada não pode ser muito alta. Com base em numerosos testes de laboratório e



de campo experimental, assume-se que aproximadamente 96 – 108 l CH<sub>4</sub>/(l\*d) pode ser completamente oxidado em MOL tecnicamente otimizado (Scheutz *et al.*, 2009). Quantidades mais elevadas de gás levam a uma redução na taxa de oxidação do metano.

O material para a camada de oxidação do metano pode ser composto feito de resíduos orgânicos, uma mistura de composto e material do solo com uma alta porosidade para o fluxo de gases. Particularmente importante é a camada de distribuição, que geralmente é feita de cascalho ou escória. Esta camada assegura que a emissão desigual de gás dos resíduos abaixo do substrato seja nivelada e que os pontos críticos associados ao aumento dos fluxos de gás (um fenômeno comum em aterros sanitários) sejam evitados no substrato.

Em qualquer caso, antes de instalar o MOL no aterro sanitário, testes em escala de laboratório e de campo devem ser feitos para identificar os materiais, a altura das camadas e a influência das condições climáticas.

## 5 ESTRUTURA LEGAL DE PROTEÇÃO CLIMÁTICA E GESTÃO DE RESÍDUOS – PERSPECTIVAS

### 5.1 ALEMANHA

Em dezembro de 2015, o **Acordo de Paris** decidiu limitar o aquecimento global bem abaixo de 2 °C e de preferência a 1,5 °C. Entretanto, as medidas atualmente anunciadas pelos países no âmbito do acordo climático para limitar as emissões de gases de efeito estufa estão longe de ser suficientes para atingir esta meta.

Portanto, todas as partes contratantes tiveram que apresentar medidas adicionais e mais ambiciosas em 2020. A União Europeia (EU) está comprometida com uma **Europa neutra em relação aos GEE até 2050**. Ela se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa da UE em pelo menos 40% até 2030, em comparação com 1990. Além de estabelecer metas, a Comissão Europeia está usando medidas em toda a UE, como o **Esquema de Comércio de Emissões da UE** e metas nacionais vinculativas de mudança de clientela para 2020 e 2030, para combater a mudança climática.

Na Alemanha, as emissões de gases de efeito estufa devem ser reduzidas inicialmente em pelo menos 55% até 2030, em comparação com 1990.

A **Lei Alemã de Proteção Climática de 2019** estipula que a Alemanha deve ser neutra em relação aos GEE até 2050 e estabelece

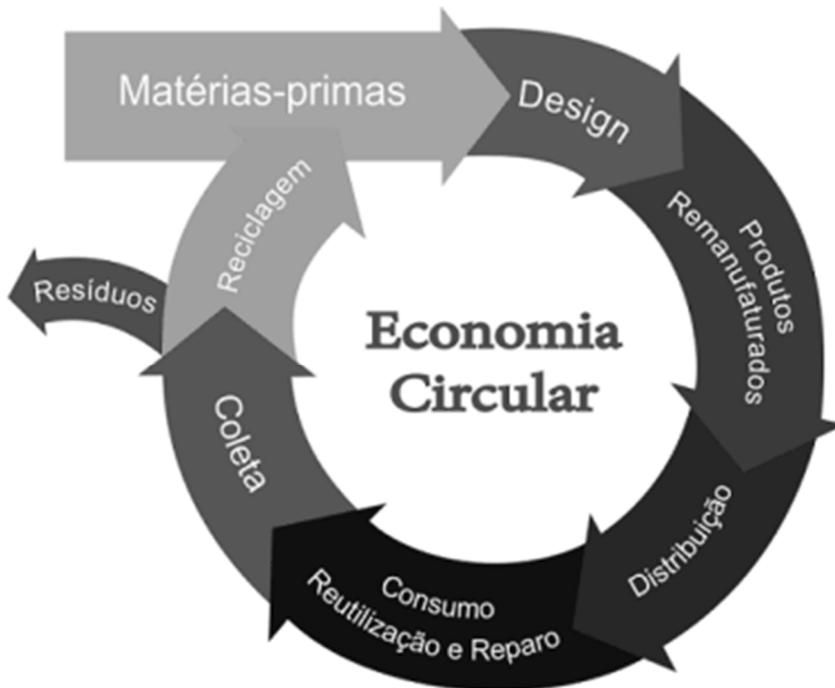


uma estrutura legal firme para o cumprimento obrigatório das metas de proteção climática da Alemanha.

Em agosto de 2019, o Ministério do Meio Ambiente alemão apresentou um projeto de emenda à **Lei Alemã de Reciclagem (KrWG)**. O objetivo da lei é promover mais fortemente a gestão da reciclagem, ampliando as quotas de reciclagem para um grande número de materiais recicláveis. A emenda é a implementação do plano de ação da UE para a economia circular.

O **conceito da Economia Circular** é um componente essencial da emenda além do foco no gerenciamento de resíduos. A Comissão Europeia apresentou um Plano de Ação da Economia Circular para 2015. O objetivo do plano é tornar o projeto, desenvolvimento, uso, eliminação e reutilização do produto o mais eficiente possível em termos de energia e recursos. O conceito abrange, portanto, todo o ciclo de vida de um produto. O Plano de Ação define padrões para diversas indústrias e abrange, por exemplo, plásticos, alimentos, matérias-primas, construção, biomassa e fertilizantes.

Figura 14 – Conceito de economia circular



Fonte: DGAE (2020).



○ **Programa de Proteção Climática 2030**, adotado em 2019, prevê medidas para todos os setores, bem como instrumentos intersetoriais para alcançar este objetivo. O elemento central do programa é a introdução de um **preço nacional de CO<sub>2</sub>** nos setores de aquecimento e transporte (BMU, 2020). Para este fim, o governo alemão estabeleceu um sistema nacional de comércio de emissões a partir de 2021.

As emissões provenientes da combustão de combustíveis que ainda não estão cobertas pelo ETS da UE estarão, portanto, sujeitas a um preço sucessivamente crescente. Em princípio, os participantes do comércio de emissões são aqueles que colocam combustíveis no mercado e estão sujeitos a impostos sobre energia. No caso dos derivados de petróleo, estes são principalmente comerciantes e produtores, no caso do gás natural, eles são principalmente fornecedores. Nos anos de 2021 a 2025, os certificados são emitidos a um preço fixo anual.

Este caminho confiável de preços permitirá que cidadãos e empresas se adaptem ao desenvolvimento e levem em conta o preço do CO<sub>2</sub> nas futuras decisões de compra e investimento. A partir de 2026, o preço do certificado será então formado no mercado, mas inicialmente será coberto com um corredor de preços. A continuação de um corredor de preços para o período a partir de 2027 será decidida em 2025. O preço dos GEE tem o efeito de tornar as alternativas favoráveis ao clima mais baratas no futuro, enquanto os preços das opções prejudiciais ao clima aumentarão moderadamente, mas de forma constante.

Preços de CO<sub>2</sub>:

- ◆ A partir de janeiro de 2021 = 25 euros/t;
- ◆ Aumento até 2025 = até 55 euros/t;
- ◆ A partir de 2026 = corredor de preços 55 a 65 euros/t.

O objetivo é garantir que as pessoas escolham um produto ecológico na próxima vez que comprarem um carro ou sistema de aquecimento. A receita do preço do CO<sub>2</sub> será totalmente investida em medidas de proteção climática ou devolvida aos cidadãos sob a forma de incentivo. Uma grande parte da receita é utilizada para reduzir os preços da eletricidade, por exemplo, reduzindo a **taxa EEG** ano após ano ao longo da trajetória de aumento dos preços. Isto pode resultar em melhorias na concorrência para a produção e comercialização de combustíveis de biomassa a partir de resíduos.



## 5.2 UNIÃO EUROPEIA

A proteção climática é uma prioridade política da UE. Para combater a mudança climática, a UE depende da formulação de objetivos abrangentes e metas vinculativas. A UE está perseguindo a meta de tornar-se neutra em relação ao clima até 2050. Com a nova meta climática de longo prazo, a UE está fortalecendo a segurança do planejamento para a economia e a sociedade.

Em janeiro de 2020, a Comissão Europeia apresentou o **European Green Deal**, uma estratégia de sustentabilidade em larga escala para a UE. O núcleo da estratégia é uma lei de proteção climática da UE para tornar o objetivo da neutralidade climática legalmente obrigatório até 2050. Isto também inclui a revisão e possível atualização das atuais metas de redução de gases de efeito estufa. Além disso, o Acordo Verde contém medidas para todos os setores que se destinam a contribuir para alcançar as metas europeias de proteção do clima.

Estas medidas são particularmente relevantes para o setor de gestão de resíduos:

- ♦ Diretiva Quadro de Resíduos da UE 2018/851/UE;
- ♦ Pacote de reciclagem da UE a partir de 2018;
- ♦ Diretiva de Concepção Ecológica da EU;
- ♦ Sistema de Comércio de Emissões da UE (EUETS).

A **Diretiva Quadro de Resíduos** 2018/851/UE introduz a **coleta seletiva** obrigatória de resíduos orgânicos a partir de 2024, têxteis usados e resíduos domésticos classificados como perigosos a partir de 2025 em toda a UE. As isenções para coletas seletivas já existentes de papel, metal, plástico e vidro também se tornarão mais rígidas. Até o final de 2024, a Comissão da UE também considerará a introdução de **metas de reciclagem obrigatórias** para resíduos de construção e demolição, resíduos têxteis, resíduos comerciais, resíduos industriais não perigosos e resíduos orgânicos.

A partir de 2035, os Estados-Membros só poderão **aterrar um máximo de 10%** dos resíduos municipais. Os Estados-membros que ainda depositaram mais de 60% em 2013 terão um adiamento de cinco anos, mas não poderão exceder 25% a partir de 2035. A partir de 2030, nenhuma substância recuperável poderá mais ser disposta em aterro. A proibição da incineração de resíduos nos termos desta legislação não foi adotada. A **proibição da disposição final em aterro sanitário de resíduos não tratados** foi aplicada a partir de 2022.



Tabela 20 – Taxas de reciclagem presentes  
no pacote de reciclagem da UE

Tipo de fração do resíduo	2025 [%]	2030 [%]	2035 [%]
RSU	55	60	65
Embalagens	65	70	
Plásticos	50	55	
Madeira	25	30	
Metais ferrosos	70	80	
Alumínio	50	60	
Vidros	70	75	
Papel e papelão	75		
<b>Crítérios para o prolongamento</b>	<b>Aterro Sanitário &gt; 60% ou reciclagem &lt; 20% em 2013</b>		

\* Prolongamento possível: Bulgária, Croácia, Chipre, Estônia, Grécia, Hungria, Letônia, Lituânia, Malta, Romênia, Eslováquia.

(1) Método de cálculo padrão: entrada para o processo de reciclagem.

Fonte: UE (2018a).

Tabela 21 – Requisitos para a redução do volume antes do aterro  
sanitário e proibição do aterro sanitário de resíduos não tratados de  
acordo com o pacote de reciclagem da UE, 2018

Requisitos	2022 [%]	2035* [%]	2040* [%]
Redução da proporção para disposição em aterros sanitários		10	10*
Proibição de disposição de resíduos não tratados em aterros sanitários	X		

\* Critérios para estender o tempo,  
Quantidade de aterro sanitário > 60% no ano de 2013.

Fonte: UE (2018a).



A nova regulamentação – quando de sua implementação efetiva – poderá ter um impacto relevante na gestão de resíduos dos Estados-Membros. É de se esperar que reduções elevadas de GEE possam ser alcançadas através da obrigação de reciclagem, da redução do volume de aterro planejado a médio prazo e, sobretudo, através da proibição de aterro de resíduos não tratados a partir de 2022.

A **Diretiva de Design Ecológico da UE** regulamenta o design ambientalmente correto dos produtos. Isto inclui não apenas a eficiência energética, reciclabilidade e reparabilidade dos produtos, mas, também, a harmonização dos padrões de produtos nos Estados Membros da UE. Atualmente, 22 grupos de produtos são regulados pela Diretiva. Todos os produtos destes grupos devem cumprir as regras para serem vendidos na União Europeia, mesmo que não sejam fabricados na UE. A Diretiva original data de 2005 e é adaptada e revisada a cada cinco anos com um novo plano de trabalho.

Pela primeira vez, a Diretiva de Concepção Ecológica e a **rotulagem energética** serão desenvolvidas em conjunto. Os consumidores podem esperar uma inovação no campo da etiquetagem energética. Isto foi redimensionado a partir de 2021 para usar novamente a **escala original de A a G**. As categorias A+ para A++++ serão abandonadas. O objetivo foi aumentar as exigências para inibir a presença de produto de classe A a partir de 2021. Assim, a diretiva ajuda a empurrar produtos ineficientes para fora do mercado. A Comissão Europeia estima que 38 TWh de eletricidade poderiam ser economizados anualmente até 2030, o que resultaria em uma redução significativa nas emissões de GEE. A diretiva será monitorada e implementada pelos Estados-Membros.

O **Esquema de Comércio de Emissões da UE** e as metas de redução de emissões compartilhadas são elementos-chave da política de mudança climática da UE. O Esquema de Comércio de Emissões da UE (EU ETS) cobre a maioria das emissões do setor energético e da indústria e, a partir de 2012, também da aviação doméstica. Além do CO<sub>2</sub>, o óxido nitroso e os perfluorocarbonos também foram incluídos no comércio de emissões desde 2013. Isto representa cerca de 40% de todas as emissões de gases de efeito estufa da UE. Para atividades fora do comércio de emissões, a Effort Sharing Decision (ESD) para o período até 2020 e a **EU Effort Sharing Regulation (ESR)** para o período até 2030 estabeleceram metas vinculativas de redução de emissões para cada Estado-Membro da UE.



Sob o Esquema de Comércio de Emissões da UE, as empresas podem emitir apenas tantas emissões quanto têm licenças de emissão. A **quantidade de permissões** disponíveis no mercado é limitada e se baseia nas metas climáticas e energéticas da UE a longo prazo. Os agentes do mercado que são obrigados a emitir uma certa quantidade de gases de efeito estufa devem ter uma dessas licenças para cada tonelada de gás de efeito estufa emitida. Isto cria um incentivo econômico para reduzir as emissões e usar combustíveis de baixa emissão, tais como os combustíveis de biomassa provenientes de resíduos.

Os certificados são livremente comercializáveis entre os participantes do mercado. Isto cria um mercado no qual o preço de uma licença de emissão é determinado pela oferta e demanda. Como resultado, as emissões de gases de efeito estufa são evitadas onde os custos são mais baixos.

Figura 15 – Hierarquia de resíduos da Lei de Economia Circular Alemã (2012) e sua relevância para a proteção do clima (modificada)



Fonte: Elaborada pelos autores (2022).

O Esquema de Comércio de Emissões da UE estabelece metas vinculativas de redução de emissões. Para fazer sua contribuição, os setores cobertos pelo ETS da UE devem reduzir suas emissões em 21% até 2020 e 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2005. Até 2018, a redução das emissões do EU ETS de instalações fixas já havia



atingido 29% em comparação com 2005, mas o comércio de emissões inicialmente não foi muito eficaz. Isto se devia a um aumento constante do excedente de licenças de emissão e, portanto, baixos incentivos para que os participantes do mercado reduzissem as emissões, entre outras coisas, devido à emissão inicialmente generosa demais de licenças e à compra de licenças mais baratas de fora da Europa (BMU, 2020).

A hierarquia de resíduos da UE e a Lei de Economia Circular alemã (2012) leva em conta as exigências de sustentabilidade e proteção climática (Figura 15).

## 6 CONSIDERAÇÃO FINAL

A mudança climática é um dos maiores desafios enfrentados pela comunidade internacional. A gestão de resíduos contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa. Em nações industrializadas, sua participação no ano de referência foi entre 5 e 7% do total de emissões de gases de efeito estufa. Através de medidas sustentáveis de gerenciamento de resíduos, esta participação poderia ser reduzida nos países da Europa Central para valores abaixo de 1,5%. Nos países em desenvolvimento e emergentes, a participação das emissões de gases de efeito estufa é muito maior do que nos países da Europa Central, chegando a 12% do total das emissões nacionais de gases de efeito estufa.

Há muitas razões complexas para isso. Uma razão importante é que o aterro sanitário é frequentemente a única medida de gerenciamento de resíduos. Além disso, existe um potencial significativamente maior de gás de aterro devido à alta proporção de resíduos biológicos – principalmente resíduos de cozinha. Em países em desenvolvimento e recentemente industrializados, sua participação está entre 55 e 70%. Os altos padrões técnicos de coleta e utilização de gás não são amplamente empregados por razões de custo. Além disso, em regiões tropicais, a coleta eficiente de gás é dificultada pela formação muito precoce do gás, que geralmente começa na fase inicial de operação.

Estão disponíveis sistemas e tecnologias para a gestão sustentável de resíduos ambientalmente amigáveis, mas, em muitos casos, exigem uma ampla adaptação às condições específicas de cada país em desenvolvimento e nos países emergentes.

Alguns instrumentos, tais como a coleta seletiva de resíduos orgânicos, não são viáveis, pelo menos a curto prazo, tendo como



pano de fundo as condições estruturais financeiras existentes, as estruturas socio-urbanísticas, a logística de coleta subdesenvolvida e as condições climáticas predominantes. Por último, mas não menos importante, existe uma falta de consciência ambiental ampla na sociedade como pré-requisito básico para a necessária aceitação da participação na coleta seletiva; isto se aplica acima de tudo à coleta de resíduos orgânicos.

Neste contexto, deve-se considerar o sistema de escalonado de coleta seletiva de orgânicos. Em um primeiro passo, os resíduos de jardins e parques, os chamados resíduos verdes, devem ser coletados e reciclados. Em uma segunda etapa, os resíduos alimentares de cantinas e restaurantes, bem como o processamento de alimentos, devem ser coletados e reciclados, de preferência com a integração da fermentação. A introdução da coleta seletiva de resíduos orgânicos de residências deve começar inicialmente em projetos-piloto menores em diferentes regiões sociourbanas.

Na estimativa dos autores, a coleta seletiva deve geralmente resultar em taxas de coleta e recuperação significativamente mais baixas. O tempo necessário para sua implementação e efeito eficiente também é estimado como sendo comparativamente alto.

Instrumentos rapidamente implementáveis e eficazes são procedimentos para o pré-tratamento de resíduos antes da disposição final em aterro. Estes incluem tecnologias de tratamento mecânico-biológico (TMB) de resíduos com a integração de tecnologias de triagem manual e automática para a separação de plásticos, papel e papelão, bem como metais para reciclagem. Também é possível separar uma fração com alto poder calorífico para recuperação de energia em plantas de incineração de resíduos ou em fábricas de cimento.

Paralelamente a estabilização biológica da matéria orgânica para fins de compostagem ou fermentação, a secagem aeróbia das frações orgânicas também pode ser apontada como pertinente. Por um lado, a secagem incrementa a eficiência de segregação das frações e por outro lado, a secagem cria o pré-requisito para a produção de combustíveis de alta qualidade, os chamados combustíveis derivados de resíduos, para a recuperação de energia em processos industriais, tais como a produção de cimento e plantas de incineração de resíduos.

A clássica incineração de resíduos não tratados é uma forma praticável, pelo menos nas áreas metropolitanas.



## REFERÊNCIAS

- BMU. **Klimaschutz in Zahlen**. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2020 des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main. 2020. Disponível em: [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_zahlen\\_2021\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- BCM – BRITISH COLUMBIA MOE. **Landfill Gas Management Facilities. Design Guidelines**. Prepared by: Conestoga-Rovers & Associates, Richmond, British Columbia, 2010. Disponível em: <https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/waste-management/garbage/designguidelinesfinal.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.
- BULLACH, W. Comunicação verbal, 2017.
- BRIEFING. **Circular Economy Package**. Four legislative proposals on waste. EU Legislation in Progress, Briefing, July 2018. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/614766/EPRS\\_BRI\(2018\)614766\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2018/614766/EPRS_BRI(2018)614766_EN.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.
- DGAE – Direção Geral das Atividades Económicas. **Economia Circular**. Disponível em: <https://www.dgae.gov.pt/servicos/sustentabilidade-empresarial/economia-circular>. Acesso em: 12 out. 2022.
- ECOINVENT. **ecoinvent v3.4**. Ecoinvent v3.4 was released in October 2017 featuring over 1'000 new and updated datasets in four different sectors: plastics recycling, chemicals, natural gas and electricity. 2017. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-4/>. Acesso em: 12 out. 2022.
- EN ISO 14040. **Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. 2006. Disponível em: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>. Acesso em: 12 out. 2022.
- EN ISO 14044. **Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017)**. German version. 2018. Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/f074a39a-8dc7-4be4-8b1c-bf5953993800/en-iso-14044-2006-a1-2018>. Acesso em: 12 out. 2022.
- EU Eco-design Directive. **Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen parlaments und des rates vom 21**. Oktober 2009ff zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. 2009/2022. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:de:PDF>. Acesso em: 12 out. 2022.
- EU Landfill Directive. **Landfill Directive (1999/31/EC)**. 1999. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/links/landfill-directive-1999-31-ec>. Acesso em: 12 out. 2022.
- EU Waste Framework **Directive 2018/851/EU**, 2018. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/directive-eu-2018-851-of>. Acesso em: 12 out. 2022.
- FLAMME, Sabine; QUICKER, Peter; WEBER, Kathrin. **Energieerzeugung aus Abfällen: Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030**. UBA-FB EF001021. Texte 51/2018. Disponível em: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26\\_texte\\_51-2018\\_energieerzeugung-abfaelle.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-26_texte_51-2018_energieerzeugung-abfaelle.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.



FRICKE, Klaus; HEUBNER, Christof; HÜTTNER, Axel; TURK, Thomas; PEREIRA, Christiane; BAUER, Werner; BIDLINGMAIER, Werner. Vergärung von Bio- und Grünabfällen, Teil 2: Ausbaupotenzial bei der Vergärung von Bio- und Grünabfällen. **Müll und Abfall 01**, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2014. Disponível em: <http://www.MUELLundABFALL.de/MA.01.2014.021>. Acesso em: 12 out. 2022.

GERMAN CIRCULAR ECONOMY ACT. KrWG, 2012 – **Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen** (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG). 2012. Disponível em: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

HBS-2018. **Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre**. Hamburger Bildungsserver, Juni 2018. Autor: Dieter Kasang. Disponível em: <http://bildungsserver.hamburg.de/atmosphaere-und-treibhauseffekt/2069644/atmosphaere-strahlungshaushalt-artikel/>. Acesso em: 13 jun. 2018.

HUMER-HUBER, Marion; GEBERT, Julia; HILGER, Helene. Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. **Waste Management and Research**, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X07087977>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/5513044\\_Biotic\\_systems\\_to\\_mitigate\\_landfill\\_methane\\_emissions](https://www.researchgate.net/publication/5513044_Biotic_systems_to_mitigate_landfill_methane_emissions). Acesso em: 12 out. 2022.

ICHA, Petra; LAUF, Thomas; KUHS, Gunter. **Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021**, Umweltbundesamt. 2022. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-der-spezifischen-kohlendioxid-8>. Acesso em: 12 out. 2022.

IPCC, 2006. Intergovernmental Panel on Climate Change, **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme [EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (eds)]. Japan, 2006. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer\\_2006GLs.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/support/Primer_2006GLs.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change, **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 5, Chapter 3, 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 12 out. 2022.

IPCC, 2013. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Groups I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

IPCC, 2020. Intergovernmental Panel on Climate Change, **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. 2020. Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5\\_Volume5/IPCC\\_Waste\\_Model.xls](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/IPCC_Waste_Model.xls). Acesso em: 12 out. 2022.

KLIMAWANDELBLOGGER, 2018. **Klimawandelblogger, Klimawandel**, 2018. Disponível em: <http://klimawandelsanderbessems.blogspot.com/2018/04/dernaturliche-treibhauseffekt-und-die.html>. Acesso em: 06 jul. 2018.

LANDFILL DIRECTIVE. **1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste**. 1999. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/links/landfill-directive-1999-31-ec>. Acesso em: 12 out. 2022.

LUA, 2004. **Materialien Band 65, Arbeitshilfe Deponiegas**. A Konkretisierung der Deponiegasüberwachung gemäß DepSüVO einschließlich Darstellung der



eingesetzten Mess- und Auswertverfahren incl. der Fehler- und Grenzwertbetrachtungen. Preparado por G. Rettenberger. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, 2004. Disponível em: [https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/luaf/mat65\\_web.pdf](https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/luaf/mat65_web.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

MPI, 2018. **Max-Planck-Institute for Meteorology, Wie funktioniert der Treibhauseffekt.** 2018. Disponível em: <http://www.mpimet.mpg.de/kommunikation/fragen-zu-klima-faq/wie-funktioniert-der-treibhauseffekt/>. Acesso em: 12 out. 2022.

Öko-Institut / FEU, 2014. **Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft.** Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz; Ufoplanvorhaben 3708 31 302. 2014. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzpotenziale-der-abfallwirtschaft>. Acesso em: 22 jun. 2018.

PBL, 2019. **Trends in global CO2 and total GHG emissions Summary of the 2019 Report** J.G.J. Olivier and J.A.H.W. Peters, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency the Hague, 2019 PBL publication number: 4004. 2019. Disponível em: [https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-summary-of-the-2019-report\\_4004.pdf](https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2019-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-summary-of-the-2019-report_4004.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

RETENBERGER, Gerhard; HAUBRICH, E.; SCHNEIDER, R. **Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Berechnung der Methanemissionen aus Deponien, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes.** Berlin, 2014. Disponível em: [www.Umweltbundesamt.de](http://www.Umweltbundesamt.de). Acesso em: 12 out. 2022.

RETENBERGER, Gerhard; MEZGER, H. **Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen – Leitfaden Deponiegas –.** Materialien zur Altlastenbearbeitung, 10, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 1992. Disponível em: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/29966>. Acesso em: 12 out. 2022.

SCHEUTZ, Charlotte; KJELDSSEN, Peter; BOGNER, J. E.; VISSCHER, A. de; GEBERT, Julia; HILGER, Helene A.; HUBER-HUMER, Marion; SPOKAS, K. Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management and Research**, v. 27, n. 5, p. 409-455, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X09339325>. Disponível em: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/microbial-methane-oxidation-processes-and-technologies-for-mitiga>. Acesso em: 12 out. 2022.

STATISTA, 2019. **Weltweite Zementproduktion im Jahr 2018**, Statista GmbH, Johannes-Brahms-Platz 1, Hamburg, 2019.

STATISTA, 2022. **Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2021.** Statista GmbH, Johannes-Brahms-Platz 1, Hamburg, 2022. Disponível em: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>. Acesso em: 12 out. 2022.

UBA, 2016. **CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe.** Kristina Jührich Fachgebiet Emissionssituation (I 2.6) Umweltbundesamt, Dessau, 2016. Disponível em: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren\\_fur\\_fossile\\_brennstoffe\\_korrektur.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

UBA, 2014. **Climate and greenhouse effect.** German Environment Agency (Umweltbundesamt – UBA), September 2014. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/climate-energy/climate-change/climate-greenhouse-effect>. Acesso em: 12 out. 2022.



UBA, 2013. **Methanemissionen von Deponien und Leitfaden zur Deponiebelüftung als förderfähige Klimaschutzmaßnahme.** Umweltbundesamt, Workshop "Deponiebelüftung als Klimaschutzmaßnahme", 2013. Disponível em: [http://www.ifas-hamburg.de/PDF/03Butz\\_UBA.pdf](http://www.ifas-hamburg.de/PDF/03Butz_UBA.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

UBA, 2015. **Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 206 33 326, 3709 44 320 UBA-FB 002084** Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen von C. Cuhls, B. Mühl, J. Clemens; gewitra Ingenieurgesellschaft für Wissenstransfer mbH, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau, 2015. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-der-emissionssituation-bei-der>. Acesso em: 12 out. 2022.

UBA, 2019. **Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018.** p. Icha, Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik Umweltbundesamt. Climate Change 10/2019. Dessau, 2019. Disponível em: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10\\_cc\\_10-2019\\_strommix\\_2019.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

UBA, 2020. **Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2020.** Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018 Umweltbundesamt - UNFCCC-Submission. Climate Change 22/2020. Dessau, 2020. Disponível em: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change\\_22-2020\\_nir\\_2020\\_de.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_22-2020_nir_2020_de.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

UBA, 2022. **Treibhausgas-Emissionen in Deutschland.** Die Treibhausgas-Emissionen in Deutschland sind 2021 gegenüber dem Vorjahr um 4,5 Prozent gestiegen. Das entspricht einer Minderung um 38,7 Prozent im Vergleich zum internationalen Referenzjahr 1990. 2022. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>. Acesso em: 12 out. 2022.

US-EPA, 2022. **Understanding Global Warming Potentials.** 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>. Acesso em: 12 out. 2022.

VDZ, Hrsg., 2017. **Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2017.** Düsseldorf, 2018. Disponível em: <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2017>. Acesso em: 12 out. 2022.

VDZ, Hrsg., 2019. **Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019.** Düsseldorf, 2019. Disponível em: [www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2019](http://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2019). Acesso em: 12 out. 2022.

WEISCHET, Wolfgang; ENDLICHER, Wilfried., 2008. **Einführung in die Allgemeine Klimatologie.** Studienbücher der Geographie. 7th ed. Stuttgart: Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung Berlin, 2008. Disponível em: [https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783443071486/Weischet\\_Einfuehrung\\_in\\_die\\_Allgem\\_Klim](https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783443071486/Weischet_Einfuehrung_in_die_Allgem_Klim). Acesso em: 12 out. 2022.

