



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, ATUARIAIS E
CONTABILIDADE
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO
CURSO DE ADMINISTRAÇÃO

MATEUS PINTO DE LIMA

**ECONOMIA CIRCULAR NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO
BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS.**

FORTALEZA

2023

MATEUS PINTO DE LIMA

**ECONOMIA CIRCULAR NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO
BIOGÁS DE ATERROS SANITÁRIOS.**

Monografia apresentada ao curso de Administração da Faculdade de Economia, Administração, Atuária, Contabilidade e Secretariado Executivo, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Administração.

Orientador: Prof. Dr. Marcia Zabdiele Moreira.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D32e de Lima, Mateus Pinto.
Economia Circular na gestão de resíduos sólidos no Brasil : oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários. / Mateus Pinto de Lima. – 2023.
71 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Curso de Administração, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Marcia Zabdiele Moreira.
1. Economia circular. 2. Biogás. 3. Recuperação energética. 4. Energia sustentável. 5. RSU. I. Título.
CDD 658
-

AGRADECIMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso, foi essencial a colaboração de diversas pessoas, para as quais expresso minha gratidão.

Primeiramente, quero agradecer a Deus, por ter me dado sabedoria, paciência e capacidade. Sou imensamente grato ao meu pai José Uilson e minha mãe Kadja, já que sem o apoio dos quais minha formatura não seria possível.

Agradeço aos meus amigos Luan, Lucas e Jônata, por me servirem de motivação e descontração nos momentos difíceis e pela compreensão quando tive que me ausentar para me dedicar ao desenvolvimento do trabalho. Ademais, sou grato ao meu colega de turma e amigo Lyndemberg, por estar ao meu lado durante todo o curso, e pelo compartilhamento de conhecimentos durante o desenvolvimento do trabalho. Nós dois sabemos o quão árdua foi a jornada até aqui, e mesmo nos momentos mais difíceis, apoiamos-nos e não pensamos em desistir.

A todos os meus colegas do curso, meus agradecimentos. Essas pessoas foram importantíssimas na minha jornada na faculdade, desde a formação de grupos nos trabalhos e companheirismo, até os momentos de descontração durante os intervalos e fora do ambiente da Universidade.

À professora Márcia Zabdiele, sou grato por aceitar ser minha orientadora e pela sua colaboração, mesmo diante da grande demanda de diferentes orientandos, que foi essencial para a entrega do trabalho.

Aos membros da banca examinadora, os professores Daniel Barboza e Vicente Melo, agradeço pela participação e por suas sugestões de melhoria durante o processo de correções finais para a efetiva entrega do trabalho.

Por fim, agradeço aos professores do curso de Administração, pelos seus ensinamentos, que impactam muito além das simples notas expressas em números no histórico escolar.

MATEUS PINTO DE LIMA

ECONOMIA CIRCULAR NA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL:
OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
DE ATERROS SANITÁRIOS

Monografia apresentada ao curso de
Administração da Faculdade de Economia,
Administração, Atuária, Contabilidade e
Secretariado Executivo, da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Administração.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Marcia Zabdiele
Moreira

Aprovada em ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Marcia Zabdiele Moreira (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Daniel Barboza Guimarães
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Vicente Sales Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos, uma preocupação social e ambiental, motiva a busca por soluções eficientes. Nesse cenário, a Economia Circular surge como abordagem para reintegrar os resíduos à economia, transformando-os em recursos de valor. Inserido neste contexto, o biogás de aterros sanitários é uma opção promissora para a recuperação energética dos resíduos no Brasil, mas enfrenta desafios em seu desenvolvimento. Diante disso, o presente estudo tem, portanto, o objetivo de analisar as oportunidades e desafios da aplicação da economia circular por meio do aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários no Brasil. Para tal, se utiliza metodologia de pesquisa de revisão bibliográfica, a partir de periódicos e livros e pesquisa documental com análise de conteúdo, por meio de documentos governamentais e dados setoriais. Verificou-se um cenário atrativo para o desenvolvimento do mercado de biogás de aterros sanitários no país, que possui um vasto potencial explorado de maneira incipiente, e, em contrapartida, o enfrentamento de desafios multifacetados, como a deficiência em incentivos e políticas claras e específicas para o setor, além de incertezas quanto à viabilidade econômica dos projetos. Desta forma, apesar de promissor, o biogás necessita da implementação de medidas que incentivem a sua produção e utilização de forma mais ampla e efetiva. Embora o Brasil tenha um potencial expressivo nesse campo, é crucial superar obstáculos estruturais e regulatórios para efetivamente capitalizar essas oportunidades.

Palavras-chave: economia circular; biogás; recuperação energética; energia sustentável; RSU; WTE.

ABSTRACT

The growing generation of solid waste, a social and environmental concern, motivates the search for efficient solutions. In this scenario, the Circular Economy emerges as an approach to reintegrate waste into the economy, transforming them into valuable resources. Within this context, landfill biogas stands out as a promising option for energy recovery from waste in Brazil, but it faces challenges in its development. Therefore, this study aims to analyze the opportunities and challenges of applying the circular economy through the energy utilization of landfill biogas in Brazil. To do so, it employs a research methodology involving literature review and documentary research with content analysis, utilizing journals, books, government documents, and sectoral data. An appealing scenario for the development of the landfill biogas market in the country was identified, with significant untapped potential. However, multifaceted challenges, such as a lack of incentives and clear, specific policies for the sector, as well as uncertainties regarding the economic viability of projects, need to be addressed. Thus, despite its promise, biogas requires the implementation of measures to encourage its production and widespread use. While Brazil holds substantial potential in this field, overcoming structural and regulatory obstacles is crucial to effectively capitalize on these opportunities.

Keywords: circular economy; biogas; energy recovery; sustainable energy; MSW; WTE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Aterro Sanitário.....	13
Figura 2 - Matriz Energética do Brasil.....	20
Gráfico 1 - Composição dos RSU no Brasil.....	12
Gráfico 2 – Relação entre o número de plantas e volume de biogás produzido no Brasil.....	33
Quadro 1 – Oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	A gestão de resíduos sólidos no Brasil e o aproveitamento energético na Economia Circular.....	14
2.1.1	A produção de resíduos sólidos no Brasil.....	14
2.1.2	A gestão de resíduos sólidos.....	18
2.1.3	A economia circular.....	19
2.1.4	A geração de energia por meio dos resíduos sólidos.....	22
2.2	Políticas públicas e regulamentações governamentais na geração de energia através dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	26
2.3	Oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros no Brasil	33
3	METODOLOGIA.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos consiste em uma das características dos animais. Via de regra, os animais produzem resíduos biodegradáveis, os quais são de simples decomposição, sendo transformados em nutrientes por outros organismos, devolvendo ao solo parte dos nutrientes que lhe foram retirados, em um ciclo ecológico que sustenta a sobrevivência de milhões de espécies. O ser humano, por sua vez, integrava-se à mesma dinâmica. Mudanças históricas, entretanto, tornaram os resíduos gerados por ele um problema grave para o meio ambiente e sociedade, para o qual ainda não fora encontrada uma solução permanente (Cardoso; Cardoso, 2016).

A correlação entre o progresso econômico e a produção de resíduos é clara: à medida que um país se torna mais próspero, a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados aumenta. Nesse sentido, o crescimento do poder de compra, juntamente com o aumento populacional e o consumo crescente de produtos descartáveis, contribuem para a problemática do esgotamento acelerado dos aterros sanitários e a poluição decorrente da disposição inadequada (Dias, 2012).

A falta de critérios na industrialização, juntamente com o aumento da população e o intenso processo de urbanização diante da mudança no comportamento humano, levou ao esgotamento dos recursos naturais. Tais fatores resultaram no surgimento de novas necessidades relacionadas a produtos, o que, por sua vez, acarretou o aumento da geração de resíduos, intensificando assim os problemas ambientais (Pozzetti; Caldas, 2019).

Conforme o relatório do World Bank Group, ou Banco Mundial, denominado What a Waste 2.0, a nível mundial, cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos são produzidas anualmente. Impulsionado pelo crescimento populacional, urbanização e mudanças nos padrões de consumo, a previsão é que, até 2050, tal número chegue a 3,4 bilhões de toneladas, o que representa um aumento de quase 70% (Kaza *et al.*, 2018).

Para lidar com o aumento de resíduos e mitigar seus impactos negativos, é urgente a implementação de sistemas de destinação apropriados. Além de impulsionar a transição para economias circulares e com baixas emissões de carbono, as mudanças climáticas assumem prioridade no setor de resíduos. Diante dos avanços atuais, a gestão de resíduos tende a se tornar uma indústria altamente orientada por dados, desempenhando papel central no futuro modelo econômico, fundamentado na circularidade e na recuperação de bens, materiais, químicos e energia (ISWA, 2022). A Economia Circular, almejada por diversos países, não só proporciona oportunidades econômicas e otimização de recursos, mas também evita os

impactos prejudiciais do descarte inadequado para a saúde pública e o meio ambiente (Silva, Capanema, 2019).

O setor de gestão de resíduos sólidos tem a capacidade de reduzir suas emissões diretas ao tratar resíduos orgânicos, empregando métodos como digestão anaeróbica e usinas de compostagem, além de adotar medidas para captura de gás metano em aterros sanitários, utilizado na produção de combustíveis, o que contribui, ao mesmo tempo, para a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE). As usinas de tratamento térmico e biológico, como incineração e digestão anaeróbica, podem, ainda, gerar eletricidade, apoiando assim a eletrificação dos sistemas de energia (ISWA, 2022).

No Brasil, é identificado um potencial significativo na produção de biogás, um combustível proveniente da biodigestão de matéria orgânica, ou digestão anaeróbia, como resíduos e efluentes. Esse gás pode ser empregado na geração de energia elétrica, térmica ou na produção de biometano, um combustível comparável ao gás natural. Essa fonte renovável de energia atende à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a segurança energética e o acesso descentralizado aos serviços de energia. Além disso, sua aplicação promove a valorização de resíduos e efluentes, melhorando as condições ambientais em áreas rurais e urbanas (Brasil, 2016).

Tendo em vista a preocupação com o atual cenário da produção dos resíduos sólidos, caracterizado pelo crescente acúmulo e descarte incorreto, resultando em sérios problemas ambientais, observa-se que diversos países têm incorporado em suas políticas públicas medidas para reduzir a geração de resíduos, incentivando a promoção da Economia Circular (EC), por meio de práticas como reuso, reciclagem e, quando estes são inviáveis, o aproveitamento energético. Apesar dos países desenvolvidos enfrentarem desafios na gestão de resíduos, essas dificuldades são ainda mais acentuadas em nações em desenvolvimento, como é o caso do Brasil (Silva, Capanema, 2019).

No cenário brasileiro, destaca-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Com o intuito de abordar a problemática dos resíduos desde sua origem, a política estabelece a responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos, promovendo a logística reversa e adotando o princípio do poluidor-pagador, que impõe aos fabricantes ou importadores a responsabilidade por todo o ciclo de produção, incluindo o gerenciamento dos resíduos resultantes do descarte de embalagens ou produtos (Wirth; Oliveira, 2016). O artigo 9º da Lei, que serve como ponto de partida para a gestão apropriada dos resíduos sólidos, estabelece uma ordem de prioridade de ações a serem seguidas: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente

adequada dos rejeitos (Brasil, 2022c).

Instituída pela Lei nº 12.305/10 e seu Decreto Regulamentador, a PNRS possui como um de seus objetivos a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias apropriadas para minimizar os impactos ambientais associados à gestão e disposição de resíduos (art. 7º, IV). Além disso, a legislação prevê a recuperação e o aproveitamento energético como alternativas para atingir esse propósito (art. 7º, XIV). A recuperação energética é considerada uma opção para a destinação final ambientalmente adequada (art. 9º, § 1º), proporcionando uma alternativa eficaz para o aproveitamento de materiais que, devido a limitações técnicas ou econômicas, não são passíveis de reciclagem. Esses materiais, atualmente classificados como rejeitos, são encaminhados para unidades de disposição final. (Brasil, 2022c).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos preconiza o aproveitamento energético e estabelece como princípio a destinação final ambientalmente adequada para os resíduos que não podem mais ser reaproveitados. Nesse contexto, é recomendável a separação da fração orgânica para otimizar sua utilização e diminuir a carga nos aterros, contribuindo para prolongar a vida útil desses locais. No entanto, considerando que os aterros são a opção mais econômica para a destinação de resíduos no país e que sua utilização tende a aumentar com a eliminação dos lixões, a coleta e aproveitamento dos gases provenientes dos aterros representam uma significativa oportunidade para a produção de biogás (ABiogás, 2023).

Mediante os desafios críticos na gestão de resíduos sólidos no Brasil, que incluem a infraestrutura inadequada e disposição ineficiente, torna-se necessário o desenvolvimento de soluções inovadoras que visem mitigar os impactos ambientais causados. O aproveitamento energético dos resíduos sólidos, exerce, além desse papel, a diversificação da matriz energética do país que, apesar de ser composta em maior parte por fontes renováveis, está propensa à sazonalidade. Nesse contexto, o aproveitamento energético do biogás gerado pelos aterros sanitários, que são o principal destino dos resíduos no país, se apresenta como uma estratégia promissora, representando não apenas uma fonte de energia limpa, mas também uma oportunidade econômica e ambiental, pela ampliação da oferta energética e redução das emissões de gases de efeito estufa.

Diante do exposto, a questão que a presente pesquisa visa responder está na seguinte pergunta: Quais são as oportunidades e desafios da implementação da Economia Circular na gestão de resíduos sólidos no Brasil no que diz respeito ao aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários? À vista disso, o objetivo geral do estudo é: Investigar as oportunidades e desafios da implementação da Economia Circular na gestão de

resíduos sólidos no Brasil, com foco específico no aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários. Para tal, conta com os objetivos específicos: (i) Avaliar o panorama atual da gestão de resíduos sólidos no Brasil com vistas ao seu aproveitamento energético no contexto da Economia Circular; (ii) Analisar as regulamentações e políticas públicas relacionadas à geração de energia a partir dos resíduos sólidos no Brasil e sua efetividade; (iii) Identificar as oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários no Brasil e (iv) Investigar os possíveis benefícios da Economia Circular na gestão de resíduos sólidos no Brasil para a sociedade e meio ambiente, com enfoque na recuperação energética do biogás de aterros sanitários.

O método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento deste trabalho é de caráter descritivo e exploratório, com abordagem qualitativa. A respeito dos procedimentos utilizados, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema estudado e uma pesquisa documental com análise de conteúdo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A gestão de resíduos sólidos no Brasil e o aproveitamento energético na Economia Circular

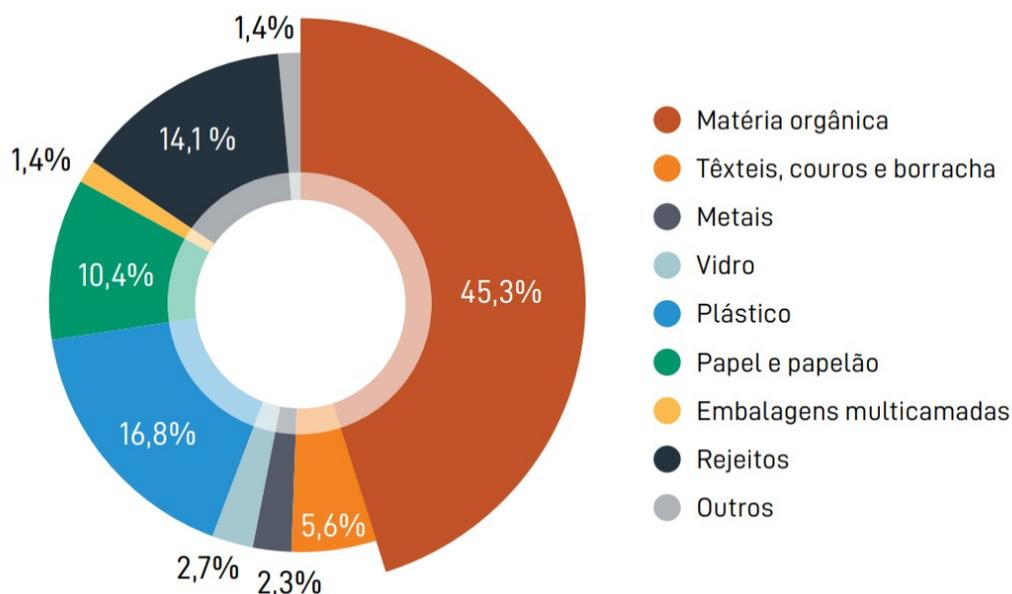
2.1.1 A produção de resíduos sólidos no Brasil

Conforme o relatório do World Bank Group, ou Banco Mundial, denominado What a Waste 2.0, a nível mundial, cerca de 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos são produzidas anualmente, com base no ano de 2016, que são os dados mais recentes. A região da Ásia Oriental e Pacífico foi responsável por cerca de 23% desse total, seguida pela Europa e Ásia Central (20%), Ásia Meridional (17%), América do Norte (14%), América Latina e Caribe (11%), África Subsaariana (9%) e Oriente Médio e África do Norte (6%). Segundo o relatório, os seis países que mais geram resíduos sólidos municipais são Estados Unidos, China, Índia, Brasil, Indonésia e Rússia (Kaza *et al.*, 2018).

A respeito da geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil, em 2022, o volume anual atingiu aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, equivalendo a 224 mil toneladas diárias. A região Sudeste liderou a geração de resíduos, contribuindo com cerca de 111 mil toneladas diárias, representando aproximadamente 50% da produção nacional. Na sequência, as regiões Nordeste e Sul contribuíram com 24,7% e 10,6%, respectivamente. As regiões Norte e Centro-Oeste tiveram participações menores, cada uma com 7,5%. Em termos de geração diária por habitante, observou-se uma variação regional significativa, sendo a região Sudeste a maior, com uma média de 1,234 kg por habitante por dia, enquanto a região Sul apresentou a menor média, com 0,776 kg por habitante por dia. Em relação à coleta de RSU, o país registrou 76,1 milhões de toneladas coletadas em 2022, alcançando uma cobertura de 93% (ABRELPE, 2022).

Como observado no Gráfico 1, a composição dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil é caracterizada pela predominância da matéria orgânica, que representa cerca de 45,3% do total. Os resíduos recicláveis secos constituem 35%, sendo compostos principalmente por plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%). Os rejeitos, abrangendo principalmente materiais sanitários, representam 14,1% do total. As demais frações incluem resíduos têxteis, couros e borrachas, correspondendo a 5,6%, e outros resíduos, com 1,4%, que englobam diversos materiais teoricamente sujeitos à logística reversa (ABRELPE, 2020).

Gráfico 1 - Composição dos RSU no Brasil



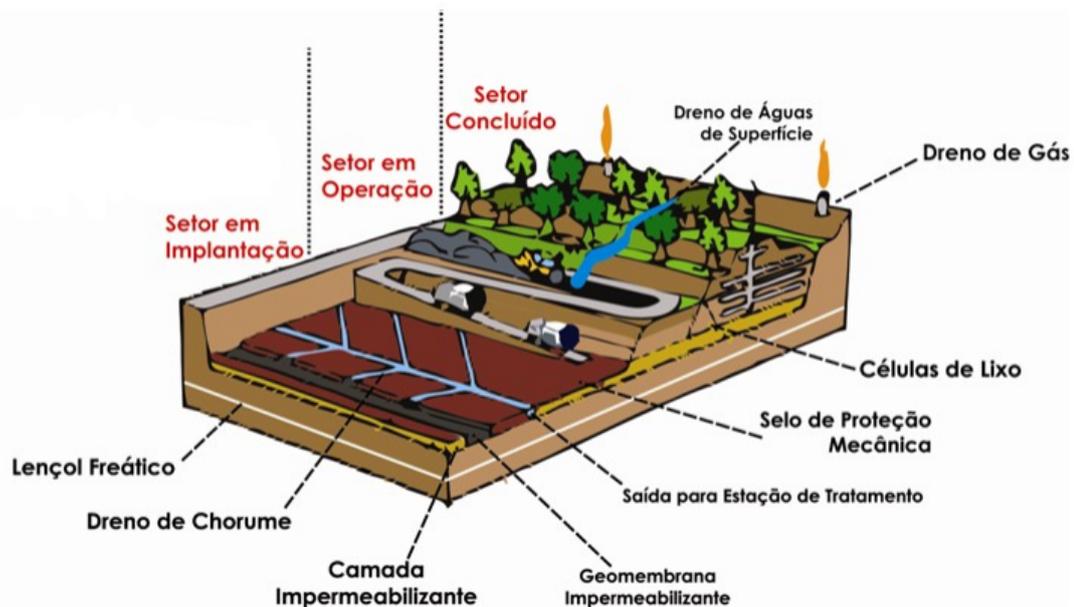
Fonte: Abrelpe (2020).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, no Brasil, a maior parcela dos resíduos sólidos urbanos coletados, correspondendo a 61%, é direcionada para aterros sanitários, totalizando 46,4 milhões de toneladas destinadas de forma ambientalmente adequada em 2022. No entanto, ainda persistem áreas de disposição inadequada, como lixões e aterros controlados em operação em todas as regiões do país, que recebem 39% do total de resíduos coletados. Essas áreas de destinação inadequada receberam um volume total de 29,7 milhões de toneladas em 2022 (ABRELPE, 2022).

A disposição dos RSU em aterros sanitários caracteriza-se pela compactação dos resíduos em camadas no solo, cobertas periodicamente com terra ou outro material inerte. Esse método visa promover a degradação natural e lenta dos resíduos por meio de processos biológicos até a mineralização da matéria biodegradável. A operação de um aterro sanitário requer cuidados especiais e o seguimento de técnicas específicas, desde a seleção e preparo da área até o monitoramento contínuo. Nesse sentido, é essencial evitar a contaminação das águas subterrâneas pelo chorume, um líquido gerado pela decomposição dos resíduos, e controlar a acumulação do biogás também produzido durante o processo. As principais características técnicas incluem a impermeabilização da base do aterro, um sistema de drenagem para o biogás, coleta de chorume e drenagem de águas pluviais para prevenir

instabilidades geotécnicas e reduzir a produção do líquido, como representado na Figura 1 (FEAM, 2012).

Figura 1 - Aterro Sanitário



Fonte: SEMARH (2015).

O Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, elaborado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, aponta para a falta de infraestrutura adequada para a coleta e tratamento de resíduos em muitos municípios brasileiros: em 2019, apenas 38,7% dos municípios possuíam serviço de coleta seletiva de resíduos sólidos. Além disso, o relatório destaca a falta de fiscalização e controle sobre a destinação final dos resíduos (Brasil, 2020a).

A má gestão de resíduos pode representar riscos para a saúde dos seres humanos, tais como a exposição a produtos químicos perigosos e doenças provenientes de água e alimentos contaminados. Além disso, a elevada produção de resíduos sólidos pode levar ao esgotamento de recursos naturais, como terra, água e energia, que são utilizados na produção e eliminação de resíduos (Kaza *et al.*, 2018). A falta de tratamento ou a disposição final precária dos resíduos provocam impactos de abrangências locais e globais, envolvendo aspectos sanitários, ambientais e sociais, sobretudo em países em desenvolvimento, onde os lixões são responsáveis pela poluição do ar, do solo e das águas, tais como a disseminação de doenças, a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais e a poluição do ar pelo gás metano (Brasil, 2017).

Quando os RSU são descartados em lixões a céu aberto, por exemplo, podem contaminar o solo e a água subterrânea com substâncias tóxicas, como metais pesados e produtos químicos. Outro impacto ambiental negativo da falta de tratamento ou disposição final incorreta dos RSU é a poluição do ar. A queima de resíduos em lixões ou em incineradores pode liberar gases tóxicos na atmosfera, como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, que podem causar problemas respiratórios e cardiovasculares em seres humanos e animais. Outra possível problemática gerada consiste na proliferação de vetores de doenças, como mosquitos e ratos, que podem transmitir doenças. A presença de lixões também pode afetar a qualidade de vida das comunidades locais, causando mau cheiro, atraindo insetos e roedores, além de afetar a paisagem (Rucevska *et al.*, 2015).

Os impactos da destinação inadequada dos RSU geram custos financeiros para a sociedade, como despesas com saúde pública, perda de produtividade, danos ambientais e prejuízos econômicos. A inércia na gestão de resíduos é onerosa, sendo o seu custo cerca de três a cinco vezes maior do que o valor necessário para investimento e custeio de soluções adequadas. Ou seja, a falta de investimento em soluções adequadas para a gestão de resíduos sólidos pode gerar custos financeiros ainda maiores no futuro. Por outro lado, a gestão adequada pode gerar benefícios financeiros significativos, como a redução de custos com saúde pública, a geração de empregos e renda na cadeia produtiva da reciclagem e a redução de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a gestão adequada de resíduos pode contribuir para a transição para uma economia circular, na qual os resíduos são vistos como recursos valiosos e são reintroduzidos na cadeia produtiva (ABRELPE, 2022).

De acordo com a United Nations Environment Programme – UNEP, ou Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, calcula-se que o mercado global de resíduos, envolvendo desde a coleta até a reciclagem, movimentava cerca de 410 bilhões de dólares anualmente (UNEP, 2011). No Brasil, o gerenciamento de resíduos representa um ônus considerável nas despesas de algumas cidades, chegando a representar até 20% das despesas correntes das prefeituras brasileiras, embora os valores apresentem considerável dispersão. Em média, a participação desse custo é de aproximadamente 4% (Brasil, 2013). Além disso, somente 44,8% dos municípios realizam a cobrança pelos serviços, e o valor arrecadado subsidia apenas cerca de 57% dos custos, o que indica uma fragilidade na sustentabilidade financeira do setor (Brasil, 2019; Silva; Capanema, 2019).

Conforme dados da Abrelpe (2022), os municípios destinaram pouco mais de R\$ 28 bilhões para os serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2021, que englobam a coleta, transporte, destinação final e serviços gerais de

limpeza urbana, que equivale a aproximadamente R\$ 10,95 por habitante/mês. A região Sudeste é a que mais investe nesses serviços, com R\$ 15,281 bilhões, o que representa 54,5% do total investido no país. Em seguida, aparece a região Nordeste, com R\$ 6,342 bilhões (22,6% do total), seguida pela região Sul, com R\$ 3,097 bilhões (11,0% do total), Centro-Oeste, com R\$ 1,367 bilhão (4,9% do total), e Norte, com R\$ 1,946 bilhão (6,9% do total). Ademais, estima-se que, devido à presença de lixões e aterros controlados, o gasto total com saúde no país para lidar com os problemas resultantes da destinação inadequada de resíduos tenha atingido a marca de 1,85 bilhão de dólares entre 2016 e 2021.

2.1.2 A gestão de resíduos sólidos

Desde o início da nossa história, o homem gerou resíduos sólidos e os descartou de diversas maneiras, como lixões improvisados ou incineração. Após a Revolução Industrial, a quantidade de bens utilizados e descartados pelas pessoas aumentou tão dramaticamente que se tornou necessário que as cidades fornecessem aterros e incineradores, ao estilo antigo, para a eliminação de resíduos. A gestão de resíduos sólidos urbanos tornou-se problemática em meados do século XX, à medida que o consumo de bens e a geração correspondente de RSU registraram um aumento exponencial. Em resposta, os países mais avançados desenvolveram vários meios e tecnologias para lidar com os resíduos sólidos. Estas vão desde a redução de resíduos através da concepção de produtos e embalagens mais eficientes até a reciclagem de materiais utilizáveis, compostagem de resíduos orgânicos, combustão com recuperação energética e aterro sanitário, que evita emissões aquosas e gasosas para o ambiente, no qual os gases podem também serem utilizados para recuperação energética (Kalogirou, 2017).

Em conformidade com a ABNT (2004, p.1), os resíduos sólidos podem ser definidos como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 10004:2004, os resíduos sólidos são classificados em dois grupos: perigosos e não perigosos. Os resíduos perigosos são aqueles que apresentam periculosidade por características que incluem inflamabilidade,

corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Já os resíduos não perigosos são subdivididos em não inerte e inerte, de acordo com suas características físicas, químicas e biológicas. (ABNT, 2004). Os resíduos sólidos podem ser categorizados como municipais (originados em residências e estabelecimentos comerciais), industriais, de construção e demolição, entre outros. Os RSU constituem o material mais heterogêneo do mundo, abrangendo praticamente todos os tipos de materiais utilizados pela humanidade, tais como alimentos e outros orgânicos naturais, papéis, plásticos, tecidos, couro, metais, vidro, entre outros (Kalogirou, 2017).

O tratamento de resíduos sólidos urbanos compreende uma série de procedimentos físicos, químicos e biológicos, destinados a diminuir a carga poluidora no meio ambiente, mitigar os impactos sanitários adversos e viabilizar benefícios econômicos por meio do aproveitamento dos resíduos. De maneira geral, existem quatro sistemas fundamentais de tratamento e disposição de RSU, centrados na triagem, tratamentos biológicos (aeróbios, como compostagem, e anaeróbios, como digestão anaeróbia), incineração e aterros sanitários. Os processos físicos predominam na triagem, os biológicos ocorrem nos tratamentos biológicos, os físico-químicos se manifestam na incineração e no tratamento térmico e, por fim, os processos físico-químicos e biológicos se interrelacionam nos aterros sanitários, especialmente no momento em que essas unidades funcionam como biodigestores (BNDES, 2014).

Ao longo do tempo, os processos de tratamento de RSU passaram por evoluções significativas. As unidades de triagem deram lugar a tecnologias mais avançadas, como os tratamentos mecânicos-biológicos, que geram matéria-prima para reciclagem de inorgânicos e compostos orgânicos destinados à compostagem ou digestão anaeróbia. O tratamento biológico também progrediu, incorporando técnicas mais eficientes de compostagem e biodigestores anaeróbios, que produzem compostos orgânicos, adubos e até mesmo energia por meio do metano gerado na decomposição dos resíduos orgânicos. As unidades de incineração evoluíram para tecnologias que permitem o tratamento térmico dos resíduos, com geração de energia elétrica, calor ou ciclos combinados. Aterros sanitários, sem geração de energia, avançaram tecnologicamente e podem ser considerados biodigestores anaeróbios, capturando biogás para a recuperação energética (BNDES, 2014).

2.1.3 A economia circular

O modelo tradicional de produção linear, pautado na lógica extrair-transformar-

descartar, originado na Revolução Industrial, demonstra estar exaurido e ambientalmente insustentável. Esse modelo contribui para o esgotamento de recursos naturais, poluição e desperdício, no qual os resíduos são gerados, acumulados e simplesmente descartados, resultando na degradação ambiental em busca do crescimento econômico (Silva; Capanema, 2019; Wijkman; Skånberg, 2015). A partir dos avanços tecnológicos trazidos pelo atual modelo econômico, especialmente nas áreas urbanas, observam-se progressos significativos na qualidade de vida das pessoas. No entanto, esse sistema enfrenta desafios críticos nos aspectos econômico, social e ambiental, evidenciados por questões persistentes como poluição, inclusão social e mobilidade urbana (Enel, 2023).

O reconhecimento dos limites dos recursos naturais do planeta Terra e a necessidade de buscar um modelo sustentável, que preserve esses recursos e encare a poluição e a produção de resíduos como ameaças, impulsionaram a busca por alternativas ao sistema econômico atual (Pimenta; Poggi; Firmino, 2018). Nesse contexto, as ações relacionadas à economia circular ganham cada vez mais destaque, representando uma ruptura do modelo econômico linear. O novo modelo prioriza a redução, reutilização e reintrodução eficiente dos materiais ao longo da cadeia produtiva, diminuindo a pressão sobre os recursos naturais, as emissões de gases de efeito estufa, o desperdício, a geração de rejeitos e a poluição (Brasil, 2022c).

A Economia Circular (EC) é um sistema econômico que substitui o conceito de "fim de vida" pela redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais em todas as etapas da produção, distribuição e consumo. Opera em diferentes níveis, desde micro (produtos, empresas, consumidores) até macro (cidade, região, nação), visando alcançar o desenvolvimento sustentável e criar qualidade ambiental, prosperidade econômica e equidade social para as atuais e futuras gerações. Este modelo é viabilizado por novos modelos de negócios e consumidores responsáveis (Kirchherr; Reike; Hekkert, 2017). Na EC, os resíduos e a poluição são vistos como recursos e a meta é manter produtos, componentes e materiais em constante uso, eliminando o desperdício e reduzindo a necessidade de extrair novos recursos, em um sistema regenerativo. Essa abordagem envolve inovação em design, novos modelos de negócios e tecnologias de recuperação e reciclagem (Irlanda, 2020).

Consoante com a Ellen MacArthur Foundation (2015), Economia Circular apoia-se em três princípios, a saber:

1. Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis: o sistema circular, ao demandar recursos, faz escolhas sensatas, optando por tecnologias e processos que

utilizam recursos renováveis ou apresentam melhor desempenho. Além disso, estimula fluxos de nutrientes e cria condições para a regeneração, por exemplo, do solo;

2. Otimizar o rendimento de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico: significa projetar para remanufatura, renovação e reciclagem, garantindo a continuidade da circulação de componentes e materiais técnicos, com o objetivo de contribuir para a economia;
3. Estimular a efetividade do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas desde o princípio: engloba a redução de danos em sistemas e áreas como alimentos, mobilidade, habitação, educação, saúde e entretenimento, bem como a gestão de externalidades, como uso da terra, ar, água, poluição sonora e liberação de substâncias tóxicas.

A aplicação dos princípios da Economia Circular pode trazer diversos benefícios. Um deles é a redução de resíduos, que pode ajudar a reduzir a pressão sobre os aterros sanitários e o meio ambiente. Além disso, a EC promove a utilização eficiente dos recursos, evitando o desperdício e reduzindo os custos de produção. Outro benefício é a estimulação da inovação. Ao promover a sustentabilidade e a eficiência, a EC pode incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias e modelos de negócios, o que pode levar a novas oportunidades de negócios e a uma maior competitividade das empresas. Também podem ser criadas novas oportunidades de emprego, especialmente em setores como a reciclagem, reparação e reutilização de materiais. Ademais, pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, promovendo a utilização de fontes de energia renovável e a redução do consumo de energia. Em resumo, a aplicação dos princípios da economia circular pode trazer benefícios ambientais, econômicos e sociais (G20 Italia, 2021).

Em contrapartida, para a efetiva implementação da economia circular, é imperativo o estabelecimento de mercados funcionais de materiais secundários. Isso se deve ao fato de que, em muitos casos, a produção de produtos a partir de materiais virgens é mais economicamente viável do que a adoção de soluções de reutilização ou o uso de matérias-primas recuperadas. Decisões políticas e a introdução de instrumentos econômicos podem impulsionar a criação desses mercados, como custos embutidos, taxas sobre carbono e poluição, e tarifas para ecomodulação. Nesse contexto, a gestão eficiente de resíduos desempenha um papel crucial, oferecendo serviços essenciais nas fases de concepção, produção, montagem e distribuição, além de transformar resíduos em novos materiais e

combustíveis (ISWA, 2022).

No contexto do setor energético, a economia circular pode ser aplicada em toda a cadeia de valor da energia, desde a produção até o consumo. A recuperação de energia a partir de resíduos é uma das principais áreas de aplicação da EC no setor de energia. Além disso, a transição para uma economia circular pode ajudar a reduzir a dependência de combustíveis fósseis e a aumentar a segurança energética, ao mesmo tempo em que reduz as emissões de gases de efeito estufa (Hamwi; Lizarralde, 2021). Nesse cenário, a geração de energia através do lixo é uma forma de contribuir para a EC, uma vez que permite a recuperação de energia a partir de resíduos que, de outra forma, seriam descartados e inutilizados. Além disso, a recuperação energética pode ser combinada com outras práticas de economia circular, como a reciclagem e a reutilização de materiais, para maximizar a eficiência de recursos e minimizar a geração de resíduos (Pan *et al.*, 2015).

A transição energética é uma das soluções vitais para reduzir as emissões de dióxido de carbono. Uma grande proporção da poluição vem do consumo de energia tradicional. Nesse contexto, o uso de resíduos municipais como fonte de energia pode reduzir ainda mais as emissões de carbono (Tiwari *et al.*, 2023). A EC ainda traz benefícios indiretos para o setor de geração de energia renovável. A transição para uma economia circular pode ajudar a reduzir a demanda por matérias-primas virgens, que são necessárias para a produção de equipamentos de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas. A EC pode ajudar a maximizar o valor dos recursos naturais e minimizar o desperdício, o que é especialmente importante para a geração de energia renovável, que depende de recursos naturais limitados (USAID, 2021).

2.1.4 A geração de energia por meio dos resíduos sólidos

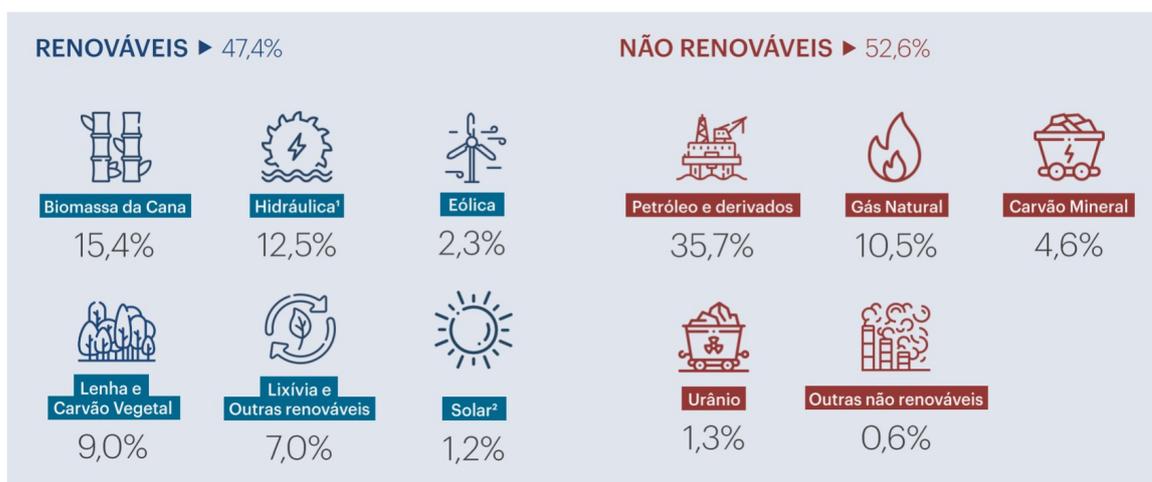
A energia provém de uma diversidade de fontes que compõem a chamada matriz energética. Esta representa o conjunto de fontes empregadas em um país ou globalmente para atender às necessidades de energia. Importante notar que os conceitos de matriz energética e matriz elétrica, embora possam ser confundidos, são distintos. Enquanto a matriz energética abrange as fontes utilizadas para diversas finalidades, como transporte e aquecimento, a matriz elétrica é composta pelas fontes destinadas exclusivamente à geração de energia elétrica. Desta maneira, pode ser afirmado que a matriz elétrica constitui uma parte da matriz energética (EPE, 2022).

A respeito da matriz energética global, de acordo com o BP Statistical Review of

World Energy 2020, o petróleo continua sendo o combustível dominante, com uma participação de cerca de 33%. O carvão e o gás correspondem, respectivamente a 27% e 24%. A hidroeletricidade representa 6% da matriz energética global, enquanto a energia nuclear representa 4%. As energias eólica, solar e biocombustíveis, correspondem a cerca de 4% da matriz energética global. Outras fontes de energia representam 1%. Desse modo, apenas cerca de 10% da matriz energética mundial é composta por fontes renováveis (BP, 2020).

O Brasil, por sua vez, possui uma matriz energética muito mais renovável do que o resto do mundo. Como exposto na Figura 2, com base no ano de 2022, cerca de 47,4% da matriz energética do país é composta por fontes de energia renováveis, em que as energias hidráulica, eólica e solar representam 12,5%, 2,3% e 1,2% da participação total, respectivamente. Além disso, a biomassa de cana representa 15,4%, a lenha e carvão vegetal 9% e a lixo e outras renováveis, 7% da matriz energética nacional. As fontes não renováveis são compostas pelo petróleo e derivados (35,7%), gás natural (10,5%), carvão mineral (4,6%), urânio (1,3%) e, por fim, as outras energias não renováveis (0,6%) (Brasil, 2023b).

Figura 2 - Matriz Energética do Brasil



Fonte: Brasil (2023b).

A predominância dos combustíveis fósseis enfrenta desafios crescentes, incluindo a volatilidade de preços, a perspectiva de redução na oferta a médio e longo prazo, além das preocupações ambientais. Nesse contexto, a luta contra as mudanças climáticas tem se intensificado, impulsionando a adoção cada vez maior de fontes de energia renovável (Milanez *et al.*, 2018). Embora as fontes renováveis ofereçam vantagens ambientais significativas, a sua utilização está atrelada à suscetibilidade do setor de energia a condições

climáticas extremas, como períodos de seca ou problemas nas safras de cana-de-açúcar. Dessa forma, a diversificação das fontes de energia emerge como uma estratégia crucial para a segurança energética do Brasil. A incorporação de tecnologias de recuperação energética de resíduos surge como uma solução estratégica, abordando simultaneamente a redução da carga orgânica nos efluentes, mitigando impactos ambientais e contribuindo para a diversificação da matriz energética por meio de uma fonte renovável (Brasil, 2016).

Com o crescimento da população urbana e do desenvolvimento econômico, a capacidade dos aterros sanitários existentes está sendo ultrapassada. Isso levou os governos a avaliarem alternativas como a redução da geração de resíduos, reciclagem e aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, de maneira a desviar o fluxo de resíduos que vai para os aterros. Nesse sentido, emerge o conceito de WTE (Waste-to-Energy), que consiste em uma tecnologia de tratamento térmico com aproveitamento energético que converte resíduos sólidos urbanos em energia elétrica ou térmica. O WTE se tornou uma das alternativas preferidas na maioria dos países da Europa do Norte, Japão e várias cidades dos EUA, e vem sendo adotada de forma crescente na China (Themelis, *et al.*, 2016).

A recuperação energética dos resíduos sólidos engloba processos como a digestão anaeróbia, a recuperação de gás de aterro sanitário, a incineração e o coprocessamento. Essa abordagem representa uma alternativa valiosa para otimizar materiais que não são viáveis para reciclagem, atualmente considerados rejeitos, os quais são direcionados para unidades de disposição final (Brasil, 2022c). Na perspectiva do setor energético, a geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos apresenta-se como uma opção atrativa. Além de ser uma fonte renovável, destaca-se por sua produção distribuída próxima aos centros de consumo, conferindo estabilidade ao sistema elétrico brasileiro, uma vez que não é uma fonte caracterizada como intermitente (Delfino, 2016).

As tecnologias WTE permitem a redução do volume de resíduos, o que diminui a necessidade de espaço para aterros sanitários e contribui para a preservação do meio ambiente. Além disso, permitem a geração de energia limpa, o que contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas, por meio da redução da emissão de gases de efeito estufa, uma vez que evitam a decomposição anaeróbica dos resíduos em aterros sanitários, que é uma das principais fontes de emissão de metano. Ademais, as tecnologias WTE podem gerar empregos em diversas áreas, desde a coleta e transporte de resíduos até a operação e manutenção das usinas de tratamento. Possibilitam, ainda, o aproveitamento de resíduos que antes eram considerados lixo, transformando-os em fonte de energia e/ou matéria-prima para outros processos industriais (World Energy Council,

2013).

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2050, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos apresenta um grande potencial para a geração de energia no Brasil. O documento destaca que o aproveitamento energético de RSU pode mitigar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado de resíduos, além de reduzir custos de produção de alimentos e produtos industrializados, expandir a vida útil das reservas de matéria-prima e energia, reduzir a demanda por esses recursos, reduzir o consumo e importações de diesel e melhorar a balança comercial (Brasil, 2017).

2.2 Políticas públicas e regulamentações governamentais na geração de energia por meio dos Resíduos Sólidos Urbanos

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, é uma lei brasileira que estabelece diretrizes e metas para a gestão adequada dos resíduos sólidos no país. De acordo com a lei, entende-se por disposição ambientalmente adequada a “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”. A PNRS busca promover a redução da geração de resíduos, o reaproveitamento e a reciclagem, além de incentivar a logística reversa e a responsabilidade compartilhada entre os diferentes atores envolvidos. A lei também prevê a participação da sociedade na gestão dos resíduos e a fiscalização por parte dos órgãos competentes (Brasil, 2010).

A PNRS previa a erradicação dos lixões no País até o ano de 2014 (Brasil, 2010). Entretanto, segundo a Abrelpe, entre o ano de 2010, ano de sanção da lei, até o ano de 2020, não foram identificadas iniciativas consistentes para promover o encerramento das unidades de destinação inadequada que ainda operam. Segundo estimativas da associação, tendo por base a manutenção do cenário vigente, os aterros controlados e lixões serão erradicados somente em 2075 (ABRELPE, 2020).

As normas da PNRS representam um avanço significativo na questão ambiental, ao impor a obrigação tanto à sociedade quanto ao Poder Público de encontrar destinos adequados para o lixo. Adicionalmente, ao atribuir valor econômico aos resíduos, a lei promove uma mudança no entendimento social sobre o que deve ser considerado "lixo" e destaca a importância das pessoas que trabalham com esses materiais (Pereira; Souza, 2017). A lei tem o potencial de reformular as práticas de gestão, introduzindo conceitos e obrigações a partir de uma visão abrangente dos resíduos. Anteriormente considerado como uma externalidade, o resíduo agora é oficialmente reconhecido como um potencial insumo para diversas cadeias produtivas (Wirth; Oliveira, 2016).

A PNRS estabelece a responsabilidade compartilhada entre os diversos atores sociais envolvidos na gestão de resíduos sólidos urbanos, incluindo produtores, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público, de forma a desonerar os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, a partir de responsabilidades atribuídas ao setor privado. Essa responsabilidade compartilhada pode

gerar oportunidades de negócios e empregos em diferentes setores, como a reciclagem, a coleta seletiva, a compostagem, a recuperação energética, entre outros. Além disso, a lei promove a economia circular, ao passo em que prevê a implementação de sistemas de logística reversa, que são responsáveis por garantir a destinação adequada dos resíduos sólidos, por meio da coleta seletiva, triagem, reciclagem e disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2022c).

A PNRS traz desafios para os três níveis de governo, para o setor produtivo, bem como para as organizações de catadores, ao estabelecer a obrigatoriedade de elaboração dos planos nacional, estaduais e municipais, dos planos de gerenciamento das empresas, dos acordos setoriais de logística reversa, além das metas para erradicação de lixões. Nesse sentido, a lei estimula o amadurecimento do diálogo entre os atores envolvidos, não apenas em uma perspectiva de proteção ao meio ambiente, mas, e especialmente, em uma abordagem de transformação de processos produtivos, de ecodesign e economia circular, de novos padrões e tecnologias para coleta, processamento e maximização da reciclagem (Zveibil, 2015).

No âmbito da recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, a PNRS exerce papel relevante. A política estabelece a prioridade para a utilização de tecnologias que permitam a recuperação energética dos resíduos, como a incineração e a produção de biogás a partir da decomposição dos resíduos orgânicos. Essas medidas têm como objetivo reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros sanitários e promover a geração de energia limpa e renovável. Ressalta-se, ainda, que a valorização energética dos RSU deve ser vista como uma alternativa complementar à redução, reutilização e reciclagem dos resíduos, que são as medidas prioritárias na gestão sustentável dos resíduos sólidos urbanos, estabelecidas no artigo 9º da Lei (Brasil, 2010; FBDS, 2015).

Entretanto, apesar de a PNRS estabelecer diretrizes para a gestão ao longo do ciclo de vida dos produtos, incluindo a logística reversa, não existe compreensão nem incentivos governamentais para desenvolver a economia circular dos resíduos sólidos urbanos com a recuperação de sua energia, não são definidas ações específicas para o desenvolvimento de uma economia de baixo carbono, economia circular ou economia verde inclusiva. Essas ações poderiam promover benefícios à sustentabilidade, como a redução da área territorial para disposição final dos RSUs, a geração de energia limpa a partir dos resíduos, a diminuição das emissões de GEEs pelo transporte e decomposição natural dos resíduos, a redução da contaminação de águas superficiais e subterrâneas, a preservação dos solos, a conservação da biodiversidade e a proteção da saúde humana, tanto de forma direta quanto indireta (Langer;

Nagalli, 2017).

Em concordância com Amaro e Verdum (2016), a PNRS passa por diferentes desafios na sua implementação, que incluem:

- a) Falta de infraestrutura: muitos municípios brasileiros ainda não possuem infraestrutura adequada para a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos, o que dificulta a implementação da PNRS.
- b) Falta de recursos financeiros: a implementação da PNRS requer investimentos significativos em infraestrutura, equipamentos e pessoal, o que muitas vezes não é possível para os municípios brasileiros, especialmente os de menor porte.
- c) Falta de capacitação técnica: a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos requerem conhecimentos técnicos específicos, que muitas vezes não estão disponíveis nos municípios brasileiros.
- d) Resistência de setores da sociedade: alguns setores da sociedade, como a indústria e o comércio, resistem à implementação da PNRS, especialmente no que se refere à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto.
- e) Falta de conscientização da população: a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos requerem a participação ativa da população, por meio da separação correta dos resíduos e da redução do consumo de materiais, mas muitas vezes a população não está consciente da importância dessas ações.

Segundo a Abrelpe, em 2022, o setor de gestão de resíduos sólidos no Brasil experimentou avanços significativos em termos normativos. O Decreto nº 10.936/2022 trouxe uma nova regulamentação para a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Além disso, o Decreto nº 11.043/2022 instituiu o Planares – Plano Nacional de Resíduos Sólidos, um instrumento crucial que estabelece estratégias, diretrizes e metas para o setor ao longo de 20 anos. Ambos os instrumentos reforçam os princípios e definições da PNRS vigentes há mais de uma década, proporcionando maior clareza e objetividade em sua aplicação. Essas medidas visam viabilizar a transição de um sistema linear de gestão de resíduos para uma abordagem mais circular, destacando o aproveitamento dos resíduos como recurso vital. Isso não apenas preserva o meio ambiente e melhora as condições de saúde, mas também impulsiona a economia, fomenta a geração de empregos e contribui para a agenda climática em todo o país (ABRELPE, 2022).

O Decreto nº 10.936 de 12 de janeiro de 2022, regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. O decreto substitui algumas legislações anteriores e dá ênfase na logística reversa. Para tal, cria o Programa Nacional de Logística Reversa, que tem o papel de

responsabilizar todos os setores da economia para a inserção de seus dados e resultados em um sistema único e padronizado, visando facilitar a compreensão e o acesso às informações a respeito da logística reversa nacional. Além disso, o decreto detalha a responsabilidade compartilhada, implementada de maneira individualizada e encadeada (Brasil, 2022a).

Instituído por meio do Decreto N° 11.043, de 13 de abril de 2022, o Planares estabelece diretrizes e estratégias para orientação das atividades de gestão de resíduos sólidos, que visam orientar para o alcance dos objetivos trazidos pela PNRS em suas diferentes interfaces, contemplando, além dos itens previstos como conteúdo mínimo, as demais ações necessárias para a consecução de tais objetivos. Essas diretrizes incluem a promoção da educação ambiental, a implementação da coleta seletiva, a ampliação da reciclagem, a redução da geração de resíduos, a melhoria da gestão dos resíduos da construção civil, a gestão dos resíduos de serviços de saúde, a gestão dos resíduos de agrotóxicos, a gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, a gestão dos resíduos de óleos lubrificantes, entre outras. Além disso, o plano apresenta diretrizes específicas para a recuperação e o aproveitamento energético dos resíduos sólidos, como a viabilização do aproveitamento energético dos gases gerados nas unidades de disposição final de rejeitos e o aumento da recuperação energética de resíduos em geral (Brasil, 2022c).

Com o objetivo de atender às diretrizes da PNRS de eliminar os lixões existentes e apoiar os municípios para soluções mais adequadas de destinação final dos resíduos sólidos, no ano de 2019, o Ministério do Meio Ambiente – MMA, institui o Programa Nacional Lixão Zero, que tem como objetivo acabar com os lixões em todo o Brasil e promover a gestão adequada dos RSU, por meio do fortalecimento da gestão integrada, coleta seletiva, reciclagem, logística reversa, recuperação energética e disposição ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2019). O programa Lixão Zero marca um passo significativo na implementação da PNRS. Um dos seus principais objetivos é impulsionar a geração de energia a partir de resíduos sólidos, buscando ajustar o ambiente regulatório para estimular projetos nessa área e adotar medidas necessárias para potencializar sua recuperação e integração na matriz energética do país, visando reverter o atual cenário de subaproveitamento no país (SINIR, 2023).

Consoante ao que está estabelecido no programa Lixão Zero, a recuperação energética dos resíduos ainda enfrenta alguns desafios no Brasil. Um dos principais desafios é a falta de infraestrutura adequada. A maioria dos municípios brasileiros ainda não possui usinas de recuperação energética, o que dificulta a implementação dessa tecnologia. Outro desafio é a falta de incentivos para a recuperação energética dos resíduos. Ainda não há

políticas públicas claras e efetivas para incentivar a geração de energia a partir dos resíduos sólidos, o que desestimula os investimentos nessa área. Além disso, a recuperação energética dos resíduos ainda enfrenta resistência de alguns setores da sociedade, que acreditam que essa tecnologia pode ser prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana (Brasil, 2019).

Vale pontuar que, em 2020, o Ministério do Meio Ambiente – MMA e o Ministério de Minas e Energia – MME implementaram uma solução que incorporou a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos como uma fonte específica nos leilões de compra de energia elétrica de novos empreendimentos de geração a partir de 2021. Essas iniciativas estão detalhadas na Portaria MME nº 435/2020, e as diretrizes para os leilões foram estabelecidas pela Portaria MME nº 480/2021. Os leilões visam contratar energia proveniente da recuperação energética de RSU, com o intuito de atender ao crescimento do mercado das distribuidoras a partir de 2026, com contratos de suprimento que variam entre períodos de 15 e 25 anos (Brasil, 2020b, 2022c).

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), lançada pelo Ministério de Minas e Energia através da Lei nº 13.576 em 2017, visa promover a expansão de biocombustíveis na matriz energética brasileira. Por meio de uma política de mercado, o RenovaBio incentiva o aumento da eficiência energética e a redução de gases do efeito estufa na produção e uso de biocombustíveis, contribuindo para o cumprimento dos compromissos nacionais estabelecidos pelo Acordo de Paris. Seu principal instrumento é o estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, com o objetivo de impulsionar a produção e a participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país. Essas metas de redução de emissões para a matriz de combustíveis foram definidas para o período de 2019 a 2029 (ABiogás, 2022a; Brasil, 2023c).

O RenovaBio, conforme estabelecido pela Lei nº 13.576/2017, tem como principais metas: *(i)* apoiar o país no cumprimento de seus compromissos no Acordo de Paris, conforme a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima; *(ii)* fomentar uma efetiva relação entre eficiência energética e redução de emissões de gases de efeito estufa na produção, comercialização e utilização de biocombustíveis, integrando mecanismos de avaliação de ciclo de vida; *(iii)* impulsionar a expansão apropriada da produção e uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com destaque para a regularidade do abastecimento de combustíveis; e *(iv)* assegurar uma participação competitiva e previsível de diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis (Brasil, 2017).

Com o intuito de atingir estes quatro objetivos, o RenovaBio conta com dois instrumentos principais: metas nacionais de redução de emissões para a matriz de

combustíveis, estipuladas para um período de 10 anos, que são aplicadas às distribuidoras de combustíveis com base em sua participação no mercado; e certificação da produção de biocombustíveis, que atribui notas para cada produtor de acordo com a intensidade de carbono do biocombustível produzido. O resultado da certificação é o Crédito de Descarbonização (CBIO), que consiste em um ativo financeiro comercializado pelo produtor de biocombustível em bolsa de valores. A meta é cumprida a partir da demonstração da propriedade dos CBIOS na carteira dos distribuidores (EPE, 2017). Nesse sentido, as partes obrigadas, (distribuidoras de combustíveis), devem demonstrar o alcance de suas metas individuais mediante a aquisição dos CBIOS. Produtores de biocombustíveis que optarem voluntariamente pelo programa têm a possibilidade de emitir e negociar esses créditos com base na produção certificada, recebendo uma bonificação proporcional ao volume e à eficiência do energético certificado (Brasil, 2018b).

No contexto do RenovaBio, o biometano apresenta duas oportunidades significativas, que consistem na possibilidade de comercialização direta dos CBIOS, proporcional ao volume de biometano vendido e na expansão das transações de créditos derivados de outros biocombustíveis. A utilização do biogás para diversificar a geração de energia elétrica nas usinas de etanol ou substituir o diesel nas frotas e equipamentos do setor de etanol e biodiesel resulta no aumento da nota de eficiência. Como resultado, o biocombustível pode gerar um aumento na emissão de CBIOS (ABiogás, 2022a).

Ainda no âmbito federal, o Decreto nº 11.003, datado de 21 de março de 2022, estabeleceu a Estratégia Federal de Estímulo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Além de promover a utilização de ambos os recursos, a iniciativa visa à redução das emissões de metano, contribuindo para o cumprimento dos compromissos assumidos pelo país, com a Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio sendo um de seus instrumentos. No contexto do decreto, destaca-se, ainda, a inclusão dos resíduos dispostos em aterros sanitários como uma das principais fontes de biogás e biometano (Brasil, 2022b).

As orientações da Estratégia Federal de Estímulo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano incluem: I - impulsionar o mercado de carbono, especialmente em relação aos créditos de metano; II - fomentar a elaboração de planos e a celebração de acordos setoriais; III - incentivar a implementação de biodigestores, sistemas de purificação de biogás e sistemas de produção e compressão de biometano; IV - apoiar iniciativas para o abastecimento de veículos leves e pesados, como ônibus, caminhões e tratores agrícolas, e de embarcações movidos a biometano ou híbridos com biometano, como pontos e corredores verdes; V - promover a adoção de tecnologias que viabilizem a utilização de biogás e

biometano como fontes de energia e combustível renovável; VI - fomentar a pesquisa científico-tecnológica e inovações, bem como a disseminação de tecnologias, processos e práticas para mitigar as emissões provenientes de fontes de metano; VII - implementar medidas e mecanismos para incentivar a redução das emissões de metano; e VIII - promover a cooperação nacional e internacional para financiar, capacitar, desenvolver, transferir e difundir tecnologias e processos para a implementação de ações de redução das emissões de metano (Brasil, 2022b).

No âmbito estadual, têm surgido iniciativas tanto legislativas quanto executivas voltadas para o desenvolvimento do setor de biogás e biometano. Um marco significativo ocorreu já em 2012, quando foram aprovadas legislações específicas nos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, estabelecendo diretrizes e normativas para esse segmento. Desde então, pelo menos três estados diferentes implementaram legislações voltadas para a promoção e regulamentação do biogás e biometano. Além das iniciativas legislativas, as agências reguladoras responsáveis pelos serviços de distribuição de gás, assim como as concessionárias reguladas, têm demonstrado um crescente interesse em encontrar soluções que possibilitem a integração efetiva do biometano ao suprimento de gás (Brasil, 2023a).

Nesse contexto, destacam-se o Decreto nº 58.659/2012, do Estado de São Paulo, que institui o Programa Paulista de Biogás, que inclui o objetivo de estabelecer um percentual mínimo de biometano no gás canalizado e a Lei nº 6.361/2012, do Rio de Janeiro, que cria a Política Estadual de Gás Natural Renovável, a qual define a aquisição compulsória pelas concessionárias em até 10%. Além disso, no estado do Rio Grande do Sul, foi criada a Política Estadual do Biometano e Programa Gaúcho de Incentivo à Geração e Utilização de Biometano, através da Lei nº 14.864/2016. Ademais, no Paraná, foi instituída a Política Estadual do Biogás e Biometano do Estado do Paraná, por meio da Lei nº 19.500/2018, que aplica o conceito de cadeia produtiva do Biogás, e no Goiás, foi instituída a Política Estadual do Biogás e Biometano, que estabelece instrumentos para o desenvolvimento da cadeia produtiva do biogás, pela Lei nº 20710/2020 (Brasil, 2023a).

2.3 Oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros no Brasil

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares, destaca três tecnologias de conversão de resíduos sólidos em energia no contexto brasileiro: Digestão Anaeróbia, Coprocessamento e Incineração. Segundo o Planares, as ações voltadas para o aproveitamento energético de resíduos são atualmente limitadas no Brasil, tornando-se crucial fortalecê-las como um instrumento adicional para a destinação apropriada desses materiais. Nessa perspectiva, não ocorre uma competição entre as diversas formas de destinação de resíduos. Pelo contrário, elas se complementam, culminando na diminuição da quantidade de rejeitos depositados em aterros sanitários (Brasil, 2022c).

O potencial de recuperação energética dos RSU no Brasil é explorado por iniciativas bastante pontuais, concentrando-se principalmente em aterros sanitários. Até 2015, apenas 17 municípios possuíam iniciativas de captação de biogás desses aterros para a geração de energia. A recuperação energética por meio de Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) mostra-se promissora para ser adotada pelo setor cimenteiro, como substituto ao coque de petróleo, um combustível importado e mais poluente. Embora incipientes, as iniciativas para a incineração de resíduos, especialmente nos casos em que outras formas de destinação final não são viáveis do ponto de vista técnico e econômico, apresentam perspectivas positivas. Para que esses empreendimentos se desenvolvam, é crucial estabelecer um quadro regulatório que assegure mais previsibilidade e segurança jurídica, incentivando os investimentos necessários (Brasil, 2022c).

Os principais energéticos que podem ser obtidos através do aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos incluem o biogás, originado de aterros, também conhecido como gás de lixo (GDL) ou proveniente da digestão anaeróbica. O biogás pode passar por um processo de purificação para ser utilizado como substituto ou complemento ao gás natural, sendo então chamado de biometano ou gás natural renovável (GNR). Além disso, a eletricidade pode ser gerada a partir da queima do biogás ou do processo de incineração, enquanto o calor, produzido nos próprios processos, pode ser exportado caso haja demanda (EPE, 2014b).

As formas de aproveitamento energético dos RSU mais amplamente utilizadas internacionalmente são a incineração e o processamento biológico, ambas capazes de reduzir significativamente a área necessária para aterros sanitários. No entanto, a incineração apresenta riscos ambientais, como emissões de dioxinas e furanos. Recentemente, avanços no desenvolvimento de sistemas de filtros têm possibilitado a redução substancial dessas

emissões, trazendo a incineração de volta às discussões sobre gestão de resíduos. Por outro lado, os processos biológicos, à luz do conhecimento atual, impactam menos o meio ambiente, embora seja necessário encontrar formas eficazes de comercializar a produção de adubo ou composto orgânico resultante desses processos (EPE, 2014b).

No processo de digestão anaeróbia, verifica-se a desintegração da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio, resultando não apenas na formação de composto orgânico, mas também na produção de biogás como subproduto desse processo bioquímico (Brasil, 2022c). Os resíduos orgânicos são submetidos ao processo de biodigestão anaeróbia no interior de biodigestores, nos quais serão degradados e ocorrerá a estabilização da matéria orgânica, com a modificação da estrutura bioquímica do resíduo, em um processo que reduz a presença de microrganismos patogênicos e a emissão de poluentes, dando origem ao biogás, que é composto principalmente de metano e dióxido de carbono. Além disso, produz biofertilizantes, que consistem na matéria orgânica estabilizada (Molino *et al.*, 2013).

O biogás constitui uma fonte energética proveniente da biodigestão anaeróbia de diversos tipos de resíduos, abrangendo materiais orgânicos derivados da indústria sucroenergética, como palha, bagaço, vinhaça e torta de filtro; da cadeia da proteína animal, como dejetos de animais, resíduos de abatedouro e laticínios; da agricultura, englobando casca de soja, milho e subprodutos da indústria da mandioca e do saneamento, envolvendo resíduos sólidos urbanos e efluentes de estações de tratamento (ABiogás, 2022).

O biogás conta com diversas aplicações, sendo as mais comuns: a geração direta de calor, a produção de energia elétrica através de motogeradores, a geração simultânea de energia elétrica e calor em sistemas CHP (Combined Heat and Power) e a utilização do biogás purificado, na forma de biometano, para injeção nas redes de gás natural e/ou como combustível veicular. Cada uma dessas aplicações exige diferentes níveis de remoção de impurezas, variando de acordo com a composição regulamentada ou a sensibilidade dos componentes de cada sistema em relação aos elementos presentes no biogás (ABiogás, 2020).

Ao atender aos critérios necessários para ser classificado como biometano, o biogás torna-se intercambiável com o gás natural, o que implica que pode substituir ou ser misturado ao combustível fóssil em qualquer proporção. Essa característica abre vastas oportunidades de mercado para o biocombustível, permitindo sua integração à malha de gasodutos e outras infraestruturas inicialmente projetadas para o gás de origem fóssil (Brasil, 2023a). Considerando que o biometano pode servir como um substituto eficaz do gás natural, que já está amplamente distribuído, os mercados potenciais abrangem uma variedade de setores, desde o fornecimento de gás para residências até o abastecimento de veículos. No

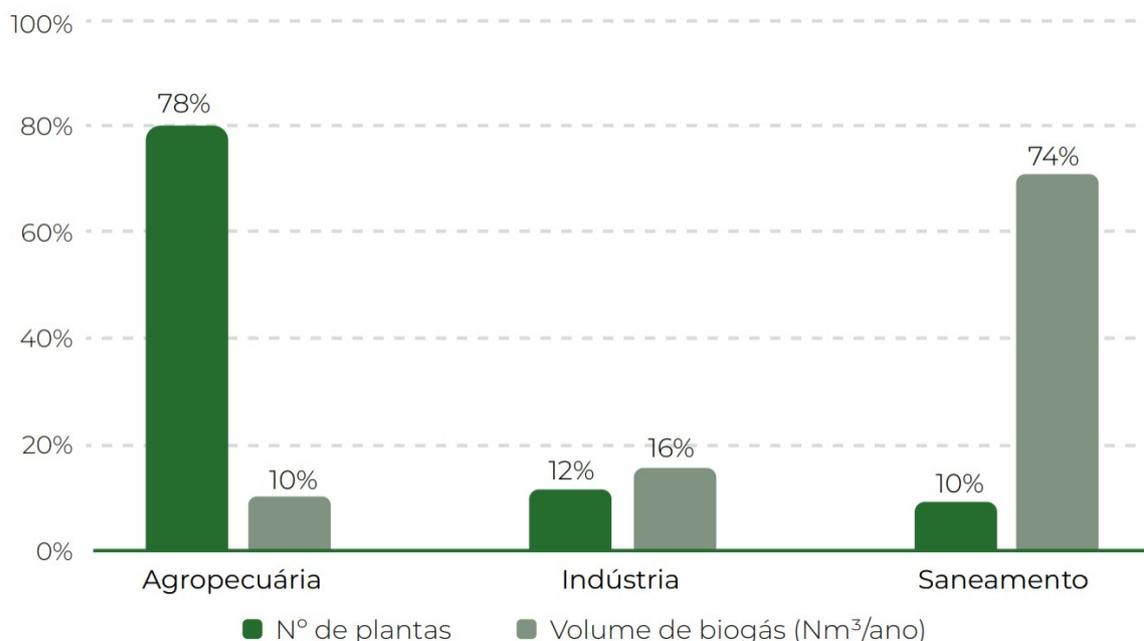
segmento de gás veicular, há competição direta com combustíveis tradicionais, como gasolina e diesel. Além disso, existe a opção de autoprodução, possibilitando atender às necessidades internas de uma frota específica ou qualquer outra demanda própria por combustíveis (EPE, 2014a).

De acordo com dados da CIBiogás (2023), o biogás tem experimentado um crescimento constante no Brasil nos últimos anos, consolidando sua presença no país. Atualmente, o Brasil abriga 936 plantas de biogás dedicadas ao aproveitamento energético, das quais 885 estão em pleno funcionamento (95%), 38 estão em fase de implantação (4%), e 13 estão passando por reformulação ou reforma (1%). Somente em 2022, 114 novas plantas de biogás entraram em operação, marcando um aumento significativo de 15% no número total de instalações em funcionamento e um acréscimo notável de 22% no volume de biogás produzido, o que corresponde a 529,5 milhões Nm³/ano.

No ano de 2022, as 885 plantas em operação geraram um total de 2,8 bilhões de Nm³ de biogás, atingindo as projeções estabelecidas no Panorama do Biogás de 2021. Vale destacar que o setor agropecuário desempenhou um papel significativo nesse crescimento, sendo responsável por 63% das novas plantas em operação em 2022. Além disso, o aumento expressivo na produção de biogás foi impulsionado principalmente pelo início das operações de grandes plantas do setor de saneamento, que contribuíram com 76% do volume expandido em 2022, totalizando 529 milhões de Nm³/ano (CIBiogás, 2023).

Em relação à origem dos substratos utilizados na produção de biogás, esses são classificados em três categorias distintas: agropecuária, indústria e saneamento (que abrange a gestão de aterros sanitários - RSU, usinas de tratamento de resíduos orgânicos e estações de tratamento de esgoto - ETE). No ano de 2022, o setor agropecuário foi responsável por 78% das plantas de biogás em operação no país. Por sua vez, o setor industrial e o setor de saneamento tiveram participações de 12% e 10%, respectivamente. Quanto ao volume de biogás produzido por essas instalações, o setor de saneamento foi preponderante, respondendo por 74% do total, seguido pelos setores industrial (16%) e agropecuário (10%), como demonstrado no Gráfico 2. No âmbito do saneamento, os aterros sanitários destacaram-se como a maior parcela de plantas em operação em 2022 (96%), sendo responsáveis por 73% do volume total de biogás produzido nesse setor (2,0 bilhões de Nm³/ano) (CIBiogás, 2023).

Gráfico 2 – Relação entre o número de plantas e volume de biogás produzido no Brasil



Fonte: CIBiogás (2023).

Ainda em conformidade com o levantamento da CIBiogás em 2022, das 885 plantas em operação, 77% são de pequeno porte, o que corresponde a 686 plantas; 15% de médio porte, sendo 130 plantas, e 8% de grande porte, que correspondem a 69 plantas. Como pontuado no relatório, as plantas de grande porte respondem por 83% da produção nacional de biogás (2,3 bilhões Nm³/ano). O restante, correspondendo a 17% do total (492,9 milhões Nm³/ano), é distribuído entre 92% das plantas (816 plantas de pequeno ou médio porte) (CIBiogás, 2023). A produção de energia elétrica é a aplicação predominante do biogás no Brasil. Em 2022, aproximadamente 86% das plantas de biogás em operação no país possuíam infraestrutura para a geração de eletricidade. O volume de biogás direcionado para essa aplicação atingiu cerca de 2,08 bilhões de Nm³/ano, consumindo 72% da produção total de biogás no país (CIBiogás, 2023).

O Brasil destaca-se globalmente pelo extraordinário potencial de produção de biogás, e exclusivamente a partir da produção de resíduos, uma característica que pode ser considerada única no cenário mundial. Essa singularidade resulta no fato de que o biogás pode aumentar de maneira significativa a geração de energia no país, sem que seja necessário recorrer ao uso de terras para plantações ou prejudicar áreas de cultivo, como ocorre em formas tradicionais de geração de energia. Deste modo, o diferencial reside na capacidade de aproveitar, para fins energéticos, os resíduos atualmente desperdiçados, os quais já contribuem para as emissões de gás metano, que exercem impactos negativos ao meio

ambiente (ABiogás, 2022a).

A ABiogás estima que o Brasil deixa de aproveitar por ano, aproximadamente, 44,1 bilhões de metros cúbicos de biogás, considerando a geração de resíduos da agroindústria, pecuária e saneamento, que poderiam fornecer 19 GW de capacidade instalada para a produção de energia elétrica (atualmente, apenas 2% desse potencial é aproveitado, o que corresponde a 375 MW) ou 120 milhões de m³/dia de biometano, ou gás natural renovável, (que atualmente tem apenas 0,2% do seu potencial aproveitado, sendo 360 mil m³/dia). Se traduzidos em equivalência energética, esse montante de biogás poderia suprir 34,5% da demanda por energia elétrica ou substituir 70% do consumo de diesel do país (ABiogás, 2022a, 2022b).

Segundo informações do Ministério de Minas e Energia (Brasil, 2018), o biogás demonstra um significativo potencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além dessa vantagem ambiental substancial, o biogás possui diversas características positivas, tornando-o um energético estratégico e competitivo:

- a) Sua produção ocorre de forma descentralizada, podendo ser consumido localmente, eliminando a necessidade de redes de transmissão ou distribuição. Também pode ser transportado por Gás Natural Comprimido (GNC) ou injetado em gasodutos, possibilitando a interiorização do gás metano;
- b) Produzido pela digestão anaeróbica de substratos orgânicos residuais, o biogás promove a sustentabilidade ambiental, proporcionando a destinação adequada de resíduos;
- c) A biodigestão gera como produtos finais o biofertilizante, valioso para a agricultura, e o biogás, um combustível versátil para geração de energia elétrica, térmica ou automotiva, contribuindo ainda mais para a redução de emissões de gases de efeito estufa;
- d) O biogás é o único combustível originado de passivos ambientais com potencial para se tornar um ativo energético;
- e) Pode ser usado para gerar energia elétrica de base e, em momentos de oferta excedente, transformado em biometano, conferindo-lhe grande flexibilidade como fonte geradora contínua, ao contrário de outras energias renováveis intermitentes.

O gás metano, componente primário do biogás, possui um potencial de efeito estufa 21 vezes superior ao dióxido de carbono. A simples queima desse gás representa um benefício ambiental significativo em comparação com sua emissão direta. Adicionalmente, o

aproveitamento energético do biogás evita as emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis que seriam necessários para fornecer a mesma quantidade de energia (EPE, 2014b). A produção de biogás/biometano a partir de resíduos orgânicos, como restos de alimentos e dejetos animais, contribui para a redução de resíduos destinados de maneira inadequada, desempenhando um papel na diminuição da poluição do solo e da água. Além de seus benefícios ambientais, também fortalece a segurança energética do país, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis importados (Coelho *et al.*, 2018).

Enquanto fonte de energia limpa e renovável derivada de resíduos, o biogás desempenha um papel crucial na promoção da economia circular e na busca pela descarbonização. No contexto do ciclo de vida do processo produtivo, as emissões de carbono resultantes da combustão são compensadas pelo carbono absorvido pela biomassa durante seu crescimento. Dessa forma, o saldo dessa equação pode ser neutro ou até mesmo negativo, quando são consideradas as emissões evitadas pela substituição de combustíveis fósseis e pelo tratamento adequado dos resíduos. Em resumo, apesar das emissões de carbono geradas pela queima do biogás, essa fonte de energia não contribui para o aumento da concentração de carbono na atmosfera, ao contrário dos combustíveis fósseis, que liberam grandes quantidades de carbono acumulado ao longo de milhões de anos (ABiogás, 2022a).

A capacidade de ser gerado de maneira contínua distingue o biogás das energias eólica e solar. Sua armazenagem, seja como matéria-prima ou gás comprimido, é economicamente viável, proporcionando flexibilidade. Além disso, pela sua estabilidade, o biogás atua como regulador para compensar a intermitência de fontes como a eólica e fotovoltaica. É relevante ressaltar que o biogás possui uma "pegada negativa de carbono", sendo de baixa emissão e mitigando a poluição causada pelos resíduos que, se não fossem aproveitados, poderiam poluir o solo e a atmosfera. Nesse contexto, o metano proveniente desses resíduos se transforma em uma fonte valiosa de energia (Milanez *et al.*, 2018).

A ABiogás (2022a) destaca os seguintes benefícios econômicos do biogás para o país: fortalecimento da segurança energética nacional; estímulo à indústria local, com o uso de equipamentos fabricados internamente; redução das importações de máquinas, equipamentos e combustíveis fósseis; aumento da competitividade da indústria com oportunidades de descarbonização a custos mais acessíveis; promoção da fabricação nacional de veículos pesados a gás natural/biometano; diminuição dos custos relacionados à infraestrutura de transporte, escoamento e importação de combustíveis; redução de despesas com insumos e combustíveis para as indústrias; aproveitamento de resíduos (materiais de baixo valor) e sua conversão em produtos de alto valor agregado (amônia, metanol e

hidrogênio verde); geração de empregos e renda, especialmente em áreas rurais; receita adicional com a comercialização de créditos de carbono e alinhamento com políticas de crescimento verde e os objetivos do desenvolvimento sustentável.

Conforme projeções da Associação Europeia de Biogás (EBA), a cada 1 MW de potência instalada de biogás são gerados aproximadamente 7 empregos permanentes (European Biogas Association, 2011). A maior parte dos empregos diretos na cadeia de biogás e biometano está concentrada nas atividades de construção, operação e monitoramento dos biodigestores, bem como nos processos associados à produção. É relevante observar que a maioria dos empreendimentos de biogás está localizada em áreas rurais, proporcionando desenvolvimento social nessas regiões e contribuindo para uma maior inclusão social. Além dos empregos tradicionais, há demanda por profissionais capacitados em áreas como planejamento, gestão, vendas, análise de dados, tecnologia da informação e desenvolvimento de softwares (ABiogás, 2022a).

No que diz respeito aos benefícios sociais, os empreendimentos e iniciativas relacionados ao biogás estão associados a diversos aspectos. Isso inclui aprimoramento da qualidade de vida da população devido à melhoria na qualidade do ar nas cidades e nas condições sanitárias ligadas à gestão de resíduos urbanos e rurais. Além disso, essas atividades incentivam a criação de empregos e a oferta de capacitação em várias áreas, como operação e construção de biodigestores, fabricação de máquinas e equipamentos industriais, bem como laboratórios especializados em análises químicas (ABiogás, 2022a).

Há também estímulo para outros setores, como gestão e planejamento, vendas, comunicação, análise de dados e tecnologia da informação. O apoio à pesquisa, inovação, ensino e capacitação é destacado, contribuindo para o avanço científico e técnico. Além disso, esses projetos promovem o desenvolvimento e a inclusão social em regiões interiores do país e áreas rurais. A promoção da equidade de gênero é outro aspecto enfatizado, tanto em diversas áreas de atuação quanto em ambientes rurais (ABiogás, 2022a).

No contexto da busca por tornar o biogás uma fonte energética atrativa no Brasil, diversas barreiras significativas são identificadas. Destacam-se os seguintes pontos (Coelho *et al.*, 2018):

- Falta de apoio público: ausência de suporte governamental para o desenvolvimento do mercado de biogás no país;
- Condições imprevisíveis do mercado: instabilidade do mercado de biogás, sendo a principal barreira para investimentos devido à incerteza na política energética, restrições de acesso a mercados financeiros e inconsistência em

âmbito estadual e/ou nacional;

- Alto custo de investimento: elevados custos de investimento, muitas vezes relacionados à importação de equipamentos; receita limitada pela venda de energia elétrica, tornando o biogás menos competitivo em comparação com fontes de energia convencionais; custos elevados para a purificação do biogás, resultando em uma relação incerta entre o investimento e benefício comercial;
- Falta de maturidade de mercado para produtos não energéticos: falta de incentivos de investimento devido à falta de maturidade de mercado para produtos não energéticos, como o biofertilizante;
- Desvalorização do valor ambiental na precificação: o preço de mercado da energia gerada pelo biogás frequentemente não reflete seu valor ambiental total; custos elevados do projeto, sem reconhecimento financeiro para produtos e/ou serviços não energéticos, criam uma barreira para investimentos;
- Falta de políticas específicas: ausência de políticas de incentivo; falta de adaptações nas regulamentações, licenciamentos ambientais e linhas de crédito; dificuldade de acesso a linhas de crédito devido à falta de políticas específicas relacionadas ao biogás;
- Carência de pesquisa e desenvolvimento técnico: falta de dados adequados de desempenho ambiental, técnico e econômico relacionados à produção de energia, coprodutos, emissões de GEE e outras emissões dos sistemas de produção e uso de biogás no Brasil; escassez de conhecimento técnico e suporte, especialmente para pequenos produtores, resultando em uma quantidade reduzida de projetos de referência bem-sucedidos em escala comercial.

Stilpen *et al.* (2018) pontuam as seguintes barreiras à implantação de um mercado de biogás/biometano no Brasil, que são: (i) Custo elevado de produção de biometano devido ao processo de refino, o que torna a produção economicamente viável apenas em plantas de média ou grande escala; (ii) Distribuição significativa do potencial de produção de biogás em plantas de pequena escala, especialmente na agropecuária, o que dificulta a produção de biometano nesses setores; (iii) Barreira logística para modelos de negócio com foco na produção de biometano para uso veicular, uma vez que somente a criação de um grande mercado consumidor e produtor viabilizaria a implantação de diversos postos de abastecimento, especialmente em locais onde atualmente não existe a opção de abastecimento

com o GNV e (iv) Dificuldades de inserção de pequenos produtores em um mercado regulado.

O Ministério das Cidades – MCID (Brasil, 2016), destaca as seguintes barreiras enfrentadas pelo mercado de biogás no Brasil:

- Relação incerta entre custo do projeto e benefício comercial: os custos elevados para desenvolver e implementar projetos de biogás, somados a um mercado incipiente, reduzem a oportunidade econômica dos investimentos e dificultam a transferência de know-how do exterior. A falta de incentivos fiscais e políticas específicas contribui para a incerteza sobre o retorno financeiro;
- Reduzida quantidade de projetos de referência em escala comercial: a implantação de projetos pilotos demanda pioneirismo, mas a falta de análise e demonstração transparente das experiências bem-sucedidas em todo o país gera incertezas. A escassez de projetos de referência dificulta a atração de investimentos, a disseminação de conhecimento técnico e aumenta a incerteza sobre a viabilidade econômica;
- Dificuldade de acesso a informações técnicas, comerciais e legais: a diversidade de arranjos comerciais possíveis com o biogás no Brasil, combinada com a complexidade do setor, exige esforços consideráveis no desenvolvimento de projetos. A dificuldade de acesso a essas informações, juntamente com a relutância em compartilhar experiências, reduz a percepção de oportunidades de negócio, aumenta os custos e retarda o desenvolvimento do mercado. A falta de informação resulta em insegurança, reduz a rentabilidade dos projetos e prolonga o tempo para avaliação e aprovação.
- Ausência de políticas dedicadas ao biogás: O biogás possui o potencial de complementar ou substituir diversas fontes de energia em contextos integrados e isolados. Além disso, a conversão de matéria orgânica em biogás desempenha um papel crucial no saneamento, tratando efluentes e resíduos sólidos. No entanto, o reconhecimento pleno da importância estratégica do biogás é limitado, uma percepção agravada pela falta de políticas específicas para o setor. Os instrumentos regulatórios, como marco regulatório, licenciamentos ambientais, linhas de financiamento, incentivos fiscais e tributários, e leilões de energia dedicados a essa fonte, precisam ser ajustados de maneira integrada e estratégica para abordar essa complexidade.

O Quadro 1 sintetiza as oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários no contexto brasileiro, elencadas a partir do que foi demonstrado no referencial teórico.

Quadro 1 – Oportunidades e desafios do aproveitamento energético do biogás de aterros sanitários.

Oportunidades	Desafios
Sustentabilidade ambiental.	Carência de apoio público.
Fortalecimento da matriz energética.	Condições de mercado imprevisíveis.
Geração de energia descentralizada.	Alto custo de investimento.
Redução da dependência de combustíveis fósseis.	Mercado pouco maduro para produtos não energéticos.
Geração de empregos e renda.	Dificuldade de entrada de pequenos produtores em um mercado regulado.
Melhoria da qualidade de vida da população.	Barreira logística para o biometano veicular.
Alto potencial de produção a partir dos aterros a ser explorado.	Desvalorização do valor ambiental na precificação
Geração de energia renovável, flexível e com baixo potencial de sazonalidade.	Falta de políticas específicas.
Integração a estruturas já existentes de distribuição.	Baixa quantidade de projetos referência.
Possibilidade de substituir o Gás Natural e GNV.	Dificuldade de acesso a informações técnicas, comerciais e legais.

Fonte: elaborado pelo autor.

3 METODOLOGIA

Acerca dos procedimentos metodológicos utilizados, a presente pesquisa é classificada como exploratória e descritiva quanto aos objetivos, com abordagem qualitativa, utilizando como ferramentas para a coleta de dados a revisão bibliográfica e a pesquisa documental com análise de conteúdo qualitativa.

O estudo exploratório tem como propósito conhecer a variável de estudo da maneira como ela se apresenta, o que significa e o contexto em que está inserida. Desta forma, tem por finalidade evitar que tendências não fundadas no repertório ao qual se pretende conhecer influenciem nas percepções do pesquisador, e, por consequência, no instrumento de medida. Tais tendências podem conduzir o pesquisador a perceber a realidade pela sua ótica pessoal, podendo resultar na sua deturpação. A pesquisa exploratória, portanto, visa controlar os efeitos dessa percepção, oportunizando que a realidade seja percebida como ela é (Piovesan; Temporini, 1995). Nesse sentido, a pesquisa exploratória visa fornecer uma visão geral de um determinado fato, buscando identificar padrões, ideias ou hipóteses, em vez de testar ou confirmar uma hipótese preestabelecida (Collis; Hussey, 2005).

A pesquisa descritiva caracteriza-se pelo registro e descrição dos fatos observados sem que sofram a interferência do pesquisador. Seu objetivo é descrever as características de uma população ou fenômeno e estabelecer relações entre variáveis. Essa abordagem engloba o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados, como questionários e observação sistemática, e geralmente assume a forma de levantamento. A pesquisa descritiva observa, registra, analisa e ordena dados sem manipulação pelo pesquisador, procurando descobrir a frequência, natureza, características, causas e relações entre os fatos (Prodanov; De Freitas, 2013).

Os estudos qualitativos têm como principal preocupação o estudo e análise do mundo empírico a partir do seu ambiente natural, sendo valorizado o contato direto e prolongado do pesquisador com o ambiente e a situação a qual está sendo estudada. Nesse sentido, o pesquisador é o principal instrumento deste tipo de pesquisa, devendo passar confiabilidade na coleta de dados, em sua observação, seleção, análise e interpretação (Godoy, 1995).

A abordagem qualitativa não se limita a utilização de uma única fonte de dados, reunindo múltiplas fontes como entrevistas, observações e documentos. Tal formato de pesquisa se utiliza da lógica indutiva e dedutiva, através de habilidades de raciocínio complexas durante o processo. Desse modo, trata-se de um estudo reflexivo e interpretativo,

no qual o pesquisador é a peça-chave para a consecução os resultados (Creswell, 2013).

A pesquisa bibliográfica busca explicar um problema utilizando o conhecimento disponível nas teorias publicadas em livros ou obras similares. Nesse tipo de pesquisa, o investigador levanta o conhecimento existente na área, identifica as teorias produzidas, analisa-as e avalia sua contribuição para compreender ou explicar o problema objeto da investigação. O objetivo da pesquisa bibliográfica é conhecer e analisar as principais contribuições teóricas sobre um tema ou problema, tornando-se um instrumento indispensável para qualquer tipo de pesquisa (Köche, 2011).

Utilizando-se da análise de documentos, sejam eles contemporâneos ou retrospectivos, os quais são considerados autênticos do ponto de vista científico, ou seja, que, em outras palavras, não foram fraudados, a pesquisa documental consiste em uma abordagem amplamente empregada nas ciências sociais e na investigação histórica, com o propósito de descrever ou comparar eventos sociais, bem como identificar suas características ou tendências (Pádua, 1997).

A pesquisa documental e a pesquisa bibliográfica seguem trajetórias semelhantes, o que por vezes torna difícil distingui-las. Enquanto a pesquisa bibliográfica utiliza principalmente fontes já elaboradas, como livros e artigos científicos encontrados em bibliotecas, a pesquisa documental recorre a uma gama mais ampla e dispersa de fontes. Essas incluem materiais como tabelas estatísticas, jornais, revistas, relatórios, documentos oficiais, cartas, filmes, fotografias, pinturas, tapeçarias, relatórios de empresas, vídeos de programas de televisão, entre outros, sem passar por um tratamento analítico prévio (Fonseca, 2002).

A análise de conteúdo é uma abordagem de pesquisa utilizada para descrever e interpretar o conteúdo presente em diversos tipos de documentos e textos. Essa análise, que pode resultar em descrições sistemáticas, qualitativas ou quantitativas, permite uma reinterpretação das mensagens, levando a uma compreensão mais profunda dos significados que vai além de uma leitura convencional. Essa metodologia de pesquisa desempenha um papel crucial tanto teórico quanto prático, especialmente no contexto das investigações sociais (Moraes, 1999).

Segundo Bardin (1977), a análise de conteúdo pode ser dividida em três etapas. A primeira etapa é a pré-análise, onde é realizada uma leitura do material para compreender o seu conteúdo, são escolhidos os documentos que serão analisados a priori, formuladas (ou reformuladas) as hipóteses e objetivos e por fim, a elaboração dos indicadores que fundamentarão a interpretação final. A segunda etapa consiste na exploração do material, onde é realizada a sua codificação e categorização. A terceira etapa é a de tratamento dos

resultados, que são analisados através da inferência e interpretação, então conclusões são tiradas em relação aos objetivos da pesquisa. Vale ressaltar que não existem fronteiras nítidas entre a coleta de informações, o início do processo de análise e a interpretação.

A pesquisa documental realizada neste estudo, desenvolvida com base nos princípios da análise de conteúdo, percorre algumas etapas em sua elaboração. A seguir, serão apresentadas em detalhes cada uma dessas etapas:

- **Fontes de informação:** todos os materiais foram coletados por meio exclusivamente eletrônico, publicados em formato digital, através dos sites oficiais das entidades envolvidas na pesquisa. Os materiais utilizados consistem essencialmente em documentos elaborados por órgãos do governo, empresas ou associações que atuam no setor de gestão de resíduos sólidos no país, no mercado de recuperação energética do biogás, bem como no setor energético em geral, compostos fundamentalmente por relatórios, políticas e legislações governamentais. Nesse contexto, destacam-se as iniciativas promovidas pelo MME, como o Plano Nacional de Energia, a Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis e a apresentação do Renovabio. O MDR contribuiu por meio do Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, enquanto o MCID contribuiu através das experiências com o já encerrado programa Probiogás e o MMA, com a apresentação do Planares. A Abrelpe ofereceu uma visão abrangente por meio do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil. O SINIR traz informações relevantes sobre a gestão e recuperação energética dos resíduos sólidos, e a ABiogás contribuiu com o PNBB, diante da sua participação ativa no setor de biogás e biometano. A CIBiogás, por sua vez, apresentou o Panorama do Biogás no Brasil. Por fim, a EPE forneceu informações vitais sobre a matriz energética do Brasil, assim como sobre o aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos, além de sua colaboração com o programa Renovabio.
- **Acesso às fontes:** as fontes selecionadas foram encontradas através da própria pesquisa bibliográfica, com a observância da utilização de fontes em comum nos diferentes artigos, seguindo para a próxima etapa de seleção. Além disso, foi realizada uma busca por entidades governamentais e empresas que atuam nos setores de interesse;
- **Seleção das fontes:** esta etapa, assim como as anteriores, constitui uma parte essencial da fase de pré-análise, na qual os objetivos da pesquisa são

delineados, o plano de trabalho é elaborado, e as fontes de dados a serem utilizadas são identificadas, seguindo os critérios estabelecidos. Está subdividida em:

- **Críticos de tratamento:** o primeiro critério utilizado para seleção dos dados é a data de publicação. Como data mínima para a seleção de documentos, foi estabelecido o ano de 2010, caracterizado pela instituição da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que representou um marco significativo para o setor de recuperação energética dos resíduos sólidos, sendo sua implementação também objeto de análise. Nesse sentido, foi dada preferência para conteúdos o mais recente possível, objetivando repassar uma visão mais condizente com a realidade atual. O segundo critério é o alinhamento com os objetivos da pesquisa. A partir das técnicas de filtragem, foram selecionados apenas conteúdos que forneçam informações úteis para o desenvolvimento do estudo;
- **Verificação de confiabilidade:** para avaliar a credibilidade dos documentos, foi dada preferência a documentos oficiais do governo, que envolvem relatórios, políticas e legislações, além da seleção de conteúdo de empresas e associações parceiras do governo ou consolidadas no seu setor de atuação;
- **Técnicas de filtragem:** foi utilizado o método de leitura diagonal, que consiste em uma técnica de filtragem de informações que se baseia na leitura superficial para explorar as ideias e identificar informações que podem ser úteis, com atenção aos índices, títulos, subtítulos, resumo, entre outros. Diante da ampla quantidade de obras disponíveis, esta técnica foi útil para selecionar os conteúdos mais relevantes para o estudo;
- **Interpretação e análise:** esta etapa integra a fase de organização do material, na qual a bibliografia foi colhida, classificada, e dividida em fichamentos, e da fase de tratamento dos resultados - não existindo fronteira clara entre as duas -, na qual foi realizada a apresentação dos principais resultados da análise de conteúdo qualitativa, interpretando as informações à luz dos objetivos da pesquisa, relacionando-os a teorias apresentadas e gerando novos *insights* com vistas a contribuir para o campo de estudo.
- **Conclusões:** diante dos resultados encontrados a partir dos materiais selecionados, foram observadas informações que se convergiam, seja entre diferentes documentos do governo e das empresas dos setores de interesse, ou

entre estes e artigos acadêmicos utilizados na revisão bibliográfica. A partir disso, foi realizado um apanhado geral, demonstrando os pontos mais relevantes para concluir o estudo.

Vale pontuar, ainda, a utilização de periódicos, livros e dissertações produzidos sobre o assunto abordado, que foram de importante valia para a revisão bibliográfica, contextualizando o problema da pesquisa e fundamentando teoricamente o estudo, servindo como apoio para a pesquisa documental. A principal ferramenta utilizada para tal foi o Google Scholar, que consiste em um mecanismo de pesquisa acadêmica que reúne diversas bibliotecas na apresentação dos resultados, sendo de utilidade para que o trabalho seja alimentado por uma ampla e diversificada gama de informações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados apresentados pelo World Bank Group (Kaza *et al.*, 2018) sobre a produção mundial de resíduos sólidos destacam a magnitude do desafio global, o que evidencia a necessidade de esforços coordenados em escala internacional. Segundo o relatório, o Brasil figura entre os quatro países que mais geram resíduos sólidos mundialmente. Ademais, no contexto brasileiro, os números recentes revelam uma realidade expressiva, com uma alta produção de resíduos e desigualdades regionais notáveis.

A composição dos resíduos do Brasil, com uma parcela significativa de matéria orgânica e recicláveis secos, sugere oportunidades claras para práticas para a economia circular, sendo materiais que podem ser reintegrados à economia, através de práticas como a recuperação energética e reciclagem. No entanto, a presença considerável de rejeitos, especialmente materiais sanitários, aponta para desafios persistentes na gestão de resíduos complexos e poluentes.

O dado apresentado pela Abrelpe (2022) sobre a destinação dos RSU no Brasil revela que uma parcela significativa, correspondendo a 61%, é encaminhada para aterros sanitários, o que sugere uma prática de disposição considerada ambientalmente adequada. No entanto, é preocupante observar que 39% dos resíduos coletados ainda são destinados a áreas de disposição inadequada, como lixões e aterros controlados, o que evidencia a presença de desafios persistentes na gestão de resíduos do país.

A questão da disposição dos RSU em aterros sanitários fornece insights sobre as práticas operacionais e os cuidados necessários. A técnica de compactação em camadas no solo, cobertas periodicamente com material inerte, é apresentada como um método que visa promover a degradação natural e lenta dos resíduos. No entanto, é observada a necessidade de precauções especiais, desde a seleção da área até o monitoramento contínuo, para garantir a eficácia e a segurança do processo.

A atenção à contaminação das águas subterrâneas pelo chorume, um subproduto da decomposição dos resíduos, e ao controle do biogás gerado destaca a complexidade envolvida na operação de aterros sanitários. As características técnicas essenciais, como a impermeabilização da base, sistemas de drenagem para o biogás e coleta de chorume são elementos fundamentais para evitar impactos negativos ao meio ambiente.

O Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, apresentado pelo SNIS (Brasil, 2020a), revela uma situação preocupante. A carência de infraestrutura adequada para a coleta e tratamento de resíduos em muitos municípios, com menos de 40%

deles oferecendo serviço de coleta seletiva em 2019, destaca uma lacuna significativa no sistema de gestão. A falta de fiscalização e controle sobre a destinação final dos resíduos é outro ponto de destaque no diagnóstico. Isso ressalta a fragilidade do sistema de gestão de resíduos, o que pode ter implicações sérias para a saúde humana e o meio ambiente.

Além dos impactos ambientais, a destinação inadequada dos RSU acarreta custos financeiros substanciais para a sociedade. Isso inclui despesas com saúde pública, perda de produtividade, danos ambientais e prejuízos econômicos. A gestão ineficiente de resíduos pode gerar custos até cinco vezes superiores aos necessários para investimento em soluções adequadas.

Por outro lado, a gestão eficaz de resíduos sólidos pode trazer benefícios financeiros expressivos. A redução de custos com saúde pública, a geração de empregos na cadeia produtiva da reciclagem e a contribuição para a redução de emissões de gases de efeito estufa destacam os incentivos econômicos para uma gestão eficiente. A transição para uma economia circular, onde os resíduos são vistos como recursos valiosos reintroduzidos na cadeia produtiva, representa uma abordagem sustentável e economicamente vantajosa.

A estimativa da Abrelpe (2022) de que, devido à presença de lixões e aterros controlados, o gasto total com saúde no Brasil para lidar com os problemas resultantes da destinação inadequada de resíduos atingiu a marca de quase 2 bilhões de dólares entre 2016 e 2021 destaca não apenas os custos financeiros associados à gestão inadequada de resíduos, mas também os impactos na saúde pública, indicando uma necessidade premente de abordagens mais eficazes e sustentáveis na gestão de resíduos sólidos urbanos.

O modelo linear de produção, que historicamente impulsionou o desenvolvimento econômico, se revela inadequado diante dos desafios contemporâneos. Sua ênfase na extração massiva de recursos, produção e descarte contribui para esgotamento de recursos naturais, poluição e degradação ambiental. A crise ambiental atual é associada, portanto, a um modelo econômico que historicamente desconsiderou limites ambientais, gerando custos para o meio ambiente e para as comunidades.

Ao discutir a economia circular como alternativa, é essencial considerar não apenas os aspectos ambientais, mas também os sociais e econômicos. A transição para um modelo circular implica uma mudança profunda nas práticas de produção e consumo, o que pode ter implicações significativas nas estruturas socioeconômicas existentes.

Também deve ser destacada a interconexão entre a economia circular e políticas públicas. A implementação bem-sucedida desse modelo requer regulamentações que incentivem práticas sustentáveis e penalizem atividades prejudiciais ao meio ambiente. O

papel dos governos é fundamental na criação de um ambiente propício à economia circular, envolvendo desde incentivos fiscais até regulamentações específicas para a gestão de resíduos.

A transição para a economia circular emerge como uma estratégia promissora para abordar os desafios relacionados aos resíduos. Os princípios fundamentais da economia circular destacam a preservação do capital natural, a otimização do rendimento de recursos e a gestão efetiva de externalidades negativas.

Ao explorar os benefícios, observamos que a redução de resíduos não apenas alivia a pressão sobre os aterros sanitários, mas também promove a eficiência no uso de recursos, reduzindo custos de produção. Além disso, a economia circular incentiva a inovação, fomentando o desenvolvimento de novas tecnologias e modelos de negócios, potencialmente gerando oportunidades econômicas e empregos.

No entanto, são enfrentados desafios significativos. A viabilidade econômica da produção a partir de materiais virgens pode ser um obstáculo à adoção de soluções de reutilização e reciclagem. A criação de mercados funcionais para materiais secundários exige decisões políticas sábias, como custos embutidos, taxas ambientais e tarifas para incentivar a transição para a economia circular.

A conexão entre a efetividade do sistema e a gestão de externalidades ressalta que a economia circular não se limita apenas à gestão de resíduos, mas abrange aspectos mais amplos de nosso estilo de vida. Essa abordagem holística destaca a necessidade de uma implementação abrangente e cuidadosa.

A aplicação da economia circular no setor energético apresenta-se como uma estratégia abrangente. A recuperação energética dos resíduos contribui não apenas para a eficiência energética, mas também para a redução da dependência de combustíveis fósseis e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A geração de energia a partir de resíduos, inserida na lógica da economia circular, ressignifica o descarte, transformando-o em uma fonte útil e sustentável.

No contexto da transição energética, a utilização de resíduos municipais como fonte de energia emerge como uma solução ambientalmente positiva, contribuindo para a redução das emissões de dióxido de carbono. Essa prática não apenas aborda a questão dos resíduos, mas também se insere como parte integrante da busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

Além disso, a economia circular desempenha um papel crucial na geração de energia renovável. A minimização da demanda por matérias-primas virgens para a produção

de equipamentos de energia renovável, como painéis solares e turbinas eólicas, destaca a importância da transição para um modelo econômico circular. Essa abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também promove uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, essenciais para a viabilidade a longo prazo da geração de energia renovável.

A matriz energética, o foco deste trabalho, abrange as fontes utilizadas para diversas finalidades, sendo um elemento crucial na garantia das necessidades de energia de um país ou globalmente. Notavelmente, a matriz energética brasileira se destaca por ser consideravelmente mais renovável em comparação com a média mundial. Essa diferenciação entre as matrizes evidencia a posição singular do Brasil, o que contribui para a sustentabilidade e a mitigação dos impactos ambientais associados às fontes não renováveis.

A transição para fontes renováveis de energia, como a recuperação energética de resíduos sólidos urbanos, emerge como uma estratégia crucial diante dos desafios ambientais e da necessidade de diversificação da matriz energética. Embora as energias renováveis ofereçam vantagens ambientais, sua vulnerabilidade a condições climáticas extremas destaca a importância de alternativas como a tecnologia de recuperação energética dos resíduos sólidos, inserida no conceito Waste-to-Energy (WTE).

A gestão integrada de resíduos, com foco na recuperação energética, não apenas reduz a pressão sobre os aterros sanitários, mas também contribui para a economia circular ao transformar resíduos em recursos valiosos. As tecnologias WTE não só geram energia limpa, mitigando as mudanças climáticas, mas também promovem a criação de empregos e maximizam o valor dos resíduos, destacando seu papel na sustentabilidade ambiental e econômica.

No cenário brasileiro, a adoção da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos se configura como uma estratégia com potencial significativo. Dada a complexidade e diversidade do país, a gestão integrada de resíduos, com ênfase na recuperação energética, oferece benefícios múltiplos.

O Brasil, apesar de possuir uma matriz energética relativamente renovável em comparação com muitos países, enfrenta desafios relacionados à segurança energética e à gestão sustentável de resíduos. A diversificação da matriz energética por meio da incorporação de tecnologias WTE pode contribuir para a redução da dependência de fontes não renováveis e para a mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, a dimensão territorial do Brasil e suas peculiaridades regionais oferecem oportunidades para a implementação de estratégias descentralizadas de recuperação

energética, promovendo a geração distribuída. A gestão eficiente de resíduos não apenas atenua os impactos ambientais, mas também pode impulsionar a economia local, criando empregos em diversas fases do processo, desde a coleta até a operação das usinas de tratamento.

No contexto da economia circular, a abordagem WTE pode ser integrada a políticas públicas voltadas para a sustentabilidade, promovendo a transição para um modelo mais eficiente no uso de recursos. No entanto, desafios como a necessidade de investimentos em infraestrutura e a conscientização da população sobre a gestão adequada de resíduos precisam ser enfrentados para garantir o sucesso dessas iniciativas. Dessa forma, a posição do Brasil nesse cenário revela tanto oportunidades quanto a necessidade de superar obstáculos para alcançar uma transição energética e ambiental eficaz e sustentável.

A respeito das políticas públicas e regulamentações governamentais no contexto da geração de energia através dos RSU, o ponto de partida está na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que é uma iniciativa voltada para a gestão adequada dos resíduos sólidos no Brasil. Essa legislação estabelece diretrizes para a disposição ambientalmente adequada dos resíduos, promovendo a redução da geração, o reaproveitamento, a reciclagem, a logística reversa e a responsabilidade compartilhada. No entanto, a PNRS enfrenta desafios significativos, como a persistência de lixões e aterros controlados, contrariando a meta inicial de erradicação dos lixões até 2014.

A constatação da Abrelpe (2020) de que, no ritmo atual, tal meta só seria alcançada no ano de 2075 evidencia um descompasso entre as metas inicialmente estabelecidas pela PNRS e a efetiva implementação de ações concretas para atingir tais objetivos. A persistência da operação de lixões e aterros controlados representam desafios significativos para a gestão adequada dos resíduos sólidos no país, impactando não apenas o meio ambiente, mas também a qualidade de vida das comunidades afetadas. O adiamento da erradicação dessas práticas inadequadas ressalta a necessidade de reavaliação e reforço nas estratégias e políticas voltadas para a destinação final adequada dos resíduos sólidos no Brasil.

A PNRS representa um avanço ao impor obrigações para gestão ambiental, atribuindo valor econômico aos resíduos e promovendo a responsabilidade compartilhada. Essa legislação busca desonerar serviços públicos, abrir oportunidades de negócios e fomentar a economia circular, especialmente por meio da logística reversa. No entanto, enfrenta desafios na elaboração de planos e metas, exigindo diálogo e comprometimento para uma gestão sustentável e inovadora dos resíduos sólidos no Brasil.

A PNRS cita a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, o que representa um avanço significativo na gestão ambiental. As medidas propostas, como a incineração e a produção de biogás, visam não apenas reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, mas também a transformar os resíduos em fonte de energia renovável. No entanto, é evidente que o escopo da lei, embora inclua diretrizes para a gestão ao longo do ciclo de vida dos produtos, carece de uma abordagem mais específica em relação à economia circular, particularmente no contexto da recuperação energética dos resíduos.

A ausência de compreensão e incentivos governamentais específicos para impulsionar a economia circular nos RSU pode representar uma lacuna significativa. Ao não definir ações concretas para promover uma economia de baixo carbono ou circular, o potencial de benefícios à sustentabilidade fica subutilizado.

Desta maneira, destaca-se não apenas a importância da PNRS na gestão sustentável dos RSU, mas também a necessidade de aprimorar e expandir suas diretrizes, considerando uma abordagem mais abrangente da economia circular. Essa abordagem poderia desencadear uma transformação mais profunda nos processos produtivos, promovendo padrões e tecnologias inovadores para a gestão de resíduos e destacando o valor dos resíduos como insumo valioso para várias cadeias produtivas.

A abordagem dos desafios na implementação da PNRS evidencia uma série de obstáculos que afetam a eficácia dessa política. Esses desafios incluem a falta de infraestrutura em muitos municípios brasileiros, o que compromete a gestão integrada e o gerenciamento adequado de resíduos sólidos. Além disso, a escassez de recursos financeiros, especialmente em municípios menores, representa um entrave significativo, considerando os investimentos necessários em infraestrutura, equipamentos e pessoal.

A falta de capacitação técnica em muitos municípios adiciona uma camada adicional de dificuldade, pois a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos exigem conhecimentos específicos. A resistência de setores da sociedade, como a indústria e o comércio, especialmente em relação à responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, destaca desafios políticos e econômicos na implementação da PNRS.

Por fim, a falta de conscientização da população sobre a importância da separação correta dos resíduos e a redução do consumo de materiais destaca um desafio cultural na efetiva participação da comunidade. Essa resistência ou falta de conscientização pode minar os esforços para alcançar uma gestão sustentável dos resíduos sólidos. A compreensão desses desafios é crucial para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes na implementação da PNRS e na promoção de práticas sustentáveis em relação aos resíduos sólidos.

O avanço normativo no setor de gestão de resíduos sólidos no Brasil em 2022, destacado pela Abrelpe (2022), reflete a implementação de medidas significativas que podem fortalecer a transição de um modelo linear para uma abordagem mais circular na gestão de resíduos. Os decretos nº 10.936/2022 e nº 11.043/2022 assumem papel central nesse contexto.

O Decreto nº 10.936/2022, ao regulamentar a PNRS, enfatiza a importância da logística reversa, estabelecendo a responsabilidade de todos os setores da economia na inserção de dados padronizados, facilitando a compreensão e o acesso às informações sobre a logística reversa nacional. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), instituído pelo Decreto nº 11.043/2022, oferece diretrizes e estratégias para orientar a gestão de RSU. Destaca-se o foco em diretrizes para o aproveitamento energético dos resíduos, como dos gases em unidades de disposição final e o aumento geral da recuperação energética de resíduos.

Essas medidas normativas não apenas consolidam os princípios e definições da PNRS, mas também reforçam o compromisso com uma gestão de resíduos mais sustentável, promovendo benefícios ambientais, econômicos e sociais no país. O fortalecimento da logística reversa e a ênfase na recuperação energética sinalizam um importante passo em direção a uma economia mais circular e eficiente na gestão de resíduos.

O Programa Nacional Lixão Zero, de 2019, é outra iniciativa que visa atender às diretrizes da PNRS, reforçando o objetivo de erradicar os lixões no país, fortalecendo a gestão integrada de resíduos sólidos por meio de medidas como coleta seletiva, reciclagem, logística reversa e recuperação energética. Uma ênfase particular do programa é impulsionar a geração de energia a partir de resíduos sólidos, buscando ajustar o ambiente regulatório para estimular projetos nessa área.

No entanto, apesar dos avanços propostos pelo programa, a recuperação energética dos resíduos ainda enfrenta desafios no Brasil. A falta de infraestrutura adequada é um obstáculo significativo, com a maioria dos municípios brasileiros carecendo de usinas de recuperação energética. Além disso, a ausência de políticas públicas claras e efetivas para incentivar a geração de energia a partir de resíduos desestimula investimentos nessa área. A resistência de alguns setores da sociedade, preocupados com possíveis impactos ambientais e na saúde humana, também é um desafio a ser enfrentado. O Programa Lixão Zero destaca a necessidade de superar esses desafios para avançar na implementação de práticas sustentáveis na gestão de resíduos sólidos no país.

A iniciativa conjunta do MMA e do MME em 2020, por meio da Portaria MME nº 435/2020 e Portaria MME nº 480/2021, que incorpora a recuperação energética de resíduos

sólidos urbanos como uma fonte específica nos leilões de compra de energia elétrica tem o objetivo de impulsionar a participação desse segmento nos leilões e, conseqüentemente, estimular a geração de energia a partir da recuperação energética de RSU.

Contudo, é importante ressaltar que os leilões de energia elétrica no Brasil operam sob a lógica de competição baseada no menor preço, sem considerar as especificidades de cada fonte. Nesse contexto, o biogás, mais especificamente, se destaca não apenas por sua contribuição para a geração de energia renovável, mas também por sua capacidade única de mitigar gases de efeito estufa de forma dupla. Além de substituir combustíveis fósseis e reduzir emissões, o biogás aborda os impactos ambientais da disposição inadequada de resíduos, melhorando as condições de saúde e saneamento nas cidades. Portanto, a eficiência dos leilões como instrumento econômico pode ser questionada quando se trata de incentivar a geração de energia por meio do biogás, dada a sua contribuição abrangente para questões ambientais e de saúde urbana.

Nesse sentido, para mitigar as limitações dos leilões de energia elétrica, especialmente para fontes como o biogás da recuperação energética de RSU, pode-se considerar a introdução de métricas que avaliem externalidades positivas, como redução de emissões e benefícios para a saúde pública. Além disso, a criação de categorias diferenciadas nos leilões, incentivos fiscais específicos e revisão das políticas energéticas podem contribuir para reconhecer e valorizar os benefícios adicionais dessas fontes.

No âmbito do biogás em específico, destaca-se a política RenovaBio, que está centrada na expansão dos biocombustíveis. Ao estabelecer metas de descarbonização para o setor de combustíveis, a política cria um ambiente propício para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhado aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris.

Os instrumentos do RenovaBio, como as metas nacionais e os Créditos de Descarbonização (CBIOS), proporcionam um mecanismo de mercado que incentiva as distribuidoras a investirem em biocombustíveis, impulsionando a produção e o consumo dessas fontes mais limpas. A certificação da produção, que gera os CBIOS, cria um vínculo financeiro entre a eficiência do biocombustível e seu valor de mercado, criando um sistema economicamente viável e ambientalmente responsável.

No contexto específico do biometano, sua inclusão no RenovaBio oferece oportunidades significativas. A possibilidade de comercialização direta de CBIOS proporcional ao volume de biometano vendido incentiva sua adoção em diferentes setores, desde a geração de energia elétrica até a substituição do diesel. A diversificação da matriz

energética e a redução das emissões associadas ao biometano destacam-se como benefícios concretos para a sustentabilidade do setor de combustíveis.

No entanto, desafios persistem, como a necessidade de infraestrutura adequada para a produção e distribuição de biometano, bem como a conscientização e aceitação da sociedade em relação a essas novas fontes de energia. Além disso, é crucial monitorar continuamente os impactos ambientais e sociais da produção de biocombustíveis para garantir que as metas de sustentabilidade sejam alcançadas de maneira abrangente.

No contexto específico do Renovabio, com relação aos CBIOS, que são papéis vendidos por produtores de biocombustíveis a distribuidoras de combustíveis, com intuito de compensar as emissões causadas pelas vendas de combustíveis fósseis, são identificados desafios no momento em que a cota de CBIOS comercializada é distribuída para todos os biocombustíveis. Tendo em vista que o etanol e biodiesel, também participantes do programa, são combustíveis com mercado mais consolidado, estes ficam em vantagem com relação ao biogás, com maior possibilidade de arcar com custos de certificação para obtenção de CBIOS. Nesse sentido, seria importante o estabelecimento de cotas mínimas de aquisição de biogás pelas distribuidoras de gás natural, visando ampliar sua competitividade. Além disso, seria importante o estabelecimento de uma cota mínima de CBIOS a ser comercializada para cada combustível, visando uma equidade na competição entre as fontes.

No Brasil, as iniciativas de aproveitamento energético de resíduos ainda são limitadas, concentrando-se principalmente em aterros sanitários. Apesar de algumas iniciativas para captar biogás para geração de energia, o país ainda não explorou completamente o potencial desse tipo de fonte na matriz energética.

As formas mais comuns de aproveitamento internacional dos RSU são a incineração e o processamento biológico. A incineração, apesar de apresentar riscos ambientais, tem evoluído com tecnologias mais seguras. Já os processos biológicos, embora menos impactantes ambientalmente, demandam soluções para a comercialização do adubo ou composto orgânico resultante. Nesse sentido, há um desafio em equilibrar o aproveitamento energético com práticas sustentáveis e seguras.

O biogás tem aplicações variadas, desde geração de calor, produção de energia elétrica até a produção de biometano para injeção nas redes de gás natural e combustível veicular. O biometano pode substituir ou ser misturado ao gás natural, abrindo oportunidades de mercado em diversos setores, como residências, veículos e competindo com combustíveis tradicionais. Essa versatilidade torna o biometano uma alternativa viável e integrável às infraestruturas existentes.

Os dados apresentados pela CIBiogás (2022) revelam que o setor agropecuário é responsável por quase 80% das plantas de biogás em operação no Brasil, mas é responsável por apenas 10% da produção total do biogás. Enquanto isso, o setor de saneamento, apesar de corresponder a apenas 10% do número de plantas em operação, é responsável por cerca de 74% do volume total de biogás produzido. Em termos específicos, os aterros sanitários no setor de saneamento foram preponderantes, representando 96% das plantas em operação e contribuindo com 73% do volume total de biogás produzido nesse setor.

O fato de o setor de saneamento representar uma parcela menor em termos de número de plantas de biogás, mas contribuir preponderantemente para a produção total, destaca a eficiência e a expressividade desse setor na geração de biogás. A predominância dos aterros sanitários nesse cenário evidencia a capacidade dessas instalações em aproveitar o potencial energético dos RSU.

A produção expressiva de biogás pelo setor de saneamento pode ser atribuída à natureza dos materiais presentes nos aterros sanitários, que são uma fonte rica em resíduos orgânicos propícios à produção de biogás. Além disso, o setor de saneamento tem a vantagem de contar com uma infraestrutura consolidada, como a gestão de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (ETE), que podem ser adaptadas para a produção eficiente de biogás.

A eficácia do setor de saneamento na produção de biogás não apenas contribui para a matriz energética do país, mas também oferece uma abordagem sustentável para lidar com os RSU, convertendo um problema ambiental em uma fonte valiosa de energia renovável. Essa eficiência ressalta a importância de investimentos e políticas que promovam a expansão desse setor, potencializando seus benefícios ambientais e energéticos.

A partir do levantamento da CIBiogás (2022), observa-se a distribuição desigual da produção de biogás no Brasil em termos de porte das plantas. Embora a maioria (77%) seja de pequeno porte, são as plantas de grande porte (8% do total) que contribuem significativamente para a produção nacional, respondendo por 83% do volume total de biogás produzido. Esse desequilíbrio ressalta a importância estratégica das plantas de grande porte na produção do biogás.

A predominância da produção de energia elétrica como aplicação do biogás, representando 86% das plantas em operação, destaca a relevância dessa fonte renovável para o setor elétrico brasileiro. A expressiva quantidade de biogás direcionada para a geração de eletricidade, consumindo mais de 70% da produção total, sublinha a contribuição substancial das plantas de biogás para a matriz energética, especialmente no contexto da diversificação e sustentabilidade no setor elétrico.

Esses dados indicam a necessidade de incentivos e políticas que fomentem não apenas a proliferação de plantas de biogás, mas também o investimento em infraestrutura de grande porte, dado seu impacto significativo na produção total. Além disso, a predominância na geração de energia elétrica como aplicação do biogás destaca a importância e relevância desta fonte para atender às demandas energéticas do país, alinhada aos objetivos de sustentabilidade e diversificação da matriz elétrica.

As estimativas da ABiogás (2022a, 2022b) revelam um expressivo subaproveitamento do potencial do biogás no Brasil, indicando que o país deixa de aproveitar mais de 44 bilhões de metros cúbicos de biogás anualmente, o que poderia atender a 34,5% da demanda por energia elétrica ou suprir 70% do consumo de diesel do país. No entanto, apenas 2% desse potencial é atualmente aproveitado. Essa subutilização representa uma oportunidade significativa para suprir parte substancial da demanda por energia elétrica e substituir uma parcela considerável do consumo de diesel no país, reforçando a necessidade de políticas e investimentos que impulsionem o aproveitamento total desse recurso.

O biogás destaca-se como uma fonte energética estratégica e competitiva. Sua produção descentralizada, capacidade de consumo local e possibilidade de transporte por Gás Natural Comprimido (GNC) o tornam uma opção versátil. Além disso, a origem do biogás na digestão anaeróbica de resíduos orgânicos contribui para a sustentabilidade ambiental, gerando não apenas energia, mas também biofertilizante.

A biodigestão, ao transformar passivos ambientais em ativos energéticos, destaca o diferencial do biogás nesse aspecto. A flexibilidade na geração, podendo ser convertido em biometano, confere-lhe vantagens sobre energias renováveis intermitentes. O potencial para redução de emissões de gases de efeito estufa e a dualidade de produtos gerados reforçam o papel estratégico do biogás na matriz energética, apresentando-se como uma solução ambientalmente sustentável e economicamente viável.

A recuperação energética dos resíduos sólidos, assim como o caso do biogás, gera benefícios em diferentes sentidos. Além de dar uma nova utilidade aos materiais que não seriam aproveitados para nenhuma finalidade, convertendo-os em energia limpa, reduz a dependência de combustíveis fósseis, beneficiando o meio ambiente ao mitigar as emissões de gases do efeito estufa, gerados tanto pelos combustíveis quanto pela destinação incorreta. Além disso, a energia gerada a partir de resíduos pode ser considerada uma fonte renovável, uma vez que os resíduos são produzidos ininterruptamente, tornando-se uma fonte constante de matéria-prima.

O biogás, como fonte limpa e renovável, desempenha um papel fundamental na

Economia Circular e na descarbonização, compensando suas emissões de carbono pelas absorções durante o processamento da biomassa. A sua queima, apesar de gerar emissões, não contribui para o aumento da concentração de carbono na atmosfera, diferenciando-se dos combustíveis fósseis. Sua capacidade de geração contínua, armazenamento viável e papel regulador o distinguem das energias eólica e solar, enquanto sua "pegada negativa de carbono" reforça seu valor ambiental.

Deste modo, biogás, proveniente de resíduos, se destaca como uma fonte de energia valiosa, mitigando impactos ambientais e contribuindo para a transição para um sistema energético mais sustentável.

O estabelecimento de um mercado robusto e rentável para a recuperação energética do biogás não apenas promove uma disposição ambientalmente responsável dos resíduos, mas também incentiva a coleta seletiva e a reciclagem. Ao contrário de competir com essas práticas, o mercado de recuperação energética complementa-as, permitindo a separação e recuperação de materiais recicláveis antes da conversão do restante dos resíduos em energia. A presença de instalações de recuperação energética pode, de fato, estimular a coleta seletiva, uma vez que a destinação adequada dos resíduos se torna uma prioridade econômica.

Outro benefício que pode ser observado é a diversificação da matriz energética, no momento em que a incorporação da recuperação energética dos resíduos na matriz energética de uma região adiciona mais fontes de energia, tornando o abastecimento mais robusto e confiável. Isso é especialmente importante para o cenário de transição para fontes de energia mais limpas e renováveis.

A adoção do biogás no Brasil oferece benefícios econômicos substanciais, que incluem fortalecimento da segurança energética, estímulo à indústria local, redução de importações de combustíveis, aumento da competitividade industrial com descarbonização acessível, promoção de fabricação nacional de veículos a gás, diminuição de custos relacionados a combustíveis e infraestrutura, aproveitamento de resíduos, geração de empregos, receitas com créditos de carbono e alinhamento com metas sustentáveis. Projeções da EBA indicam que cada MW de biogás gera sete empregos permanentes, principalmente nas áreas rurais, contribuindo para o desenvolvimento social. Essa transição não só impulsiona a economia, mas também abre caminho para um modelo mais sustentável e inclusivo.

Os benefícios sociais relacionados ao biogás são amplos. A adoção dessas iniciativas melhora significativamente a qualidade de vida ao promover uma atmosfera mais

limpa em ambientes urbanos e melhores condições sanitárias. Além disso, a criação de empregos e oportunidades de capacitação abrange diversas áreas, desde a operação de biodigestores até a fabricação de equipamentos industriais, impulsionando setores como gestão, vendas, comunicação e tecnologia da informação. O apoio à pesquisa e inovação não apenas impulsiona o avanço técnico, mas também contribui para o desenvolvimento e inclusão social, especialmente em áreas rurais.

Entretanto, o desenvolvimento do biogás como fonte energética no Brasil enfrenta desafios significativos. A falta de apoio governamental, a instabilidade do mercado, os altos custos de investimento, a baixa maturidade de mercado para os produtos não energéticos, como o biofertilizante, a desvalorização do valor ambiental na precificação, a deficiência em políticas específicas e a carência de pesquisa técnica são barreiras críticas. Para superar esses obstáculos, é essencial implementar políticas claras, estabilizar as condições do mercado, reduzir custos, promover a diversificação de produtos, reconhecer adequadamente os benefícios ambientais e investir em pesquisa e desenvolvimento. Essas ações são cruciais para consolidar o biogás como uma fonte energética competitiva e sustentável no cenário brasileiro.

Ademais, é destacado o alto custo de produção de biometano, tornando-o economicamente viável apenas em plantas de médio ou grande porte. Além disso, a distribuição significativa da produção em plantas de pequena escala cria desafios. A barreira logística para modelos de negócios focados em biometano para uso veicular é agravada pela necessidade de um grande mercado consumidor e produtor para viabilizar postos de abastecimento. Finalmente, a difícil inserção de pequenos produtores em um mercado regulado também é apontada como uma dificuldade, o que destaca a necessidade de abordagens estratégicas e regulatórias para impulsionar o desenvolvimento do mercado de biogás/biometano no Brasil.

Para superar tais barreiras, é crucial adotar uma abordagem abrangente que envolva ações estratégicas e regulatórias. Incentivos financeiros e subsídios podem ser direcionados para reduzir os custos de produção do biometano, especialmente em plantas de médio e pequeno porte. Programas de capacitação e assistência técnica podem ser implementados para auxiliar pequenos produtores na transição para práticas sustentáveis de gestão de resíduos. A criação de políticas específicas e adaptações nas regulamentações podem oferecer suporte ao desenvolvimento do mercado, garantindo reconhecimento financeiro para produtos não energéticos, como biofertilizantes. Além disso, é essencial estabelecer parcerias público-privadas para promover investimentos em infraestrutura

logística, especialmente para o abastecimento de biometano veicular. A articulação entre os setores público e privado, aliada a uma abordagem proativa na pesquisa e desenvolvimento técnico, tem o potencial de contribuir para superar essas barreiras e consolidar o biogás como uma fonte de energia sustentável e economicamente viável no Brasil.

A incerteza na relação entre os custos de projeto e os benefícios comerciais representa uma barreira significativa para o mercado de biogás no Brasil, influenciada pelos altos custos iniciais, pela falta de incentivos fiscais e de políticas específicas. Além disso, a escassez de projetos de referência em escala comercial cria um ambiente de incerteza, dificultando a atração de investimentos e a disseminação do conhecimento técnico. A dificuldade de acesso a informações técnicas, comerciais e legais, combinada com a falta de transparência no compartilhamento de experiências, contribui para a insegurança e os atrasos no desenvolvimento do mercado. Para superar essas barreiras, é crucial adotar medidas que promovam a transparência, incentivem investimentos, forneçam suporte técnico e simplifiquem o acesso a informações essenciais para o setor.

Nesse sentido, é necessário um conjunto abrangente de ações. A criação e implementação de políticas públicas específicas para o desenvolvimento do setor de biogás podem ser realizadas por meio de parcerias entre os governos em níveis federal, estadual e municipal, em conjunto com organizações do setor privado e ONGs. Essas políticas podem abranger:

- Incentivos fiscais e financeiros: isso envolve medidas como isenção de impostos sobre investimentos em projetos de biogás, e subsídios financeiros para reduzir os custos iniciais. Esses recursos podem ser alocados a partir do orçamento público, com uma visão de retorno a longo prazo em termos de benefícios ambientais e energéticos.
- Programas de apoio e financiamento: criação de programas específicos de apoio e financiamento para projetos pilotos em escala comercial. Esses programas podem ser gerenciados por agências governamentais ou entidades financeiras especializadas, como bancos de desenvolvimento.
- Parcerias com o setor privado: parcerias com empresas do setor de energia e gestão de resíduos podem garantir investimentos e conhecimentos especializados. Mecanismos como leilões de energia e contratos de longo prazo podem ser estabelecidos para garantir a viabilidade econômica dos projetos.
- Cooperação internacional: buscar apoio financeiro e técnico por meio de

cooperação internacional com organismos multilaterais, como o Banco Mundial, a Agência Internacional de Energia (IEA) e programas de financiamento climático. Essas parcerias podem fornecer recursos adicionais e expertise técnica.

- Fundos de investimento verde: explorar a criação de fundos de investimento específicos para projetos verdes, incluindo biogás. Esses fundos podem atrair investidores interessados em iniciativas sustentáveis, contribuindo para a mitigação de riscos financeiros.

Para abordar a falta de informações técnicas, comerciais e legais, seria útil a criação de uma plataforma centralizada de compartilhamento de conhecimento. Essa plataforma poderia ser desenvolvida em parceria com especialistas do setor, órgãos reguladores e instituições acadêmicas, fornecendo informações detalhadas sobre tecnologias, arranjos comerciais, regulamentações e casos de sucesso. Incentivar a colaboração entre empresas, governo e instituições de pesquisa pode ser fundamental para aumentar a transparência e reduzir a assimetria de conhecimento.

Adicionalmente, é essencial investir em programas de capacitação e conscientização. Isso pode envolver a criação de cursos, workshops e eventos educativos direcionados a gestores públicos, investidores e empreendedores, visando desmistificar o setor de biogás, esclarecer dúvidas e promover uma compreensão mais ampla dos benefícios e desafios associados. Essas ações combinadas podem contribuir para acelerar o desenvolvimento do mercado de biogás no Brasil.

5 CONCLUSÃO

A economia circular surge como uma proposta para abordar os desafios na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. A significativa parcela de destinação inadequada dos resíduos, evidenciada pelos dados apresentados, destaca a urgência da transição para um modelo mais sustentável. A EC propõe uma mudança fundamental na forma como os recursos são utilizados e descartados e, ao adotar os seus princípios, o Brasil pode não apenas mitigar os impactos negativos da destinação inadequada de resíduos, mas também criar oportunidades econômicas significativas.

A integração da EC com a recuperação energética dos resíduos sólidos representa uma abordagem abrangente e inovadora para enfrentar os desafios ambientais e energéticos. O reconhecimento dos resíduos como recursos valiosos, em vez de considerá-los simplesmente como descartáveis, não só contribui para a eficiência ambiental, mas também para a criação de empregos na gestão de resíduos e cria oportunidades para o setor energético. Em suma, a combinação da EC e da recuperação energética oferece um caminho sustentável e economicamente viável para melhorar a gestão de RSU no Brasil, alinhando-se com os princípios de preservação ambiental, eficiência econômica e resiliência energética.

Em contrapartida, a economia circular, embora promissora, enfrenta desafios substanciais que exigem uma abordagem abrangente. Visando solucionar as barreiras enfrentadas, tornam-se necessárias intervenções políticas, instrumentos econômicos e uma compreensão aprofundada das complexidades sistêmicas envolvidas na gestão de resíduos e na transição para um modelo mais sustentável.

A análise das políticas públicas e regulamentações governamentais revela um cenário complexo e dinâmico em relação à gestão de resíduos sólidos no Brasil e sua recuperação energética. A Política Nacional de Resíduos Sólidos representa um avanço importante ao estabelecer diretrizes para a gestão adequada desses resíduos. No entanto, a efetiva erradicação dos lixões, conforme previsto inicialmente para 2014, enfrenta desafios significativos, com projeções indicando que a meta só será alcançada em 2075.

A PNRS promove a responsabilidade compartilhada entre diversos atores sociais, estimulando oportunidades de negócios e empregos, especialmente na economia circular. A legislação também influencia a recuperação energética de resíduos, priorizando tecnologias como incineração e produção de biogás. Entretanto, a implementação efetiva da economia circular e a maximização da recuperação energética ainda carecem de incentivos governamentais claros.

A recente regulamentação, com o Decreto nº 10.936/2022, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), bem como o Programa Lixão Zero, demonstra um esforço do governo para fortalecer a PNRS. A inclusão da recuperação energética no contexto das políticas nacionais, juntamente com os leilões de energia e a valorização do biogás, evidenciam avanços e uma maior integração de práticas sustentáveis na gestão de resíduos sólidos.

No entanto, também são observados desafios persistentes neste contexto, como a falta de infraestrutura, resistência setorial e social, a problemática dos leilões, a carência de maior clareza nas políticas e a necessidade de maior conscientização da população. A promoção de tecnologias sustentáveis, a cooperação internacional e a busca por soluções inovadoras emergem como aspectos cruciais para impulsionar uma gestão mais eficaz de resíduos sólidos, alinhada aos princípios da economia circular e ao desenvolvimento sustentável.

Em relação ao potencial do biogás no Brasil, com destaque em suas origens nos resíduos sólidos urbanos e suas diversas aplicações, incluindo a geração de eletricidade e a produção de biometano, evidencia-se que o país experimenta um crescimento consistente no setor, com centenas de plantas em operação e um aumento notável na produção de biogás em diferentes setores, como agropecuária e saneamento.

O presente estudo revelou que o biogás não apenas contribui para a matriz energética, mas também traz benefícios ambientais, sociais e econômicos. A capacidade de transformar resíduos em fonte de energia renovável destaca-se como uma solução sustentável para o país, mitigando problemas ambientais associados ao descarte inadequado. Além disso, o potencial de criação de empregos, a inclusão social e os benefícios econômicos foram destacados como aspectos positivos da expansão do biogás.

Contudo, várias barreiras foram identificadas, desde desafios financeiros até questões regulatórias e falta de incentivos. Estratégias como incentivos financeiros, capacitação, ajustes regulatórios e parcerias público-privadas são essenciais nesse sentido, como soluções para superar essas barreiras. No entanto, é importante reconhecer que tais medidas representam processos complexos que demandam tempo para serem efetivamente implementados. Diante desse cenário, é plausível inferir que, a curto médio prazo, o mercado de biogás continuará subdesenvolvido no país. Pode-se concluir que, enquanto houver matéria prima virgem disponível ou mesmo a continuidade das energias renováveis tradicionais, não haverá um interesse maior em desenvolver este mercado. Essa perspectiva também se estende ao contexto mais amplo da economia circular, indicando que a plena integração do biogás

como uma fonte expressiva de energia dependerá da superação desses desafios estruturais e da evolução do cenário energético nacional.

Em termos globais, o biogás destaca-se como uma fonte versátil e sustentável de energia, contribuindo para a Economia Circular, descarbonização e redução de emissões. Seu potencial no Brasil é expressivo, o que aponta para um cenário promissor. Entretanto, suscita desafios que requerem abordagens integradas, envolvendo diferentes setores e níveis de governo. Desta maneira, o avanço do biogás no Brasil dependerá da implementação efetiva de medidas que incentivem sua produção e uso, garantindo que seu potencial seja plenamente explorado em benefício do país.

A respeito das limitações identificadas no estudo, devido à natureza do levantamento bibliográfico, os resultados podem ser influenciados pela disponibilidade e representatividade dos documentos analisados. Portanto, a generalização dos achados para todo o contexto nacional pode ser limitada. Ademais, a seleção de fontes pode introduzir um viés, uma vez que as organizações escolhidas podem ter perspectivas específicas sobre o tema. Uma abordagem mais ampla, incluindo fontes divergentes, poderia proporcionar uma visão mais abrangente. Por fim, a falta de uma abordagem de pesquisa de campo limita a incorporação de perspectivas práticas e experiências de stakeholders diretamente envolvidos no setor de gestão de resíduos e biogás.

Como sugestões para estudos posteriores, pode ser realizada uma pesquisa para uma comparação internacional, analisando experiências de outros países que têm implementado com sucesso programas de gestão de resíduos e produção de biogás, identificando lições aprendidas e boas práticas. Ademais, seriam de utilidade pesquisas qualitativas que envolvam entrevistas com diversos stakeholders, como gestores públicos, empresários do setor, e a comunidade local, para compreender melhor as percepções, desafios e oportunidades percebidos por diferentes atores. Por fim, seria interessante a análise comparativa entre diferentes tecnologias de recuperação energética dos resíduos sólidos, podendo-se, por exemplo, confrontar a tecnologia de incineração com a captação de biogás, com o intuito de comparar as suas viabilidades.

REFERÊNCIAS

ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. Programa Nacional do Biogás e Biometano. São Paulo, SP: ABiogás, 2022a. Disponível em: <https://abiogas.org.br/biblioteca>. Acesso em: 01 out. de 2023.

ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. O Potencial Brasileiro de Biogás. 2020. Disponível em: <https://abiogas.org.br/biblioteca>. Acesso em: 30 out. 2023.

ABIOGÁS – Associação Brasileira do Biogás. Propostas para o desenvolvimento do setor de biogás e biometano no Brasil. São Paulo, SP: ABiogás, 2022b. Disponível em: <https://abiogas.org.br/biblioteca>. Acesso em: 30 out. 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: 2004.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022. São Paulo: ABRELPE, 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em 04 out. 2023.

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 03 nov. 2023.

AMARO, Aurélio Bandeira; VERDUM, Roberto. Política Nacional de Resíduos Sólidos e suas Interfaces com o espaço geográfico: entre conquistas e desafios. Porto Alegre: Letra1, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/147901>. Acesso em: 24 out. 2023.

BARDIN, L. Análise de Conteúdo. Lisboa: Edições 70, 1977.

BNDES. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. Jaboatão dos Guararapes, PE: Grupo de Resíduos Sólidos - UFPE, 2014. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/11651f52-7515-4072-b70e-b8f51ae21f15/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf?MOD=AJPERES&CVID=1w7bpvB&CVID=1w7bpvB&CVID=1w7bpvB. Acesso em: 10 out. 2023.

BP – BRITISH PETROLEUM. Statistical Review of World Energy 2020. 2020. Disponível em: https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html#tab_sr-2020. Acesso em: 17 out. 2023.

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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 de janeiro de 2022a.

BRASIL. Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 mar. 2022b.

BRASIL. Lei 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. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Barreiras e Propostas de Soluções para o Mercado de Biogás no Brasil. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. Disponível em: https://www.giz.de/en/downloads/giz_barreiras_digital_simples.pdf. Acesso em: 08 nov. 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2013. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-antiores-do-snis/residuos-solidos-1/2013>. Acesso em: 06 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022. Brasília, DF: EPE, 2023a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2022>. Acesso em: 02 nov. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 – ano base 2022. Brasília, DF: EPE, 2023b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Nota Técnica nº 12/2018/DBIO/SPG. Brasília, DF: MME, 2018b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/arquivos/2-nota-t-cnica-n-12-2018-dbio-spg.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. PNE 2050 - Plano Nacional de Energia. Brasília, DF: MME, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 06 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Renovabio - Propostas das Instituições Presentes na Reunião de Construção do Renovabio Biocombustíveis Biogás e Biometano. Brasília, DF: MME, 2018. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36224/460139/COLABORADORES+DIVERSOS_Propostas+para+Biog%C3%A1s+e+Biometano.pdf/594997e6-8611-6afe-e143-81031d42d82e?version=1.0#:~:text=Essas%20propostas%20almejam%20a%20integra%C3%A7%C3%A3o,setores%20produtivos%20e%20isto%20a. Acesso em: 30 out. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. RenovaBio. 2023c. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/ptbr/assuntos/renovabio#:~:text=%2D%20Assegurar%20previsibilidade%20para%20o%20mercado,comercializa%C3%A7%C3%A3o%20e%20uso%20de%20biocombust%C3%ADveis>. Acesso em: 23 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2019a. Brasília: SNS/MDR, 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/residuos-solidos-1/2019>. Acesso em: 06 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares. Brasília, DF: MMA, 2022c. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 23 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental, Departamento de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos, Coordenação-Geral de Qualidade Ambiental e Gestão de Resíduos. Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana: Programa Nacional Lixão Zero. Brasília, DF: MMA, 2019b. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/agendaambientalurbana/lixao-zero>. Acesso em: 23 out. 2023.

BRASIL. Portaria nº 435, de 4 de dezembro de 2020. Dispõe sobre o cronograma do Ministério de Minas e Energia (MME) para Leilões de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração para o triênio 2021-2023. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 dez. 2020b, Seção 1, p. 61.

CARDOSO, Fernanda de Cássia Israel; CARDOSO, Jean Carlos. O problema do lixo e algumas perspectivas para redução de impactos. *Ciência e Cultura*, v. 68, n. 4, p. 25-29, 2016. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?pid=S0009-67252016000400010&script=sci_arttext&tlng=en. Acesso em: 09 out. 2023.

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis. Panorama do Biogás no Brasil 2022. Foz do Iguaçu, PR: CIBiogás, 2023. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/webinar-panorama-do-biogas-no-brasil-2022>. Acesso em: 01 nov. 2023.

COELHO, Suiani Teixeira. et al. Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano. Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo: IEE-USP, 2018. Disponível em: <https://gbio.webhostusp.sti.usp.br/sites/default/files/anexosnoticias/livro-tecnologias-producao-uso-biogas-biometano.pdf>. Acesso em: 31 out. 2023.

COLLIS, Jill; HUSSEY, Roger. Pesquisa em Administração. Um guia prático para alunos de graduação e pós-graduação. 2ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

CRESWELL, John W. Qualitative inquiry and research design choosing among five approaches. Los Angeles: Sage, 2013.

DELFINO, Ana Paula Santos. O aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: as causas do subaproveitamento do biogás de aterro sanitário no Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/1047>. Acesso em 06 nov. 2023.

DIAS, Sylmara Gonçalves. O desafio da gestão de resíduos sólidos urbanos. GV-executivo, v. 11, n. 1, p. 16-20, 2012. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/gvexecutivo/article/download/22776/21542/41214>. Acesso em 03 out. 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Rumo à Economia Circular: O racional de negócio para acelerar a transição. 2015. Disponível em: https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf. Acesso em: 07 out. 2023.

ENEL. Economia Circular: Cidades do Futuro e Descarbonização - Estudo diagnóstico das Cidades do Rio de Janeiro e de São Paulo. 2023. Disponível em: https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/megamenu/inova%C3%A7%C3%A3o-e-sustentabilidade/transicao-energetica/cidades-circulares/VF_ENEL2023_EstudoCidadesCirculares_Brasil.pdf. Acesso em: 12 out. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Apresentação do Programa Renovabio. São Paulo: EPE, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/renovabio>. Acesso em: 02 nov. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Matriz Energética e Elétrica. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 10 out. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica - DEA 16/14 - Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, RJ: EPE, 2014a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2016%20-%20%20Economicidade%20e%20Competitividade%20do%20Aproveitamento%20Energetico%20d%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica - DEA 18/14 - Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro, RJ: EPE, 2014b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2023.

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. Biogas simply the best. Bruxelas, 2011. Disponível em: <https://www.europeanbiogas.eu/biogas-simply-the-best/>. Acesso em: 01 nov. 2023.

FBDS – Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável. Diretrizes para uma economia verde no Brasil II. Resíduos Sólido Urbanos Desafios e Metas da Política Nacional dos Resíduos. São Paulo: FBDS, 2015. Disponível em: <https://www.fbds.org.br/IMG/pdf/doc-107.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Guia de Orientações para Governos Municipais de Minas Gerais. - Belo Horizonte: FEAM, 2012. Disponível em:

[http://www.resol.com.br/cartilhas/aproveitamento_energetico_de_rsu_gui_a_feam_\(2\).pdf](http://www.resol.com.br/cartilhas/aproveitamento_energetico_de_rsu_gui_a_feam_(2).pdf). Acesso em: 09 nov. 2023.

FONSECA, João José Saraiva. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002.

G20 ITALIA. Energy Transition and Climate Sustainability Working Groups: Joint G20 Energy-Climate Ministerial Communiqué. 2021. Disponível em: https://www.ief.org/_resources/files/events/g20-energy-and-climate-ministerial-meeting/g20-energy-climate-joint-ministerial-communicue.pdf. Acesso em: 14 out. 2023.

GODOY, Arlida Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. Revista de administração de empresas, v. 35, p. 57-63, 1995.

HAMWI, Michael; LIZARRALDE, Iban. Circular economy principles in the context of energy transition. 2021. Disponível em: <https://hal.science/hal-03619599/>. Acesso em: 12 out. 2023.

IRLANDA. Department of Communications, Climate Action and Environment. A Waste Action Plan for a Circular Economy: Ireland's National Waste Policy 2020-2025. Irlanda: Department of Communications, Climate Action and Environment, 2020. Disponível em: <https://www.gov.ie/en/publication/4221c-waste-action-plan-for-a-circular-economy/#:~:text=The%20Waste%20Action%20Plan%20for,by%20creating%20a%20circular%20economy>. Acesso em: 06 out. 2023.

ISWA – International Solid Waste Association. O Futuro do Setor de Gestão de Resíduos: Tendências, Oportunidades e Desafios para a Década (2021-2030). 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/o-futuro-do-setor-de-gestao-de-residuos/>. Acesso em: 10 out. 2023.

KALOGIROU, Efstratios N. Waste-to-Energy technologies and global applications. CRC Press, 2017. Disponível em: <https://wtert.org/wp-content/uploads/2022/06/Waste-to-Energy-Technologies-and-Global-Applications-by-Efstratios-N.-Kalogirou.pdf>. Acesso em: 02 out. 2023.

KAZA, Silpa et al. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 02 out. 2023.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, conservation and recycling, v. 127, p. 221-232, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302835>. Acesso em 06 out. 2023.

KÖCHE, José Carlos. Fundamentos de Metodologia Científica: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. Petrópolis, RJ: Vozes, 2011.

LANGER, Marcelo; NAGALLI, André. Política nacional dos resíduos sólidos: possibilidades para o desenvolvimento de inovação tecnológica. Unoesc & Ciência-ACET, v. 8, n. 1, p. 69-78, 2017. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/12843>. Acesso em: 24 out. 2023.

MILANEZ, Artur Yabe et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>. Acesso em: 02 nov. 2023.

MOLINO, Antonio. et al. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. Fuel, v. 103, p. 1003-1009, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611200631X>. Acesso em: 02 nov. 2023.

MORAES, Roque. Análise de conteúdo. Revista Educação, Porto Alegre, v. 22, n. 37, p. 7-32, 1999.

PÁDUA, Elisabete Matallo. Metodologia da pesquisa: abordagem teórico-prática. 2. ed. São Paulo: Papirus, 1997.

PAN, Shu-Yuan et al. Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review. Journal of cleaner production, v. 108, p. 409-421, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615008574>. Acesso em: 16 out. 2023.

PEREIRA, Marlene de Paula; SOUZA, Kayque Silva. Política nacional de resíduos sólidos (PNRS): avanços ambientais e viés social nos municípios de pequeno porte. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, v. 17, n. 32, p. 189-210, 2017. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/csaemrevista/article/view/17509>. Acesso em: 24 out. 2023.

PIMENTA, Regina; POGGI, Francesca; FIRMINO, Ana Maria Viegas. A importância do setor das energias renováveis na economia circular. Livro de atas do XVI Colóquio Ibérico de Geografia, p. 1108-1116, 2018. Disponível em: <https://run.unl.pt/handle/10362/65957>. Acesso em: 11 out. 2023.

PIOVESAN, Armando; TEMPORINI, Edméa Rita. Pesquisa exploratória: procedimento metodológico para o estudo de fatores humanos no campo da saúde pública. Revista de saúde pública, v. 29, p. 318-325, 1995.

POZZETTI, Valmir César; CALDAS, Jeferson Nepumuceno. O descarte de resíduos sólidos no âmbito da sustentabilidade. Revista de Direito Econômico e Socioambiental, v. 10, n. 1, p. 183-205, 2019. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7210982>. Acesso em: 03 out. 2023.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico - 2ª Edição. Editora Feevale, 2013.

RUCEVSKA, Ieva et al. Waste crime–waste risks: gaps in meeting the global waste challenge. 2015. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9648/Waste_crime_RRA.pdf. Acesso em: 02 out. 2023.

SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos. Aterro Sanitário de Resíduos Sólidos Urbanos. Maceió, AL: SEMARH, 2015. Disponível em: <http://www.residuossolidos.al.gov.br/sistemas/aterro-sanitario>. Acesso em: 23 nov. 2023.

SILVA, Vanessa Pinto Machado; CAPANEMA, Luciana Xavier de Lemos. Políticas públicas na gestão de resíduos sólidos: experiências comparadas e desafios para o Brasil. BNDES, Rio de Janeiro, v. 25, n. 50, p. 153-200, set. 2019. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19062>. Acesso em: 25 out. 2023.

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. O que é Recuperação Energética? 2023. Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/suplementares/o-que-e-recuperacao-energetica/>. Acesso em: 23 out. 2023.

STILPEN, Monique Riscado et al. Análise do Programa RenovaBio no âmbito do setor de biogás e biometano do Brasil. Revista Brasileira de Energia, Itajubá, v. 24, nº 4, p. 1-19, out./dez. 2018. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/441>. Acesso em: 31 out. 2023.

THEMELIS, Nickolas J. et al. Guia para a Recuperação de Energia e Materiais (REM) a Partir de Resíduos Sólidos. EEC/GWC, 2016. Disponível em: <https://abren.org.br/downloads/>. Acesso em: 02 out. 2023.

TIWARI, Sunil et al. Role of circular economy, energy transition, environmental policy stringency, and supply chain pressure on CO2 emissions in emerging economies. Geoscience Frontiers, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987123001494?via%3Dihub>. Acesso em: 16 out. 2023.

UNEP – United Nations Environment Programme. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication - A Synthesis for Policy Makers. UNEP, 2011. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/pathways-sustainable-development-and-poverty-eradication>. Acesso em: 16 out. 2023.

USAID – United States Agency For International Development. Clean Energy and The Circular Economy: Opportunities for Increasing the Sustainability of Renewable Energy Value Chains. Arlington, USA: Tetra Tech ES, Inc, 2021. Disponível em: <https://www.usaid.gov/energy/sure/circular-economy/opportunities-assessment>. Acesso em: 12 out. 2023.

WIJKMAN, Anders; SKÅNBERG, Kristian. The circular economy and benefits for society: Jobs and climate clear winners in an economy based on renewable energy and resource efficiency: A study pertaining to Finland, France, the Netherlands, Spain and Sweden. Club of Rome, 2015. Disponível em: <https://www.clubofrome.org/publication/the-circular-economy-and-benefits-for-society/> Acesso em: 10 out. 2023.

WIRTH, Ioli Gewehr; OLIVEIRA, Cristiano Benites. A Política Nacional de Resíduos Sólidos e os modelos de gestão. Catadores de materiais recicláveis: um encontro nacional. Brasília: Ipea, 2016. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/livros/livros/160331_livro_catadores_cap_9.pdf. Acesso em: 25 out. 2023.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources: Waste to Energy. 2013. Disponível em:
https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_7b_Waste_to_Energy.pdf. Acesso em: 06 nov. 2023.

ZVEIBIL, Victor Zular. O Programa LIXÃO ZERO: estratégias, limitações e desafios. Rev. Adm. Munic, p. 15-24, 2015. Disponível em:
<https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-913279>. Acesso em: 25 out. 2023.