

PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

LUCAS BRANCO

**Análise do potencial de produção de biometano a partir de aterro sanitário e
avaliação da substituição do gás natural por biometano em uso veicular: um
estudo de caso**

São Paulo

Outubro de 2024

LUCAS BRANCO

Análise do potencial de produção de biometano a partir de aterro sanitário e avaliação da substituição do gás natural por biometano em uso veicular: um estudo de caso

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Biogás e Biometano

Orientadora: Prof. Vanessa Pecora Garcilasso

São Paulo
Outubro de 2024

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Nome: BRANCO, Lucas da Paz Nogueira

Título: Análise do potencial de produção de biometano a partir de aterro sanitário e avaliação da substituição do gás natural por biometano em uso veicular: um estudo de caso.

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como forma de avaliação do Curso de Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Aprovado em: _____ / _____ / _____

Banca Examinadora

Prof^o. Dr^o: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof^o. Dr^o: _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho a Deus, à minha família, aos meus amigos e, especialmente, às pessoas que fizeram desse período (em que estive na USP) algo leve e que de alguma forma me fizeram sempre seguir em frente: Bianca Lemos, Luan Ferraz, Rafael Rodrigues e Renan Queiroz.

“Caminante, no hay camino. Se hace camino al andar”

(Antonio Machado)

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------|
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| CH ₄ | Metano |
| CO | Monóxido de Carbono |
| CO ₂ | Gás Carbônico/Dióxido de Carbono |
| CO _{2eq} | Gás Carbônico Equivalente/Dióxido de Carbono Equivalente |
| DOC | Carbono Orgânico Degradável |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GNV | Gás Natural Veicular |
| H ₂ S | Gás Sulfídrico ou Sulfeto de Hidrogênio |
| N ₂ | Nitrogênio |
| NH ₃ | Amônia |
| O ₂ | Oxigênio |
| OIE | Oferta Interna de Energia |
| Planares | Plano Nacional dos Resíduos Sólidos |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| RSU | Resíduo Sólido Urbano |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 - Percentual de RSU coletado por grande região em 2022 | 17 |
| Figura 2.2 - Disposição final de RSU no Brasil em 2022 | 18 |
| Figura 2.3 - Composição gravimétrica do RSU no Brasil | 19 |
| Figura 2.4 - Esquema representativo de um aterro sanitário com processo de captação de biogás | 21 |
| Figura 2.5 - Número de plantas produtoras de biogás em operação no Brasil e volume produzido | 24 |
| Figura 2.6 - Quantidade de biogás aproveitado energeticamente em comparação ao seu potencial em 2022 no Brasil | 25 |
| Figura 2.7 - Dados de plantas de biogás em operação no Brasil | 26 |
| Figura 2.8. Distribuição das plantas de produção de biogás no Brasil em 2022.. | 27 |
| Figura 2.9. Distribuição das plantas de produção de biogás no Brasil em 2022 com RSU/esgoto como fonte de substrato (esquerda) e com RSU/esgoto como fonte de substrato com uso exclusivo para a produção de biometano (direita) | 28 |
| Figura 3.1 - Lagoa de acumulação de chorume na CVTA Caieiras | 32 |
| Figura 3.2 - Usina Termelétrica na CVTA Caieiras | 32 |
| Figura 3.3 - Vista área da planta de produção de biometano em construção na CVTA Caieiras | 33 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 - Dados de RSU's gerados no Brasil por região em 2022 | 16 |
| Tabela 3.1 - Composição gravimétrica média dos resíduos domiciliares de São Paulo e valores de DOC correspondentes | 34 |
| Tabela 4.1 - Resultados ao utilizar as Equações 1, 2 e 3 | 37 |
| Tabela 4.2 - Resultados de CO _{2eq} | 40 |

RESUMO

Com o intuito da diversificação da matriz energética visando a utilização de uma parcela maior de energias renováveis, o biogás proveniente de aterros sanitários vem apresentando um papel promissor no Brasil. Além disso, a captação do biogás em aterros sanitários contribui para redução da emissão de gases de efeito estufa e torna viável a produção de biometano, combustível renovável e alternativo ao gás natural, que é um combustível fóssil. Esta monografia detalha o panorama dos resíduos sólidos urbanos, biogás e biometano no Brasil e seus potenciais benéficos ao meio ambiente. Adicionalmente, um estudo de caso é conduzido com o objetivo de avaliar o potencial de produção de biometano a partir do biogás gerado no aterro sanitário da cidade de Caieiras, investigando a viabilidade da sua substituição pelo gás natural em veículos. Por fim, os principais desafios e impactos resultantes dessa substituição são discutidos.

Palavras-chave: Biogás, Biometano, Gás Natural, Aterro Sanitário, Energia Renovável.

ABSTRACT

Aiming to diversify the energy matrix with the use of more renewable energy, biogas produced from landfills has been playing a promising role in Brazil. Furthermore, biogas production on landfills contributes to the reduction of greenhouse gas emissions and allows the production of biomethane, a renewable fuel and alternative to natural gas. This work details the panorama of urban solid waste, biogas and biomethane in Brazil and their potential benefits to the environment. Additionally, a case study is conducted with the goal of evaluating the potential of biomethane production from biogas from Caieiras city landfill, investigating the feasibility of replacing natural gas in vehicles with the produced biomethane. Finally, the main challenges and impacts resulting from this replacement are discussed.

Keywords: Biogas, Biomethane, Natural Gas, Landfill, Renewable Energy.

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. Contextualização | 11 |
| 1.2. Objetivos | 13 |
| 1.2.1. Objetivo geral | 13 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 13 |
| 1.3. Justificativa | 13 |
| 1.4. Estrutura da monografia | 14 |
| 2. REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 2.1. Aterros sanitários e resíduos sólidos urbanos (RSU's)..... | 15 |
| 2.2. Biogás, biometano e sua produção | 20 |
| 2.3. Panorama do biogás e biometano no Brasil | 23 |
| 2.4. Uso veicular de gás natural e biometano | 29 |
| 3. PRODUÇÃO DE BIOMETANO EM ATERRO SANITÁRIO E SEU USO VEICULAR – ESTUDO DE CASO | 30 |
| 3.1. Descrição do estudo de caso | 30 |
| 3.2. Coleta e tratamento de dados | 33 |
| 3.3. Estimativa do Potencial de Produção de Biometano | 35 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 37 |
| 4.1 Potencial de produção de biometano..... | 37 |
| 4.2 Análise técnica | 38 |
| 4.3 Análise ambiental | 39 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 41 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 42 |
| APÊNDICE | 48 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Embora as taxas anuais de crescimento populacional estejam em declínio – chegando a valores menores que 1% em 2023 (ROSER, 2023) – a população do planeta segue em expansão, gerando a necessidade de atenção em diversas áreas que podem comprometer o fator sustentável desse crescimento. Dentre elas, o tema ambiental destaca-se, visto que o gerenciamento de recursos necessários para a manutenção da vida humana no planeta está diretamente relacionado a ele.

A produção e utilização de energia possui um impacto relevante sobre a pauta ambiental, muita das vezes com foco na redução da emissão de GEE (gases de efeito estufa), potencialmente causadores e/ou catalisadores do aquecimento global, dentre outros problemas ambientais ou mesmo de saúde para os humanos e animais.

A utilização de energias de fontes renováveis, que, por serem alternativas menos agressivas ao meio ambiente quando comparadas às energias geradas por combustíveis fósseis, vem ganhando bastante importância dado o cenário apresentado. O Brasil, que historicamente é um país com altas taxas de utilização de energias renováveis em sua matriz energética, apresentou, na Oferta Interna de Energia (OIE), o percentual de 49,1% de energias de fontes renováveis em 2023 em sua matriz energética, frente a 45% em 2021, com destaque para a utilização de biomassa de cana-de-açúcar e energia hidráulica (BRASIL, 2024).

Reforçando o protagonismo do Brasil na importante missão de transição energética justa e sustentável, o biometano, que é um biocombustível gasoso gerado a partir da purificação do biogás (produzido a partir de diversas fontes, como resíduos sólidos urbanos – RSU, esgoto sanitário, agropecuária ou indústrias) apresenta-se como uma solução extremamente promissora tanto do ponto de vista energético quanto ambiental.

Por ter uma grande produção RSU e crescente preocupação com o gerenciamento sustentável desses resíduos, o Brasil se consolida como um país de grande potencial para a produção de biometano. Os aterros sanitários, frequentemente vistos como um passivo ambiental, são fontes ricas de biogás, que é composto majoritariamente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Ao ser purificado, o biogás dá origem ao biometano, que é classificado como combustível renovável e é uma alternativa ao gás natural, com aplicações em diversos setores, como transporte, geração de energia e indústrias. No setor de transportes, o uso do biometano como substituto do gás natural veicular (GNV) tem o potencial de reduzir emissões, além de diminuir a dependência de combustíveis fósseis.

Neste contexto, o presente estudo visa analisar o potencial de produção de biometano a partir do biogás proveniente de aterros sanitários e investigar a viabilidade da sua substituição pelo gás natural em veículos. O estudo de caso proposto (biometano produzido no aterro sanitário da cidade de Caieiras - SP) focará em uma avaliação teórica da substituição do GNV utilizado no estado de São Paulo - SP pelo biometano, explorando os benefícios ambientais e operacionais que essa alternativa pode oferecer. Paralelamente será discutida a viabilidade técnica e os desafios relacionados à infraestrutura, regulamentações e aceitação do mercado para a implementação em larga escala do biometano como combustível veicular.

Dessa forma, esta pesquisa contribui para a discussão sobre energias renováveis no Brasil, apresentando o biometano como uma alternativa viável e estratégica para diversificação da matriz energética e mitigação dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos urbanos e pelo uso intensivo de combustíveis fósseis.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é analisar o potencial de produção de biometano no Aterro Sanitário da cidade de Caieiras, localizado no estado de São Paulo e discutir uma possível substituição do GNV consumido no estado de São Paulo - SP pelo biometano potencialmente produzido por esse aterro sanitário.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Estimar o volume de biometano potencial a ser produzido no aterro sanitário de Caieiras-SP;
- Realizar uma análise da viabilidade técnica dessa produção total;
- Comparar o volume de biometano potencialmente produzido com volume de gás natural veicular consumido no estado de São Paulo e avaliar possível substituição do GNV pelo biometano produzido;
- Avaliar o impacto ambiental dessa substituição.

1.3. Justificativa

O biometano, por ser utilizado como um combustível renovável, contribuindo para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, tendo um impacto ambiental positivo como fonte energética, possui grande potencial para ter sua produção maximizada no Brasil.

É possível verificar que, no Brasil, a produção de biogás para a produção de biometano passou de 54,2 milhões de Nm³/ano em 2012 para 635,6 milhões de Nm³/ano em 2022, um aumento superior a 1000% em 10 anos (CIBIOGÁS, 2023), mostrando na prática a grande importância desse combustível no território brasileiro.

Quando analisada a situação dos aterros sanitários, que são fontes de biogás (e potencialmente poluidores se os gases de decomposição dos RSU's não forem tratados), é possível constatar que eles são fundamentais para a produção de biometano no Brasil, visto que 84% do biogás utilizado para a fabricação de biometano no Brasil em 2022 foi proveniente dos aterros sanitários (CIBIOGÁS, 2023).

Por fim, pela possibilidade da utilização do biometano em aplicações práticas e usuais, como na substituição do GNV, contribuindo diretamente para pontos como: redução da utilização de combustíveis fósseis no setor de transportes; diminuição da emissão de GEE pelos aterros sanitários; além da geração de empregos em seu processo de produção, esse tema apresenta uma grande relevância em seu estudo.

1.4. Estrutura da monografia

Após a apresentação da introdução, o capítulo 2 detalha a revisão da literatura utilizada como base desse trabalho, desde o panorama do biogás e biometano no Brasil até pesquisas mais específicas sobre a produção de biogás e/ou biometano em aterros sanitários específicos em território nacional. Adicionalmente serão evidenciadas as normas da utilização do biometano e GNV como combustível veicular.

No capítulo 3 é apresentado o estudo de caso, com detalhes sobre o local, coleta de dados e metodologia utilizada para as avaliações técnicas e ambientais da possível substituição do GNV pelo biometano potencialmente produzido.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa desse trabalho, com detalhes sobre o potencial de biometano a ser produzido no local do estudo de caso e sobre as avaliações técnicas e ambientais.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão visa fornecer uma base teórica ampla sobre os principais aspectos relacionados à produção de biometano em aterros sanitários, com foco no cenário brasileiro.

Os principais pontos chave são discutidos, tais como os conceitos de resíduo sólido urbano, aterro sanitário, as definições e diferenças entre biogás e biometano, o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica, as tecnologias de captura e purificação de biogás, as políticas públicas envolvidas, além de estudos que evidenciam o potencial desses combustíveis no Brasil.

2.1. Aterros sanitários e resíduos sólidos urbanos (RSU's)

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, define-se resíduo sólido urbano (RSU) todo material, substância, objeto ou bem descartado que seja resultante de atividades humanas em sociedade, onde a destinação final se procede 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 inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010). Já os rejeitos são definidos como resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

A PNRS ainda determina, no Art. 9º, que 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, 2010). Assim, seguindo a ordem prioritária, após o tratamento dos resíduos sólidos, o residual precisa ser encaminhado para uma disposição final que seja ambientalmente adequada. Esse

processo deve seguir normas operacionais específicas para evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, além de reduzir os impactos ambientais negativos.

Um tipo de instalação que se enquadra nessa definição de disposição final é o aterro sanitário, uma obra de engenharia que inclui impermeabilização de base, coleta e aproveitamento ou queima de biogás gerado pela decomposição da matéria orgânica, drenagem, coleta e tratamento de chorume, além de contar com monitoramento ambiental e geotécnico da área (ABREMA, 2023). Lixões, aterros controlados, valas, vazadouros e áreas similares não possuem essa proteção ambiental e são considerados ambientalmente inadequados para a disposição final de resíduos (ABREMA, 2023).

De acordo com ABREMA (2023), o brasileiro gerou cerca de 1,04 kg de RSU por dia em 2022, ou seja, o total gerado por toda a população brasileira no ano foi de aproximadamente 77,1 milhões de toneladas. A região Sudeste apresenta a maior geração de RSU per capita: cerca de 1,23 kg gerados por habitante em 2022. Por outro lado, a região Sul apresenta o menor número: 0,778 kg gerado por habitante. A região Sudeste, em 2022, foi responsável pela geração de 38,09 milhões de toneladas de RSU, representando aproximadamente 50% da geração nacional. Já, em números absolutos, a região que menos contribui para o total nacional é a Norte, responsável pela geração de 5,60 milhões de toneladas de RSU em 2022, equivalente a 7,3% dos RSU do país (ABREMA, 2023 e IBGE, 2023). Os dados completos com todas as regiões brasileiras foram disponibilizados na Tabela 2.1.

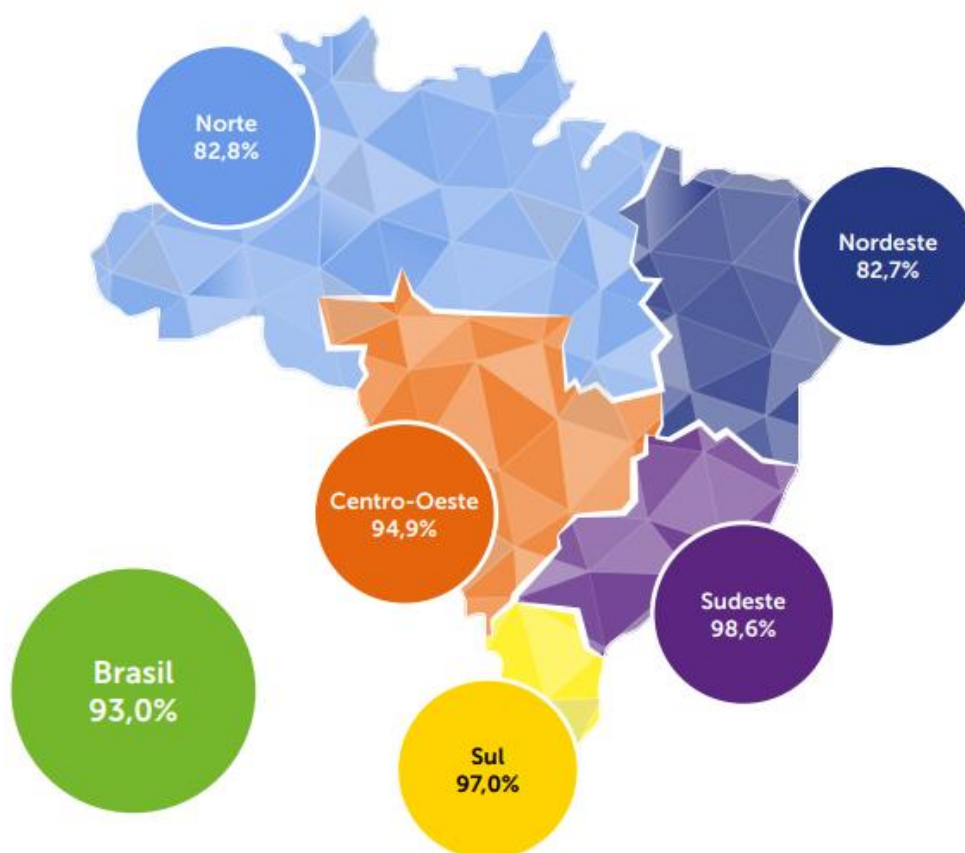
Tabela 2.1 - Dados de RSU gerados no Brasil por região em 2022.

| Região | RSU gerado per capita | População 2022 (milhões de habitantes) | RSU gerado 2022 (milhões ton.) |
|---------------|-----------------------|----------------------------------------|--------------------------------|
| Sudeste | 1,230 | 84,84 | 38,09 |
| Centro-Oeste | 0,997 | 16,29 | 5,93 |
| Nordeste | 0,950 | 54,66 | 18,95 |
| Norte | 0,884 | 17,35 | 5,60 |
| Sul | 0,778 | 29,94 | 8,50 |
| Brasil | 1,040 | 203,08 | 77,1 |

Fonte: ABREMA, 2023 e IBGE, 2023.

Já em relação ao percentual de RSU devidamente coletado no Brasil em 2022, a ABREMA (2023) estima que esse número seja 93%. Isso significa que cerca de 5 milhões de toneladas tiveram uma destinação final inadequada em todo país em 2022, oferecendo riscos ao meio ambiente e à saúde pública. A Figura 2.1 evidencia a porcentagem de RSU coletado em cada região brasileira em 2022. Destaca-se a região Sudeste com a maior porcentagem: 98,6%. Por outro lado, a região Nordeste apresenta o menor percentual: 82,7%.

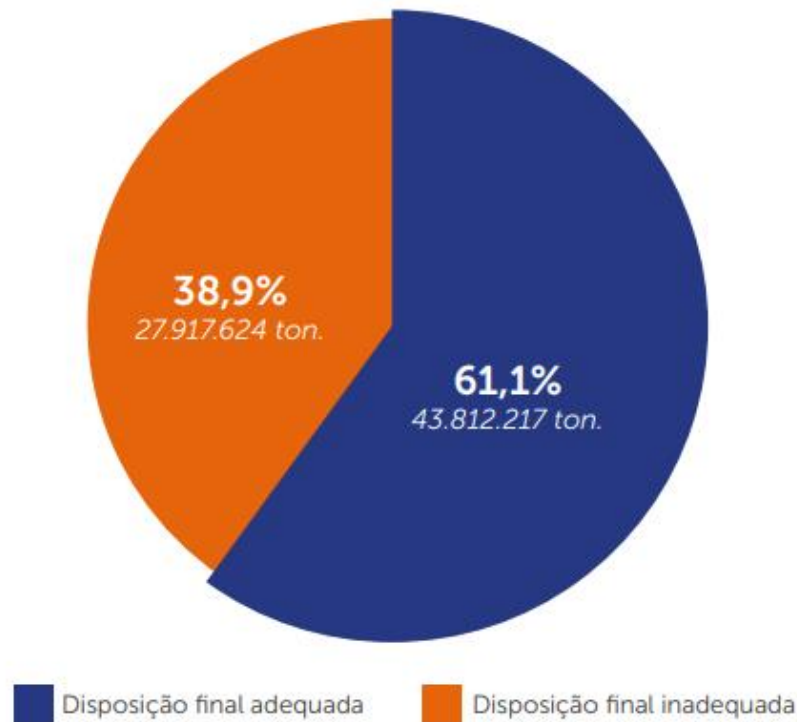
Figura 2.1 - Percentual de RSU coletado por grande região em 2022.



Fonte: ABREMA, 2023.

No Brasil, conforme dados da Figura 2.2, estima-se que 61,1% dos RSU's coletados em 2022 (cerca de 43,8 milhões de toneladas) foi encaminhado para aterros sanitários, enquanto cerca de 38,9% desses resíduos tiveram disposição final inadequada (aterros controlados e lixões). As regiões Norte e Nordeste, com desempenho abaixo da média nacional, enviaram somente 37% dos resíduos coletados para uma destinação final ambientalmente adequada (ABREMA, 2023).

Figura 2.2 - Disposição final de RSU no Brasil em 2022.

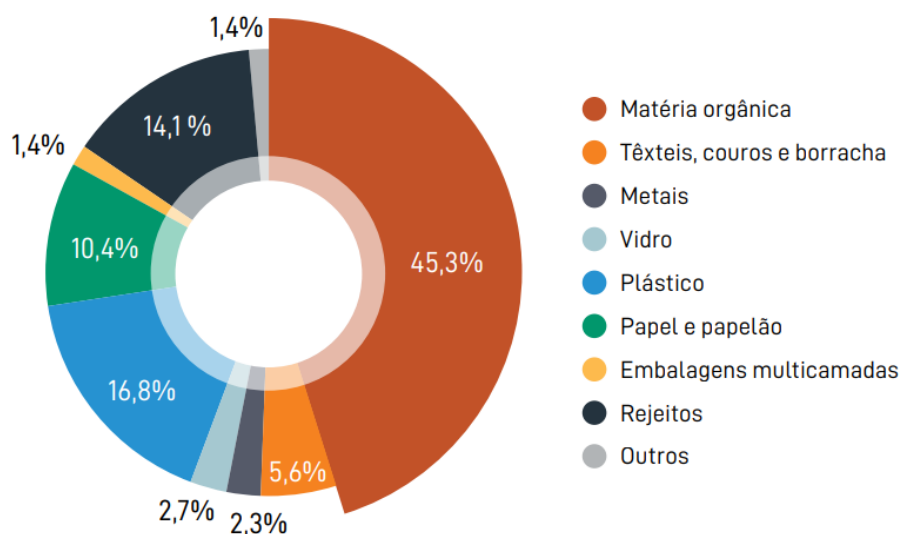


Fonte: ABREMA, 2023.

Como na PNRS existe a diretriz de se reduzir gradativamente a utilização dos aterros sanitários, encaminhado para estes somente rejeitos e não mais resíduos, o reaproveitamento dos resíduos deve ser maximizado. Um grande direcionamento da PNRS é em relação ao aproveitamento do biogás proveniente de aterros sanitários, gerado pela decomposição da matéria orgânica presente nos RSU (CANDIANI e TORRES, 2015).

Na Figura 2.3 pode-se verificar os dados mais recentes divulgados pela ABRELPE, em seu relatório sobre resíduos sólidos no Brasil. Fica evidenciado o grande percentual de matéria orgânica na composição média do RSU no Brasil, qualificando o país com um grande potencial de geração de biogás a partir de aterros sanitários.

Figura 2.3 - Composição gravimétrica do RSU no Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2020.

Em abril de 2022, através do decreto 11.043, o Ministério do Meio Ambiente divulgou o Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (Planares). O plano é um importante instrumento da PNRS pois apresenta um caminho para se alcançar os objetivos da mesma, melhorando a gestão de resíduos sólidos no país.

Além do encerramento de todos os lixões, é previsto o aumento da recuperação de resíduos para cerca de 50% em 20 anos (MMA, 2022). Assim, metade do lixo gerado deverá deixar de ser aterrado e passará a ser reaproveitado por meio da reciclagem, compostagem, biodigestão e recuperação energética (MMA, 2022).

O Planares ainda indica que a recuperação e o aproveitamento energético dos resíduos sólidos deverá ser entendida como uma eficiente solução complementar para a valorização dos materiais descartados, incentivando assim que a captação e queima do biogás gerado nos aterros sanitários seja fortalecida, reduzindo assim as emissões de GEE e podendo, adicionalmente, gerar energia e recursos adicionais através da venda de energia limpa e sustentável (MMA, 2022).

2.2. Biogás, biometano e sua produção

O biogás é um tipo de biocombustível produzido a partir da decomposição da matéria orgânica (origem vegetal ou animal), composto geralmente por 60% de CH₄, 35% de CO₂ e 5% de outros gases como H₂, N₂, H₂S, CO, NH₃, O₂ e aminas voláteis. Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano (PECORA, 2006). De acordo com Coelho et al. (2020), o biogás proveniente de aterros sanitários possui em sua composição uma concentração de CH₄ de 50%.

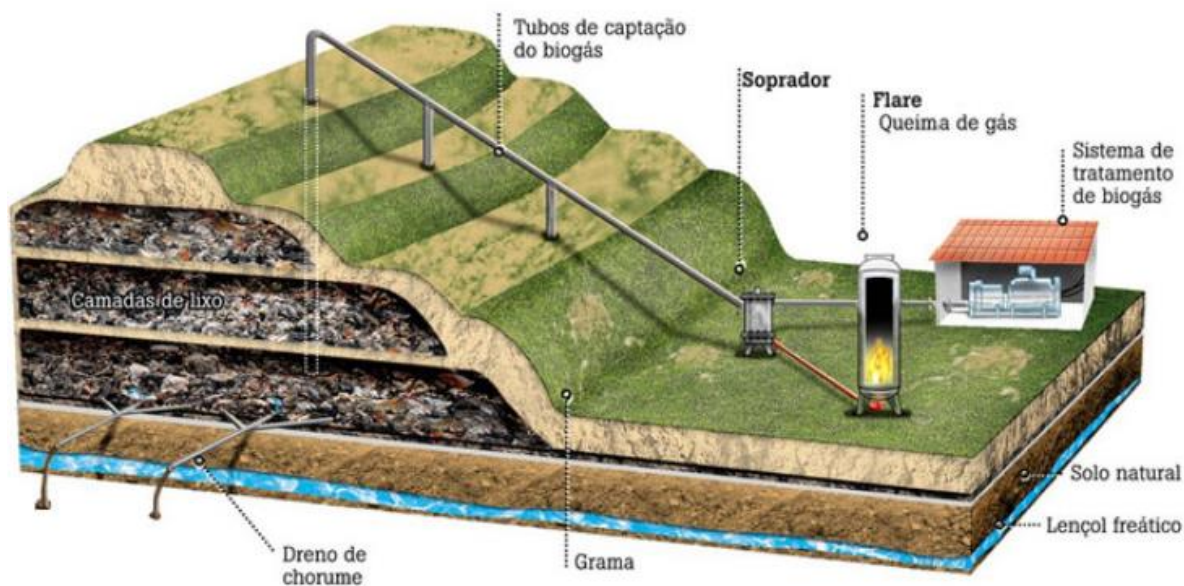
Conforme citado anteriormente, o biogás pode ser produzido a partir de diversas fontes, como RSU, esgoto sanitário, e resíduos oriundos do setor agropecuário ou industrial, possuindo diversas utilizações, como por exemplo: queima em flare para uso em créditos de carbono, produção de energia elétrica e tratamento para a produção de biometano (ENERGÊS, 2020).

Em um aterro sanitário, a geração de biogás começa alguns meses após o início do depósito dos resíduos e continua por 15 anos ou mais após seu encerramento (ABREU, COSTA FILHO e SOUZA, 2009). Uma tonelada de resíduo disposto em um aterro sanitário gera em média 200 Nm³ de biogás (ABREU, COSTA FILHO e SOUZA, 2009).

Em linhas gerais, o biogás é produzido através da degradação da matéria orgânica por bactérias. A digestão anaeróbia é um processo em que algumas espécies de bactérias, que atuam na ausência de oxigênio, atacam a estrutura de materiais orgânicos mais complexos para produzir compostos simples, como CH₄, CO₂, H₂O dentre outros, através de uma série de degradações sucessivas (VIEIRA et.al., 2015).

A captação de biogás oriundo de aterros sanitários é realizada por meio de um sistema de drenagem constituído por drenos verticais instalados em diferentes pontos do aterro, conforme representado pela Figura 2.4.

Figura 2.4 - Esquema representativo de um aterro sanitário com processo de captação de biogás.



Fonte: RAC SANEAMENTO, 2018.

A ineficiência do sistema de captação de gás pode resultar em emissões fugitivas de metano do aterro sanitário, gerando um grande problema devido ao elevado impacto deste gás sobre o meio ambiente, principalmente no que tange aos efeitos do aquecimento global. Estudos realizados em aterros sanitários como o da cidade de Caieiras, em São Paulo indicaram níveis de emissões fugitivas de até 31,4% do total de biogás produzido no aterro sanitário (CANDIANI e VIANA, 2017).

Para que o biogás possa ser utilizado em suas diversas aplicações (como queima em flares, geração de energia elétrica, conversão em biometano), é necessário que passe pelos sistemas de tratamentos adequados. Conforme Coelho et al. (2019), os principais tratamentos utilizados são:

- Remoção da umidade do biogás: através de processos como o resfriamento, compressão (esses dois ocorrem com a alteração da temperatura e/ou pressão do biogás forçando a condensação do vapor de água, posteriormente coletado), adsorção em sílica ou alumina e absorção em glicol.

- Remoção do gás sulfídrico (H_2S): esse gás altamente corrosivo é removido através de processos como adsorção em carvão ativado e óxidos de ferro e absorção com sais de ferros quelatados.
- Remoção de Siloxanos: a técnica mais utilizada é a adsorção em carvão ativado ou em sílica gel.

Esses tratamentos têm os seguintes objetivos principais:

- Aumento da concentração de metano no biogás (aumento de poder calorífico);
- Remoção de impurezas ou compostos inertes;
- Remoção de compostos danosos às aplicações do biogás (Ex: siloxanos, que podem ser prejudiciais a equipamentos no processo de aproveitamento energético do biogás);
- Adequação do produto final a requerimentos (Ex: Resolução 886 da ANP para substituição ao gás natural).

O biometano é definido como gás constituído essencialmente de metano, derivado da purificação do biogás (ANP, 2022) e para que o biogás produzido possa ser considerado biometano, as seguintes especificações mínimas e máximas de concentração de componentes estabelecidas pela ANP na Resolução 886/2022 devem ser cumpridas:

- Metano (CH_4): O biometano deve conter pelo menos 90% de metano em volume (essencial para garantir que o gás tenha alto poder calorífico).
- Dióxido de Carbono (CO_2): Limite máximo de 3% em volume.
- Oxigênio (O_2): Limite máximo de 0,8% em volume.
- Sulfeto de Hidrogênio (H_2S): a concentração não pode ultrapassar 10 mg/m^3 visto que trata-se de um gás altamente corrosivo que pode causar sérios danos a equipamentos.
- Siloxanos: O limite de siloxanos, que são compostos presentes principalmente no biogás de aterros, é de no máximo $0,001 \text{ mg Si/m}^3$ (ANP, 2022).

Uma das etapas mais importantes na purificação do biogás para transformá-lo em biometano é a remoção do dióxido de carbono (CO_2), de modo que a

concentração de metano (CH₄) seja aumentada e o poder calorífico do gás seja melhorado. Conforme ULTRAGAZ (2024), as tecnologias mais empregadas atualmente são as apresentadas a seguir:

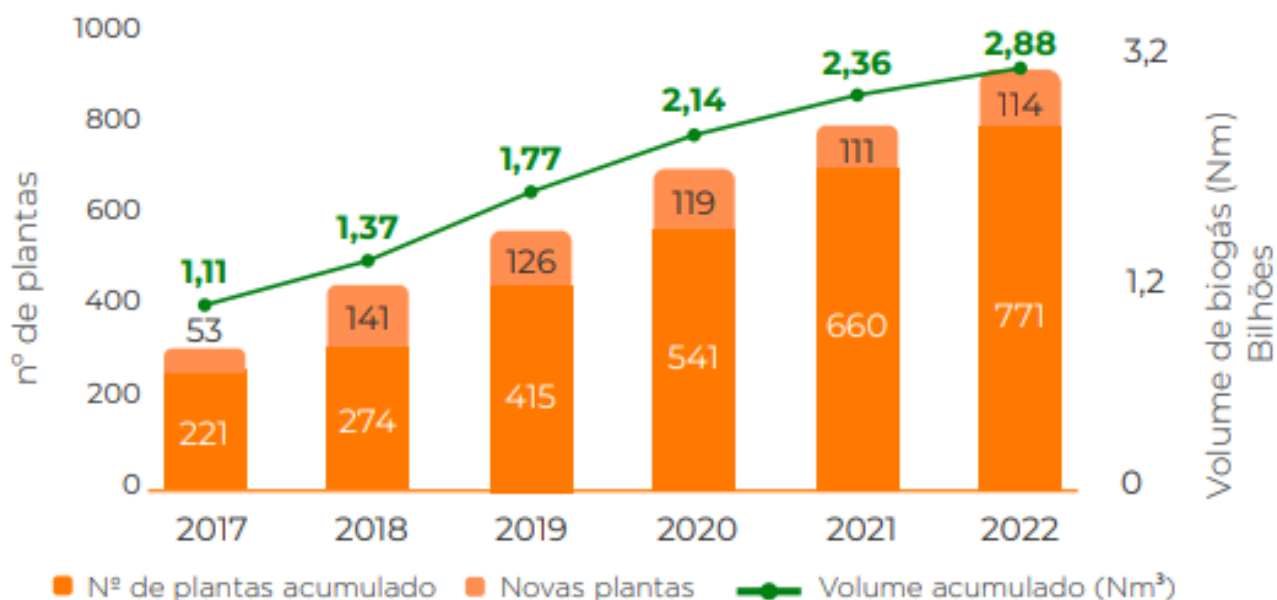
- PSA (Pressure Swing Adsorption): utiliza materiais adsorventes que, sob alta pressão, prendem o CO₂ e liberam o metano. Após a captura, a pressão é reduzida para liberar o CO₂, permitindo que o processo se repita continuamente.
- Membranas: atuam como barreiras físicas que separam o biogás com base no tamanho das moléculas. O CO₂, sendo mais leve, atravessa a membrana, enquanto o metano é retido.
- Water Scrubbing: o processo usa água sob pressão para absorver o CO₂. Assim o biogás é lavado, e como o CO₂ é mais solúvel em água do que o metano, ele é removido enquanto o metano permanece.

Com a grande quantidade de resíduos sólidos urbanos produzidos diariamente no país, há um imenso potencial para a geração de biogás, que pode ser purificado e convertido em biometano, uma alternativa energética promissora no Brasil, especialmente pelo seu potencial de substituir combustíveis fósseis, pela sua contribuição para uma matriz energética mais sustentável e pela redução das emissões de gases de efeito estufa (ao aproveitar o metano que seria liberado na atmosfera).

2.3. Panorama do biogás e biometano no Brasil

A produção de biogás no Brasil tem ganhado destaque nos últimos anos, especialmente por seu potencial de contribuir para a matriz energética do país e para a gestão sustentável de resíduos. O número de plantas produtoras teve o aumento expressivo de 221 no final de 2016 para 885 no final de 2022, um aumento superior a 300% em apenas seis anos, conforme evidenciado na Figura 2.5. Já o volume produzido teve um salto de 159% entre 2017 e 2022, um adicional de 1,77 bilhões de Nm³/ano.

Figura 2.5 - Número de plantas produtoras de biogás em operação no Brasil e volume produzido.

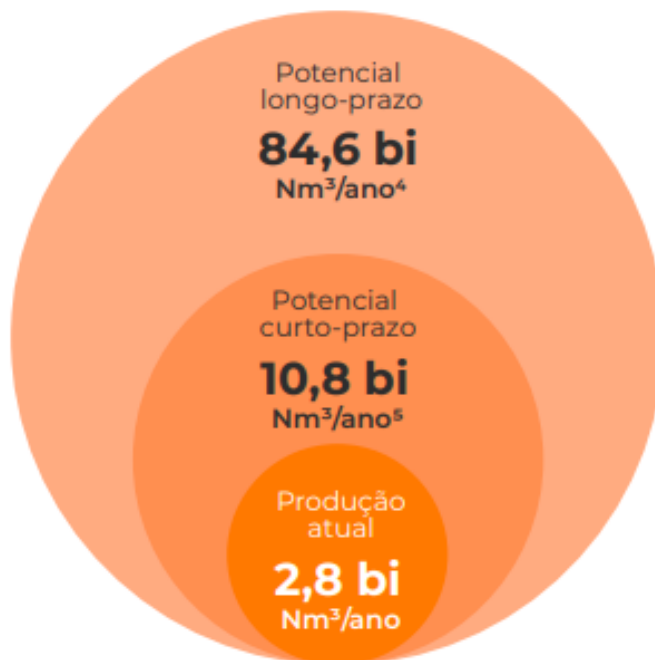


Fonte: CIBIOGÁS, 2023.

Em relação ao potencial para a produção de biogás, o Brasil se destaca imensamente devido à alta geração de resíduos orgânicos, principalmente os provenientes do setor agropecuário e da indústria alimentícia, além dos resíduos sólidos urbanos.

Estima-se que, no longo prazo, o país tenha capacidade para produzir cerca de 84,6 bilhões de metros cúbicos de biogás por ano, conforme indicado na Figura 2.6. A produção atual é de 2,88 bilhões de metros cúbicos de biogás por ano, o equivalente a apenas um pouco mais do que 3% do potencial total (CIBIOGÁS, 2023).

Figura 2.6 - Quantidade de biogás aproveitado energeticamente em comparação ao seu potencial em 2022 no Brasil.

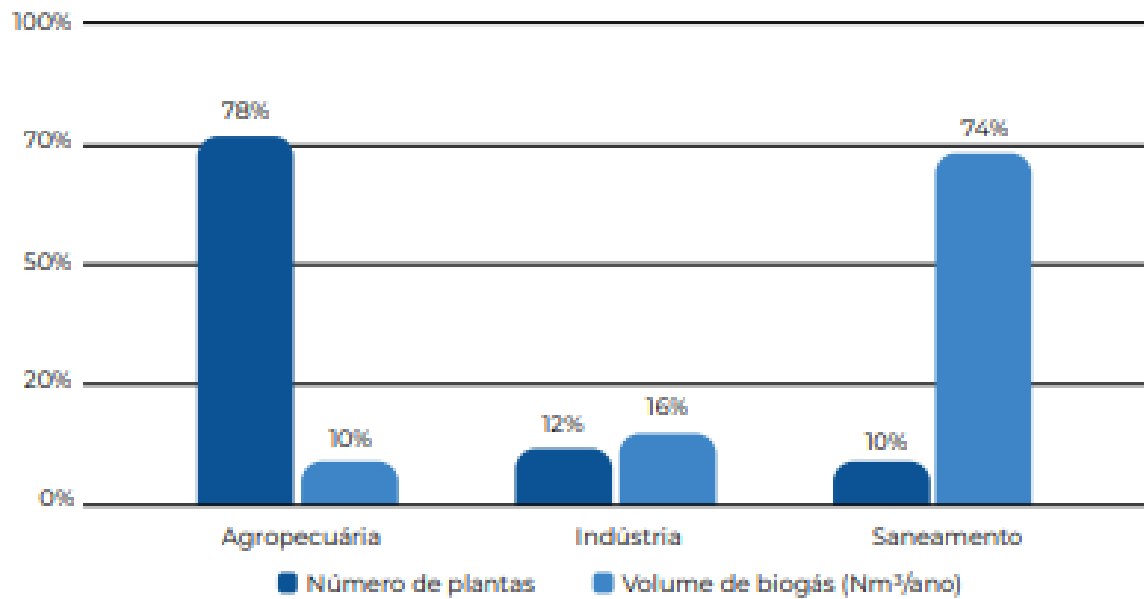


Fonte: CIBIOGÁS, 2023.

A agroindústria é uma das principais fontes dessa energia renovável, especialmente em regiões como o Centro-Oeste, Sul e Sudeste, onde há uma alta concentração de atividades agrícolas e pecuárias, que geram subprodutos orgânicos ideais para a geração de biogás.

Conforme mostrado na Figura 2.7, no Brasil, embora o maior número de plantas de biogás em operação se encontre no setor agropecuário (77%), a maior produção, em volume de biogás, está representada pelo setor de saneamento (74%), principalmente com os aterros sanitários, responsáveis por 96% da produção de biogás desta categoria (CIBIOGÁS, 2023).

Figura 2.7 - Dados de plantas de biogás em operação no Brasil.

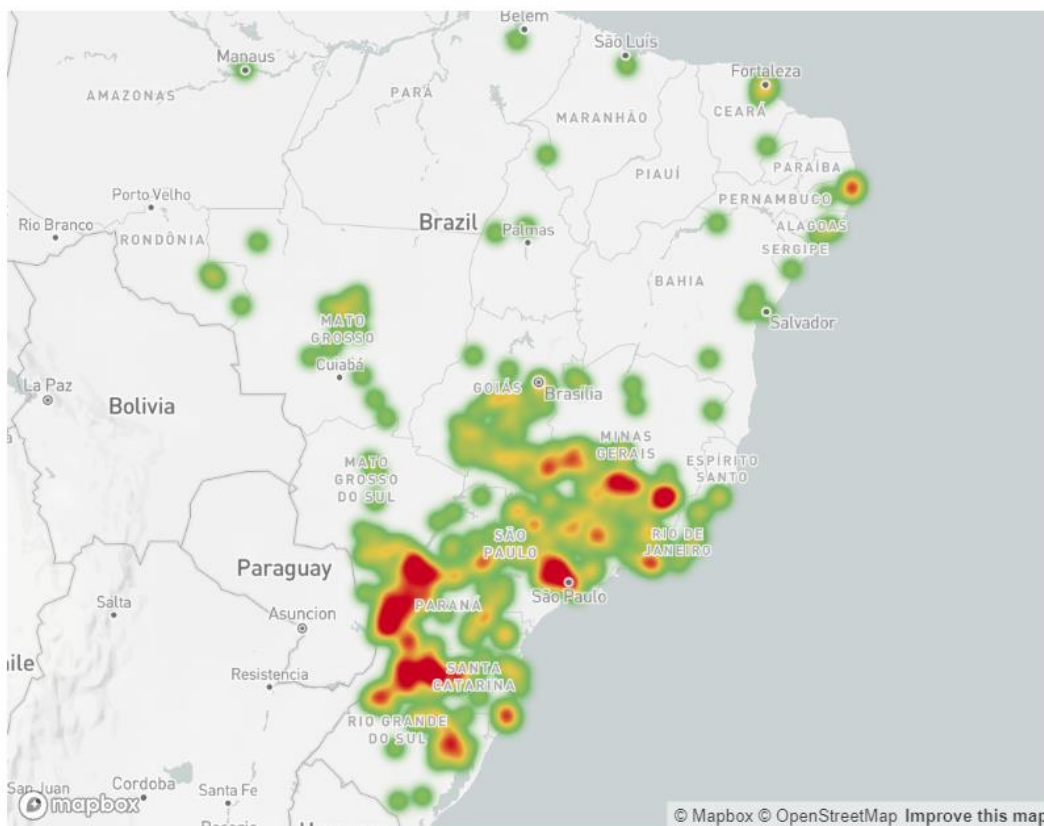


Fonte: CIBIOGÁS, 2023.

No ano de 2022, conforme mostrado na Figura 2.8, as plantas de produção de biogás estão distribuídas pelo Brasil majoritariamente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Além do potencial de produção previamente citado (2,88 bilhões de Nm³/ano), havia cerca de 527 milhões de Nm³ em potencial sendo implementados. Excluindo essa parcela, havia 885 plantas em operação (CIBIOGÁS, 2023) e os substratos utilizados são provenientes dos setores agrícolas, industriais e de saneamento

Conforme dados da CIBIOGÁS (2023), os principais usos do biogás no Brasil em 2022 são para a produção de energia elétrica (72% da utilização), térmica/mecânica (6% da utilização) e produção de biometano (22% da utilização).

Figura 2.8. Distribuição das plantas de produção de biogás no Brasil em 2022.

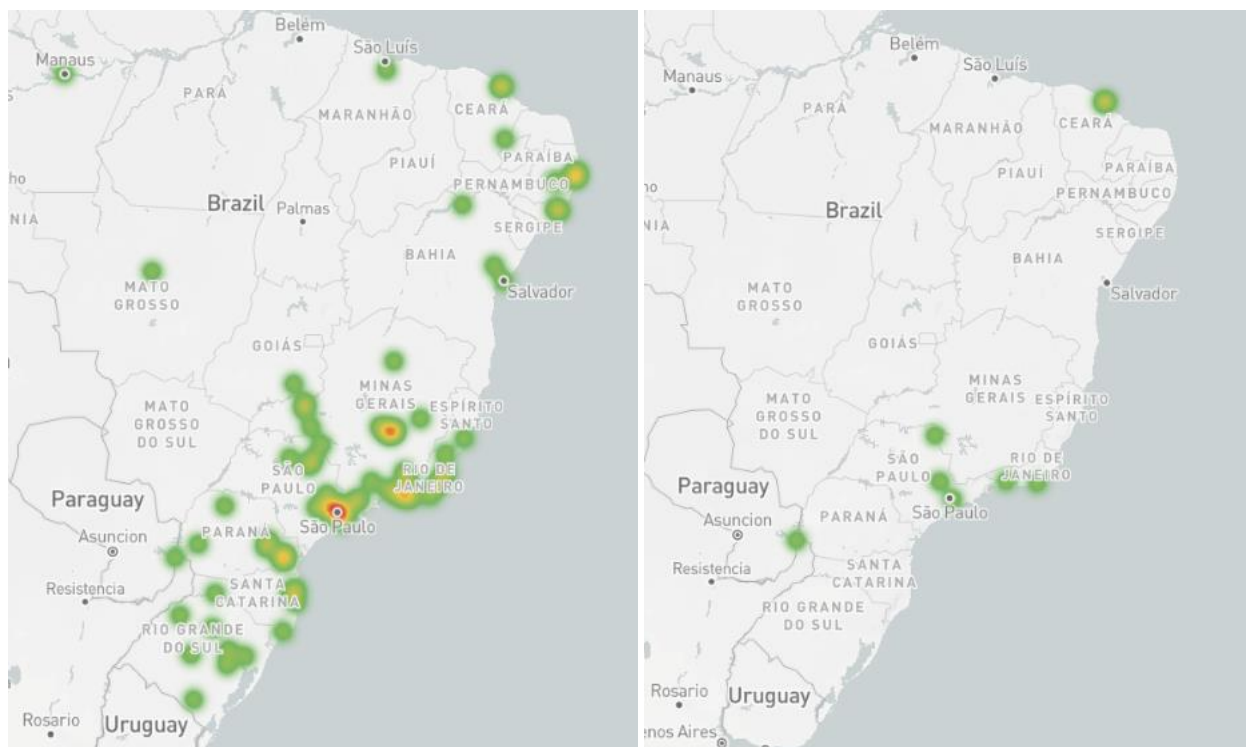


Fonte: CIBIOGÁS, 2023.

Na análise da distribuição de plantas no Brasil que produzem biogás apenas com RSU ou esgoto sanitário como fonte de substrato, o número de plantas em operação cai para 91, porém com potencial de produção de 2,14 bilhões de Nm^3/ano (CIBIOGÁS, 2023). A Figura 2.9 (à esquerda) indica essa distribuição.

Na análise da distribuição de plantas no Brasil que produzem biogás apenas com RSU ou esgoto como fonte de substrato e com uso do biogás exclusivo para a produção de biometano, o número de plantas em operação cai para 8. O potencial de produção, em 2022, com essas condições, foi de 536 milhões de Nm^3/ano , valor que representa um pouco mais de 18% de todo o potencial de produção de biogás no ano (CIBIOGÁS, 2023). A Figura 2.9 (à direita) indica essa distribuição.

Figura 2.9. Distribuição das plantas de produção de biogás no Brasil em 2022 com RSU/esgoto como fonte de substrato (esquerda) e com RSU/esgoto como fonte de substrato com uso exclusivo para a produção de biometano (direita)



Fonte: CIBIOGÁS, 2023.

Ainda em 2022, existia, em implantação, plantas com potencial de gerar cerca de 72 milhões de Nm^3/ano de biogás (considerando RSU/esgoto como fonte de substrato e uso exclusivo para produção de biometano). Esse valor representa um aumento superior a 13% em relação ao potencial em operação (CIBIOGÁS, 2023), indicando que o setor segue em expansão em territórios brasileiros e que o biometano vem ganhando protagonismo.

No Brasil, um exemplo que ressalta o protagonismo da produção do biometano através de biogás (oriundo de aterros sanitários) é o anúncio de investimento do BNDES para construção de planta de biometano no aterro sanitário da Cidade de Caieiras, no estado de São Paulo. Tal planta terá potencial de produção de cerca de 25 milhões de Nm^3/ano de biometano (EPBR, 2023). Apesar de tratar-se de um número não tão alto (visto que o aterro também produz energia elétrica através do biogás produzido), a notícia ganha relevância pois trata-se do

maior aterro sanitário da América Latina, ressaltando um grande compromisso com a sustentabilidade ao evitar emissões de GEE para o meio ambiente.

No entanto, para viabilizar a produção e utilização do biometano no Brasil em larga escala, ainda é necessário enfrentar alguns desafios importantes, como questões de infraestrutura, logística, custos de produção, competitividade, regulação e incentivos.

2.4. Uso veicular de gás natural e biometano

O uso veicular de biometano é uma alternativa crescente no Brasil para substituição de combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, por ser renovável e gerar menores emissões de gases poluentes.

O biometano é quimicamente similar ao gás natural e pode ser utilizado em veículos que já operam com GNV sem necessidade de adaptações significativas. Isso facilita sua implementação, pois a infraestrutura já existente de postos de abastecimento de GNV é aproveitada. Considerando as semelhanças entre o gás natural e o biometano, esse último é considerado o “gás natural renovável” (BAILUNE, 2022).

Na Europa, embora os processos e experiências de países europeus sejam bastante diversificados, o uso de biometano como combustível ainda é embrionário. Na Suécia, por exemplo, um dos países pioneiros na tecnologia, as normas de qualidade para a injeção de biometano na rede e para o uso como combustível entraram em vigor em 1999 (BRASIL, 2016). Quase 10% do biometano da Suécia é utilizado como combustível em mais de 5.000 veículos, sendo a maioria veículos leves, além de 200 caminhões e 550 ônibus. Estes veículos podem ser abastecidos em 130 postos públicos de biometano (BRASIL, 2016).

Na Suíça, atualmente, mais de 1.250 veículos são movidos a biometano, consumindo a maior parte do biogás tratado disponível. Na Alemanha, a opção do uso de biometano como combustível tornou-se mais interessante nos últimos

tempos, sendo fornecido em aproximadamente 35% dos mais de 900 postos de abastecimento de gás natural do país (BRASIL, 2016).

No Brasil, segundo o decreto Nº 10.712, de 2 de junho de 2021, para todos os fins, o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural possuem tratamento regulatório equivalente ao gás natural, desde que atendidas as especificações estabelecidas pela ANP (BRASIL, 2021). Dessa forma, dada a sua importância ambiental e com grande viabilidade de produção, o biometano produzido através de biogás de aterro sanitário mostra-se promissor no Brasil, ainda mais ao ser considerado o fato de que o Brasil possui a quarta maior frota mundial de veículos leves movidos a GNV, totalizando 2,5 milhões de automóveis (ESGAS, 2023).

Entretanto, o uso veicular do biometano ainda enfrenta desafios, como os altos custos de produção e a necessidade de incentivos fiscais e regulatórios para se tornar competitivo frente ao GNV. Contudo, com os investimentos em tecnologia e o aumento da conscientização ambiental, o biometano tem potencial para crescer como uma solução viável e sustentável no setor de transportes.

3. PRODUÇÃO DE BIOMETANO EM ATERRO SANITÁRIO E SEU USO VEICULAR – ESTUDO DE CASO

3.1. Descrição do estudo de caso

O estudo de caso apresentado a seguir teve como escolha o aterro sanitário da cidade de Caieiras, no estado de São Paulo, o maior aterro sanitário do Brasil (e terceiro maior do mundo), com capacidade de recebimento de 10.625 toneladas de resíduos sólidos por dia (BRASIL, 2021).

O objetivo desse estudo de caso é estimar a capacidade de produção de biogás desse aterro sanitário de acordo com a quantidade de RSUs recebidos e, posteriormente, estimar a quantidade de biometano potencial a ser produzido em

uma eventual conversão total do biogás para biometano. Na sequência, esse volume será comparado com o consumo de GNV consumido no estado de São Paulo e aspectos técnicos e ambientais serão discutidos.

O aterro (Central de Tratamento e Valorização Ambiental – CTVA Caieiras) é gerenciado pela Essencis, empresa do Grupo Solví, e dispõe de unidade de logística reversa, unidade de recuperação de metais, unidade de tratamento de dessorção térmica, unidade de biogás, usina termelétrica, além de espaços para destinação de resíduos de classe I e classe II (ESSENCIS, 2016), recebendo resíduos sólidos urbanos da Bacia do Rio Juquery (incluindo os municípios de Caieiras, Franco da Rocha, Francisco Morato, Cajamar, Campo Limpo Paulista, Várzea Grande Paulista e Mairiporã) e também das cidades de Taboão da Serra, Embu-Guaçu, Itapecerica da Serra e São Paulo.

O aterro, que apresenta tempo de vida útil de cerca de 30 anos, é constituído por um sistema de impermeabilização de base, composto por uma camada de solo (2 metros de espessura) de ocorrência natural compactada até a permeabilidade na ordem de 10^{-7} m/s, camada de solo argiloso (1 metro de espessura) compactada até a permeabilidade na ordem de 10^{-9} metros por segundo, barreira sintética de geocomposto bentonítico e geomembrana de polietileno de alta densidade (CANDIANI, 2011).

O lixiviado ou percolato (chorume) gerado na decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos e as águas de chuva, coletados através de um sistema de drenagem, são transportados a tanques de armazenamento, conforme Figura 3.1, para posterior tratamento adequado na SABESP (CANDIANI, 2011).

Figura 3.1 - Lagoa de acumulação de chorume na CVTA Caieiras.



Fonte: ESSENCIS, 2016.

Em 2002 a operação do aterro foi iniciada, ocupando uma área de 3,5 milhões de metros quadrados na Grande São Paulo. A usina termelétrica da CVTA, mostrada na Figura 3.2, utiliza o biogás produzido como combustível para geração de energia elétrica por meio de motores geradores. A produção média de 230 mil MWh de energia ao ano é suficiente para atender a uma cidade de cerca de 300 mil habitantes com energia elétrica sustentável (BRASIL, 2021).

Figura 3.2 - Usina Termelétrica na CVTA Caieiras.



Fonte: SOLVÍ, 2024.

Por estar associado a novos investimentos do BNDES para produção de biometano (EPBR, 2023), o aterro mostra-se com potencial extremamente relevante para essa discussão. O uso atual do biogás gerado no aterro destina-se, majoritariamente, para a produção de energia elétrica enquanto o biogás excedente será utilizado para a produção de biometano.

A Figura 3.3 mostra a vista aérea da planta de produção de biometano na CVTA Caieiras, que tem o potencial de evitar a emissão de aproximadamente 300 mil toneladas de CO₂ por ano (ENERGIA E BIOGÁS, 2024).

Figura 3.3 - Vista aérea da planta de produção de biometano em construção na CVTA Caieiras.



Fonte: SOLVÍ, 2024.

3.2. Coleta e tratamento de dados

Para estimar o potencial de produção de biogás e biometano a partir dos RSU no aterro de Caieiras, foram utilizados dados coletados de estudos já publicados, como a capacidade máxima de recebimento de RSU neste aterro, que é 10.625 toneladas de RSU por dia (BRASIL, 2021).

Outras séries de dados relevantes são as informações de DOC – Fração de Carbono Orgânico Degradável (IPCC, 2006) e Composição Gravimétrica média dos resíduos domiciliares de São Paulo (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2014). A Tabela 3.1 foi construída com essas informações, servindo de base para os cálculos posteriores. É importante ressaltar que grande parte dos RSU recebidos na CVTA Caieiras são provenientes da cidade de São Paulo, mantendo assim adequados os dados da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares utilizados nos cálculos a serem apresentados no Capítulo 4 deste trabalho.

Tabela 3.1 - Composição gravimétrica média dos resíduos domiciliares de São Paulo e valores de DOC correspondentes.

| Resíduo | Composição (%) | DOC ¹⁷ (IPCC, 2006) – Média fração de carbono orgânico degradável |
|-------------------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Matéria orgânica | 51 | 15 |
| Recicláveis secos (papel, papelão, plástico, metal e vidro) | 32 | 20 |
| Outros (rejeitos) | 17 | 0 |
| Total | 100,0 | - |

Fonte: IPCC, 2006; PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2014; COELHO et al., 2020.

Segundo o IPCC (2006), outros dados relevantes são o fator de correção de metano (MCF) que é igual a 1 para aterros bem gerenciados, conforme assumido neste estudo e a fração do DOC degradada (DOC_f), considerada igual a 0,50.

Por meio de drenos conectados ao sistema de exaustão, a captação do biogás no aterro é realizada, porém nem todo o biogás gerado no aterro é possível de ser captado (COELHO et al., 2020). Segundo Candiani e Viana (2017), o aterro sanitário da cidade de Caieiras indicou níveis de emissões fugitivas (perdas para o meio ambiente) de até 31,4% do total emitido de gás metano no aterro sanitário, indicando que a eficiência do sistema de extração de biogás seja de apenas 68,6%. Candiani (2011) também sugere que a porcentagem média de metano presente no biogás do aterro sanitário de Caieiras é de 50%.

O teor de metano de 90% foi o valor assumido para o potencial biometano produzido. Essa premissa considera a necessidade de seguir os padrões existentes estabelecidos pela ANP, ou seja, um combustível com 90% de pureza (ANP, 2022).

Por fim, para a realização de análise ambiental, o conceito de CO₂ equivalente foi adotado. Trata-se de uma medida utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa, baseada no potencial de aquecimento global de cada um. O dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de GEE pelo seu potencial de aquecimento global (CO₂ = 1, CH₄ = 28) (FGV, 2022).

3.3 Estimativa do Potencial de Produção de Biometano

Foi aplicada a metodologia IPCC (IPCC, 2006) para quantificar a geração de metano (CH₄) a partir de RSU descartados em aterros sanitários. Desta forma, inicialmente foi calculada a fração de carbono orgânico degradável (Equação 1), de acordo com a composição gravimétrica dos RSU. O resultado obtido é apresentado no Capítulo 4 deste trabalho.

$$\text{DOC} = \sum (\text{DOC}_i \times W_i) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU).

DOC_i = Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo *i*.

W_i = Fração do tipo resíduo *i* por categoria de resíduo.

Foi, então, avaliado o potencial específico de geração de metano a partir de RSU em aterros sanitários, de acordo com a Equação 2.

$$L_0 = \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times F \times (16/12) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

L₀ = Potencial de geração de metano de RSU depositado em aterro sanitário (Nm³ CH₄ /tRSU).

MCF = Fator de correção de metano;

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU).

DOC_f = Fração do DOC degradada (t/tRSU);

F = 50% (porcentagem média de metano presente no biogás).

(16/12) = Conversão de carbono (C) em metano (CH₄).

A quantidade de metano produzido no aterro varia com o tempo, de acordo com a disposição da matéria orgânica (COELHO et al., 2020). Entretanto, a quantidade de biogás gerado nesse trabalho (em Nm³/ano) foi calculada utilizando apenas o que foi produzido ao longo de um ano de disposição, desconsiderando o potencial de produção a partir de resíduos anteriormente depositados.

Para avaliar a produção potencial de biometano, a Equação 3 é utilizada. O resultado obtido é apresentado no Capítulo 4 deste trabalho.

$$V_{\text{biom}} = (\text{Biogás}_{\text{captado}} \times \text{Con}_{\text{CH}_4}) / (\% \text{metano}_{\text{biometano}}) \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

V_{biom} = Volume de biometano produzido por ano (Nm^3/ano).

$\text{Biogás}_{\text{captado}}$ = Volume de biogás captado em aterro sanitário (Nm^3 biogás captado/ano).

Con_{CH_4} = Concentração de metano média presente no biogás do aterro sanitário de Caieiras (50%, conforme CANDIANI, 2011).

% $\text{metano}_{\text{biometano}}$ = Porcentagem de metano presente no biometano.

Dessa maneira foi possível calcular o volume de biometano potencial a ser produzido, dado que é apresentado no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Potencial de produção de biometano

Após utilização das Equações 1, 2 e 3, os números abaixo podem ser verificados na Tabela 4.1. No cálculo do L_0 , foi necessário utilizar o dado da densidade do metano, que a 0°C e 1,013 bar é de $0,7168 \text{ kg/m}^3$. Os cálculos estão demonstrados no Apêndice.

Tabela 4.1 - Resultados ao utilizar as Equações 1, 2 e 3.

| DOC (tC/tRSU) | L_0 (tCH ₄ /tRSU) | L_0 (Nm ³ CH ₄ /tRSU) | tRSU/dia |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 0,1405 | 0,0468 | 65,3367 | 10625 |
| Potencial de geração de metano (Nm ³ CH ₄ /ano) | Potencial de geração de Biogás (Nm ³ biogás/ano) | Quant. de Biogás captado - Efic. de 68,6% (Nm ³ biogás/ano) | V_{bio} (Nm ³ /ano) |
| 253.383.818 | 506.767.636 | 347.642.598 | 193.134.777 |

Seguindo as premissas utilizadas, o potencial de produção de biometano é de aproximadamente 193,1 milhões de m³/ano (caso 100% do biogás captado no aterro fosse destinado à essa utilização). Esse número é mais de 7 vezes maior que a capacidade anual de produção da planta de biometano recém-inaugurada na CVTA Caieiras (ENERGIA E BIOGÁS, 2024). O alto nível de emissões fugitivas de biogás no aterro de Caieiras, encontrado na literatura e apresentado na capítulo anterior, contribui diretamente para que esse potencial não seja maior.

Segundo a Abegás (2023), em 2022, o estado de São Paulo consumiu cerca de 707 mil m³/dia de GNV, o equivalente a aproximadamente 258,05 milhões de m³ no ano. Dessa forma, em condições ideais, o potencial da produção de biometano a partir dos RSU do aterro sanitário de Caieiras atenderia 74,8% da demanda anual de GNV do estado de São Paulo, mostrando a grande relevância dessa produção teórica no que tange à disponibilidade de produto.

Para fins de comparação, a nova planta de biometano na CVTA Caieiras, operando em sua capacidade máxima e destinando 100% da produção para substituição de GNV, atenderia 9,6% da demanda do estado de São Paulo.

4.2 Análise técnica

Atualmente o aterro de Caieiras conta com uma planta de biometano recém-inaugurada em operação, com capacidade de produção de 68 mil m³ de biometano por dia (EPBR, 2023 e ENERGIA E BIOGÁS, 2024). Embora o aterro apresente a capacidade de produção de biometano superior a esse número (vide sessão 4.1), dificilmente realizará investimentos para aumentar o limite máximo de capacidade atual. Isso se deve pois o aterro utiliza o biogás excedente para a produção de biometano enquanto a maior parte do biogás captado é utilizado para a produção de energia elétrica. A Usina Termelétrica do aterro de Caieiras é hoje uma das maiores usinas geradoras de eletricidade através de biogás de aterro do Brasil e o custo de desmobilizar essa operação priorizando a produção de biometano tornaria o negócio inviável.

Além dos custos fixos de instalação de uma planta de biometano (que podem influenciar no preço do produto) o preço da energia elétrica produzida sempre será comparado com o preço final de venda do biometano, fazendo com que a empresa administradora dê sempre preferência de otimização de produção ao produto mais lucrativo.

Considerando que o biometano teoricamente produzido nesse trabalho esteja atendendo todos os parâmetros exigidos pela ANP, outro fator importante na análise técnica é questão da logística de distribuição para empresas ou postos de combustível. Devido a ausência de gasodutos no interior dos estados, entidades do setor defendem a criação de políticas públicas para incentivar o uso do gás e ampliação da malha (ABEGÁS, 2023). Atualmente a solução temporária é a utilização de transporte rodoviário com caminhões-tanque. Esse processo, no entanto, exige infraestrutura para compressão ou liquefação do biometano antes do transporte, permitindo que ele seja levado até os postos.

É discutida também a falta de políticas públicas que facilitem a conversão de veículos leves e pesados para a utilização de GNV. Embora fabricantes estejam desenvolvendo soluções tecnológicas para tal, a conversão do setor ainda é pouco explorada pela ausência de, entre outros fatores, postos de abastecimento nas rodovias (ABEGÁS, 2023).

Excluindo-se as análises feitas em relação à estrutura do aterro sanitário, fica evidente a necessidade de implementação de políticas públicas, infraestrutura e desenvolvimento de tecnologias que impulsionem a expansão do biometano no setor de transporte sustentável no Brasil.

4.3 Análise ambiental

A utilização de biometano como combustível automotivo em substituição ao GNV possui o importante papel de minimizar a exploração desse último, que é um combustível fóssil, aumentando assim a parcela de matriz energética

renovável no Brasil. Além disso, a emissão de uma grande quantidade de CO_{2eq} é evitada.

De acordo com a Tabela 4.2 (cálculos demonstrados no Apêndice), o biometano produzido a partir dos RSU no aterro sanitário de Caieiras, ao substituir o GNV como combustível automotivo, contribuiria para a não emissão de aproximadamente 3,87 milhões de toneladas anuais de CO₂ equivalente, ressaltando a importância da valorização energética do biogás gerado em aterros sanitários.

Tabela 4.2 - Resultados de CO_{2 eq}.

| V_{biometano} (Nm³/ano) | Densidade CH₄ (kg/m³) | CH₄ (t/ano) | CO_{2 eq} (t/ano) |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 193.134.777 | 0,7168 | 138.439 | 3.876.292 |

Em 2020, no estado de São Paulo, os veículos automotivos foram responsáveis pelas emissões de 37 milhões de toneladas de CO₂ equivalente (CETESB, 2022), isso é, a quantidade evitada de emissões nesse estudo de caso representaria cerca de 10% da quantidade total de emissões anuais no estado de São Paulo.

A recém-inaugurada planta de de biometano na CVTA Caieiras, operando em sua capacidade máxima e também utilizando seu biometano produzido para substituir o GNV, tem o potencial de evitar a emissão de aproximadamente 300 mil toneladas de CO₂ por ano (ENERGIA E BIOGÁS, 2024), ou seja, cerca de 7,7% do valor calculado na Tabela 4.2.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora os hábitos da sociedade atual estejam contribuindo para uma maior produção de RSU, e, conseqüentemente, maior possibilidade de produção de biogás em aterros sanitários, o desenvolvimento da cadeia de produção do biometano (principalmente para uso automotivo) ainda precisa de atenção. Os números potenciais são animadores: o estudo de caso mostrou que em uma eventual produção dedicada de biometano através do biogás proveniente do aterro sanitário de Caieiras, 74,8% do consumo de GNV do estado de São Paulo seria atendido. Caso fossem considerados outros aterros sanitários do estado, o potencial seria ainda maior.

Entretanto, o potencial hoje disponível no aterro, através da planta de biogás recém-inaugurada, representa apenas 9,6% do consumo de GNV do estado de São Paulo. Embora esse valor seja distante do potencial calculado nesse trabalho, ele representa uma redução considerável no uso de combustíveis derivados de petróleo.

Ambientalmente falando, o biometano oriundo de biogás de aterros sanitários, ao ser utilizado no lugar do GNV, resultaria em um grande impacto ambiental positivo. O estudo de caso apresentado nesse trabalho mostrou que a emissão de 3,87 milhões de toneladas anuais de CO₂ equivalente poderia ser evitada, o que representa cerca de 10% de todas as emissões de veículos automotivos no estado de São Paulo, tendo como referência dados do ano de 2020 (CETESB, 2022).

Embora o potencial do biometano seja extremamente promissor na substituição do GNV como combustível automotivo, a nível técnico, porém, fica extremamente necessário o maior desenvolvimento de políticas públicas, infraestrutura adequada e desenvolvimento de tecnologias que impulsionem a expansão do biometano no setor de transporte sustentável no Brasil. A discussão sobre o tema e elaboração de trabalhos e publicações tornam-se igualmente necessárias visto que possuem o papel de conscientizar a população sobre esse tema tão importante e com imenso potencial econômico e ambiental.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEGAS. Cresce adoção de GNV no país, mas potencial ainda é pouco aproveitado. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.abegas.org.br/arquivos/86302>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

ABREU, Fábio Viana; COSTA FILHO, Manoel Antônio Fonseca; SOUZA, Mauro Carlos Lopes. Biogás de aterros sanitários para geração de energia renovável e limpam um estudo de viabilidade técnica e econômica. In: IX Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecânica (CIBIM). 2009.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução nº 886, de 29 de setembro de 2022. Rio de Janeiro, 2022.

BAILUNE, Gabriela Dias. Regulamentação e operacionalização do Swap de biometano nas redes de distribuição de gás natural no estado de São Paulo. 2022.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Resíduos sólidos: maior aterro sanitário do Brasil é visitado pelo Governo Federal. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/residuos-solidos-maior-aterro-sanitario-do-brasil-e-visitado-pelo-governo-federal>. Acesso em: 21 agosto de 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Fontes renováveis atingem 49,1% na matriz energética brasileira. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/fontes-renovaveis-atingem-49-1-na-matriz-energetica-brasileira>. Acesso em: 20 de outubro de 2024.

BRASIL. DECRETO Nº 10.712, DE 2 DE JUNHO DE 2021 Regulamenta a Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021, que dispõe sobre as atividades relativas ao transporte

de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. BRASÍLIA, 2021. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2021/decreto-10712-2-junho-2021-791420-publicacaooriginal-162940-pe.html>. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. Biometano como combustível veicular / Probiogás. Brasília, 2016.

BRASIL. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República / Casa Civil / Subchefia para Assuntos Jurídicos. BRASÍLIA, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 10 de outubro de 2024.

CANDIANI, Giovano; DA SILVA, M. R.. Análise do biogás no aterro sanitário Caieiras. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, 32(1), 69-77, 2011.

CANDIANI, Giovano; TORRES, Diego Castellano. Análise qualitativa e quantitativa da produção de biogás em aterro sanitário. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 6, n. 1, p. 285-292, 2015.

CANDIANI, Giovano; VIANA, Ednilson. Emissões fugitivas de metano em aterros sanitários. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 3, p. 845-857, 2017.

CANDIANI, Giovano; DA SILVA, Marcus Roberto. Análise do biogás no aterro sanitário Caieiras. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 32, n. 1, p. 69-77, 2011.

CASTRO NETO, Francisco Alfredo de. O potencial energético do biometano proveniente do biogás de origem dos resíduos sólidos urbanos. Rotas prováveis de utilização: geração de energia elétrica ou distribuição canalizada. 2017.

CETESB. Emissões veiculares no estado de São Paulo 2020. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes>. Acesso em: 12 de novembro de 2024.

CIBIOGÁS. BiogasMap, Painel dinâmico de plantas de biogás e biometano no Brasil. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiODc2NThhOGltOTc2Ny00ZDc1LWI5MTMtYjYwZTRlYjFiOWQ3liwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>>. Acesso em: 20 de outubro de 2024.

CIBIOGÁS. O que é Biogás? Foz do Iguaçu, 2019. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/o-que-e-biogas/>. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

CIBIOGÁS. Centro Internacional de Energias Renováveis. Panorama do Biogás no Brasil 2022. Relatório Técnico nº 001/2023 – Foz do Iguaçu, 2023.

COELHO, Suani Teixeira et al. Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo. São Paulo, 2020.

COELHO, Suani Teixeira et al. Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano: Part. I Biogás; Part. II Biometano. São Paulo, 2019.

D'ANGELO, Pedro Henrique Bertrami. Análise e Gerenciamento de Riscos em Plantas de Produção de Biogás a partir de Resíduos Sólidos Urbanos. 2023.

DE OLIVEIRA SILVA, Claudionor et al. Geração quantitativa e qualitativa da emissão de biogás no aterro sanitário de Maceió. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 11, n. 5, p. 401-408, 2020.

ENERGÊS. O que é Biogás de aterro? Xanxerê, 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/o-que-e-biogas-de-aterro/>. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

ENERGIA E BIOGÁS. Inauguração de planta de biometano em Caieiras – SP. Disponível em: <https://energiaebiogas.com.br/inauguracao-de-planta-de-biometano-em-caieiras-sp>. Acesso em: 12 de novembro de 2024.

EPBR. Biocombustíveis, Mercado de gás, Transição energética. Essencis obtém R\$ 93 milhões com BNDES para biometano em SP. Niterói, 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/essencis-obtem-r-93-milhoes-com-bndes-para-biometano-em-sp/>. Acesso em: 21 de agosto de 2024.

ESGAS. Gás Natural Veicular cresce em competitividade e economia. Disponível em: <https://esgas.com.br/gas-natural-veicular-cresce-em-competitividade-e-economia/>. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

ESSENCIS. RIMA – Relatório de Impacto Ambiental. São Paulo, 2016.

FGV. Equipe do Programa Brasileiro GHG Protocol. NOTA TÉCNICA - Valores de referência para o potencial de aquecimento global (GWP) dos gases de efeito estufa – versão 2.0. São Paulo, 2022.

FIGUEIREDO, Natali Jimenez Verdí de. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica – um estudo de caso. 2011.

GUERREIRO, Érica Machado da Silva et al. Potencial de aproveitamento energético de biometano gerado em aterros sanitários: estudo de casos. 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2022. Rio de Janeiro, 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Module 5 – Waste / Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data, and Chapter 3: Solid Waste Disposal, 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>. Acesso em: 24 de outubro de 2024.

MIKI, Rosane Ebert. Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso combustível veicular. Revista DAE, v. 66, n. 209, 2018.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2022.

NASCIMENTO, Maria Cândida Barbosa et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 24, n. 1, p. 143-155, 2019.

PECORA, Vanessa. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo, 2014. Comitê Intersecretarial para a Política Municipal de Resíduos Sólidos. Prefeitura de São Paulo. São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>. Acesso em: 24 de outubro de 2024.

RAC SANEAMENTO. Planta piloto para aproveitamento energético do biogás. Içara, 2018. Disponível em: <https://www.racsaneamento.com.br/blog/planta-piloto-para-aproveitamento-energetico-do-biogas/>. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

ROSER, Max; RITCHIE, Hannah. How has world population growth changed over time? 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/population-growth-over-time>. Acesso em: 20 de outubro de 2024.

SILVA, Sara Talita Sales et al. Avaliação técnica e econômica da utilização de biometano proveniente de aterro sanitário da região Sudeste do Brasil para abastecimento veicular. 2022.

SOLVÍ. Relatório de Sustentabilidade 2024 – Exercício 2023. São Paulo, 2024.

SOUZA FILHO, José Demontier Vieira de. Desenvolvimento de protótipo para enriquecimento de biogás de aterro sanitário. 2023.

ULTRAGAZ. Biogás e biometano: quais as diferenças e por que conhecer? São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.ultragaz.com.br/biogaz-e-biometano-quais-as-diferencas-e-por-que-conhecer/>. Acesso em: 27 de outubro de 2024.

VEIGA, Ana Paula Beber; STRAMIERI SILVA, Ramatys; MARTINS, Gilberto. Abordagem baseada em sistemas de informação geográfica para avaliação da viabilidade locacional da produção de biometano a partir de gás de aterro sanitário e injeção em dutos no Brasil. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 27, p. 41-46, 2021.

VIEIRA, Gláucia Eliza Gama, et al. Produção de biogás em áreas de aterros sanitários: uma revisão. Revista Liberato 16.26: 193-204. 2015.

APÊNDICE

Cálculos realizados

Cálculo DOC

Tabela 3.1

| Resíduo | Composição (%) | DOC ^o (IPCC, 2006) – Média fração de carbono orgânico degradável |
|-------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Matéria orgânica | 51 | 15 |
| Recicláveis secos (papel, papelão, plástico, metal e vidro) | 32 | 20 |
| Outros (rejeitos) | 17 | 0 |
| Total | 100,0 | - |

$$\text{DOC} = 0,51 * 0,15 + 0,32 * 0,2 + 0,17 * 0 \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{DOC} = 0,1405$$

Cálculo L_0

$$L_0 = 1 * 0,1405 * 0,5 * 0,5 * (16/12)$$

$$L_0 = 0,0468 \quad (\text{tCH}_4/\text{tRSU})$$

$$L_0 = 0,0468 / 0,7168 * 1000$$

$$L_0 = 65,3367 \quad (\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{tRSU})$$

Cálculo Potencial de Geração de Metano ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{ano}$)

$$V_{\text{met}} = 10625 * 365 * L_0$$

$$V_{\text{met}} = 253.383.818$$

Cálculo Potencial de Geração de Biogás ($\text{Nm}^3 \text{biogás}/\text{ano}$)

$$V_{\text{biogás}} = V_{\text{met}} * F$$

$$V_{\text{biogás}} = V_{\text{met}} * 0,5$$

$$V_{\text{biogás}} = 506.767.636$$

Cálculo quantidade de biogás captado ($\text{Nm}^3 \text{biogás}/\text{ano}$)

$$V_{\text{biogás cap}} = 506.767.636 * \text{eficiência}$$

$$V_{\text{biogás cap}} = 347.642.598$$

Cálculo Volume biometano (Nm^3/ano) (Equação 3)

$$V_{\text{biom}} = 347642598 * 0,5 / 0,9$$

$$V_{\text{biom}} = 193.134.777$$

Cálculo $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (t/ano)

$$\text{CO}_{2\text{eq}} = V_{\text{biom}} * \text{densidade CH}_4 / 1000 * 28$$

$$\text{CO}_{2\text{eq}} = 3.876.292$$