

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

STHÉFANI SILVA SANTOS

**“WASTE TO ENERGY”: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS
SANITÁRIOS VIA ANÁLISE SWOT**

**Bagé
2024**

STHÉFANI SILVA SANTOS

**“WASTE TO ENERGY”: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS
SANITÁRIOS VIA ANÁLISE SWOT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Sabrina Neves da Silva

**Bagé
2024**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S1627415" Santos, Sthéfani Silva

"WASTE TO ENERGY": OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS
VIA ANÁLISE SWOT / Sthéfani Silva Santos.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2024.

"Orientação: Sabrina Neves Da Silva".

1. Biogás . 2. Aterros sanitários. 3. Geração de
energia. 4. SWOT. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

STHÉFANI SILVA SANTOS

“WASTE TO ENERGY”: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS VIA ANÁLISE SWOT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para o Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 17 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Msc. Daniele Ferreira Lopes
UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/12/2024, às 10:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/12/2024, às 20:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DANIELE FERREIRA LOPES, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 17/12/2024, às 20:54, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1627415** e o código CRC **07970CED**.

AGRADECIMENTO

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, em primeiro lugar, pois é por sua graça e misericórdia que estou aqui hoje. Agradeço também aos meus anjos da guarda, que sempre estiveram comigo, me guiando e protegendo. Aos meus pais, minha querida mãe Edevanir Santos e meu querido pai Edivaine Dalbão, que foram fundamentais durante todos esses anos de estudos. O amor, a paciência e o apoio de vocês foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Sem vocês, nada disso seria possível, eu amo vocês com todo meu coração.

Agradeço, ainda, à minha orientadora, Sabrina Neves da Silva, por todo o apoio, dedicação e incentivo que me proporcionou. Suas orientações e palavras de ânimo foram essenciais para que eu seguisse firme nessa caminhada. Sou imensamente grata por cada ensinamento e pela paciência de me acompanhar ao longo deste processo.

Aos meus colegas, agradeço por todo o conhecimento compartilhado, pelas discussões enriquecedoras e pelo apoio mútuo durante o curso. Juntos, aprendemos e crescemos, e a amizade de cada um de vocês foi muito importante para a realização deste trabalho.

E não poderia deixar de agradecer a todos meus professores que me acompanharam ao longo de todo o curso. Cada um de vocês contribuiu com seu conhecimento e sabedoria para minha formação, e sou muito grata por todos os ensinamentos que recebi.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero obrigado.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários para a geração de energia, utilizando a análise SWOT para identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas a essa prática. O estudo inicia-se com a caracterização dos componentes e do processo de formação do biogás, destacando sua composição e potencial energético. Em seguida, são avaliadas as tecnologias disponíveis para captação e conversão do biogás em energia elétrica, considerando sua viabilidade técnica e econômica. A análise SWOT é aplicada para mapear os fatores internos e externos que influenciam o aproveitamento do biogás em aterros, identificando oportunidades, como políticas públicas e incentivos financeiros, além de ameaças como barreiras regulatórias e desinteresse de grandes investidores. Com base nos resultados, o estudo propõe recomendações para otimizar a utilização do biogás, destacando seu potencial para promover benefícios ambientais e econômicos, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e redução de emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: biogás; aterros sanitários; geração de energia; SWOT.

ABSTRACT

This work aims to analyze the utilization of biogas generated in landfills for energy production, using SWOT analysis to identify the strengths, weaknesses, opportunities, and threats associated with this practice. The study begins with the characterization of the components and the biogas formation process, highlighting its composition and energy potential. Subsequently, the available technologies for capturing and converting biogas into electricity are evaluated, considering their technical and economic viability. SWOT analysis is applied to map the internal and external factors influencing the utilization of biogas in landfills, identifying opportunities such as public policies and financial incentives, as well as threats like regulatory barriers and the lack of interest from major investors. Based on the results, the study proposes recommendations to optimize biogas utilization, highlighting its potential to promote environmental and economic benefits, aligning with sustainability goals and the reduction of greenhouse gas emissions.

Keywords: biogas; landfills; energy generation; SWOT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plano de gerenciamento de resíduos sólidos.....	22
Figura 2 - Prioridade de gerenciamento de resíduos sólidos.....	24
Figura 3 - Desenho esquemático de um lixão.....	25
Figura 4 - Desenho esquemático de um aterro sanitário.....	26
Figura 5 - Desenho esquemático de um aterro controlado.....	28
Figura 6 - Emissões em CO ₂ do setor de resíduos dos períodos 1990 a 2020.....	30
Figura 7 - Fases da degradação dos RSUs em aterro.....	34
Figura 8 - Poços verticais.....	36
Figura 9 - Impermeabilização do aterro.....	37
Figura 10 - Ciclo de desenvolvimento de um projeto MDL e responsabilidades.....	38
Figura 11 - Organização da Matriz SWOT.....	41
Figura 12 - Termoelétrica Caieiras.....	49

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Classificação de Resíduos sólidos de Acordo com sua Origem.....	20
Quadro 2 - Classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos que trazem ao meio ambiente.....	21
Quadro 3 - Perguntas para elaboração da matriz SWOT.....	44
Quadro 4 - Principais elementos estratégicos para o aproveitamento do biogás.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
CH₄ - Metano
CO₂ - Dióxido de Carbono
NH₃ - Amônia
H₂S - Sulfeto de hidrogênio
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
PoAs - Programas de atividades
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
CIBiogás - Centro Internacional de Energias Renováveis
ABiogás - Associação Brasileira do Biogás
ABegás - Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado
BEN - Balanço Energético Nacional
GDL - Gás de Lixo
RCEs - Reduções Certificadas de Emissão
GEEs - Gases do Efeito Estufa
DQO - Demanda Química de oxigênio
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
AIE - Agência Internacional de Energia
Planares - Plano Nacional de Resíduos Sólidos
NBR - Norma Brasileira
KW - Quilowatt
MW - Megawatt
PGRS - Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos
RSU - Resíduos sólidos urbanos
SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS - Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1	Resíduos Sólidos.....	17
2.1.1	Definição de Lixo	19
2.2	Classificação dos Resíduos Sólidos.....	19
2.2.1	Gerenciamento dos Resíduos Sólidos.....	21
2.2.2	Etapas de Gerenciamento.....	22
2.2.3	Disposição de RSU.....	25
2.2.3.1	Lixão	25
2.2.3.2	Aterro Sanitário.....	26
2.2.3.3	Aterro Controlado.....	27
2.2.4	Aspectos ambientais.....	28
2.2.4.1	Emissões relacionadas ao RSU.....	29
2.3	Balanco Energético Brasileiro.....	31
2.3.1	Papel do biogás na Matriz Energética Brasileira.....	32
2.3.2	Biogás.....	33
2.3.2.1	Definição de Biogás.....;	33
2.3.2.2	Produção do Biogás.....	34
2.3.2.3	Coleta do GDL.....	35
2.4	O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.....	37
2.5	Análise SWOT.....	40
3	METODOLOGIA.....	43
4	RESULTADOS.....	45

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICES.....	63

1 INTRODUÇÃO

A importância do tema está relacionada aos benefícios que a correta disposição final dos RSU pode oferecer. Além de reduzir os danos ambientais relacionados à poluição generalizada e liberação massiva de gases do efeito estufa, possibilita a produção do biogás, um recurso energético que pode ser tratado e comercializado como combustível ou energia elétrica, e a geração de receitas financeiras com a venda de créditos de carbono (Montagner, 2021).

A crescente preocupação mundial com a sustentabilidade e a gestão eficiente dos RSU tem impulsionado a busca por soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis. Nesse contexto, o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários para a geração de energia surge como uma alternativa promissora, capaz de transformar passivos ambientais em ativos energéticos. O biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), é produzido pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica presente nos resíduos. Sua captura e utilização não apenas mitiga as emissões de GEEs, mas também oferecem uma fonte renovável de energia, contribuindo para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis (Rodrigues, 2022).

A análise SWOT, uma ferramenta estratégica que examina forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, pode ser aplicada para avaliar o potencial de aproveitamento do biogás em aterros sanitários. Essa abordagem permite identificar os fatores internos que podem facilitar ou dificultar a implementação de projetos, bem como os fatores externos que podem influenciar seu sucesso. Estudos recentes indicam que, apesar dos desafios técnicos e econômicos, como a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, existem oportunidades significativas associadas a políticas de incentivo e inovação tecnológica (Freitas, 2022).

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar, por meio da aplicação da análise SWOT, o potencial de aproveitamento do biogás para geração de energia em aterros sanitários, propondo estratégias que maximizem os benefícios ambientais e econômicos dessa prática. Assim, espera-se contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis no

gerenciamento de resíduos sólidos, alinhadas aos objetivos globais de sustentabilidade e redução de emissões.

1.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial de aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários para a geração de energia, utilizando a análise SWOT como ferramenta para identificar as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas a essa prática.

1.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar e caracterizar os componentes e o processo de formação do biogás em aterros sanitários.
- b) Avaliar as tecnologias disponíveis para a captação e conversão do biogás em energia elétrica, analisando sua viabilidade técnica e econômica.
- c) Aplicar a análise SWOT para mapear as forças e fraquezas internas relacionadas ao aproveitamento do biogás em aterros.
- d) Explorar as oportunidades externas que podem ser aproveitadas para incentivar o uso do biogás como fonte de energia renovável.
- f) Identificar as ameaças externas que podem impactar a implementação de projetos de geração de energia a partir do biogás, como barreiras regulatórias e desafios de mercado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão da literatura é dividida em tópicos que abordam de maneira sistemática os principais aspectos relacionados ao biogás produzido em aterros sanitários. Primeiramente, discute-se a definição de resíduos sólidos, abrangendo a compreensão do conceito de lixo e a classificação dos diferentes tipos de resíduos, essencial para a formulação de estratégias de manejo adequadas. Em seguida, são exploradas as práticas de disposição de RSU, com foco nas técnicas de deposição em aterros sanitários e os consequentes impactos ambientais, incluindo a emissão de gases de efeito estufa. O tópico subsequente introduz o biogás, um subproduto da decomposição anaeróbica dos resíduos, destacando seu potencial para a geração de energia sustentável. Além disso, a revisão examina o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) como uma estratégia para promover projetos de captação e utilização de biogás, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade ambiental e econômica. Por fim, a análise SWOT é aplicada para avaliar as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas ao gás de lixo (GDL).

2.1 Resíduos Sólidos

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da sua NBR 10.004/2004 define resíduos sólidos como:

Resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido 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 tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível (ABNT NBR 10.004. p.1, 2004).

Com a aprovação da Lei 12.305/2010, que criou a PNRS, a definição de resíduo sólido foi expandida em relação à norma técnica brasileira anterior. Com nova definição inclui, além dos materiais sólidos, os gases armazenados em recipientes. Essa alteração é estabelecida no Capítulo II, artigo 3º:

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Segundo Barros (2012), o termo lixo designa qualquer material ou produto que não podemos ou não desejamos mais utilizar, levando ao seu descarte, seja no ambiente doméstico ou profissional. Em contrapartida, quando falamos em resíduos sólidos, estamos nos referindo a uma ampla gama de materiais, que abrange resíduos industriais, hospitalares, agrícolas, oriundos da mineração, além dos que são coletados pelos serviços de limpeza pública. De acordo com a PNRS, esses resíduos têm o potencial de ser valorizados. Antigamente, o lixo era considerado um elemento sem valor, exigindo investimentos públicos para sua coleta e descarte. Contudo, com a implementação da PNRS, essa visão se transformou, e os resíduos sólidos passaram a ser vistos como fontes de geração de valor econômico. A disposição final dos rejeitos é discutida somente quando não existem alternativas viáveis de reaproveitamento econômico ou técnico.

Outro termo introduzido pela Lei 12.305/2010 PNRS que não possuía uma definição anterior na norma ABNT NBR 10.004/2004 é a definição de rejeitos. A PNRS estabelece essa definição em seu capítulo II, artigo 3º:

XV - Os rejeitos são aqueles resíduos que, após todas as tentativas de tratamento e recuperação tecnológicas e economicamente viáveis, não possuem outra destinação possível além da disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Dessa forma, um resíduo sólido será classificado como rejeito apenas quando todas as opções de reutilização, reciclagem, recuperação e tratamento forem esgotadas, restando como única alternativa a disposição em aterros que atendam aos requisitos ambientais.

2.1.1 Definição de Lixo

No contexto da legislação brasileira, instituída pela Lei nº 12.305/2010, é importante compreender as diferenças entre os termos resíduos sólidos urbanos, rejeitos e lixo, cada um com implicações distintas para o gerenciamento ambiental e econômico. Conforme a ABNT NBR 10004/2004 define o lixo como:

Os restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo se apresentar no estado sólido e líquido, desde que não seja passível de tratamento.

2.2.1 Classificação dos Resíduos Sólidos

Para obter uma escolha mais apropriada em relação à destinação final do material descartado, é estabelecida uma classificação conforme sua origem e sua periculosidade. A classificação dos resíduos na legislação brasileira está definida principalmente pela PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, e regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010.

O Quadro 1, apresenta a classificação dos resíduos sólidos com base em sua origem.

Quadro 1 - Classificação de resíduos sólidos de acordo com sua origem

Classificação	Característica
Domiciliar	Os originários de atividades domésticas em residências urbanas
Limpeza urbana	Os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana
Sólidos urbanos	Resultantes dos resíduos domiciliares e resíduos de limpeza urbana.
Industriais	Gerados em processos produtivos e em instalações industriais.
Serviços de Saúde	Originados de atividades médicas, odontológicas, veterinárias, farmácias, entre outros serviços de saúde.
Construção Civil	Resultantes de construções, reformas, reparos e demolições de obras, bem como os resultantes da preparação e escavação de terrenos.
Agrossilvopastoris	Resultantes de atividades agropecuárias e silviculturais.
Serviços de Transporte	Gerados nos terminais de transporte e no sistema de transporte público, incluindo resíduos de portos, aeroportos e rodoviárias.
Mineração	Provenientes da extração e do beneficiamento de minérios.

Fonte: Adaptado da Lei nº 12.305/2010.

A seguir, o Quadro 2 apresenta a classificação dos resíduos sólidos, considerando os diferentes níveis de risco que esses materiais oferecem ao meio ambiente e à saúde pública.

Quadro 2 - Classificação dos resíduos sólidos quanto aos riscos que trazem ao meio ambiente

Classificação	Característica
Classe I Perigosos	Inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública e ao meio ambiente
Classe II Não perigosos	Não apresentam nenhuma das características acima, podem ser divididos em Classe II A – Não inertes e Classe II B – Inertes.
Classe II A Não Inertes	Incluem resíduos orgânicos e recicláveis, como restos de alimentos e materiais como papel, vidro e plástico. Esses resíduos podem ser reaproveitados ou reciclados, reduzindo o impacto ambiental.

Fonte: Adaptado da Lei nº 12.305/2010.

2.2.1 Gerenciamento dos Resíduos Sólidos

De acordo com a PNRS em seu capítulo II, artigo 3º define o gerenciamento de resíduos sólidos como:

X - gerenciamento de resíduos sólidos: conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, de acordo com plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, exigidos na forma desta Lei (BRASIL. Lei n. 12.305, 2010).

O gerenciamento de resíduos sólidos urbanos tem se tornado um dos principais desafios para a sustentabilidade das cidades, devido ao aumento da população e do consumo. A crescente produção de resíduos exige a implementação de estratégias mais eficientes para a coleta, tratamento e destinação final, de forma a minimizar os impactos ambientais e promover o aproveitamento dos materiais descartados.

Um conceito introduzido pela Lei Federal é a responsabilidade compartilhada, estabelecendo a obrigatoriedade de toda a sociedade participar da gestão dos resíduos, e o ciclo de vida dos produtos, em oposição ao modelo linear “produção-consumo-descarte”. No entanto, a falta de infraestrutura e recursos, especialmente em regiões menos desenvolvidas, tem dificultado a implementação de sistemas integrados de gestão de resíduos (Zago e Barros, 2019).

Além de que, o aproveitamento energético dos resíduos, como a geração de biogás, surge como uma alternativa para não apenas minimizar o impacto ambiental dos aterros, mas também diversificar a matriz energética nacional. Contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e reforça a importância de políticas de incentivo à valorização de resíduos como insumo energético.

2.2.2 Etapas de Gerenciamento

O Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), conforme representado na Figura 1, organiza o tratamento dos resíduos em etapas interconectadas, visando à gestão eficiente e sustentável. Cada fase é projetada para assegurar que os resíduos sejam tratados adequadamente.

Figura 1 - Plano de gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Soluções Ambientais, 2024.

O processo inicial envolve identificar e quantificar os diferentes tipos e volumes de resíduos produzidos, o que possibilita a seleção das estratégias mais eficazes para manejo e tratamento, de acordo com as características e necessidades de cada local. Posteriormente, a separação dos resíduos é um passo fundamental para assegurar que eles sejam direcionados de maneira ambientalmente correta. A classificação dos resíduos na origem é essencial para aumentar a eficiência dos planos de gestão de resíduos (Silva *et al*, 2021 apud Silva, 2023).

Após a segregação, os resíduos passam pela etapa de acondicionamento onde envolve o processo de colocá-los em sacos ou recipientes que são projetados para prevenir vazamentos e resistir a possíveis danos, como perfurações, rupturas e tombamentos. Além disso, esses recipientes devem ser escolhidos de acordo com as características físicas e químicas dos resíduos que estão sendo armazenados, garantindo a segurança e a integridade, tanto do conteúdo como do ambiente circundante (Anvisa, 2018; Silva, 2023).

A coleta de resíduos envolve a retirada dos materiais descartados pelos geradores e seu transporte utilizando os meios adequados. Após essa fase, os resíduos seguem para processos que podem englobar estações de transferência, tratamentos específicos e, por fim, a destinação final correta. Esse processo é essencial para evitar riscos à saúde pública, que podem surgir devido à gestão inadequada dos resíduos (Monteiro, 2001 apud Silva, 2023).

A fase de transporte refere-se à movimentação dos resíduos desde o ponto de origem até os locais de triagem, estações de transferência, instalações de tratamento ou, em alguns casos, diretamente para o local de destinação final. Para essa etapa, diferentes tipos de veículos podem ser empregados, sendo os caminhões compactadores e caminhões baú os modelos mais comumente utilizados (Massukado, 2004 apud Silva, 2023).

Assim, os RSU podem ser encaminhados para diferentes destinos, dependendo de sua natureza. Os resíduos orgânicos, por exemplo, podem ser tratados em usinas de compostagem, enquanto materiais recicláveis são direcionados para usinas de reciclagem. Já os resíduos hospitalares e perigosos podem passar por processos de incineração, e os rejeitos

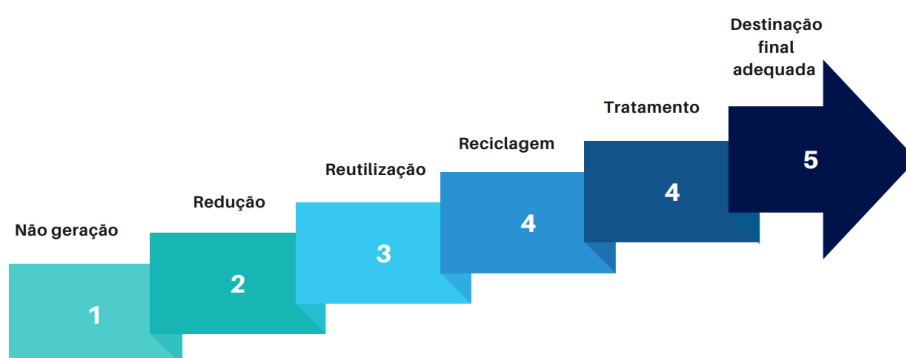
geralmente são enviados para aterros sanitários, onde são dispostos de forma final (Silva, 2023).

É fundamental a utilização da ordem de prioridade de gestão dos resíduos, essa ordem prioriza ações que busquem a minimização da geração de resíduos. Conforme a Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, descreve a prioridade de gestão no capítulo I, artigo 9º:

Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil. Lei n. 12.305, 2010).

A Figura 2 ilustra a hierarquia de prioridades no gerenciamento de resíduos sólidos, destacando as etapas recomendadas para minimizar o impacto ambiental.

Figura 2 - Prioridade de gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Adaptado da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.

A hierarquia para o gerenciamento de resíduos sólidos prioriza, antes de tudo, a redução da quantidade de resíduos gerados. Em seguida, conforme a lei recomenda a reutilização e a reciclagem para aproveitar os materiais e diminuir o descarte. A recuperação de energia é considerada uma opção intermediária, enquanto a disposição em aterros é a última alternativa, destinada apenas ao que não pode ser reaproveitado. Esse modelo busca otimizar o uso dos recursos e diminuir o impacto ambiental dos resíduos.

2.2.3 Disposição de RSU

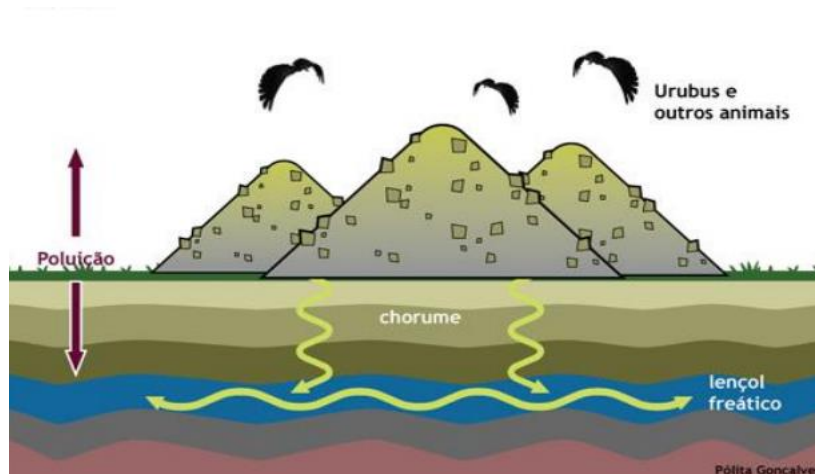
2.2.3.1 Lixão

Lixões são depósitos a céu aberto onde os resíduos são descartados sem qualquer tipo de supervisão ou tratamento adequado, configurando uma das formas mais danosas de gestão de resíduos. Além de comprometerem a saúde pública, esses locais provocam sérios danos ao meio ambiente, como a poluição do solo e das águas subterrâneas.

Os resíduos orgânicos, originados principalmente de restos de alimentos descartados, passam por um processo natural de decomposição que dá origem a um líquido conhecido como chorume. Esse subproduto, de coloração escura e odor intenso, é altamente tóxico e pode causar contaminação prolongada no solo e nos lençóis freáticos, mesmo após o encerramento de áreas de descarte inadequado, como lixões. Ademais, a decomposição desses resíduos libera gases que agravam os impactos ambientais, tornando sua gestão um desafio crucial (Sanchez, 2013 apud Silva, 2023).

Os lixões frequentemente atraem animais como ratos e insetos, que atuam como vetores de diversas doenças, gerando um ambiente prejudicial à saúde das comunidades vizinhas. Na Figura 3, apresenta-se uma representação esquemática de um lixão a céu aberto, também chamado de vazadouro.

Figura 3 - Desenho esquemático de um lixão

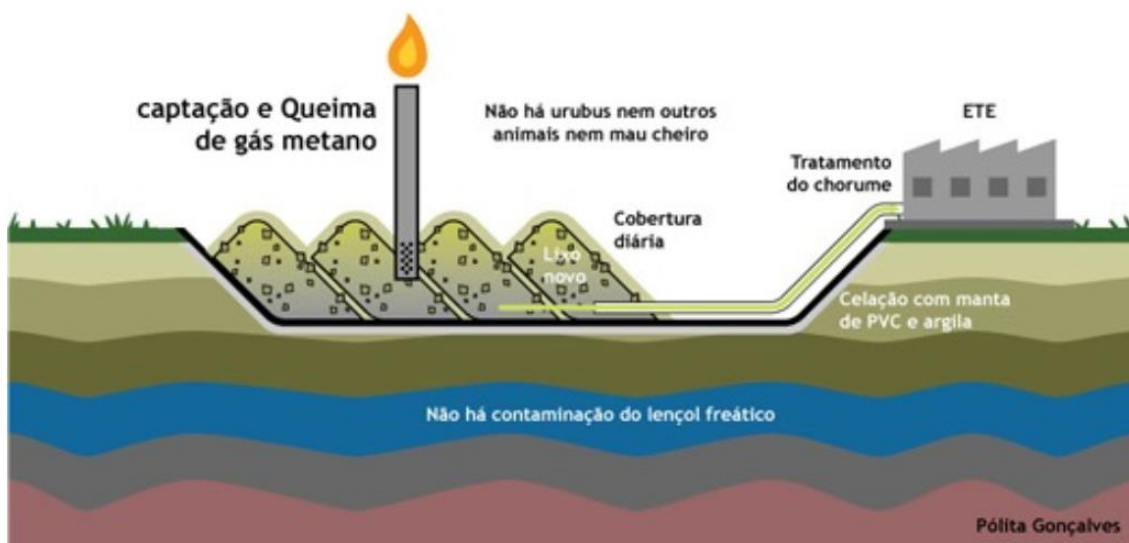


Fonte: Pólita Gonçalves, 2019.

2.2.3.2 Aterro Sanitário

Aterros sanitários é a forma adequada de disposição final de resíduos sólidos urbanos, projetados para garantir que o descarte seja feito de maneira controlada. Esses aterros consistem em camadas de impermeabilização, normalmente feitas de argila compactada ou geomembranas sintéticas, que evitam a infiltração de líquidos contaminantes, como o chorume. Durante o processo de construção, são implementados sistemas de drenagem para coletar o chorume e tubulações para capturar gases, como o CH_4 , gerado pela decomposição dos resíduos. Esse gás pode ser tratado ou utilizado para a geração de energia, contribuindo para a sustentabilidade da operação do aterro e de comunidades (Akhtar, Hollaender e Yuan, 2023).

Figura 4 - Desenho esquemático de um Aterro Sanitário



Fonte: Pólita Gonçalves, 2019.

A escolha do local para a implantação de aterros sanitários deve atender a critérios rigorosos, com o objetivo de prevenir impactos negativos ao meio ambiente e à saúde da população. Conforme as diretrizes legais, esses aterros devem ser estabelecidos em regiões com condições geológicas e geográficas apropriadas, afastados de áreas urbanas, fontes de água potável, regiões de preservação ambiental e terrenos propensos a alagamentos. O solo

da área selecionada precisa ter baixa permeabilidade, como o de composição argilosa, para minimizar o risco de contaminação dos lençóis freáticos.

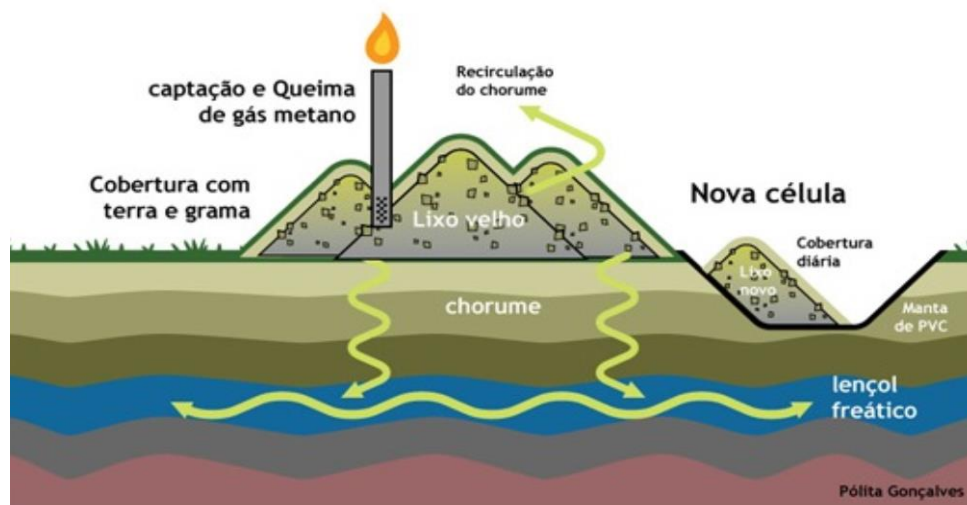
A legislação brasileira, como a PNRS, estipula que aterros devem estar localizados em áreas onde é possível minimizar os impactos ambientais, o que inclui distâncias mínimas de centros urbanos e corpos d'água. Silva (2023) reforça que a escolha do local também deve levar em conta os vetores predominantes, para evitar que odores afetem áreas residenciais. Além disso, a acessibilidade para veículos de coleta e transporte de resíduos é um fator importante a ser considerado na seleção de locais para aterros sanitários.

2.2.3.3 Aterro Controlado

A disposição de resíduos em estruturas controladas representa uma tentativa de reduzir os danos ambientais, embora ainda careçam de critérios rigorosos presentes em outras formas de gerenciamento, como os aterros sanitários. Nesses locais, a ausência de impermeabilização na base aumenta significativamente o risco de infiltração de líquidos gerados pela decomposição dos resíduos. O chorume, por exemplo, ao percolar pelo solo, pode atingir lençóis freáticos, comprometendo a qualidade da água subterrânea e de fontes próximas (Audibert, 2011).

Para mitigar esses efeitos negativos, algumas dessas áreas utilizam lagoas específicas para o tratamento do lixiviado. Essa medida busca reduzir os níveis de contaminação, protegendo, dentro das limitações dessas instalações, os recursos hídricos locais e a biodiversidade. Contudo, apesar desses esforços, os riscos associados a esse modelo reforçam a necessidade de avanços em tecnologias e práticas mais seguras, como aquelas empregadas em aterros sanitários, que oferecem maior controle ambiental.

Figura 5 - Desenho esquemático de um Aterro Controlado



Fonte: Pólita Gonçalves, 2019.

2.2.4 Aspectos ambientais

Os Resíduos Sólidos gerados nos setores doméstico, industrial e de construção são coletados e descartados em unidades sólidas municipais aterros resíduos com características diferentes estão sendo coletado e despejado no local onde cria muitos problemas ambientais. Para manusear e descartar os resíduos, mecanismos apropriados e legislação reguladora devem ser formulados e seguidos. O transbordamento de resíduos nos aterros pode contribuir para problemas ambientais como poluição da água, destruição de habitats e contaminação do solo devido à sua natureza inorgânica. A camada de base do aterro deve ser projetada com a camada impermeável. O forro protege as águas subterrâneas, o aterro é coberto no topo com argila e cascalho para evitar vazamento de água. Portanto, os aterros sanitários evitam problemas de saúde e riscos ambientais, mas encarece os custos (Parameswari *et al.*, 2021).

Visando a saúde e a preservação do meio ambiente, o manejo adequado dos resíduos sólidos, sendo uma importante estratégia foi criado a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 que estabelece a PNRS, foi um marco no saneamento básico do país em relação aos resíduos sólidos. Nela, são apresentados instrumentos e diretrizes importantes para permitir o avanço e reverter à situação dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos

decorrente do manejo inadequado dos resíduos sólidos (Brasil, 2010; Rogerio, 2023).

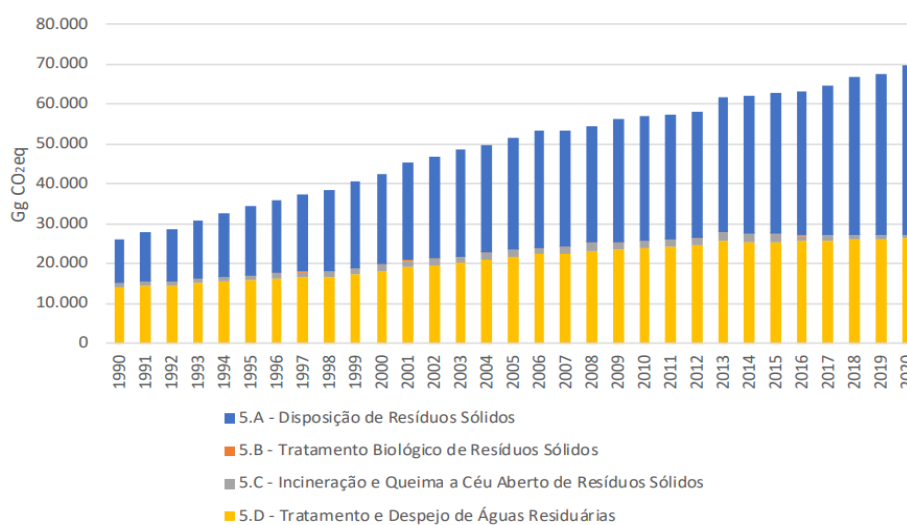
Contudo, os locais de disposição de RSU são também fonte de emissão de gases de efeito estufa, considerados responsáveis pelo aquecimento global. Dessa forma, ampliou-se o interesse em conferir tratamento adequado à gestão de RSU. Atualmente, a utilização de tecnologias que evitem a decomposição anaeróbica dos resíduos, ou que recuperem e queimem esses gases, é incentivada com recursos a fundo perdida, conhecidos como créditos de carbono (Pereira e Curi, 2021).

2.2.4.1 Emissões Relacionadas ao RSU

As emissões provenientes do setor de RSU são compostas majoritariamente por CH_4 que representa 95,7% do total, resultado da decomposição de materiais orgânicos biodegradáveis nos locais de disposição e tratamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos. Em menor escala, outros gases também são emitidos, como o N_2O , que corresponde a 4,0%, e o CO_2 , com 0,3%, sendo este último gerado principalmente durante a incineração de resíduos sólidos de origem fóssil.

A Figura 6 apresenta a evolução histórica das emissões por subsetores, medida em Gg de CO_2 equivalente. Nota-se que o subsetor de disposição de RSU foi o principal responsável pelas emissões totais do setor em 2020, com uma participação de 60,9%. Em seguida, o subsetor de tratamento e despejo de águas residuárias contribuiu com 37,7%. Os subsetores de incineração e queima de resíduos a céu aberto e tratamento biológico de resíduos sólidos apresentaram contribuições menores, representando 1,3% e 0,1%, respectivamente, no mesmo ano (MCTI, 2022).

Figura 6 - Emissões em CO₂ do setor de Resíduos dos períodos 1990 a 2020.



Fonte: MCTI, 2022.

Em 2020, o subsetor de disposição de resíduos sólidos foi responsável pela emissão de 3.172,9 Gg de CH₄, correspondendo a 60,9% das emissões do setor em termos de CO₂ equivalente. Comparado ao ano de 2016, houve um aumento de 16,7% nas emissões. Esse subsetor abrange a emissão de metano gerado durante a decomposição anaeróbica da matéria orgânica em aterros sanitários, aterros controlados e lixões (MCTI, 2022).

A quantidade de CH₄ gerada no local de disposição final dos resíduos sólidos depende, principalmente, da quantidade de resíduo descartada, da composição gravimétrica dos resíduos e das condições do local de destinação. Outros fatores relevantes incluem a temperatura e umidade do ambiente, a vida útil do local de disposição, bem como as condições de operação e manejo. Locais adequados, como aterros sanitários, tendem a gerar maiores emissões de metano devido à criação de um ambiente mais favorável à decomposição anaeróbica, em comparação a locais inadequados, como lixões.

Embora os aterros sanitários sejam responsáveis por uma parcela maior das emissões, eles desempenham um papel essencial na melhoria das condições sanitárias e na preservação do meio ambiente. Além disso, sua estrutura permite o aproveitamento energético do metano, contribuindo para a sustentabilidade do manejo de resíduos sólidos urbanos (MCTI, 2022).

2.3 Balanço Energético Nacional

O Balanço Energético Nacional (BEN) desenvolvido pela EPE, em síntese, fornece uma visão abrangente da dinâmica energética do Brasil, destacando a diversificação das fontes e o crescente papel das energias renováveis na matriz energética nacional. Em meio a este cenário, o biogás de aterro emerge como uma alternativa promissora, não apenas por seu potencial de geração de energia, mas também por seus benefícios ambientais significativos. Originado da decomposição anaeróbica de resíduos orgânicos em aterros sanitários, o biogás representa uma solução eficiente para a gestão de resíduos sólidos e a redução de emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às metas de sustentabilidade e transição energética do país.

De acordo com o BEN publicado em 2024, tendo como base o ano de 2023, nos últimos anos, o biogás de aterro tem ganhado destaque como uma fonte renovável de energia, contribuindo significativamente para a matriz energética do Brasil. Esse tipo de biogás representa uma parcela importante da produção de energia renovável no país, destacando-se como uma alternativa eficaz para a redução de emissões de GEE. Em 2024, o Brasil continuou a investir em tecnologias para a captura e utilização do biogás de aterro, ampliando sua capacidade de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos (BEN, 2024).

A utilização do biogás de aterro minimiza impactos ambientais e traz benefícios sociais, isso porque vai mitigar o impacto ambiental dos aterros ao reduzir a emissão de metano e promover o desenvolvimento local, gerando empregos e incentivando o avanço de novas tecnologias (Lima, 2023).

Ainda segundo Lima (2023), o setor enfrenta desafios e oportunidades. Os principais desafios incluem a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, além de superar barreiras regulatórias. As oportunidades residem na expansão do uso do biogás para a geração de eletricidade e como combustível veicular, o que está alinhado com as políticas de sustentabilidade e transição energética do Brasil.

2.3.1 Papel do Biogás na Matriz Energética Brasileira

O biogás tem ganhado crescente destaque na matriz energética brasileira, sendo valorizado tanto como fonte para a geração de energia quanto como combustível sustentável. Em 2022, foi firmada uma parceria estratégica entre a Associação brasileira das empresas distribuidoras de gás canalizado (ABegás) e a Associação brasileira do biogás (ABiogás), visando promover a injeção de biometano, uma forma purificada de biogás, na rede de distribuição. Essa iniciativa reflete os esforços de diversas empresas em reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (ABegás, 2022).

Conforme dados da ABiogás, há previsão de investimentos significativos no setor, com a construção de 25 novas usinas e aporte estimado em R\$ 60 bilhões até 2030. A expectativa é atingir uma produção de 30 milhões de metros cúbicos de biometano por dia, com potencial técnico superior a 120 milhões de metros cúbicos diários. Esses avanços representam um marco importante para consolidar o biogás como uma fonte renovável de energia no Brasil, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa (ABegás, 2022).

Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), a evolução do biogás no Brasil tem sido exponencial. Entre 2017 e 2021, o número de usinas passou de 271 para 755, com uma oferta de 2,3 bilhões de metros cúbicos de biogás. O CIBiogás projeta um crescimento de 22% na produção, considerando 56 novas centrais que estão em implantação ou reforma. Vale ressaltar que 4% das plantas em desenvolvimento representam 15% do volume total de biogás, indicando o maior porte das novas unidades, conforme o relatório Panorama do Biogás no Brasil 2021.

A evolução do setor também foi impulsionada por mudanças regulatórias, como o marco da micro e minigeração distribuída, vigente desde 2012 e atualizado em 2021. Essa legislação tem permitido que geradoras de biogás recebam créditos ao injetar eletricidade na rede das distribuidoras, criando um ambiente mais favorável para o desenvolvimento do setor (ABegás, 2022).

Nos próximos capítulos, este trabalho abordará o papel do biogás, com foco especial em sua geração em aterros sanitários. Será analisado como o biogás, um subproduto da decomposição anaeróbica de resíduos sólidos, pode

ser aproveitado na produção de energia. A discussão incluirá as oportunidades e os desafios técnicos e econômicos associados a essa fonte renovável, destacando a importância de políticas públicas e iniciativas sustentáveis para maximizar seus benefícios.

2.3.2 Biogás

2.3.2.1 Definição de biogás

A digestão anaeróbica, também chamada de biodigestão de materiais orgânicos, é um processo fermentativo no qual compostos orgânicos complexos são convertidos em substâncias mais simples. Essa técnica é amplamente reconhecida por sua eficiência no tratamento de grandes volumes de resíduos, reduzindo significativamente seu potencial poluente (GEF Biogás Brasil, 2020).

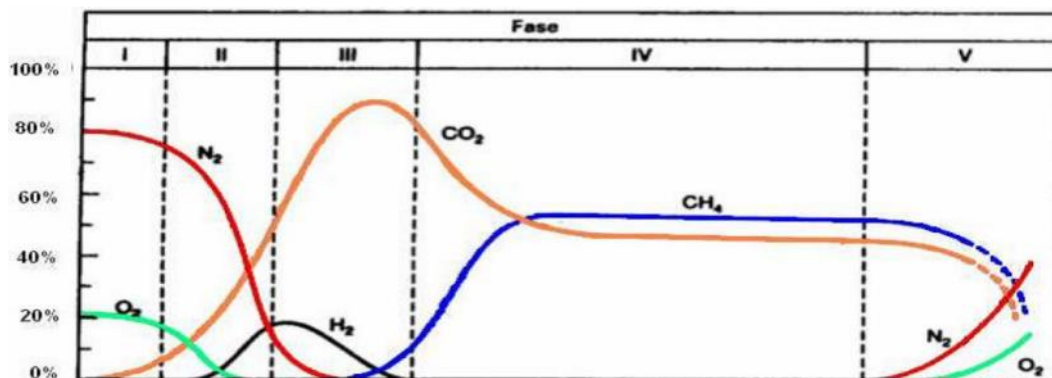
Esse mecanismo ocorre devido à ação de diferentes grupos de micro-organismos, especialmente aqueles que não dependem de oxigênio para crescer, conhecidos como micro-organismos anaeróbios. Eles interagem de forma simultânea e cooperativa até que os produtos finais sejam gerados. O principal subproduto desse processo é o biogás, que é composto principalmente de CH_4 e CO_2 além de pequenas quantidades de hidrogênio H_2 , NH_3 e outros gases em menor proporção (GEF Biogás Brasil, 2020).

Conforme relatado pelo GEF Biogás Brasil (2020), o processo de digestão anaeróbica ocorre naturalmente no ambiente, sendo comum na decomposição de matéria orgânica presente em lixões, aterros sanitários ou lagoas de armazenamento de efluentes. Nessas situações, os resíduos ou efluentes expostos ao ar são decompostos por micro-organismos aeróbios, enquanto as partes não expostas ao oxigênio são degradadas por micro-organismos anaeróbios. No entanto, com o uso de tecnologias apropriadas, como biodigestores, esse processo pode ser otimizado para o tratamento de resíduos sólidos e líquidos. Além da geração de biogás, a digestão anaeróbica em biodigestores produz um subproduto conhecido como digestato, que corresponde à fração líquida digerida, representando uma forma de reciclagem e reaproveitamento desses materiais.

2.3.2.2 Produção do biogás

A produção de biogás nos aterros sanitários ocorre em cinco fases distintas, conforme o estágio de decomposição da matéria orgânica, como ilustrado na Figura 11 (Tchobanoglous, 2012 apud Quirino Ginga, 2021).

Figura 7 - Fases da degradação dos resíduos sólidos urbanos em aterro



Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, 2012 apud Quirino Ginga, 2021.

Na Fase I, também chamada de fase aeróbia ou fase inicial, ocorre um intenso consumo de oxigênio, durante um curto período, que pode variar de dias a semanas. Nessa fase, os microrganismos presentes no aterro contribuem para a formação de H₂O e CO₂, gerando uma pressão interna que impede a entrada de oxigênio e a difusão de gases atmosféricos para o interior do aterro. Isso resulta na manutenção de uma concentração residual de oxigênio, enquanto a temperatura aumenta devido ao calor liberado nesse processo de decomposição aeróbia (Fernandes, 2009 apud Quirino Ginga, 2021).

Em seguida, na Fase II, conhecida como fase de transição, começam a predominar as condições anaeróbias. Durante essa fase, ocorre a conversão da matéria orgânica em compostos como ácidos gordos, açúcares, ácidos orgânicos e aminoácidos, com a produção de outros produtos fermentáveis. Essa etapa pode durar entre um e seis meses, dependendo das características do aterro e das condições ambientais. Durante esse período, observa-se uma queda no pH dos lixiviados devido à dissolução de ácidos orgânicos e CO₂,

além da formação de H_2 e redução acentuada de N_2 (Tchobanoglous, 2012 apud Quirino Ginga, 2021).

A Fase III ocorre entre três meses e três anos e caracteriza-se por um período bem mais longo que as fases anteriores. Nesse estágio, as condições se tornam puramente anaeróbias, o que favorece a ação das arqueobactérias que continuam a degradação da matéria orgânica, gerando ácidos gordos por meio do processo de acidogênese, caracterizando esta fase como a fase ácida. É também nessa fase que o metano começa a ser gerado em pequena quantidade, enquanto o CO_2 , continua a se acumular em maior volume. O pH permanece baixo devido à acumulação de ácidos orgânicos e CO_2 , o que resulta no aumento da demanda química de oxigênio (DQO) e na demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Russo, 2003 apud Quirino Ginga, 2021).

Na Fase IV, que dura de oito a quarenta anos, ocorre a fase metanogênica, na qual a produção de CH_4 e CO_2 se tornam predominante, sendo os principais componentes do biogás. Neste estágio, o pH começa a se estabilizar, e a produção e composição do biogás se tornam mais constantes (Tchobanoglous, 2012 apud Quirino Ginga, 2021).

Por fim, a Fase V é a fase final da decomposição, marcada pela redução significativa na produção de biogás até que a extração se torne praticamente impossível. Nessa fase, a conversão da matéria orgânica restante em metano e CO_2 é praticamente concluída, restando apenas substratos de baixa degradabilidade que não podem ser mais decompostos (Russo, 2003 apud Quirino Ginga, 2021).

2.3.2.3 Coleta do GDL

Conforme a EPA (2010) (Carvalho *et al.*, 2019) a coleta de gás de lixo GDL utiliza sistemas compostos por poços verticais onde pode ser visto na Figura 8. Os poços verticais são instalados em conjunto com as células de resíduos, sendo posicionados diretamente sobre as membranas inferiores do aterro. Durante o processo, os resíduos são dispostos em torno desses poços, que podem ser prolongados caso seja necessário elevar o volume de deposição no aterro.

Figura 8 - Poços verticais



Fonte: Portal Resíduos Sólidos, 2020.

Durante a decomposição dos resíduos, gases como metano e CO_2 são produzidos e se acumulam no interior do aterro. Para controlar essa emissão, são instalados poços de gás, que capturam esses compostos à medida que eles se movem devido à difusão e à pressão interna gerada pela decomposição.

As tubulações responsáveis pela coleta dos gases se conectam em um ponto único, chamado coletor central, que tem a função de agrupar os gases de todos os poços. Esses gases, então, são encaminhados para a próxima etapa do processo. Antes de serem liberados para o ambiente, os gases passam por um processo de purificação para eliminar substâncias indesejáveis, como dióxido de enxofre e compostos orgânicos voláteis. O metano extraído pode ser aproveitado como energia, seja através de sua queima controlada para produção de eletricidade ou calor, ou ainda transformado em biogás (Portal Resíduos Sólidos, 2020).

Para o processo de impermeabilização em aterros frequentemente faz uso de geomembranas, que são materiais sintéticos com a capacidade de bloquear a passagem de líquidos, como o polietileno de alta densidade (PEAD), PVC ou poliuretano. Essas geomembranas são aplicadas sobre o fundo do aterro, formando uma camada sólida e resistente, ou ainda, com

camadas de argila compactada se necessário (Portal Resíduos Sólidos, 2020). Na Figura 9, é possível observar o processo de impermeabilização do aterro.

Figura 9 – Impermeabilização do aterro



Fonte: Portal Resíduos Sólidos, 2020.

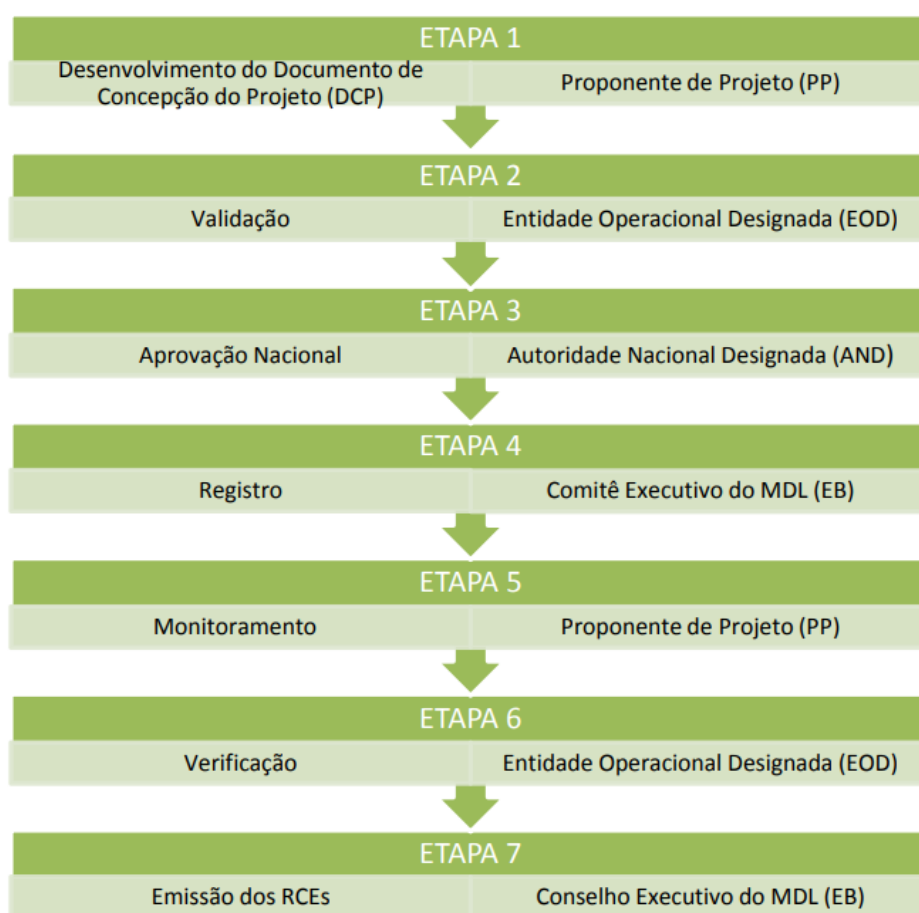
2.4 O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um instrumento estabelecido pelo Protocolo de Quioto que busca promover o desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento ao mesmo tempo em que contribui para a redução de emissões de GEEs. O MDL permite que nações desenvolvidas e algumas economias em transição, com compromissos de redução de emissões, invistam em projetos que reduzam emissões em países em desenvolvimento, gerando créditos, conhecidos como Reduções Certificadas de Emissão (RCEs). Esses créditos podem ser utilizados para cumprir parte das metas de redução de emissões dos países investidores, incentivando, assim, a transferência de tecnologia limpa e o financiamento de projetos sustentáveis. O MDL é considerado um selo de qualidade ambiental, tanto local quanto internacionalmente, e tem sido uma ferramenta importante para atrair investimentos privados para projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento (Gutierrez, 2018).

Os projetos de MDL devem incluir a substituição de fontes de energia fóssil por energias renováveis, a otimização do uso de energia, além de melhorias em serviços urbanos e outras atividades.

Sendo assim, para que um projeto possa gerar as RCEs, é necessário que as atividades do projeto e os Programas de Atividades (PoAs) do MDL cumpram obrigatoriamente as sete fases do ciclo do projeto, onde abaixo se mostra na Figura 10.

Figura 10 - Ciclo de desenvolvimento de um projeto MDL e responsabilidades



Fonte: MCTIC, 2016.

Gutierrez (2018), em seu estudo apresenta uma análise detalhada da evolução regulatória do MDL e suas perspectivas futuras. Conforme o autor, a evolução regulatória do MDL incluiu a criação de uma infraestrutura institucional complexa, com múltiplos níveis de governança nacional e internacional. Essa estrutura foi essencial para garantir a integridade ambiental

dos projetos e a credibilidade do mecanismo. No entanto, os elevados custos de transação e a complexidade burocrática foram identificados como barreiras, limitando o potencial do MDL.

No entanto, ainda pela análise de Gutierrez (2018), para mitigar esses desafios, foram introduzidas inovações como o MDL programático, que permite a agrupação de projetos com características comuns para reduzir custos de transação. Além disso, houve esforços para simplificar e consolidar metodologias, visando aumentar a eficiência do processo de certificação de emissões.

Na última década, o Brasil tem se destacado na implementação de projetos aprovados sob o MDL, com um foco significativo em setores como hidrelétricas, captura de gás de aterro e redução de metano. De acordo com os dados apresentados por Ridelensky e Santos (2022) o país registrou um total de 764 projetos até 2021, distribuídos em diversas áreas, refletindo a diversidade e o potencial ambiental do Brasil. Esses projetos, além de contribuírem para a redução de gases de efeito estufa, também promovem o desenvolvimento sustentável e a inovação tecnológica. No entanto, apesar do sucesso em termos de volume, muitos desses projetos enfrentam desafios relacionados a altos custos de transação e complexidade regulatória, o que pode desestimular pequenos investidores e limitar o crescimento de novas iniciativas. Assim, o Brasil continua a buscar formas de otimizar a implementação desses projetos, visando não apenas atender às suas metas de redução de emissões, mas também fortalecer sua posição no mercado global de carbono.

Pelo viés de Fernandes e Leite (2021), o MDL consiste em uma ferramenta para a redução de emissões de GEEs, destacando a importância do mercado de carbono global. Especificamente, no contexto do GDL, o MDL é mencionado como uma das principais áreas de atuação no Brasil.

Ainda segundo os autores, o MDL permite que projetos que capturam e utilizam o GDL para geração de energia recebam créditos de carbono, que podem ser comercializados. Isso não só ajuda a mitigar as emissões de metano, mas também promove o uso de fontes de energia renováveis.

Apesar das oportunidades, pela análise de Frangetto *et al.* (2018), alguns desafios precisam de mais atenção, como a necessidade de protocolos para o cálculo das emissões e a validação de projetos. Além disso, os custos elevados de transação e a complexidade dos processos de certificação podem desestimular pequenos investidores. Mesmo assim, projetos de captura de GDL têm atraído investimentos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a redução de emissões.

Portanto, o MDL proporciona um incentivo econômico para a implementação de tecnologias que capturam e utilizam o GDL, transformando um problema ambiental em uma oportunidade de negócio e contribuindo para os objetivos de sustentabilidade global (Filippe, 2021).

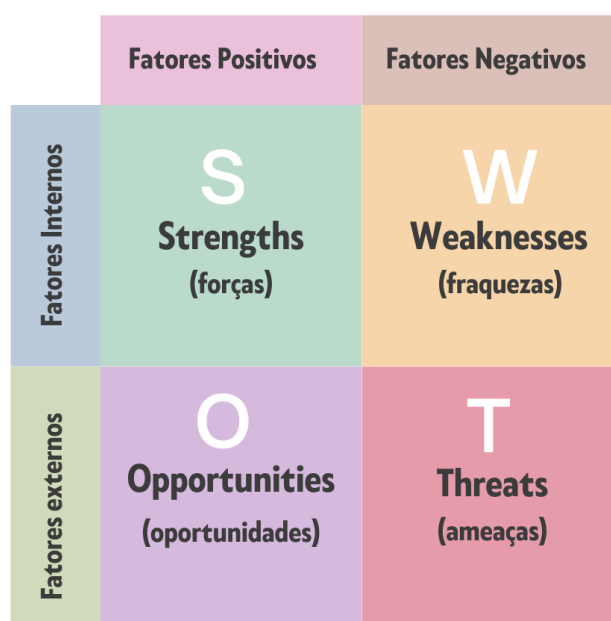
Como fecho deste capítulo, ressalta-se que, apesar das dificuldades enfrentadas, o MDL continua sendo um instrumento valioso, especialmente com o Acordo de Paris, que reforça a importância de mecanismos de mercado para a mitigação das mudanças climáticas. O documento destaca que mais da metade das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) reconhecem a importância desses mecanismos, apontando para um futuro onde o MDL e suas estruturas podem ser integrados a novos canais de financiamento e políticas climáticas globais.

2.5 Análise SWOT

A Análise SWOT, também conhecida como Matriz FOFA traduzindo para o português é uma ferramenta fundamental no planejamento estratégico das organizações, amplamente utilizada para avaliar a posição competitiva de uma empresa e formular estratégias eficazes. O acrônimo SWOT refere-se a Strengths (forças), Weaknesses (fraquezas), Opportunities (oportunidades) e Threats (ameaças). Esses elementos são classificados em dois ambientes distintos: o ambiente interno, que inclui forças e fraquezas, e o ambiente externo, que abrange oportunidades e ameaças.

A análise do ambiente interno permite identificar os recursos e capacidades que podem impulsionar ou limitar o desempenho organizacional, enquanto a avaliação do ambiente externo busca identificar tendências, eventos e condições que podem ser exploradas para vantagem competitiva ou que representam potenciais riscos ao sucesso estratégico. Assim, a Análise SWOT proporciona uma visão holística, auxiliando na identificação de estratégias que alinham as capacidades internas com as realidades externas, promovendo um planejamento estratégico mais robusto e adaptativo (Souza, 2020). Para ilustrar a estrutura da Matriz SWOT, a Figura 11 apresenta a organização dos componentes internos e externos que compõem essa ferramenta de análise.

Figura 11: Organização da matriz SWOT



Fonte: Elaboração própria, 2024.

A análise SWOT aplicada ao setor de biogás no Brasil, conforme discutido no estudo de Freitas (2022), revela um panorama abrangente das condições internas e externas que afetam a expansão desta fonte de energia renovável. Entre as forças destacadas, estão a abundância de matérias-primas acessíveis e de baixo custo, como resíduos agropecuários e resíduos sólidos urbanos, que oferecem um substrato rico para a produção de biogás. Além disso, o biogás é uma fonte de energia renovável que contribui

significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se com as metas ambientais do país. No entanto, o setor enfrenta fraquezas, como o elevado custo de escalabilidade e a necessidade de infraestrutura avançada para purificação e distribuição do biogás, fatores que podem limitar sua competitividade.

Por outro lado, as oportunidades para o biogás no Brasil são promissoras, impulsionadas por políticas públicas como o RenovaBio e o Programa Metano Zero, que incentivam a produção e utilização de biocombustíveis. O cenário regulatório em evolução e o compromisso do Brasil com acordos internacionais, como o Acordo de Paris, também favorecem o crescimento do setor. Todavia, ameaças significativas, como a dependência de outros setores para matéria-prima e a competição com outras fontes de energia renovável, podem impactar o desenvolvimento do biogás. A análise SWOT, portanto, não só identifica os desafios e oportunidades, mas também ressalta a necessidade de estratégias integradas para superar as barreiras, maximizar as forças e explorar plenamente o potencial do biogás no contexto brasileiro.

No mesmo contexto, biogás de aterro, foco deste trabalho, emerge como uma solução estratégica para a gestão sustentável de RSU ao mesmo tempo em que contribui para a diversificação da matriz energética brasileira. A análise SWOT aplicada no contexto do biogás de aterro destaca como a abundância de resíduos orgânicos em aterros sanitários representa uma força significativa, oferecendo uma fonte contínua e acessível de matéria-prima para a produção de biogás.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho caracteriza-se como uma pesquisa descritiva, utilizando uma abordagem baseada na análise SWOT aplicada à geração de energia a partir do biogás em aterros sanitários. Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico abrangente, contemplando artigos científicos, monografias, dissertações, teses e livros, que fornecem a fundamentação teórica necessária para a discussão proposta.

A análise SWOT foi estruturada a partir das informações coletadas, possibilitando uma avaliação crítica das potencialidades e limitações desse sistema energético. Esse método visa compreender o posicionamento estratégico da geração de energia proveniente do biogás, identificando fatores que influenciam tanto o crescimento quanto a sustentabilidade desse setor. Além disso, o estudo abordou políticas públicas, incentivos financeiros e desafios regulatórios que impactam o desenvolvimento do segmento energético.

A pesquisa bibliográfica utilizou palavras-chave como resíduos sólidos urbanos, gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, fragilidades, potencialidades e análise SWOT. Essas palavras-chave foram aplicadas em bases de dados como Google Acadêmico, Periódicos CAPES e ScienceDirect da Elsevier, considerando publicações no intervalo de 2020 a 2024. O principal objetivo do trabalho foi avaliar a situação atual do biogás de aterros sanitários como fonte de energia no Brasil, destacando sua relevância no cenário energético nacional. Adicionalmente, buscou-se, por meio da metodologia SWOT, identificar as principais oportunidades e desafios relacionados ao aproveitamento do biogás, fornecendo uma visão estratégica que permita maximizar seu uso e superar barreiras existentes no contexto brasileiro.

A construção da matriz SWOT baseou-se, primordialmente, nos estudos de Freitas, Pires e Benincá (2024), Freitas (2022), Kirsten (2023), Lima (2023), Bozzini e Schalch (2022). Esses autores demonstraram a eficácia da aplicação da análise SWOT na avaliação da viabilidade de projetos específicos, evidenciando sua utilidade na identificação de forças, fraquezas, oportunidades e ameaças em diferentes cenários estratégicos.

Para a formulação da matriz SWOT foi guiada por perguntas-chave, descritas no Quadro 3, que orientaram a análise detalhada do cenário brasileiro. Essas perguntas foram adaptadas de metodologias empregadas em pesquisas anteriores, de modo a refletir as especificidades do mercado energético nacional.

Quadro 3 - Perguntas para a elaboração da matriz SWOT



Fonte: Autoria própria, 2024.

5 RESULTADOS

A pesquisa realizada por Freitas, Pires e Benincá (2024) evidenciou diversas fragilidades na gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Entre os principais desafios, destaca-se o uso predominante de aterros sanitários como destino final dos resíduos, o que limita a possibilidade de reaproveitamento desses materiais como recursos. A falta de infraestrutura adequada para a coleta seletiva e a reciclagem, associada a uma baixa conscientização ambiental da população, compromete a adoção de práticas sustentáveis. Ademais, as políticas públicas existentes são vistas como fragmentadas e com pouca integração, dificultando avanços mais significativos no setor. A carência de incentivos financeiros e a ausência de programas robustos de financiamento também são pontos que agravam esses problemas.

Apesar das dificuldades, o cenário brasileiro apresenta diversas potencialidades. Entre as oportunidades, destaca-se a implantação de tecnologias inovadoras que incentivem a economia circular, como a utilização do biogás. A grande quantidade de resíduos orgânicos gerados no país abre caminho para a conversão em energia, contribuindo para o cumprimento de metas ambientais, tanto nacionais quanto internacionais. Esses fatores destacam a viabilidade de uma reestruturação do setor baseada em práticas sustentáveis.

No estudo de Freitas (2022), foi feita uma análise detalhada do setor de biogás no Brasil, abordando os avanços em políticas públicas voltadas para energias renováveis e os benefícios ambientais do aproveitamento de resíduos sólidos. No entanto, a autora ressaltou desafios como a infraestrutura deficiente, a dependência de incentivos financeiros e as barreiras regulatórias, que podem dificultar o crescimento do setor. Para superar essas limitações, Freitas propõe uma colaboração entre os setores público e privado, com foco em inovações tecnológicas, financiamento de projetos e o desenvolvimento de um marco regulatório mais robusto.

Kirsten (2023) investigou o potencial do biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos, destacando que uma tonelada de resíduos pode gerar, em média, 335,99 m³ de biogás, com 51,39% de metano e um poder calorífico de 5.020,06 kcal/ m³. O estudo revelou que, apesar de apenas 5,6%

dos resíduos serem tratados em aterros com infraestrutura adequada para geração de biogás, o Brasil possui um potencial para atingir até 2.564 MW de potência instalada. Projeções mais otimistas para 2040 indicam que a produção poderia superar as metas nacionais, alcançando 1.093 MW. Kirsten enfatizou ainda o papel do biogás na redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando sua pesquisa com os objetivos do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares).

O estudo de Lima (2023) aprofundou a análise do potencial do biogás na matriz energética brasileira, ressaltando que o país gera cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente, sendo que aproximadamente 50% são resíduos orgânicos. Apesar desse elevado potencial, o autor apontou desafios como a falta de infraestrutura em cidades menores e as disparidades regionais. A ausência de regulamentação específica e de incentivos econômicos consistentes também foi destacada como uma barreira para o desenvolvimento do setor. Lima defendeu a necessidade de alinhar as políticas públicas com os compromissos climáticos internacionais e sugeriu a realização de campanhas de conscientização e treinamento técnico para desmistificar a utilização do biogás.

Bozzini e Schalch (2022) exploraram o uso da análise SWOT como ferramenta estratégica para promover consórcios intermunicipais na gestão de resíduos sólidos urbanos. Os autores destacaram as vantagens dessa abordagem, como a economia de escala e o fortalecimento da cooperação entre municípios, e apontaram desafios como a falta de marcos regulatórios e a coordenação entre as partes envolvidas. Como alternativa, propuseram o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a formação de consórcios, com incentivos fiscais e programas de capacitação.

Outros estudos demonstraram que a análise SWOT se mostra uma ferramenta eficaz para identificar os pontos fortes, fracos, as oportunidades e as ameaças relacionadas ao uso do biogás, contribuindo para a diversificação da matriz energética do Brasil.

FORÇAS

a) Tecnologias Utilizadas

O Brasil tem desenvolvido uma infraestrutura voltada para a utilização do biogás produzido em aterros sanitários, destacando-se na geração de energia e na redução de impactos ambientais. As tecnologias de captação de biogás, que incluem drenos verticais e horizontais, desempenham um papel essencial na coleta do gás liberado durante a decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos. Após essa etapa de captação, o biogás é tratado em unidades de purificação para remover substâncias como sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono, resultando em biometano, que pode ser usado como substituto do gás natural em diferentes aplicações (Lima, 2023).

A implementação de tecnologias como biodigestores e microturbinas em aterros sanitários permite a conversão do biogás em eletricidade, sendo esse processo já utilizado em instalações como os aterros Bandeirantes e São João, no estado de São Paulo. Essas iniciativas representam exemplos de sucesso na geração de energia renovável a partir de resíduos sólidos urbanos, demonstrando o potencial do biogás como recurso energético sustentável (Freitas, 2022).

b) Vantagens Econômicas e Ambientais

O biogás gerado em aterros sanitários, originado da decomposição de resíduos orgânicos, tem emergido como uma fonte de energia renovável com potencial significativo, trazendo benefícios econômicos e ambientais. Do ponto de vista econômico, a utilização do biogás para a geração de eletricidade pode resultar em economia substancial na conta de energia elétrica, especialmente em locais distantes ou onde a infraestrutura elétrica é deficiente. A implementação de sistemas de aproveitamento de biogás em aterros tem se mostrado eficaz em reduzir custos, permitindo que esses locais se tornem autossuficientes em termos de energia ou até mesmo gerem receita ao venderem o excedente para a rede pública. No Brasil, a prática já foi adotada em vários aterros sanitários, demonstrando viabilidade econômica e

contribuindo para a criação de empregos na operação e manutenção dos sistemas de captura e queima do biogás (Brasil, 2022). Ademais, o biogás também possui uma grande capacidade de reduzir os custos relacionados ao tratamento de resíduos. O processo de captura do biogás contribui para a diminuição dos custos com a gestão de aterros sanitários, uma vez que permite o controle de emissões de metano, um dos gases mais potentes no aquecimento global, com um potencial de efeito estufa 25 vezes maior do que CO₂. Quando o biogás não é aproveitado e se libera diretamente na atmosfera, há um impacto ambiental significativo. Porém, ao ser capturado e utilizado como fonte de energia, esse metano é convertido, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e contribuindo para os objetivos globais de mitigação das mudanças climáticas.

No aspecto ambiental, a conversão do biogás em energia também promove a redução da dependência de fontes não renováveis de energia, como o petróleo e o carvão, que são responsáveis por uma grande parte das emissões globais de CO₂. Um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia (AIE) aponta que a implementação de tecnologias de recuperação de biogás de aterros poderia reduzir as emissões de CO₂ de até 4 milhões de toneladas por ano, considerando a geração de 3.500 MW de energia elétrica provenientes de aterros sanitários ao redor do mundo (AIE, 2022). Isso representa uma contribuição significativa para o cumprimento das metas de redução de emissões estabelecidas pelo Acordo de Paris.

c) Legislação

A legislação brasileira tem demonstrado avanços no incentivo ao uso do biogás proveniente de aterros sanitários, com destaque para a PNRS, estabelecida pela Lei nº 12.305/2010. Esta legislação propõe diretrizes claras para a gestão de resíduos, priorizando a redução, reutilização e reciclagem, além de incentivar o uso de tecnologias que promovam a recuperação de energia. A PNRS estabelece que os aterros sanitários devem adotar tecnologias que minimizem impactos ambientais, como a captação de biogás, o que favorece o desenvolvimento de projetos para aproveitamento energético (Brasil, 2010). Além disso, o Brasil tem integrado mecanismos como o mercado

de carbono, oferecendo incentivos financeiros para empresas que adotam práticas sustentáveis, como a utilização do biogás, através de créditos de carbono gerados pela captura e queima do gás metano (Zawadiski, 2021).

Culturalmente, o Brasil tem se tornado cada vez mais receptivo a soluções que aliam desenvolvimento econômico e sustentabilidade. A crescente conscientização sobre os impactos ambientais dos aterros sanitários e a busca por alternativas mais verdes tem levado a um aumento no apoio institucional e social ao uso do biogás. A iniciativa de gerar energia a partir dos resíduos sólidos não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também cria novas oportunidades de geração de energia, especialmente em regiões que enfrentam desafios no fornecimento elétrico (Zawadiski, 2021). Assim, a convergência entre as políticas públicas e a mudança cultural tem favorecido a adoção do biogás como uma alternativa energética viável e sustentável no Brasil.

d) Matérias primas

As características dos RSU no Brasil destacam o biogás como um subproduto atrativo para a geração de energia renovável. Uma das principais razões é a elevada proporção de matéria orgânica presente nos resíduos brasileiros, que corresponde a aproximadamente 50% do total coletado. Essa característica facilita o processo de decomposição anaeróbica nos aterros sanitários, resultando na produção de biogás com altos níveis de metano, um gás essencial para aplicações energéticas (Carvalho, 2019).

e) Exemplos de aterros no Brasil

Na cidade de Caieiras, localizada no estado de São Paulo, foi implantada a maior usina termelétrica brasileira alimentada por biogás de aterro sanitário, conforme representado na Figura 12. O projeto, realizado pelo grupo SOLVÍ, contou com um investimento superior a R\$100 milhões e possui capacidade instalada de 29,5MW. Essa potência é suficiente para abastecer aproximadamente 300 mil habitantes, fornecendo energia limpa e renovável. A usina utiliza o gás metano, gerado pela decomposição dos resíduos no aterro,

como principal combustível para a produção de energia elétrica (Portal Temoverde, 2022).

Figura 12 - Termoelétrica Caieiras



Fonte: Portal Termoverde, 2022.

FRAQUEZAS

a) Dificuldade Técnicas

As principais dificuldades técnicas no aproveitamento do biogás em aterros sanitários estão relacionadas a questões tecnológicas e operacionais. A purificação do biogás é um dos maiores desafios, pois o gás contém contaminantes como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), siloxanos e NH_3 , que podem danificar os equipamentos e elevar os custos operacionais. Esses contaminantes exigem a utilização de tecnologias avançadas de remoção, o que aumenta tanto os custos quanto a complexidade do processo. Além disso, estudos apontam que a composição heterogênea dos resíduos sólidos e as condições variáveis nos aterros, como umidade e temperatura, afetam a geração de biogás, tornando-a irregular e menos previsível. Essa variabilidade compromete o planejamento energético e a viabilidade econômica de muitos projetos (Carvalho, 2019).

b) Limitações na Infraestrutura e Logística

Primeiramente, a falta de redes de distribuição adequadas é um desafio significativo, onde o transporte do biogás é mais caro e complexo. Para superar isso, seria necessário investir em sistemas de transporte mais eficientes, como gasodutos dedicados, o que ainda é raro em países em desenvolvimento, incluindo o Brasil.

Há dificuldade em integrar o biogás à matriz energética existente, devido à falta de normatizações claras para a injeção de biometano na rede de gás natural. Além disso, a infraestrutura de purificação e compressão do biogás, essencial para aumentar sua eficiência energética e permitir seu uso em diferentes aplicações, é frequentemente limitada por custos elevados de implementação e manutenção.

c) Custos de Implementação e Manutenção

O custo de implantação engloba a construção de biodigestores, aquisição de equipamentos como sistemas de captura e purificação de biogás, além de instalações para conversão energética, como motores geradores. Projetos de menor escala, como aqueles voltados para pequenas propriedades rurais, podem enfrentar dificuldades em acessar financiamento devido ao alto custo inicial e à percepção de retorno financeiro demorado. Mesmo com incentivos governamentais, o longo prazo para atingir o equilíbrio financeiro pode desencorajar investidores em áreas onde o mercado de energia renovável ainda não está plenamente desenvolvido.

d) Problemas com a Qualidade dos Resíduos

A eficiência na produção de Biogás depende diretamente da qualidade dos resíduos utilizados, que influenciam a estabilidade do processo de digestão anaeróbia e a qualidade do gás produzido. Diversos problemas relacionados com a composição e as características dos resíduos podem comprometer o desempenho dos biodigestores e conseqüentemente, a viabilidade do biogás. O excesso de nitrogênio resulta na formação de amônia, que é tóxica para as bactérias responsáveis pela digestão anaeróbia. Outro fator se dá pela

variabilidade na composição dos resíduos ao longo do tempo representa um desafio operacional.

OPORTUNIDADES

a) Incentivos Governamentais

No Brasil, a implementação de políticas públicas e incentivos governamentais tem sido fundamental para fomentar a adoção dessa fonte de energia renovável.

Uma das principais estratégias do governo é o RenovaBio, que estabelece metas de descarbonização e incentiva a produção de biocombustíveis. Por meio deste programa, produtores de biogás podem gerar CBIOs, que são negociáveis no mercado financeiro, proporcionando receita adicional para projetos de biogás (BRASIL, 2017). Além disso, a Resolução Normativa Nº 482/2012 da ANEEL, atualizada em 2022, permite a geração distribuída de energia elétrica a partir do biogás, promovendo economia e autossuficiência energética para pequenos e médios produtores (ANEEL, 2012).

Vale ressaltar o programa Metano Zero lançado em 2022, é uma iniciativa liderada pelo Governo Federal, em colaboração com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), que incentiva a captura e o aproveitamento energético do metano emitido em atividades agropecuárias, de saneamento e de resíduos sólidos urbanos.

Por meio desse programa, são oferecidas linhas de crédito específicas, em parceria com instituições como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e o Banco do Brasil, para financiar tecnologias de produção de biogás, incluindo biodigestores e sistemas de purificação e transporte do gás (MMA, 2022).

a) Mudanças Climáticas e Acordos Internacionais

Os acordos internacionais, como o Acordo de Paris, têm desempenhado papel central no incentivo ao desenvolvimento do biogás. Firmado em 2015, o acordo estabelece compromissos para limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, exigindo que os países promovam ações ambiciosas de redução de emissões (UNFCCC, 2015). O Brasil, como signatário, assumiu a meta de reduzir em 50% suas emissões até 2030, o que inclui a valorização de fontes renováveis como o biogás e o biometano.

As iniciativas globais como a Global Methane Pledge, lançada durante a COP26 em 2021, incentivam a redução de 30% das emissões de metano até 2030. Esse compromisso reforça a importância de tecnologias que capturam e aproveitam o metano emitido por aterros sanitários, agropecuária e estações de tratamento de esgoto, áreas onde o biogás tem grande potencial de aplicação (EUROPEAN COMMISSION, 2021).

Além dos compromissos internacionais, os impactos das mudanças climáticas, como secas prolongadas e eventos climáticos extremos, também reforçam a necessidade de diversificar a matriz energética. O biogás oferece uma alternativa resiliente, pois utiliza matérias-primas locais e abundantes, como resíduos orgânicos, reduzindo a dependência de fontes fósseis e importadas.

b) Mercados Promissores

O uso do biogás vai além da geração de energia elétrica, abrangendo setores como transporte, indústria e agricultura, especialmente em mercados que buscam soluções alinhadas às metas de descarbonização e à economia circular.

No setor industrial, o biogás pode ser utilizado para fornecer energia térmica em processos como secagem, aquecimento e produção de vapor. Indústrias com alto consumo energético, como as dos setores alimentício,

químico e cerâmico, têm a oportunidade de aproveitar essa fonte de energia, que é tanto de baixo custo quanto de baixa emissão de carbono.

Um dos mercados com maior potencial é o setor de transportes, com a substituição de combustíveis fósseis pelo biometano, um derivado purificado do biogás. Países como Suécia e Alemanha já incorporaram o biometano em frotas urbanas e veículos pesados. No Brasil, programas como o Renovabio e Metano Zero incentivam a adoção dessa tecnologia (BRASIL, 2017; MMA, 2022).

Além disso, o mercado de gás residencial e comercial, após o tratamento e compressão do biogás para biometano, também apresenta grande potencial. Esse mercado pode atender a necessidades que vão desde sistemas de aquecimento doméstico até o fornecimento de gás para restaurantes, hotéis e edifícios comerciais, proporcionando uma alternativa mais econômica e com menor impacto ambiental em relação ao gás natural convencional.

c) Cumprimento das Metas

O biogás promove benefícios econômicos e sociais, alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Entre os objetivos apoiados estão o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), por meio da geração de energia renovável, e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao reduzir emissões de GEEs e incentivar práticas sustentáveis na cadeia produtiva (ONU, 2015).

No setor de saneamento básico, o biogás colabora com o cumprimento do PNRS e do Marco do Saneamento Básico, promovendo a destinação adequada de resíduos orgânicos e sua conversão em energia.

Essa abordagem reduz a pressão sobre aterros sanitários, evita a contaminação de recursos naturais e contribui para a universalização do saneamento no país (MMA, 2022).

d) Parcerias público - privadas

Na gestão de resíduos sólidos urbanos, as PPPs podem estruturar projetos de geração de energia a partir do biogás em aterros sanitários. O setor público pode ceder terrenos e garantir incentivos fiscais, enquanto empresas privadas assumem a operação e a comercialização de energia ou biometano. Um exemplo de sucesso é o projeto de biogás do Aterro Bandeirantes, em São Paulo, que utiliza parcerias para converter o biogás em energia elétrica, contribuindo para a matriz energética renovável do estado (ANEEL, 2022).

As PPPs no setor de biogás também podem ser potencializadas por meio de acordos multilaterais e parcerias regionais. A colaboração entre estados e municípios para criar consórcios intermunicipais, por exemplo, pode aumentar a viabilidade econômica de projetos em pequena escala, compartilhando recursos e reduzindo custos operacionais. As parcerias público-privadas oferecem um caminho promissor para o fortalecimento do setor de biogás no Brasil, conectando esforços institucionais com inovação e eficiência do setor privado. Com políticas de incentivo claras e um ambiente regulatório favorável, essas parcerias podem ampliar a utilização do biogás e consolidar sua importância no cenário energético.

AMEAÇAS

a) Competição de outras fontes

A transição energética global tem incentivado o crescimento de diversas fontes de energia renovável, como solar, eólica, biomassa e biogás. No entanto, essa diversidade gera competição por investimentos, incentivos e espaço no mercado, o que pode impactar o desenvolvimento do setor de biogás. Apesar de suas vantagens, o biogás enfrenta desafios significativos para consolidar sua participação na diversificação energética brasileira.

Uma das principais barreiras é o custo inicial de instalação. Enquanto o setor solar, por exemplo, se beneficia de uma rápida redução nos custos dos painéis fotovoltaicos devido à sua ampla adoção global, o biogás ainda exige investimentos elevados em infraestrutura, como biodigestores, sistemas de purificação e redes de distribuição de biometano.

Essa diferença pode limitar a atratividade do biogás em relação a outras fontes renováveis, especialmente em regiões onde o potencial de energia solar e eólica é abundante (IEA, 2021).

A intermitência de outras fontes renováveis como solar e eólica, tem sido mitigada pelo avanço de tecnologias de armazenamento de energia, o que fortalece sua competitividade no mercado. Em contrapartida, o biogás apresenta uma vantagem estratégica ao oferecer uma fonte de energia contínua e programável, essencial para complementar a matriz energética e equilibrar a oferta e a demanda. Essa característica ainda não é plenamente explorada em políticas de planejamento energético, o que limita sua competitividade frente a outras opções (ANEEL, 2022).

b) Incertezas Políticas e Econômicas

A expansão do mercado de biogás no Brasil enfrenta desafios associados a incertezas políticas e econômicas, que podem impactar tanto o planejamento quanto a implementação de projetos. Apesar do potencial do biogás como fonte renovável e sustentável, essas incertezas criam barreiras que afetam investimentos, regulação e a consolidação do setor no país.

A falta de uma regulação consolidada e nacional para o biogás também gera incertezas. Embora existam normas e incentivos em alguns estados, como São Paulo e Paraná, a ausência de uma política federal abrangente dificulta a uniformidade no desenvolvimento do mercado.

Isso impacta diretamente a previsibilidade de retornos financeiros para investidores, além de limitar o acesso a subsídios e financiamentos (ANEEL, 2022).

Portanto, a competição por investimentos no setor energético representa outro desafio econômico. Com recursos limitados disponíveis para projetos de infraestrutura no Brasil, o biogás frequentemente compete com outras prioridades do governo, como investimentos em grandes hidrelétricas ou na expansão da energia solar e eólica.

Essa competição é agravada pela percepção de que o biogás, apesar de seus benefícios ambientais, requer investimentos iniciais elevados e apresenta um retorno mais lento (IPEA, 2023).

c) Desinteresses de Grandes Investidores e Empresas

Um dos principais riscos é a redução na capacidade de escala dos projetos. Sem o envolvimento de grandes investidores, muitos projetos de biogás permanecem em estágio piloto ou operam em pequena escala, o que dificulta a consolidação do setor e sua integração à matriz energética nacional. Além disso, a falta de investimentos em infraestrutura, como redes de distribuição de biometano e sistemas de purificação, impede a conexão eficiente da produção com o mercado consumidor (BNDES, 2023).

A seguir, no Quadro 4, resume-se os principais pontos da análise SWOT, facilitando a visualização dos fatores internos e externos que influenciam o aproveitamento do biogás em aterros sanitários.

Quadro 4 – Principais elementos estratégicos para o aproveitamento do biogás

Forças	Fraquezas
- Crescente infraestrutura tecnológica para captação e processamento de biogás.	- Falta de infraestrutura adequada em muitos aterros sanitários.
- Vantagens econômicas na geração de energia renovável a partir de resíduos.	- Altos custos de implementação e manutenção de tecnologias de biogás.
- Redução significativa das emissões de gases de efeito estufa.	- Problemas técnicos relacionados à purificação e estabilidade do biogás.
Oportunidades	Ameaças
- Políticas públicas e incentivos governamentais, como RenovaBio e Metano Zero.	- Barreiras regulatórias que dificultam a expansão do setor.
- Compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, que promovem o uso de energias renováveis.	- Competição com outras fontes de energia renovável, como solar e eólica.
- Possibilidade de parcerias público-privadas para financiar e expandir projetos.	- Incertezas políticas e econômicas que podem afetar investimentos e planejamento de longo prazo.

Fonte: Autoria própria, 2024.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais deste trabalho reforçam a relevância do biogás de aterros sanitários como uma solução estratégica e promissora para a gestão de resíduos e a geração de energia renovável no Brasil. A partir dos objetivos propostos e da análise realizada, é possível concluir que o aproveitamento do biogás apresenta um alto potencial para contribuir com a transição energética do país, ao mesmo tempo em que mitiga impactos ambientais associados à decomposição de resíduos orgânicos.

A viabilidade estratégica dessa prática foi evidenciada pela análise SWOT, que identificou as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças relacionadas ao desenvolvimento desse setor. Entre as forças, destaca-se a disponibilidade abundante de resíduos orgânicos, que garantem uma fonte contínua de biogás, e a contribuição significativa dessa tecnologia na redução de emissões de gases de efeito estufa. Contudo, desafios como a infraestrutura tecnológica limitada e os altos custos iniciais de implementação representam fraquezas que precisam ser superadas. Em contrapartida, as oportunidades incluem o suporte de políticas públicas voltadas para o incentivo às energias renováveis, enquanto as ameaças envolvem barreiras regulatórias e a competição com outras fontes de energia. Nesse contexto, este estudo propõe uma série de recomendações para alavancar o aproveitamento do biogás no Brasil. Em primeiro lugar, a implementação de políticas integradas que fomentem o desenvolvimento tecnológico e a colaboração entre setores público e privado é fundamental. Portanto, é necessário investir em infraestrutura adequada e na capacitação técnica da força de trabalho, garantindo a operacionalidade e a manutenção das tecnologias de biogás. Também se destaca a importância de integrar o biogás a uma matriz de energias renováveis, promovendo sinergias com fontes como a energia solar e eólica, além de explorar tecnologias de cogeração para maximizar a eficiência.

Os impactos socioeconômicos também não podem ser negligenciados. O desenvolvimento do setor de biogás tem o potencial de gerar empregos verdes, impulsionar economias locais e promover a educação e o treinamento da população para operar e manter as tecnologias. Ademais, a realização de

pesquisas constantes e o monitoramento dos impactos ambientais e econômicos são essenciais para ajustar as práticas e garantir que elas atendam às demandas do mercado e às políticas ambientais vigentes.

Em síntese, este trabalho reafirma a necessidade de uma abordagem holística e integrada para o aproveitamento do biogás de aterros sanitários no Brasil. Com as ações recomendadas, é possível superar os desafios identificados e maximizar os benefícios dessa solução sustentável, contribuindo significativamente para o desenvolvimento ambiental, econômico e social do país.

REFERÊNCIAS

ABEGÁS. Biogás aumenta sua relevância na matriz energética do Brasil. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/arquivos/83839>. Acesso em: 10 nov. 2024.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (AIE). Global energy review: CO2 emissions in 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Relatório de Geração de Energia Renovável. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 26 nov. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Relatório de Usinas de Biogás no Brasil. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 26 nov. 2024.

ALAO, M. A.; POPOOLA, O. M.; AYODELE, T. R. Projecting the energetic potential and economic viability of renewable power generation from municipal solid waste: Indication from South African Provinces. *Energy for Sustainable Development*, v. 71, p. 352–367, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.10.010>. Acesso em: 15 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 1004. Resíduos Sólidos: Classificação. Rio de Janeiro. 2004.

AUDIBERT, Jorge Luis. Avaliação qualitativa e quantitativa do biogás de aterro controlado em Londrina. Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes. 2011. 186 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011. Disponível em: <https://repositorio.uel.br/handle/123456789/11476>. Acesso em: 20 out. 2024.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Linhas de Crédito para Energia Renovável. Disponível em: www.bndes.gov.br. Acesso em: 26 nov. 2024.

BARROS, Regina Mambeli. Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciências, 2012. 374 p.

BENSHLOMO, O. Produção de biogás através de aterros sanitários: uma alternativa para economia circular. v. 4, n. 1, p. 88–100, 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.html. Acesso em: 11 set. 2024.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Disponível em: www.planalto.gov.br. Acesso em: 26 nov. 2024.

CARVALHO, Ruy de Quadros; TAVARES, André Neiva; SANTOS, Glicia Vieira dos; BAJAY, Sérgio Valdir (colaborador). Geração elétrica a partir do biogás de resíduos sólidos urbanos: oportunidades enterradas. 1. ed. Vitória, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/server/api/core/bitstreams/c9f69317-2b03-418f-b044-20bce998adac/content>. Acesso em: 15 set. 2024.

DE SOUZA RIBEIRO, N. et al. Electric energy generation from biogas derived from municipal solid waste using two systems: landfills and anaerobic digesters in the states of São Paulo and Minas Gerais, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 48, n. September, p. 101552, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional: Síntese 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. Global Methane Pledge. Disponível em: www.globalmethanepledge.org. Acesso em: 26 nov. 2024.

FERNANDES, E. A.; LEITE, G. B. Atuação dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo para o desenvolvimento sustentável no Brasil. *Brazilian Journal of Political Economy*, v. 41, n. 2, p. 351–371, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0101-31572021-3168>. Acesso em: 28 nov. 2024.

FILIPPE, M. Mercado de carbono criado: COP26 tem documento final. Exame, 2021. Disponível em: <https://exame.com/negocios/mercado-de-carbono-criado-cop26-tem-documento-final>. Acesso em: 28 nov. 2024.

FORGIARINI, G. M. Classificação dos resíduos sólidos urbanos coletados com o uso de ecobarreira em cursos de água no município de Caçapava do Sul, RS. 2018. p. 19. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/4123>. Acesso em: 20 out. 2024.

GONÇALVES, D. Q.; SOUZA, L. M. F. Biogás: produção, uso e viabilidade econômica. Curitiba: Editora UFPR, 2022. 314 p.

IPCC. 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3>. Acesso em: 27 nov. 2024.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 127, p. 221–232, 2017.

KIRSTEN, Leonardo Brito. Explorando as características do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil e seu impacto na geração de energia no país. 2023. Orientador: Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Sorocaba, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/253387>. Acesso em: 15 nov. 2024.

LIMA, Thiago R. F.; SOUSA, Camila S.; PINTO, André C. S. O impacto da coleta seletiva no aproveitamento do biogás em aterros sanitários brasileiros. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 1, p. 41–50, 2020.

LOUREIRO, M. A. S. Perspectivas e desafios para a recuperação energética do biogás em aterros sanitários no Brasil. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2022.

MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações). Estratégia Brasileira de Longo Prazo para a Neutralidade Climática. Brasília: MCTI, 2022.

ONU. Relatório do IPCC 2022: impacto do biogás e energias renováveis no contexto das mudanças climáticas. Disponível em: <https://www.un.org/pt/>. Acesso em: 30 nov. 2024.

PIRES, A.; DE MATOS, L.; MONTEIRO, J. Energia e Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: Uma Revisão de Literatura. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 15, n. 4, p. 22–31, 2023.

SANTOS, M. C.; FREITAS, L. S.; SILVA, A. P. Geração de energia elétrica a partir do biogás: estudo de caso no aterro sanitário do município de Campinas-SP. *Revista Ambiente e Sociedade*, v. 25, n. 1, p. 78–90, 2022.

SILVA, F. D. P.; ARAÚJO, T. M. O biogás e sua utilização como fonte de energia. *Revista Brasileira de Energia*, v. 11, n. 2, p. 45–57, 2020.

SOUZA, C. R.; OLIVEIRA, L. C. O papel da recuperação energética de resíduos sólidos urbanos no Brasil: uma análise das principais políticas públicas e desafios. 2024. Disponível em: <https://www.revistas.org.br>. Acesso em: 5 dez. 2024.

ZANZOTTI, Leonardo A. Energia gerada a partir de resíduos sólidos urbanos: O biogás e sua contribuição para a sustentabilidade no Brasil. *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 10, n. 3, p. 118–129, 2023.

APÊNDICE A - “Waste To Energy”: Oportunidades e desafios do aproveitamento energético do Biogás em aterros sanitários via análise swot

“WASTE TO ENERGY”: OPORTUNIDADES E DESAFIOS DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS VIA ANÁLISE SWOT

STHÉFANI SILVA SANTOS; SABRINA NEVES DA SILVA

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários para a geração de energia, utilizando a análise SWOT para identificar forças, fraquezas, oportunidades e ameaças associadas a essa prática. O estudo inicia-se com a caracterização dos componentes e do processo de formação do biogás, destacando sua composição e potencial energético. Em seguida, são avaliadas as tecnologias disponíveis para captação e conversão do biogás em energia elétrica, considerando sua viabilidade técnica e econômica. A análise SWOT é aplicada para mapear os fatores internos e externos que influenciam o aproveitamento do biogás em aterros, identificando oportunidades, como políticas públicas e incentivos financeiros, além de ameaças como barreiras regulatórias e desinteresse de grandes investidores. Com base nos resultados, o estudo propõe recomendações para otimizar a utilização do biogás, destacando seu potencial para promover benefícios ambientais e econômicos, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade e redução de emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: biogás; aterros sanitários; geração de energia; SWOT

1 INTRODUÇÃO

A importância do tema está relacionada aos benefícios que a correta disposição final dos RSU pode oferecer. Além de reduzir os danos ambientais relacionados à poluição generalizada e liberação massiva de gases do efeito estufa, possibilita a produção do biogás, um recurso energético que pode ser tratado e comercializado como combustível ou energia elétrica, e a geração de receitas financeiras com a venda de créditos de carbono (Montagner, 2021).

A crescente preocupação mundial com a sustentabilidade e a gestão eficiente dos RSU tem impulsionado a busca por soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis. Nesse contexto, o aproveitamento do biogás gerado em aterros sanitários para a geração de energia surge como uma alternativa promissora, capaz de transformar passivos ambientais em ativos energéticos. O biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) é produzido pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica presente nos resíduos. Sua captura e utilização não apenas mitiga as emissões de GEEs, mas também oferecem uma fonte renovável de energia, contribuindo

para a diversificação da matriz energética e a redução da dependência de combustíveis fósseis (Rodrigues, 2022).

A análise SWOT, uma ferramenta estratégica que examina forças, fraquezas, oportunidades e ameaças, pode ser aplicada para avaliar o potencial de aproveitamento do biogás em aterros sanitários. Essa abordagem permite identificar os fatores internos que podem facilitar ou dificultar a implementação de projetos, bem como os fatores externos que podem influenciar seu sucesso. Estudos recentes indicam que, apesar dos desafios técnicos e econômicos, como a necessidade de investimentos em infraestrutura e tecnologia, existem oportunidades significativas associadas a políticas de incentivo e inovação tecnológica (Freitas, 2022).

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar, por meio da aplicação da análise SWOT, o potencial de aproveitamento do biogás para geração de energia em aterros sanitários, propondo estratégias que maximizem os benefícios ambientais e econômicos dessa prática. Assim, espera-se contribuir para o desenvolvimento de soluções sustentáveis no gerenciamento de resíduos sólidos, alinhadas aos objetivos globais de sustentabilidade e redução de emissões.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho envolveu a consulta a publicações acadêmicas e documentos técnicos relacionados à gestão de resíduos sólidos urbanos e ao aproveitamento de biogás em aterros sanitários, com foco na aplicação da análise SWOT. As fontes foram selecionadas com base em sua relevância para o tema, abrangendo artigos científicos, legislações ambientais e relatórios técnicos que tratam de oportunidades e desafios para a gestão sustentável de resíduos e a geração de energia a partir do biogás no Brasil. As informações coletadas foram organizadas e sintetizadas em um quadro, permitindo uma visão estruturada das possibilidades de melhoria e dos desafios associados à implementação de tecnologias e políticas voltadas para o aproveitamento de biogás em aterros sanitários.

3 RESULTADOS

Os resultados destacam o grande potencial do biogás como fonte de energia renovável no Brasil, especialmente considerando a vasta quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados no país. A elevada proporção de matéria orgânica nesses resíduos, como restos de alimentos e outros materiais biodegradáveis, reforça a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento do biogás em aterros sanitários. Essa diversidade de componentes orgânicos amplia as possibilidades de geração de energia e redução de impactos ambientais, além de alinhar-se às políticas públicas voltadas para a sustentabilidade e a economia circular.

Com base nos estudos analisados e nos autores mencionados na metodologia deste trabalho, foi elaborada uma matriz SWOT que orientou a construção de um quadro representativo como parte dos resultados. Esse Quadro 4 sintetiza os principais elementos estratégicos relacionados à gestão e ao aproveitamento do biogás em aterros sanitários no Brasil.

Quadro 1 – Principais elementos estratégicos para o aproveitamento do biogás

Forças	Fraquezas
<ul style="list-style-type: none"> - Crescente infraestrutura tecnológica para captação e processamento de biogás. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de infraestrutura adequada em muitos aterros sanitários.
<ul style="list-style-type: none"> - Vantagens econômicas na geração de energia renovável a partir de resíduos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altos custos de implementação e manutenção de tecnologias de biogás.
<ul style="list-style-type: none"> - Redução significativa das emissões de gases de efeito estufa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Problemas técnicos relacionados à purificação e estabilidade do biogás.
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> - Políticas públicas e incentivos governamentais, como RenovaBio e Metano Zero. 	<ul style="list-style-type: none"> - Barreiras regulatórias que dificultam a expansão do setor.
<ul style="list-style-type: none"> - Compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, que promovem o uso de energias renováveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Competição com outras fontes de energia renovável, como solar e eólica.
<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de parcerias público-privadas para financiar e expandir projetos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Incertezas políticas e econômicas que podem afetar investimentos e planejamento de longo prazo.

Fonte: Autoria própria, 2024.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se que o biogás proveniente de aterros sanitários representa uma solução altamente eficaz para a gestão de resíduos e a geração de energia renovável no Brasil. Apesar dos desafios associados à infraestrutura limitada e aos elevados custos iniciais, seu potencial para contribuir com a transição energética e mitigar os impactos ambientais da decomposição de resíduos orgânicos é substancial. A superação dessas barreiras pode ser viabilizada por meio de políticas públicas estratégicas, parcerias intersetoriais e avanços tecnológicos. Aliás, o desenvolvimento do setor de biogás pode gerar importantes benefícios socioeconômicos, como a criação de empregos verdes e o fortalecimento da economia local, promovendo, assim, um desenvolvimento sustentável e integrado para o país.

REFERÊNCIAS

FREITAS, Milena Silva de. **Mapeamento e identificação de janelas de oportunidades para o biogás no Brasil via análise SWOT. 2022.** Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/17633>. Acesso em: 2 out. 2024.

MONTAGNER, Paulo Renato dos Santos. **Avaliação do potencial de uso do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica.** Orientador: Prof. Dr. Humberto Felipe da Silva. 2021. 80 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Física) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2021. p.11. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2020/MEF20012.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

RODRIGUES, Larissa Jonaly. **Panorama de aproveitamento energético do biogás dos tratamentos de esgoto sanitário e de resíduos sólidos urbanos.** 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/16911>. Acesso em: 3 out. 2024.