

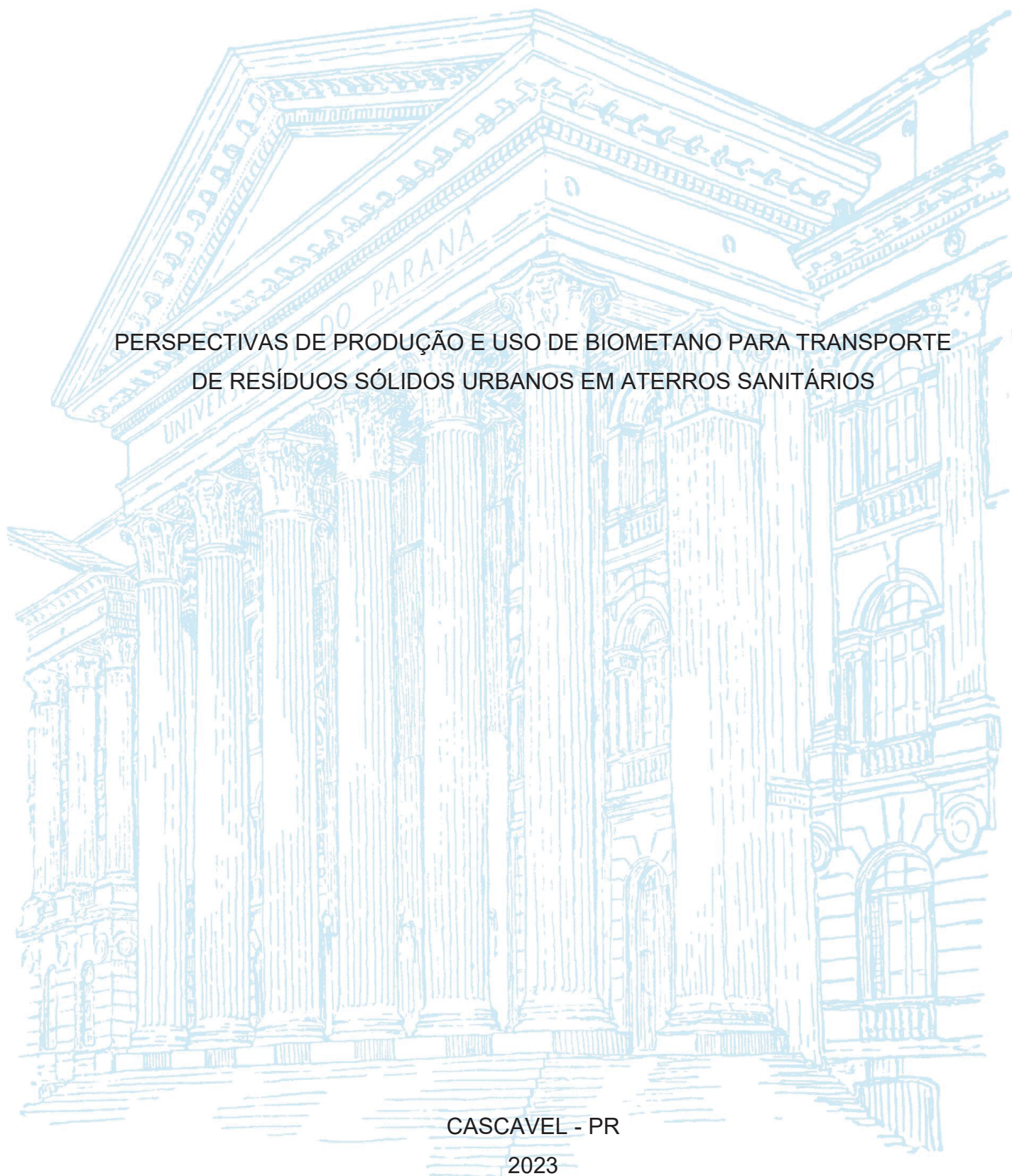
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JÉSSICA DA SILVA MENEZES PEREIRA

PERSPECTIVAS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOMETANO PARA TRANSPORTE
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ATERROS SANITÁRIOS

CASCADEL - PR

2023



JÉSSICA DA SILVA MENEZES PEREIRA

PERSPECTIVAS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOMETANO PARA TRANSPORTE
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ATERROS SANITÁRIOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

CASCADEL - PR

2023

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

P436 Pereira, Jéssica da Silva Menezes
Perspectivas de produção e uso de biometano para transporte
de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários
/ Jéssica da Silva Menezes Pereira. – Palotina, PR, 2023.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Tecnologia Ambiental.
Orientador: Prof. Samuel Nelson Melegari de Souza.

1. Aproveitamento energético. 2. Aterros sanitários. 3.
Compactadores de resíduos. I. Souza, Samuel Nelson Melegari de.
II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 620.9

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **JÉSSICA DA SILVA MENEZES PEREIRA** intitulada: **PERSPECTIVAS DE PRODUÇÃO E USO DE BIOMETANO PARA TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM ATERROS SANITÁRIOS**, sob orientação do Prof. Dr. **SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 26 de Junho de 2023.

Assinatura Eletrônica

18/07/2023 10:02:04.0

SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

28/06/2023 11:39:29.0

OSVALDO GUEDES FILHO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

27/06/2023 19:38:17.0

RALPHO RINALDO DOS REIS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ)

DEDICATÓRIA

À pessoa mais importante da minha existência, minha fonte de inspiração, motivação e para quem eu espero ser digna de servir de exemplo: meu amado e extraordinário filho, Luiz Henrique.

RESUMO

O uso do biometano produzido a partir do biogás de aterros sanitários representa ganhos sociais, econômicos e ambientais, pois promove a geração de empregos, redução dos desprazeres causados pelo mau gerenciamento dos resíduos, fonte extra de renda com a comercialização da energia ou poupança financeira com a redução do uso de combustíveis fósseis, e, especialmente, contenção de emissões de metano, ainda mais com a crescente visibilidade das medidas que estão sendo endereçadas para mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Sendo assim, é fundamental que a produção do biometano no Brasil seja compatível com o seu potencial; para isso, esse trabalho propõe a avaliação do potencial energético do biometano produzido por meio de resíduos sólidos urbanos para abastecimento de caminhões coletores compactadores de resíduos, determinando-se a quantificação do biogás purificado em usinas pertencentes a aterros sanitários, com vida útil considerada em 15 anos, dedicados ao atendimento de municípios de 4 cenários distintos (100 mil, 500 mil, 1 milhão e 2 milhões de habitantes). A partir disso, calculou-se a capacidade de substituição do combustível diesel pelo biometano, sob a ótica do autoconsumo de frota cativa (para 2 hipóteses distintas de rendimento) e venda do excedente a consumidor direto. As reduções de emissão de gases de efeito estufa também foram contabilizadas para cada um dos cenários, as quais se mostraram extremamente benéficas para a descarbonização do setor de transportes. Em seguida, com o auxílio de técnicas de análise de investimento, determinou-se a viabilidade econômica dos empreendimentos, cujos resultados foram atrativos para os 3 critérios de decisão adotados - Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* descontado - sendo o aterro de maior capacidade instalada o que apresentou o melhor retorno financeiro, além de possuir o menor custo de operação e manutenção por metro cúbico de biogás. Uma análise de sensibilidade também foi desenvolvida para verificar o impacto nos resultados financeiros que alguns parâmetros podem causar, tendo sido o preço de venda do biometano líder no quesito influência.

Palavras-chave: Aproveitamento energético do Biometano. Porte de aterros sanitários. Caminhões coletores compactadores de resíduos.

ABSTRACT

The use of biomethane produced from landfills biogas represents social, economic and environmental gains, as it promotes jobs creation, reduction of unpleasantness caused by poor waste management, extra source of income from the energy sale or financial savings with the reduction of fossil fuels use, and, especially, methane emissions containment, even more so with the growing visibility of the measures that are being addressed to mitigate greenhouse gas emissions. Therefore, it is essential that the biomethane production in Brazil be compatible with its potential; for that, this work proposes the evaluation of biomethane energy potential produced through urban solid waste to supply garbage trucks collectors, determining its quantification of purified biogas in plants belonging to landfills, with a useful life considered to 15 years, dedicated to serving municipalities in 4 different scenarios (100 thousand, 500 thousand, 1 million and 2 million inhabitants). Based on this, the ability to replace diesel fuel into biomethane was calculated, from the perspective of self-consumption by the own fleet (for 2 different income hypotheses) and the sale of surplus biomethane to direct consumers. The emission reductions of greenhouse gases were also accounted for each of the scenarios, which proved to be extremely beneficial for the transport sector decarbonization. Then, with the aid of investment analysis techniques, the economic viability of the projects was determined, which the results were attractive for the 3 decision criteria adopted - Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Discounted *Payback* – being the highest capacity landfill the one that presented the best financial return, in addition to having the lowest cost of operation and maintenance per cubic meter of biogas. A sensitivity analysis was also developed to verify the impact on financial results that some parameters can cause, with the sale price of biomethane being the leader in terms of influence.

Keywords: Energy utilization of Biomethane. Size of landfills. Garbage trucks collectors.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral.....	11
1.1.2	Objetivos Específicos.....	11
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
2	REVISÃO TEÓRICO-EMPÍRICA	13
2.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	13
2.1.2	O diesel no contexto da poluição atmosférica.....	14
2.1.3	Realidade do transporte de cargas no país	15
2.2	ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE DAS EMISSÕES DE GEE	16
2.2.1	Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE)	16
2.2.2	Política de renovação de frota	16
2.2.3	Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio)	17
2.2.4	Programa Nacional Metano Zero	18
2.3	RESÍDUOS SÓLIDOS	18
2.3.1	Aterros Sanitários.....	20
2.3.2	Usinas de Metanização.....	22
2.3.3	Vantagens dos Aterros Sanitários	23
2.4	GESTÃO DE RESÍDUOS	24
2.4.1	Caminhões compactadores de resíduos.....	25
2.4.2	Realidade dos Resíduos no Brasil	27
2.4.3	Economia circular e reciclagem	27
2.5	BIOGÁS.....	29
2.5.1	Realidade do Biogás no Brasil	31
2.6	BIOMETANO.....	31
2.6.1	Tecnologias de Purificação	33
2.6.2	Custos Envolvidos na Purificação.....	35
2.6.3	Análise do Ciclo de Vida do Biometano.....	36
2.6.4	Caminhões a Gás.....	37
2.6.5	Realidade do Biometano no Brasil.....	39
3	METODOLOGIA	43
3.1	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	43
3.2	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	44

3.3	ESTRUTURA METODOLÓGICA	44
3.4	PROJEÇÃO POPULACIONAL	46
3.5	QUANTIFICAÇÃO DE GÁS	46
3.5.1	Índice de Recuperação de Biogás	49
3.5.2	Índice de Recuperação de Biometano	49
3.6	EMISSÕES EVITADAS DE GEE	50
3.7	AUTONOMIA VEICULAR DO BIOMETANO	51
3.8	COMPOSIÇÃO DE CUSTOS, RECEITAS E ECONOMIAS	54
3.8.1	Dimensionamento básico dos equipamentos de coleta de biogás	56
3.9	VIABILIDADE ECONÔMICA.....	57
3.10	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1	GERAÇÃO DE RSU	60
4.2	VAZÃO DE GÁS	60
4.3	EMISSÕES DE GEE	65
4.4	AUTONOMIA VEICULAR DO BIOMETANO	65
4.5	POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES	66
4.6	COMPOSIÇÃO DE CUSTOS, RECEITAS E ECONOMIAS	72
4.7	ANÁLISE DE VIABILIDADE	77
4.8	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	82
5	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma população estimada em 215 milhões de habitantes atualmente, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022a), com uma alta taxa de urbanização (84,36%) (IBGE, 2022b). Isso, em conjunto com a excessiva e imediatista demanda por bens de consumo é diretamente proporcional à geração de resíduos a serem descartados, o que torna cada vez mais difícil o sistema de manejo deles.

Quando deficientemente geridos, os resíduos representam riscos para a saúde humana e de outros seres vivos, em decorrência dos males advindos da poluição atmosférica, hídrica e do solo que eles podem ocasionar. Tais problemas tendem a causar prejuízo à economia mundial, tornando-os alvos de preocupação dos governantes e os obrigando a viabilizar meios de contornar a situação, tanto através de políticas públicas, sucedidas de leis voltadas para o saneamento básico, quanto através de incentivo ao aproveitamento energético dos resíduos, ressignificando o propósito dos mesmos. Afinal, Magalhães et al. (2020) elucidam que, pela Constituição de 1988, o governo federal tem o dever de criar condições administrativas para a preservação do meio ambiente, sem que a vivência em sociedade interfira de forma danosa sobre ele.

No contexto dos aterros sanitários, além da matéria orgânica dos resíduos se degradar gerando compostos contaminantes como o gás metano, cujo potencial de aquecimento global é 28 vezes superior ao do dióxido de carbono, conforme estudo do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014); existe também dois grandes problemas associados aos caminhões que realizam a coleta e o transporte dos resíduos: o elevado índice de ruído e o abastecimento com diesel. O primeiro, além de representar uma poluição sonora relevante em metrópoles brasileiras, pode prejudicar a audição dos trabalhadores que o manipulam. O segundo está diretamente relacionado ao gasto com tal combustível (dependente de importação) e com a sua corresponsabilidade pelas mudanças climáticas (origem fóssil).

Como a geração de energia elétrica já conta com fontes renováveis suficientemente capazes de suprir o setor, como a energia hidrelétrica, eólica e a de biomassa (biogás), é importante focar no aumento da parcela de combustíveis alternativos limpos destinada ao setor de transportes, que atualmente é bastante limitada (LAWSON, 2021).

Nesse sentido, uma alternativa de investimento que tem ganhado visibilidade é o Gás Natural Renovável (Biometano), cujo processo produtivo aproveita o metano captado dos resíduos, mediante separação criteriosa do gás carbônico, para utilizá-lo na câmara de combustão dos motores veiculares, produzindo energia capaz de movimentar o veículo. Dessa

forma, o uso do biometano aponta para uma produção em circuito fechado, pois envolve a redução de custos na gestão de resíduos e de seus passivos ambientais também.

Em biorrefinarias para produção de biometano já se percebe que ele pode agregar até quatro vezes mais valor por metro cúbico de biogás produzido quando comparado ao utilizado para gerar eletricidade (ABIOGAS, 2021). Inclusive, Adamo (2021) indicou em sua pesquisa que a lentidão na implantação de plantas de biometano causam perdas econômicas que podem chegar a 2,9 milhões de euros.

Contudo, de acordo com a Cibiogás (2022), 71% da produção de biogás é aplicada para gerar energia elétrica no país, 23% é purificada em biometano e 6% tem aproveitamento térmico. Apenas 1% do total de plantas brasileiras de biogás possuem sistema de purificação com geração de biometano para autoconsumo ou comercialização.

Quanto a estudos que correlacionam a produção de biometano com o tamanho do aterro sanitário originário, Silva et al. (2022) avaliaram a viabilidade econômica da produção de biometano em 50 consórcios de aterros sanitários existentes na Região Sudeste do Brasil para abastecimento veicular e concluíram que quanto maior a capacidade instalada das usinas de biometano maior o VPL dos projetos, havendo inviabilidade para os aterros que atendem menos de 83.000 habitantes. Guerreiro (2020) utilizou indicadores para mensurar o desempenho de aterros sanitários de 3 portes distintos, tendo observado que o porte do aterro não necessariamente está atrelado ao seu nível de desempenho, pois isto depende de um bom planejamento de instalações, eficiência operacional e fluidez de processos.

No que diz respeito à substituição do diesel por biometano, Martins (2018) identificou que o potencial de geração de biogás oriundo de resíduos sólidos urbanos (RSU) no município de Bento Gonçalves – RS é suficiente para abastecer 16 ônibus da frota urbana, diariamente. Em seguida, combinando este município com outros 3 (Carlos Barbosa, Garibaldi e Farrolpilha), o potencial de abastecimento seria de 35 ônibus intermunicipais. Nadaletti et al. (2015), em uma perspectiva ampla do potencial de produção de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos (RSU) de aterros sanitários brasileiros, concluíram que seria possível abastecer 100% da frota própria de ônibus do país, que, na ocasião, era equivalente a 107.000 unidades, havendo, inclusive, excedente suficiente para atender mais 840.546 ônibus semelhantes.

Não foram encontrados, nas bases de dados científicas pesquisadas, estudos nacionais consistentes que correlacionem o biometano produzido em aterros sanitários de diferentes portes com a sua aplicabilidade voltada para caminhões, mais especificamente os de resíduos. Logo, isso se caracteriza como uma lacuna de pesquisa. Neste contexto, surge uma pergunta central a qual se pretende responder: a energia gerada pelo biometano produzido em aterros

sanitários é suficiente para pelo menos atender a demanda dos caminhões que fazem a coleta e o transporte de resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros de atuação desses aterros?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de produção de biometano em diferentes capacidades de aterros sanitários para inserção de frota renovável de caminhões compactadores de resíduos no Brasil.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estimar a demanda de óleo diesel de caminhões compactadores de resíduos e comparar com a possibilidade de suprimento da energia advinda do biogás proveniente dos aterros sanitários aos quais supostamente estejam atrelados;
- Avaliar a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa quando se opta pelo biometano em detrimento ao diesel;
- Calcular a viabilidade econômica dessa alteração da matriz energética brasileira, sob a ótica da logística na gestão de resíduos;
- Realizar uma análise de sensibilidade nos principais parâmetros que influenciam a análise econômica.

1.2 JUSTIFICATIVA

A presente pesquisa se justifica especialmente por contribuir com o compartilhamento de conhecimento no que diz respeito ao biometano, tema já consolidado em vários países e em crescimento no Brasil. Em paralelo, a implementação de sistemas de recuperação de energia em aterros sanitários é uma possível solução para suprir a demanda por energia limpa, proporcionar o tratamento correto dos RSU e mitigar as emissões de metano.

Entre os benefícios da inserção ampliada do biometano na matriz energética brasileira, cabe citar: i) seu mecanismo de precificação não leva em conta parâmetros do mercado externo, diferentemente do que acontece com os combustíveis fósseis, como o diesel, que sofrem sucessivos reajustes de acordo com o preço do barril de petróleo; ii) ele ajuda a resolver

problemas sociais crônicos do Brasil, já que pode ser obtido por meio do correto tratamento dos resíduos sólidos urbanos, uma fonte de biomassa de enorme disponibilidade; iii) aumenta a resiliência do setor de transportes frente às ameaças constantes de desabastecimento relacionadas à dependência dos combustíveis finitos; iv) reduz a pegada de carbono, sendo reconhecido como um combustível verde; v) ao contrário de outras fontes de energia renováveis (solar e eólica), o biometano tem a vantagem de poder ser armazenado; vi) ele pode ser misturado com gás natural e, inclusive, ser integrado nas redes de gás natural já existentes.

2 REVISÃO TEÓRICO-EMPÍRICA

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Segundo o relatório mais recente do IPCC (2021), os aumentos observados nas concentrações de gases de efeito estufa (GEE), desde o ano 1750, são causados explicitamente por atividades humanas. O relatório ainda afirma que cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer década que a precedeu.

Sabe-se que os maiores esforços para enfrentar o aquecimento global se concentram em limitar as emissões de dióxido de carbono (CO₂), o que se justifica pelo fato deste ser o gás predominante para o aquecimento global, mas o gás metano (CH₄), apesar de durar menos tempo na atmosfera (cerca de 12 anos), impacta entre 30% e 50% no aumento das temperaturas do planeta, de acordo com estimativas do IPCC (2021).

Isso significa que, sem menosprezar os males a longo prazo que o CO₂ causa ao planeta, estratégias direcionadas para a redução das emissões de CH₄ podem fornecer benefícios dentro de poucas décadas, tanto em termos climáticos quanto de saúde (SANT'ANNA et al., 2021). Afinal, o grande prejuízo que a poluição do ar acarreta também tem conexão comprovada com a incidência de mortes prematuras nas pessoas, causadas por doenças pulmonares, cardiovasculares, acidentes vasculares cerebrais, disposição ao câncer e ao diabetes. Também são notados prejuízo do desenvolvimento cognitivo em crianças e demência em idosos (SANT'ANNA et al., 2021).

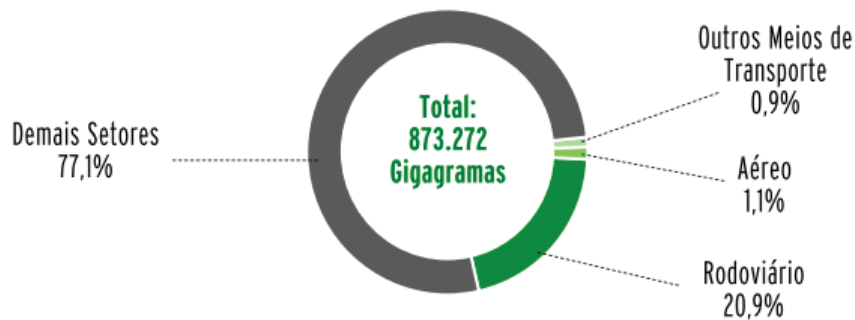
Em 2018, o CH₄ representou entre 11,5% e 14% das emissões de GEE globais, sendo cerca de 29,7% delas originadas pelo tratamento e disposição final de resíduos (CRIPPA et al., 2021). No contexto das mudanças do clima, a gestão de resíduos sólidos (incluindo a operação de transporte envolvida) deve ser considerada relevante, no sentido de se procurar alternativas para a redução das emissões de GEE.

A geração de resíduos, por exemplo, responde por 4,8% do total de emissões de gases de efeito estufa no Brasil, conforme consulta ao SEEG (2022). Em paralelo, um estudo feito por uma empresa de gerenciamento de frotas constatou que os caminhões destinados à coleta de resíduos, especificamente, são os maiores emissores de CO₂ (cerca de 1,24 kg de CO₂ por quilômetro rodado), ficando à frente dos caminhões usados pelo setor químico e das máquinas agrícolas, por exemplo. A natureza de utilização dos caminhões de lixo em baixas velocidades, com paradas constantes, contribui para tal resultado (AMBIENTE BRASIL, 2011).

2.1.2 O diesel no contexto da poluição atmosférica

Sabe-se que meios de transporte automotores são considerados fontes móveis de poluição atmosférica, pois, ao contrário das fontes fixas (indústrias, aterros, usinas, etc.), os poluentes emitidos pelos veículos se dispersam pela comunidade (NOGUEIRA, 2018). O Gráfico 1 indica a participação do setor de transportes nas emissões de CO₂, a nível Brasil.

GRÁFICO 1 – EMISSÕES DE CO₂ DO SETOR DE TRANSPORTES E DOS DEMAIS SETORES



FONTE: Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2022)

O óleo diesel é um produto derivado do processamento do petróleo, em maior quantidade e, também, considerado de elevado índice emissor de particulado e gases poluentes para a atmosfera. Trata-se de um tipo de combustível utilizado em grande escala nos motores de ciclo a diesel ou motores de ignição por compressão, característicos dos caminhões que integram a frota de veículos atuante no modal rodoviário de transporte de cargas (FERNANDES et al., 2016). No caso de caminhões e ônibus, os principais poluentes primários emitidos são o material particulado fino (MP_{2,5}), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o dióxido de enxofre (SO₂) (INEA, 2016 apud SOARES, 2019).

Quanto aos materiais particulados, Nogueira (2018) esclarece que eles se mantêm em suspensão na atmosfera e merecem atenção por terem relação direta com a redução da qualidade do ar; portanto, representam risco ao bem-estar humano, em virtude da inalação desses poluentes, especialmente os MP_{2,5} que têm tamanho reduzido. Já o SO₂ é um dos principais formadores da chuva ácida. Ao reagir com outras substâncias presentes no ar, ele forma partículas de sulfato que reduzem a visibilidade na atmosfera.

O ozônio troposférico é um exemplo de poluente secundário gerado pelos caminhões. Ele resulta da reação entre óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos (incluindo o Metano) na presença de radiação solar. Este gás de efeito estufa está associado a mais de 1 milhão das mortes anuais relacionadas a poluição atmosférica, além de ser tóxico às culturas agrícolas e ecossistemas (CCAC, [s.d.]).

Estudos mostram que os motores a Diesel produzem cinco vezes mais NO_x que os veículos a gasolina e que os caminhões são responsáveis pela maior parte da emissão de material particulado (MP) na atmosfera. Para tentar diminuir essas emissões, são utilizadas tecnologias como sistema de gerenciamento eletrônico nos motores, filtros, catalisadores de oxidação, e aditivos para a redução da emissão de poluentes (SILVA et al., 2014).

2.1.3 Realidade do transporte de cargas no país

No ano de 2018, o setor de transportes tornou-se o maior consumidor de energia do Brasil, superando o setor industrial; o modal rodoviário predomina no consumo de energia, conforme apontado por Coelho (2019).

O CNT (2021) contabiliza que a frota brasileira de caminhões e caminhões trator seja de 2.934.976 e 786.595, respectivamente, referente ao ano de 2021. No mesmo ano, o consumo de diesel atingiu a marca de 62,1 milhões de metros cúbicos no setor de transporte como um todo, o que representa aproximadamente 70% do total de diesel disponível no país, sendo 68% exclusivamente referente ao modal rodoviário (CNT, 2022). Outra constatação relevante apontada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022) é que óleo diesel tem o maior volume de importação dentre todos os outros combustíveis.

A perspectiva da EPE (2022) é que, em 2031, o óleo diesel para o abastecimento de caminhões responda por 34% na demanda total do setor de transportes e continue sendo o mais representativo dentro do transporte de cargas, com 89,9%. Este fato revela que a economia brasileira possui forte dependência do modal rodoviário de transporte, para escoamento da produção agrícola e industrial, mesmo sendo inapropriado em função das dimensões continentais do país. Roitman e Silva, 2018 (apud SANT'ANNA et al., 2021) reiteram que o consumo de diesel para transportar uma tonelada de carga por caminhão é 2,7 vezes superior ao consumo demandado por trem. Ferreira et al. (2019) enxergam a alta dependência do transporte rodoviário e dos ônibus, no caso do transporte público urbano, como situações que representam oportunidades de reforçar a adesão ao biometano veicular.

Já que a liderança do transporte de cargas é uma realidade que tende a perdurar por ainda muitos anos no país, é fundamental reunir esforços no sentido de transformar as previsões a respeito da elevada demanda de diesel em previsões nas quais ele cede espaço para outro combustível igualmente eficiente, mas que não contribua com a poluição atmosférica, que é o caso do biometano.

2.2 ESTRATÉGIAS PARA CONTROLE DAS EMISSÕES DE GEE

2.2.1 Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE)

Como forma de atender aos padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR), regido pela resolução Conama nº 5/1989, o controle da poluição veicular se fez necessário, respaldando a criação do PROCONVE (resolução Conama nº 18/1986), que tem como base padrões internacionais de emissão de poluentes. Valores máximos de emissão de poluentes foram estabelecidos por meio de fases, nas quais são aplicadas gradativas reduções desses valores, permitindo a adequação da indústria automobilística e dos fornecedores de combustíveis em tempo hábil (SOARES, 2019).

Soares (2019) comenta que os programas de incentivo à manutenção preventiva e inspeção da frota no país (resolução Conama nº 418/2009) têm servido como sustentação ao PROCONVE, pois permitem identificar desconformidades dos veículos em uso que repercutam em emissões descontroladas de poluentes.

Em seu artigo sobre políticas públicas para o transporte rodoviário de cargas no Brasil, Silva et al. (2020) constataram que as emissões de CO, NO_x e MP desse modal de transporte decresceram ao longo dos últimos anos, ao contrário da frota de caminhões e da demanda energética do setor que, entre 2000 e 2019, cresceram 2,8% a.a. e 2,5% a.a., respectivamente. Os autores apontam que isto se deve, especialmente, à implementação das fases do programa Proconve e aos ganhos de eficiência na frota. Entre 2011 e 2019, a Fase Proconve P-7 contribuiu com a redução de 24% das emissões de CO, 21% de NO_x e 13% de MP do transporte rodoviário de cargas, de acordo com as estimativas. A tendência é que, até 2030, essas emissões apresentem queda ainda maior durante a Fase P-8, equivalente ao padrão europeu de emissões EURO VI, que entrou em vigor em 2023 no Brasil.

2.2.2 Política de renovação de frota

Segundo a ANTT (2020), a idade média da frota de empresas de transporte é de 9,5 anos, enquanto para os caminhões de transportadores autônomos é de aproximadamente 18 anos, provavelmente pelo fato dos caminhoneiros autônomos deterem recursos financeiros limitados, o que implica na reduzida capacidade de renovarem seus caminhões.

O inconveniente de caminhões muito antigos estarem em circulação reside no fato deles emitirem maior quantidade de poluentes atmosféricos, até mesmo por conta da prevista perda

de rendimento energético (km/l). O mau estado de conservação desses veículos tende a diminuir a capacidade de carga útil para transporte e, além disso, pode contribuir para acidentes de trânsito (ANTT, 2020).

Diante do exposto, uma política de renovação da frota de caminhões, que considere o sucateamento dos mais antigos, precisa fazer parte da pauta de reivindicação de agentes do setor de transporte rodoviário. De acordo com um estudo de Silva et al. (2020), a retirada de circulação de veículos de carga com mais de 30 anos de idade tem potencial para reduzir as emissões brasileiras de CO, NO_x e MP do transporte rodoviário de cargas em 18%, 21% e 49%, respectivamente, no ano de 2030.

2.2.3 Política Nacional de Biocombustíveis (Renovabio)

A Renovabio, regida pela Lei nº 13.576/2017, incentiva a produção e expansão de biocombustíveis (como o biometano) na matriz energética de transportes do país. Os produtores de biocombustíveis que tenham interesse em ser remunerados por sua contribuição individual na mitigação de gases de efeito estufa devem buscar certificação junto à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), designada a atribuir notas diferentes para cada produtor, de acordo com a Intensidade de Carbono (IC) de seus biocombustíveis. Quanto menor a IC, maiores são os Créditos de Descarbonização (CBIOS) alcançados, que, por sua vez, são ativos financeiros negociáveis em bolsa de valores, onde cada unidade corresponde a uma tonelada de CO₂ que deixa de ser emitida com a substituição do combustível fóssil pelo biocombustível. As distribuidoras de combustível possuem obrigação legal de compra de CBIOS para estarem em conformidade com as metas de descarbonização calculadas pela ANP, que são baseadas nas metas nacionais estipuladas pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) (MME, 2017; STILPEN; STILPEN; MARIANI, 2018).

Infelizmente, para obtenção dos créditos de carbono e sua comercialização, é necessário arcar com as altas taxas de certificações propostas por entidades validadoras e certificadoras, além de custos com consultoria (FARIA; LEITE; OLIVEIRA, 2022). Outro entrave para a emissão de CBIOS é a exigência da comprovação de venda do biocombustível por meio de nota fiscal, ou seja, o produtor que faz uso para consumo em sua própria frota veicular não tem direito à emissão de CBIOS, pois isso não caracteriza uma venda propriamente dita, apesar do fato de estar contribuindo com a descarbonização do meio ambiente.

2.2.4 Programa Nacional Metano Zero

O Ministério do Meio Ambiente elucida que este programa é uma iniciativa do Governo Federal que tem o intuito de reduzir as emissões de metano, em consonância com o compromisso firmado com mais de 100 países na 26ª Conferência das Partes (COP 26) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Enquadrado nisso, está o incentivo ao aproveitamento energético de resíduos (que são emissores de metano), por meio do biogás e do biometano. Portanto, estão previstas linhas de crédito e financiamento específicas de agentes financeiros públicos e privados, além dos recentemente criados créditos de metano, complementares aos CBIOs do Renovabio, o que representa receitas extras para os empreendimentos atrelados à mitigação de emissões de gases do efeito estufa. Além disso, novos projetos de usinas de produção de biogás e biometano estão suspensos de cobrança de PIS e COFINS para aquisição de máquinas, materiais de construção, equipamentos, dentre outros componentes (MMA, 2022).

2.3 RESÍDUOS SÓLIDOS

Primeiramente, é fundamental entender que lixo e resíduo têm significados distintos, pois, ao contrário do lixo, o resíduo não necessariamente é algo completamente inútil, ele pode (e, idealmente, deve) ser transformado ou recuperado para reuso.

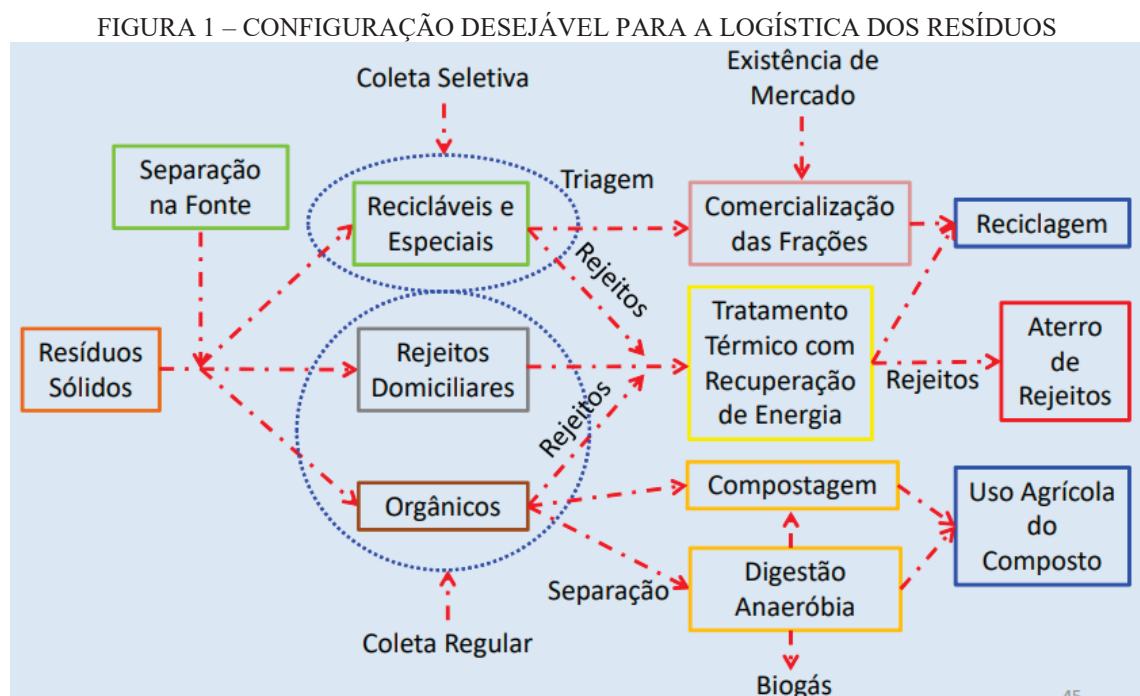
Na terminologia usual das campanhas de coleta seletiva, resíduos são constituídos de materiais úmidos e secos. Os materiais úmidos podem ser divididos em orgânicos (como restos de alimentos de origem animal e vegetal) e rejeitos (que são aqueles contaminados biologicamente, como os resíduos sanitários). Os materiais secos são classificados como potenciais recicláveis, como plásticos, vidros, papéis e papelão, metais ferrosos e não ferrosos, entre outros que podem ou não ter valor comercial; parte deste material pode conter também uma parcela constituída de rejeitos. Os rejeitos não são passíveis de serem processados tecnologicamente, tendo, portanto, que seguir para a disposição final ambientalmente adequada (SNIS, 2021; MENEGHELLO, 2021). No caso dos resíduos orgânicos, Shanmuggam et al. (2019) consideram que eles podem ser bem gerenciados com técnicas de tratamento como vermicompostagem, incineração e biometanização.

Resíduos sólidos são formados por atributos físicos, químicos e biológicos, sendo as características físicas as mais importantes para a gestão dos serviços de limpeza urbana, a saber: geração per capita (kg/dia); composição gravimétrica (% de cada

fração componente em relação ao peso total de amostras analisadas, como papel, plástico, vidro, metal etc.); peso específico aparente (kg/m^3); teor de umidade (% em peso); grau de compactação (redução de volume). Outros fatores que influenciam as características dos resíduos sólidos são os climáticos, os demográficos e os socioeconômicos, além de épocas especiais de calendário, como as festividades da Páscoa, do Natal etc. A geração de resíduos sólidos se dá em função do crescimento populacional, da variação de renda e de novos hábitos de consumo, e também devido à introdução de novos componentes nos produtos finais, que, em alguns casos, possuem componentes com elevado tempo de degradação na disposição final (LIMA, 2018, p. 25).

Já os resíduos sólidos urbanos são aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas (resíduos domiciliares) e originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana (resíduos de limpeza urbana), incluídos, ainda, os resíduos de atividades comerciais caracterizados como não perigosos, que podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal (BRASIL, 2010).

A FIGURA 1 representa um esquema estratégico idealizado para coleta e tratamento de resíduos sólidos.



FONTE: Contrera (2017)

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), na forma da Lei nº 12.305/2010, é o principal instrumento legal de enfrentamento do desafio de realizar adequadamente o manejo e disposição dos resíduos sólidos. Ela organiza e atribui a responsabilidade compartilhada entre o poder público, o setor empresarial e a coletividade, levando em conta desde o processo de

fabricação de produtos até o seu consumo. A orientação da PNRS é que apenas rejeitos sejam encaminhados aos aterros sanitários, como forma de aumentar a funcionalidade dos mesmos e o seu tempo de vida útil, ao mesmo tempo em que incentiva a identificação de alternativas de tratamento da parcela orgânica do resíduo (BRASIL, 2010).

2.3.1 Aterros Sanitários

Aterro sanitário é uma forma de dispor RSU no solo para permitir o confinamento seguro, atendendo a critérios de Engenharia e procedimentos operacionais, além de garantir o controle da poluição ambiental e a proteção da saúde pública (SOARES; MIYAMARU; MARTINS, 2017).

O relatório do SNIS (2021) enfatiza que a área onde o aterro é alocado precisa ser impermeabilizada, a fim de impedir a percolação do chorume para o subsolo e aquíferos existentes. A acumulação do chorume na massa de resíduos e os possíveis problemas de instabilidade associados também demandam a adoção de um sistema de drenagem, de forma que os líquidos sigam para um dreno principal que os direcione para ser tratado em sistema adequado. Além disso, os gases também devem ser drenados por um sistema específico, evitando, assim, escape pelos meios porosos do subsolo e alcance das fossas, esgotos e edificações. Outro requisito para a operação de um aterro sanitário é o sistema de cobertura diário (podendo ou não contar com uma cobertura intermediária), principalmente como forma de eliminar a proliferação de vetores, bem como reduzir a taxa de formação de lixiviados, a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás. Existe, ainda, a cobertura final, que evita a infiltração das águas pluviais e o vazamento dos gases gerados, além de contribuir para a recuperação final da área e o crescimento de vegetação. Os desafios na implantação de um aterro sanitário são diversos, desde a identificação de espaços disponíveis e viáveis à sua implantação até a correta operação, que envolve, entre outras responsabilidades, controle e pesagem dos tipos de resíduos entrantes na unidade, garantia do atendimento aos padrões sanitários e de proteção ambiental previstos por lei, etc.

Pela norma ABNT NBR 15849 (2010), os aterros sanitários devem apresentar vida útil superior a 15 anos e serem supervisionados por mais 10 anos, no mínimo, após o encerramento de suas atividades, garantindo assim a segurança e qualidade do empreendimento. Para Santos et al. (2019), os diversos processos internos que ocorrem para o funcionamento dos aterros sanitários disparam agentes físicos, químicos e biológicos nos resíduos, que, sob influência também de condições externas, resultam na sua biodegradação e geração de lixiviados e gases.

Logo, o alto risco que os resíduos sólidos representam não finda com o uso de aterros, por isso, é requerido monitoramento do ponto de vista geotécnico e ambiental, como forma de evitar acidentes (desmoronamentos e explosões) e a contaminação do ar, dos solos e dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

No período de deposição do resíduo, a decomposição da matéria orgânica ocorre pela decomposição aeróbia (presença de oxigênio). Depois, conforme a quantidade de O₂ presente nos resíduos diminui, inicia-se o processo de decomposição anaeróbia (ausência de oxigênio), dando origem ao biogás, que, independente do uso final, deve ser submetido a um sistema padrão de coleta, tratamento e queima (MMA, [s.d.]). Segundo LIMA et al. (2017), a coleta de gás em aterros se dá por meio de grandes dutos de ar dispostos a certa distância uns dos outros ao longo do aterro, drenando os gases da camada subterrânea para a superfície. Santos, Barros e Filho (2018) completam ao listar os componentes básicos para a implementação de uma usina de aproveitamento energético em aterros sanitários, sendo que os indispensáveis são: i) drenos: utilizados para realizar a coleta do gás; ii) tubulação: necessária para transportar o biogás do aterro sanitário ao sistema de aproveitamento energético ou *flare*; iii) *flare*: utilizado para a combustão dos gases excedentes que não forem aproveitados para geração de energia; iv) compressor: faz a sucção do gás dos drenos e o bombeia pela tubulação; v) unidade de tratamento do biogás: utilizada para a remoção de partículas sólidas e gotículas líquidas, diminuindo os riscos de problemas em equipamentos da unidade.

ICLEI (2009) orienta que, independentemente da utilização energética escolhida para o biogás, a instalação do *flare* é recomendada, especialmente para projetos destinados à obtenção de créditos de carbono. Isto porque, em caso de falha no sistema de geração de energia ou outro tipo de aproveitamento, evita-se a emissão de metano para a atmosfera e a consequente perda de créditos de carbono.

Contudo, mesmo no caso em que o biogás é efetivamente coletado nas células do aterro e queimado em *flares*, é comum que ocorram emissões de GEE derivadas da combustão incompleta do CH₄. Além disso, parte dos gases gerados no processo de digestão anaeróbia acaba por se infiltrar nas camadas de cobertura do aterro sanitário e se dissipa para a atmosfera difusamente (FRANCA; FERREIRA, 2020; CORDEIRO, 2018). A grande questão é que a molécula do CH₄ absorve mais calor que a do CO₂, logo, contribui mais ainda para o aquecimento global (CARVALHO, 2021). Portanto, para os aterros já consolidados e que fazem uso energético do biogás, é importante minimizar as emissões difusas e desenvolver planos para monitorar potenciais vazamentos de biogás.

2.3.2 Usinas de Metanização

Os biodigestores são equipamentos utilizados para a digestão anaeróbia de materiais orgânicos. Eles são compostos por uma câmara fechada na qual ocorre a degradação e a decomposição da matéria orgânica por meio da ação de diferentes microrganismos, tendo como subprodutos o biogás e o biofertilizante (MALINOWSKY, 2016). Para Santos (2016), um biodigestor é classificado como um reator químico, sendo as reações químicas de origem biológica.

Dentre os tratamentos biológicos, o tratamento anaeróbio via usinas de metanização pode ser considerado o mais vantajoso por apresentar alta capacidade de aquisição energética, com baixo impacto ambiental. Ele tanto reduz o volume de RSU a ser enviado a aterros sanitários, o que reflete em redução de custos logísticos, como também gera um material digerido menos nocivo que aquele não tratado (estabilização de resíduos) que, inclusive, ainda pode ter valor agregado como biofertilizante (SOARES, 2021)

O processo de digestão anaeróbia em usinas de metanização é quase o mesmo que o apresentado em aterros sanitários, diferenciando-se pela utilização de equipamentos e técnicas adequadas para controlar as diversas variáveis envolvidas, a fim de maximizar a geração de gás (SOARES, 2021). A biodigestão é um processo complexo, que pode ser inibido pela composição do próprio substrato, seja por insuficiência de micronutrientes, relação inadequada entre carbono e nitrogênio, presença demasiada de compostos tóxicos ou baixo pH. Ademais, os diversos grupos de microrganismos responsáveis pelo processo não resistem a determinados estresses, como elevado carregamento orgânico e choques de temperatura (ABIOGÁS, c2013).

Em uma análise econômica das opções de tratamento de RSU do Brasil e, para um período mínimo de 5 anos, Carvalho (2021) concluiu que os tratamentos por biodigestão de putrescíveis, em conjunto com a reciclagem de materiais reaproveitáveis, geram receitas capazes de subsidiar mais da metade dos custos incorridos com os serviços de coleta de resíduos e de limpeza urbana; podendo chegar a um índice de cobertura de despesas de aproximadamente 90,79%, quando se considera um período de 20 anos.

Com a demanda da sociedade por melhores práticas de gestão de RSU e a tendência dos aterros sanitários se esgotarem, o resíduo orgânico passará gradualmente a ser tratado separadamente em biodigestores, ao invés de em aterros sanitários, como acontece atualmente na Europa. Assim, os biodigestores se mostrarão mais econômicos e versáteis (CARVALHO et al., 2019).

2.3.3 Vantagens dos Aterros Sanitários

Na pesquisa de Mavridis e Voudrias (2021), comparou-se a produção de biogás produzido em aterros sanitários (com 100% das 50.000t de RSU sendo despejados neles) e em usinas de metanização (com 40% da fração orgânica dos resíduos separada na fonte, enquanto o restante segue para aterro). Em termos energéticos, ambientais e legais, a digestão anaeróbia em usina de metanização se mostrou mais atrativa que a de aterro sanitário. Mas, economicamente, isso só é válido para produções de RSU superiores a 210.000 t/a (considerando investimento implementado com fundos próprios), caso contrário, aterro sanitário é a melhor opção.

Jagtap e Dalvi (2021) estimam que o custo de investimento do digestor anaeróbio é quatro vezes maior que o custo de purificação em biometano, o que pode retardar ou invalidar o retorno sobre o investimento. Para Meneghello (2021), como os aterros são mais econômicos em termos de implantação e manutenção, eles são mais utilizados e possuem uma vida útil média de 30 anos, a depender dos investimentos realizados para a sua manutenção.

Na contramão da PNRS, os aterros sanitários contribuem com as maiores produções brasileiras de biogás. Entende-se que a justificativa se dê pelos ganhos de escala alcançados com os aterros sanitários, pela qualificação e *expertise* das empresas de gestão de resíduos, entre outros fatores (CLEMENTINO, 2021).

É fundamental o conhecimento do potencial energético dos aterros de resíduos no país e ainda a concretização de incentivos fiscais e financeiros à criação de consórcios para a disposição compartilhada dos RSU, principalmente entre municípios de pequeno porte (até 50 mil habitantes), a fim de proporcionar maior volume de resíduos aterrados e o consequente aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica e biometano (NASCIMENTO, 2017 apud MENEGHELLO, 2021, p. 40).

Além da questão financeira, um dos principais desafios para operação de biodigestores em larga escala é assegurar o fornecimento regular da fração orgânica de resíduos bem segregados. Afinal, os sistemas da Europa, pioneira no assunto, restringem os limites de teores de materiais impróprios no substrato para que não haja perda de eficiência, desgastes dos reatores ou obstruções causadas pela presença de pedra, plástico, vidro, metal e outros inertes (CORDEIRO, 2018).

Probiogás (2015a) enfatiza que a etapa prévia de triagem dos RSU é importante em todas as tecnologias de metanização, pois promove a recuperação dos materiais recicláveis e a separação da matéria orgânica a ser submetida ao tratamento anaeróbio, uma vez que a

qualidade final do composto é diretamente proporcional à eficiência na separação. Contudo, como no Brasil a coleta seletiva dos RSU ainda é muito inexpressiva, as tecnologias atualmente disponíveis não conseguem ser amplamente implantadas.

Diante do exposto, a presente pesquisa se limita a estudar a produção energética a partir de aterros sanitários, a fim propiciar a expansão e concretização do biometano como combustível veicular, sem que a construção de usinas de metanização sejam tratadas com a mesma urgência a fim de não competirem simultaneamente por investimentos financeiros, que já são escassos quando se trata de países subdesenvolvidos como o Brasil.

2.4 GESTÃO DE RESÍDUOS

A dificuldade na gestão de RSU em muitos países em desenvolvimento se deve, principalmente, à falta de infraestrutura adequada para coleta, transporte e tratamento de resíduos. O maior problema, na verdade, está nos resíduos sólidos orgânicos (em grande parte provenientes do desperdício de alimentos por parte do consumidor), que compõem a maior fração de RSU nos países em desenvolvimento (SHANMUGAM et al, 2019).

A não segregação dos resíduos na fonte geradora é uma ineficiência por si só, e a disposição final em aterro controlado ou lixão a céu aberto agrava a situação (SHANMUGAM et al., 2019). Afinal, no aterro controlado, apesar da utilização de alguns princípios básicos de engenharia para confinamento dos resíduos e de, geralmente, apresentarem uma camada de solo na superfície, eles não dispõem de impermeabilização da base nem possuem sistema de tratamento de percolados. No lixão, a disposição é caracterizada pela simples descarga dos resíduos sobre o solo que ali ficam a céu aberto (CEMPRE, 2018), degradando-se e gerando chorume e metano, componentes altamente poluentes. A Política Nacional de Resíduos Sólidos, inclusive, previa o fim dos lixões até 2014, data que foi prorrogada para 2024 pelo Ministério do Meio Ambiente.

Quanto ao desperdício mundial de alimentos, a FAO (2021) alerta que, em média 9% das emissões globais de gases de efeito estufa estão associadas a isso, se forem considerados todos os pontos da cadeia alimentar. Além do impacto ao meio ambiente, a economia e a sociedade também sofrem, ainda mais com a realidade da fome enfrentada por milhares de pessoas. Tomando como base o ano de 2019, estima-se que 931 milhões de toneladas de alimentos (17% do total disponível aos consumidores) sejam destinadas principalmente ao lixo das residências, bem como do setor de varejo, restaurantes e outros serviços alimentares (UNEP, 2021).

Especificamente no Brasil, o desperdício de alimentos corresponde em torno de 12.578.308 toneladas anuais (FAO, 2021). Conforme Paritosh et al. (2017), em termos de perda de alimentos, a estimativa é de 200 g per capita/dia nas esferas de produção agrícola, pós-colheita e processamento.

Essa característica majoritariamente orgânica dos resíduos brasileiros, associada ao típico clima tropical, indica grande potencial para geração energética, pois a aplicação de resíduos alimentares configura um substrato promissor no processo de digestão anaeróbia, devido ao seu conteúdo elevado de carboidratos e grande quantidade disponível (PARITOSH et al., 2017).

Alguns dos impactos causados pelo mau gerenciamento dos resíduos, apontados por Kaza et al. (2018), são: i) contaminação dos oceanos do mundo; ii) entupimento de drenos municipais para escoamento de água, levando a inundações; iii) favorecimento da proliferação de vetores de doenças; iv) aumento de problemas respiratórios devido à inalação de partículas geradas na queima de resíduos; v) prejuízo aos animais que consomem resíduos inocentemente; vi) desaceleração econômica com a queda do turismo, por exemplo.

Os resíduos ainda são vistos como um problema, devido aos danos ao meio ambiente e à saúde pública, mas a indústria de gestão de resíduos e recursos, por outro lado, é parte da solução, não o problema. Afinal, o setor de resíduos apresenta um importante papel na mitigação das emissões de GEE, estimado em cerca de 20% (ISWA, 2021). Este mesmo instituto, baseado em estimativas internacionais, afirma que o custo da inércia na gestão de resíduos é de três a cinco vezes maior do que o necessário para investimento e custeio de soluções adequadas.

Conforme abordado por Carvalho et al. (2019), a gestão dos resíduos no país precisa observar a seguinte ordem de prioridade prevista na PNRS: i) não geração – encontrar maneiras de prevenir a formação de RSU; ii) redução – diminuir o uso de recursos nos processos produtivos e aumentar a vida útil dos bens; iii) reutilização – usar novamente bens já existentes, mediante reparo, limpeza ou restauro; iv) reciclagem – reprocessar material para originar novo produto; v) tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

2.4.1 Caminhões compactadores de resíduos

De acordo com dados levantados pelo SNIS (2021), o Brasil contou, em 2020, com uma frota de veículos para a coleta de resíduos domiciliares e públicos composta por

aproximadamente 31,5 mil veículos, sendo que caminhões compactadores compõem 97,46% desse total (30,7 mil), o restante são caminhões do tipo basculante, baú ou carroceria de madeira, caminhões poliguindaste e tratores agrícolas com reboque.

Ribeiro (2017) menciona que o caminhão compactador de lixo do tipo carga traseira é o mais utilizado no Brasil, tendo a vantagem de ser capaz de coletar grandes volumes, operar em alta velocidade, descarregar com rapidez, apresentar baixo índice de derramamento de resíduos e boas condições ergométricas para o serviço dos garis, etc. O equipamento completo é composto pelo chassi do caminhão e pelo implemento, que é o elemento compactador em si, formado pela junção da porta traseira com a caçamba.

Quanto ao processo de coleta, sua classificação normalmente é dividida em dois tipos: sistema especial de coleta (resíduos contaminados) e sistema de coleta de resíduos não contaminados. Para a segunda situação, a coleta pode ser realizada de maneira convencional, denominada coleta indiferenciada (resíduos são encaminhados para os aterros, podendo ou não passar por estações de transferência ou transbordo) ou de maneira seletiva, denominada coleta seletiva (resíduos recicláveis são triados e encaminhados para as cooperativas de material reciclável) (VECCHI, 2016).

A forma da coleta depende da distinção de recicláveis e não recicláveis. Para o caso dos resíduos não recicláveis, a coleta costuma ser feita com caminhões compactadores, com o objetivo de aumentar a eficiência do processo de coleta. Já os resíduos recicláveis, geralmente são coletados em caminhões com carroceria do tipo gaiola, de forma a preservar o resíduo para segregação e acondicionamento mais apropriado, objetivando auferir lucros com a sua comercialização (CEMPRE, 2018).

Em muitas cidades brasileiras, a coleta de RSU responde por um grande percentual do orçamento municipal, chegando inclusive a ultrapassar os gastos com serviços de saúde pública (ICLEI, 2009). Essa informação é reiterada pelo TCM GO (2016), que menciona que o serviço de coleta de RSU compreende de 35% a 70% dos valores gastos com limpeza urbana. No sistema de manejo de resíduos sólidos urbanos, a etapa de transporte, em geral, é a que demanda maior gasto financeiro, pois os pontos de coleta periódica são diversos e muitas vezes complexos, sendo necessário um planejamento detalhado para que os veículos consigam atender todas as casas, comércios e demais estabelecimentos (SNIS, 2021).

2.4.2 Realidade dos Resíduos no Brasil

Os dados apurados pela Abrelpe (2021) mostram que a geração de RSU no país, em 2020, foi fortemente influenciada pela pandemia da COVID-19, afinal, as pessoas se isolaram em suas residências e, conseqüentemente, a geração de resíduos que antes era descentralizada passou a ser quase inteiramente atendida pelos serviços de limpeza urbana. O reflexo foi uma geração de RSU de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas.

No Brasil, embora a cobertura de coleta seja de 92,2%, 39,8% disso apresenta destinação final inadequada em aterros controlados ou, nos piores casos, lixões. Sendo estas duas opções ainda predominantes nas regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste, como pode ser visto na Tabela 1.

A região Sudeste continua sendo a maior geradora de RSU do país, tendo registrado 40.249.087 de toneladas coletadas no ano de 2020, o que corresponde a 452,2 kg/hab/ano, valor acima da média nacional (359,3 kg/hab./ano) (ABRELPE, 2021).

TABELA 1 – SITUAÇÃO DA DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6	3.209.013	64,4
Nordeste	6.016.948	36,3	10.558.666	63,7
Centro-oeste	2.456.849	42,5	3.323.972	57,5
Sudeste	29.542.830	73,4	10.706.257	26,6
Sul	6.011.894	70,8	2.479.482	29,2
Brasil	45.802.448	60,2	30.277.390	39,8

FONTE: Abrelpe (2021)

2.4.3 Economia circular e reciclagem

Na concepção de Kaza et al. (2018), em uma economia circular, os produtos são projetados e otimizados para um ciclo de desmontagem e reutilização, com a intenção de prolongar sua vida útil e, conseqüentemente, minimizar o impacto ambiental da disposição final. Portanto, no sistema de produção circular os mesmos materiais são usados repetidamente até o nível ótimo de consumo, sem que haja desperdício ou subutilização de material.

O atual sistema econômico linear (que segue o conceito do “berço ao túmulo”) tem se mostrado insustentável, pois dia após dia a pressão sobre o meio ambiente aumenta, um grande volume de resíduos inutilizado é gerado e o esgotamento dos recursos naturais é um risco que

não se pode ignorar. Portanto, a transição para um sistema circular (“do berço ao berço”) deve ser tratada com seriedade e urgência, de forma que os produtos e recursos sejam recuperados e mantidos sustentavelmente no ciclo o máximo de tempo possível (LIMA, 2018; ISWA, 2021).

Quanto à reciclagem, SNIS (2021) explica que ela só ocorre a partir do momento em que os ciclos produtivos têm capacidade de reintroduzir os resíduos sólidos recuperáveis como matéria prima para a confecção de novos produtos, substituindo a matéria prima virgem originária da extração de recursos naturais.

Em aterros sanitários, o processo de digestão anaeróbia ocorre de forma natural *in loco* e, comumente, conta com a presença indesejada de materiais inorgânicos que comprometem o andamento da conversão energética (MARANA et al., 2019). Em uma pesquisa sobre a capacidade de produção de biogás no aterro sanitário de Ponta Grossa – PR, realizada por Eidam (2019), foi considerado cenário com e sem seleção preliminar de resíduos sólidos. Ele verificou que, além de um incremento significativo na vida útil do aterro, a remoção de uma parte do material inerte torna a produção de biogás por metro cúbico de aterro mais eficiente, uma vez que há maior disponibilidade de matéria orgânica passível de ser degradada.

O material inerte, sendo previamente separado em uma estação de triagem, pode ser destinado a algum tipo de reciclagem ao invés de impactar na superação da capacidade de recebimento dos aterros sanitários, que estão se mostrando inviáveis de serem ampliados e/ou implantados em novos espaços em outras regiões (EIDAM, 2019; MARANA et al., 2019).

Além da estratégia de gestão dos resíduos baseada na revalorização energética, a PNRS entende que as cooperativas de catadores são valiosas prestadoras de serviços e cria mecanismos para integrar os trabalhadores informais de resíduos no sistema formal de reciclagem do país, com garantia de seus direitos trabalhistas, melhoria da perspectiva de renda e reconhecimento social. É sabido que os catadores informais de materiais recicláveis geralmente são um grupo demográfico vulnerável, que trabalham em condições insalubres, enfrentam forte estigma social e são sujeitos a flutuações no preço dos materiais recicláveis.

Outro ponto positivo dessa formalização é que se trata de uma medida economicamente interessante para os municípios, pois os gastos com gestão de resíduos tendem a reduzir, afinal, com a retirada de RSU reaproveitáveis dos sistemas de gerenciamento de resíduos, diminui-se a quantidade destinada aos aterros sanitários (KAZA et al., 2018; CARVALHO, 2021).

Nesse sentido, é importante o papel que o poder público municipal, estadual ou federal pode assumir no sentido de desenvolver políticas que fomentem a reciclagem, a redução dos desperdícios, o melhor aproveitamento das matérias-primas e economia no consumo de energia, bem como o subsídio a projetos ecologicamente corretos e de geração de emprego. O poder

público tem o poder de punir, corrigir e incentivar medidas que façam parte de seu interesse econômico, mas sejam ambientalmente justas também (NASCIMENTO, 2012, apud MAGALHÃES et al., 2020).

Em consulta às prefeituras municipais, SNIS (2021) apurou que, após o processo de triagem, 1,07 milhão de toneladas de resíduo seco tenha sido recuperado por meio de reciclagem, no ano de 2020. Estimando-se que, do total de RSU coletados, 30% sejam compostos por resíduos secos, então 22,8 milhões de toneladas poderiam ter sido recuperadas. Logo, somente 4,7% foi efetivamente recuperada, enquanto o restante foi perdido, seja pela carência de processos tecnológicos economicamente viáveis para recuperá-los ou pela falta de separação prévia por parte dos geradores dos resíduos.

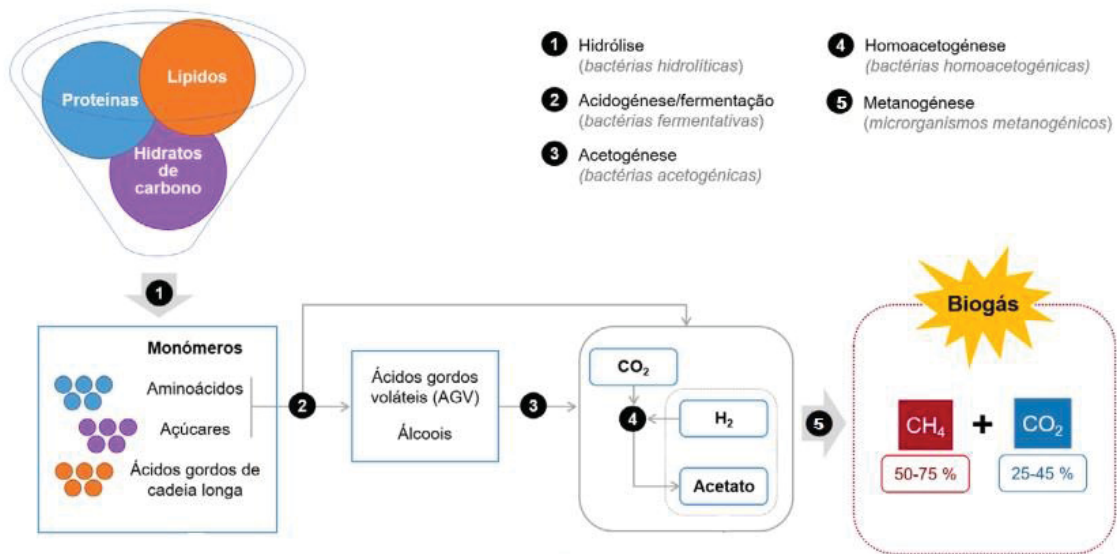
2.5 BIOGÁS

A produção de biogás em ambiente anaeróbio acontece por meio de quatro etapas, conforme esquematizado na Figura 2, a saber: i) a primeira, denominada Hidrólise, é caracterizada pelas bactérias hidrolíticas que, através da liberação de enzimas extracelulares, transformam a matéria orgânica complexa (polímeros e lipídios) em compostos solúveis de menor peso molecular; ii) na etapa da Acidogênese, as bactérias fermentativas acidogênicas convertem os compostos formados na etapa anterior em outros mais simples, como ácidos graxos voláteis, álcoois, CO_2 , H_2O e acetona; iii) na Acetogênese ocorre a oxidação dos produtos da acidogênese em substrato para as bactérias da próxima etapa; iv) por fim, na Metanogênese, as arqueas metanogênicas consomem CO_2 , H_2O e acetato, gerados na Acetogênese, e o resultado metabólico é a geração de CO_2 e CH_4 (SANTOS, 2016; CONTRERA, 2017).

Todavia, Contrera (2017) acrescenta mais uma possível etapa, denominada Sulfetogênese, que, havendo a presença de substâncias compostas por enxofre, bactérias redutoras de sulfato competem com as arqueias metanogênicas pelo consumo do mesmo substrato, gerando H_2S (gás indesejável para aproveitamento do biogás).

O biogás gerado é usado para produzir calor ou para ser convertido em energia elétrica, por meio de uma unidade de cogeração de energia e calor (*Combined Heat and Power* – CHP). Também pode ser purificado em biometano para ser usado como substituto do gás natural ou ser estocado para uso de acordo com a demanda. Em geral, a concentração de metano varia entre 50% e 75% no biogás (ABIOGÁS, c2013).

FIGURA 2 – ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA



FONTE: Adaptado de Cavaleiro e Alves (2020)

O principal problema no projeto e operação de um sistema de coleta de biogás para uso energético é a incerteza da taxa de geração. Por isso, o desenvolvimento de modelos de geração de biogás é uma prioridade na indústria de biogás (MAJDINASAB; ZHANG; YUAN, 2017). Essa incerteza é dependente de alguns fatores, como os do Quadro 1.

QUADRO 1 – FATORES QUE INTERFEREM NA GERAÇÃO DE BIOGÁS

Quantidade de resíduos e sua composição	Este fator está diretamente relacionado à geração de biogás em termos volumétricos, pois são fatores que afetam a inércia de degradabilidade da biomassa, podendo ser alta, moderada ou baixa. No caso da biomassa presente nos resíduos descartados em aterros sanitários, sua composição típica é formada por ligninas, celulose, hemicelulose e proteínas.
Tempo	O tempo diz respeito ao período de latência anterior ao início da geração do biogás e o período de geração relativamente estável de biogás no aterro. Sua influência é crítica à viabilidade do projeto conceitual dos sistemas de aproveitamento energético do biogás.
Teor de umidade	Há uma faixa ótima de teor de umidade (vinculada às condições climáticas e à composição dos resíduos) que é satisfatoriamente alcançada com a recirculação dos lixiviados na massa de resíduos presentes nas células do aterro, pois melhora as condições das bactérias anaeróbias, reduz o tempo de latência e acelera bastante a geração de biogás.
Temperatura	A atividade microbiana possibilita o aumento da produção de biogás em função do aumento da temperatura, até atingir a faixa ideal entre 30 e 40°C.
Geometria do aterro	Aterros com células de resíduos mais profundos melhoram as condições de biodegradabilidade da biomassa presente nos resíduos, afinal, o isolamento aumenta a temperatura e a profundidade aumenta o teor de umidade.

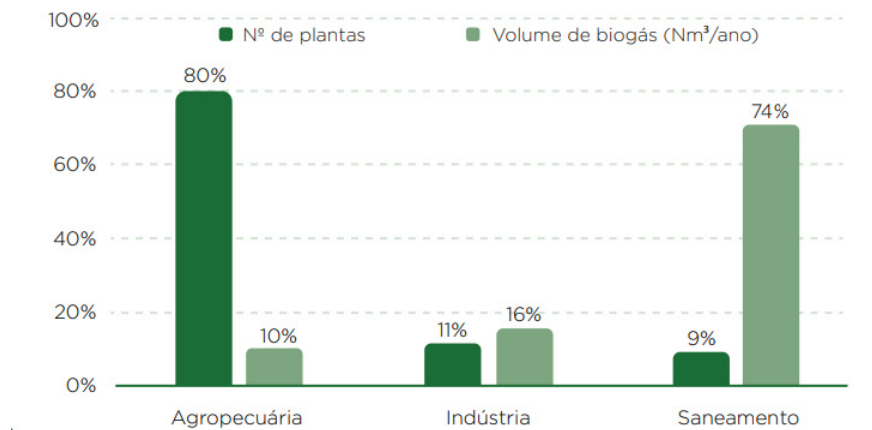
FONTE: adaptado de Majdinasab; Zhang; Yuan (2017)

2.5.1 Realidade do Biogás no Brasil

No Panorama do biogás no Brasil, elaborado pela Cibiogás (2022), consta que as plantas em operação produziram 2,3 bilhões de m³ de biogás em 2021 (um crescimento de 10% em relação ao ano anterior), sendo que 83% desse valor foi produzido por plantas de grande porte (5.000.001 a > 125.000.001 m³/ano de biogás).

Na consideração de Mariani (2018), parte do setor de biogás do Brasil está em estágio inicial, principalmente para substratos da agropecuária e de pequena escala, enquanto outra parte já está em estágio de consolidação, como os aterros sanitários e indústrias. Isso condiz com os dados expostos no Gráfico 2, que correlaciona o número de plantas brasileiras de biogás com seus respectivos volumes de produção. Infere-se, a partir dele, que, das 755 plantas de biogás em operação, o setor agropecuário responde por 80% das unidades no país e o setor industrial por 11%. Já o setor de saneamento - que contempla os aterros sanitários (RSU), as usinas de tratamento de resíduos orgânicos e as estações de tratamento de esgoto (ETE) - apesar de contar com o menor número de plantas, 9% do total, contribui com 74% do volume total de biogás produzido no país.

GRÁFICO 2 – NÚMERO DE PLANTAS DE BIOGÁS POR VOLUME PRODUZIDO



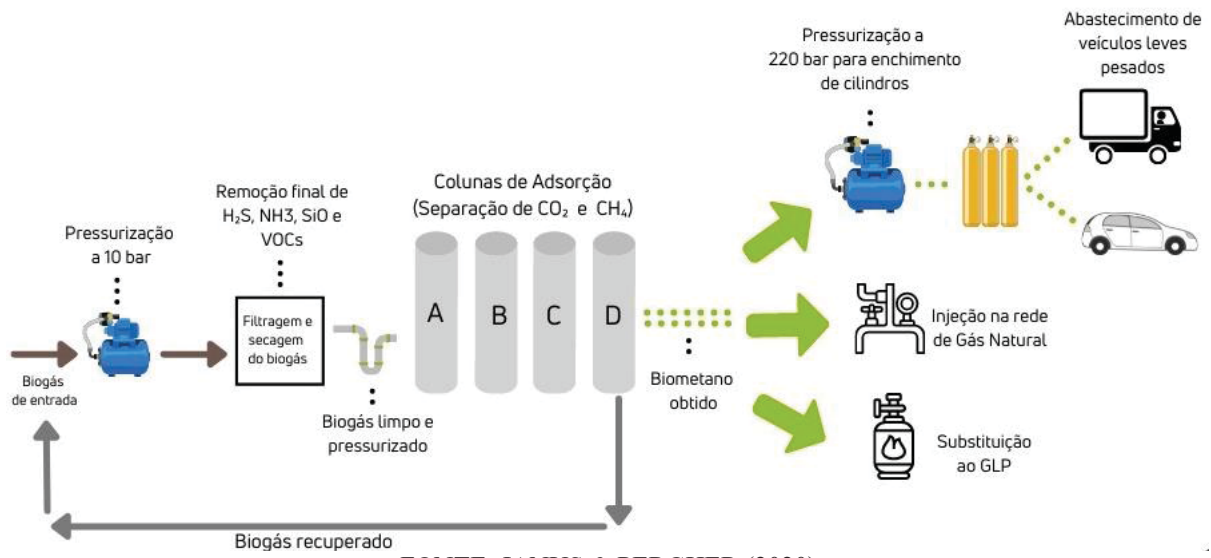
FONTE: Cibiogás (2022)

2.6 BIOMETANO

As rotas para padronização da qualidade do biogás ocorrem em duas etapas: limpeza e purificação. Garcilasso et al. (2018) esclarecem que, para a queima direta do biogás em caldeiras, motores estacionários e microturbinas com a finalidade de geração de energia elétrica e térmica, é suficiente o processo de limpeza, sendo a purificação obrigatória somente para o

biogás com pretensão de uso como biometano, cujas possibilidades de aplicação são esquematizadas na Figura 3.

FIGURA 3 – EXEMPLO DE ROTA DE PRADONIZAÇÃO DA QUALIDADE DO BIOGÁS E DESTINAÇÕES POSSÍVEIS



São as especificações da Resolução ANP nº 8/2015 (ANP, 2015) e da Resolução ANP Nº 685 de 2017 (ANP, 2017) que determinam a composição e tolerâncias do biometano para fins de comercialização, sendo a primeira referente a biogás de resíduos agrossilvopastoris e comerciais e a segunda referente a resíduos sólidos urbanos e efluentes de saneamento.

A limpeza inclui a remoção de compostos nocivos e tóxicos, tais como, umidade, H_2S , compostos orgânicos voláteis (COV), CO, NH_3 e siloxanos. Posteriormente, o *upgrading*, ou purificação, visa aumentar a concentração de metano e reduzir o teor de gás carbônico, de forma a aumentar o valor de poder calorífico e diminuir a densidade relativa, melhorando a eficiência térmica (CLEMENTINO, 2021). Lembrando que a concentração de cada um desses gases contaminantes varia de acordo com a localidade, tipo de resíduos, condições climáticas e tecnologia usada (CARVALHO et al., 2019).

O biometano deve conter pelo menos 90% de metano em sua composição e apresentar, regionalmente, a mesma faixa de poder calorífico superior, índice de Wobbe, limites de teores de enxofre e dióxido de carbono e ponto de orvalho que o requerido ao gás natural comercializado no país (ANP, 2017). A etapa de purificação também é importante para eliminar a característica corrosiva dos elementos que compõem o biogás (SILVA; MEZZARI, 2019).

2.6.1 Tecnologias de Purificação

Dentre as tecnologias existentes e comercializadas para limpeza e purificação do biogás, as principais, são: separação por membrana, absorção física (lavagem com água ou solventes), absorção química, adsorção por balanço de pressão (*Pressure Swing Adsorption* – PSA) e a separação criogênica, embora menos utilizada (GARCILASSO et al., 2018). A participação das tecnologias no mercado tem mudado ao longo do tempo, com um acentuado aumento no uso de membranas nos últimos anos (IEA, 2020, apud ASSUNÇÃO; BORSCHIVER; MENDES, 2020). No estudo de Assunção, Borschiver e Mendes (2020), demonstrou-se que a combinação de PSA com membranas tem sido destaque na produção de biometano de alta pureza, além de representar possível redução de custos de investimento.

A água é comumente o primeiro contaminante a ser removido do sistema, como forma de minimizar a corrosão de compressores e tubulações. Geralmente, os métodos de remoção de água do biogás bruto também permitem que impurezas como o material particulado e a espuma sejam eliminados. (SILVA; MEZZARI, 2019). A secagem do biogás ocorre por adsorção, absorção ou por condensação (resfriamento), sendo este último o processo de remoção mais utilizado. Na condensação, a temperatura do biogás é induzida a reduzir até um nível inferior ao ponto de orvalho, o que faz com que a umidade condense e possa ser removida (PROBIOGÁS, 2015b).

Para remoção de H₂S (dessulfurização), um dos mais antigos métodos é o de absorção química, que faz uso de soluções cáusticas. Nele, o biogás passa por uma coluna de absorção em contracorrente com a solução cáustica utilizada (geralmente hidróxido de sódio). Esse processo remove tanto o H₂S como também parte do CO₂ (FREDDO; MARTINEZ, 2019 apud GUIMARÃES et al., 2021). Para Garcilasso et al. (2018), a principal vantagem do processo de lavagem química é que a perda de metano no processo é baixa e o consumo de eletricidade também.

Quanto ao CO₂, de acordo com Carvalho et al. (2019), ele não afeta a operação dos equipamentos em si, mas reduz seu potencial calorífico por não participar da reação de combustão. O CO₂ ocupa volume, tornando sua remoção necessária na transformação do biogás em biometano. Silva e Mezzari (2019) confirmam esta afirmação e acrescentam que a remoção do CO₂ pode se dar durante ou após processos de dessulfurização, através da lavagem do gás com água e/ou reagentes químicos.

Diversos autores mencionam que a tecnologia mais amplamente utilizada em escala industrial tem sido a lavagem com água, também chamada de *water scrubbing*, que Freddo e

Martinez (2019) apud Guimarães et al. (2021) descrevem como um processo capaz de remover não só o H_2S , mas também o CO_2 presentes no gás, graças à solubilidade em água do sulfeto de hidrogênio e do dióxido de carbono ser maior que a do metano, tornando possível a separação. Entretanto, a maior desvantagem desta tecnologia é a alta demanda de água, além do fato do biometano precisar ser seco em um estágio posterior (GARCILASSO et al., 2018).

A adsorção baseia-se na retenção de CO_2 em um sólido adsorvente, como carvão ativado, zeólitos, óxido de ferro, etc, que ficam contidos em reatores (no formato de colunas) instalados em série, na linha do biogás. Após um período de utilização os materiais adsorventes ficam saturados e precisam ser substituídos ou regenerados a altas temperaturas, envolvendo custos adicionais. E isso é justamente uma das principais desvantagens da tecnologia de adsorção (SILVA; MEZZARI, 2019). A grande vantagem deste processo é que tanto N_2 quanto O_2 também são removidos do biogás, o que torna esta tecnologia interessante de ser empregada na produção de biogás advindo de gás de aterro, o qual normalmente contém estes contaminantes (GARCILASSO et al., 2018).

No processo de separação com membranas ou permeação de gases, o biogás é pressurizado e conduzido através de uma membrana, onde o metano fica retido, mas o dióxido de carbono não, por ele ter alta permeabilidade (EPE, 2018).

Já a separação criogênica é uma tecnologia ainda em desenvolvimento, que consiste na redução gradativa de temperatura até ser alcançada a temperatura de condensação do CO_2 (mais alta que a do metano), resultando na sua separação (EPE, 2018).

Para Franco et al. (2021), alguns aspectos atrativos das tecnologias de purificação merecem ser mencionados, como a operação em temperatura ambiente proporcionada pela separação por membranas; a economia de biogás alcançada com a tecnologia criogênica; a baixa necessidade de investimento em infraestrutura requerida no processo de lavagem com água; e a interessante retenção de umidade e simples operação no processo de adsorção.

Contudo, o resíduo de saída do processo de purificação do biogás (para obtenção do biometano) via tecnologia de membranas ainda apresenta resquícios de metano, o que salienta a necessidade de aperfeiçoamento do processo. A tecnologia criogênica utiliza turbinas e compressores que demandam alto consumo de energia elétrica. O processo de adsorção requer alta pressão e temperatura, mostrando-se mais caro (FRANCO et al., 2021).

SUN et al., 2015 (apud Assunção, Borschiver e Mendes, 2020) afirmam que os processos que requerem maiores consumos de energia elétrica no processamento são a separação por membrana e a separação criogênica. A separação criogênica, em específico, ainda não é a mais adequada para pequenas aplicações de até $50 \text{ m}^3/\text{h}$.

Estimativas referentes ao nível de pureza alcançado e às possíveis perdas de metano nos processos mencionados anteriormente podem ser verificadas na Tabela 2. Por meio dela, nota-se que todos os processos podem atingir eficiências acima de 90%. Cada tecnologia apresenta vantagens e desvantagens específicas e deve ser selecionada de acordo com a finalidade pretendida.

TABELA 2 – NÍVEL DE PUREZA E EMISSÕES DE METANO POR TIPO DE PURIFICAÇÃO

Processos	Concentração de CH₄ (%)	Perdas de CH₄ (%)
Lavagem com água	> 96%	1 – 2 %
Lavagem com solvente	96 – 98	< 2
Lavagem química	99,5 - 99,9	< 0,1
PSA	96 – 98	2 – 4
Separação por membranas	96 – 98	< 1
Criogenia	99	0,1 – 1

FONTE: adaptado de Guerreiro (2020)

Uma característica comum nesses métodos físico/químicos é que o CO₂ é simplesmente removido do biogás. Rendimentos mais altos de biometano podem ser obtidos através de processos que reciclam o CO₂ em CH₄, como no caso dos processos biológicos. Eles são considerados mais ambientalmente adequados, em termos de consumo de energia e de produtos químicos, e estão ganhando notoriedade.

2.6.2 Custos Envolvidos na Purificação

O custo de purificação é o que possui o maior impacto no custo de produção do biometano, correspondendo entre 37% e 47% do custo total, para usinas de pequeno porte (100-500 m³/hora), e entre 27% e 30%, para usinas de grande porte (1.000-2.000 m³/hora) (IRENA, 2013). Isso indica que o custo de purificação do biogás tem forte ligação com a capacidade instalada da usina, ou seja, há ganhos de escala com usinas maiores. O mesmo raciocínio é válido para o biometano advindo de usinas instaladas em aterros sanitários.

O custo da produção de biometano pode variar significativamente dependendo também do substrato (CLEMENTINO, 2021), sendo que os resíduos alimentares demonstraram ser os substratos mais econômicos na pesquisa realizada por Martín-Hernández, Guerras e Martíns (2020).

O CAPEX (*Capital Expenditure*), traduzido como Despesas de Capital, inclui o custo dos ativos físicos, equipamentos, planta industrial e tecnologia. Os custos totais de produção também incluem a compra e o transporte de matéria-prima, a produção de biogás, e,

dependendo da finalidade do uso do biometano, a conexão à rede ou compressão do gás, para transporte de biometano por caminhões feixe (ZHENG et al., 2020 apud ASSUNÇÃO, BORSCHIVER E MENDES, 2020).

EPE (2018) aponta custos aproximados de R\$ 238,00 por metro cúbico de biogás para plantas grandes (com capacidade acima de 50 mil m³/dia), especificamente para a parcela do CAPEX referente ao tratamento e conversão em biometano. Para plantas menores, com capacidade diária de 19 mil metros cúbicos, os custos de investimento da conversão em biometano são na ordem de R\$ 426,00 por metro cúbico de capacidade diária (baseado no Euro = 4,19 reais). Com isto, corrobora-se para o efeito de economia de escala.

O OPEX (*Operational Expenditure*), traduzido como despesas de operação, englobam mão-de-obra, manutenção e variam de acordo com o consumo de produtos químicos, calor, eletricidade, água (RYCKEBOSCH et al., 2011 apud ASSUNÇÃO; BORSCHIVER; MENDES, 2020).

Um projeto da *Severn Wye Energy Agency* (2013) apud Garcilasso et al. (2018) utilizou um software de cálculo de biometano para estimar custos específicos referentes a OPEX, para diferentes tecnologias de purificação, conforme ilustrado na Tabela 3.

TABELA 3 - INVESTIMENTOS E CUSTOS OPERACIONAIS PARA PROCESSOS DE *UPGRADING*

Vazão de biometano (m ³ /h)	Lavagem com água (US\$)	Lavagem física com solvente (US\$)	Amina (US\$)	PSA (US\$)	Membrana (US\$)
	Investimento típico				
100	11.850	11.140	11.140	12.200	8.650-8.910
250	6.450	5.860	5.860	6.330	5.512-5.746
500	4.100	4.100	4.100	4.340	4.100-4.340
	Custo operacional típico				
100	16,42	16,20	16,90	15,00	12,70-18,53
250	12,00	12,00	14,10	11,90	9,00-13,61
500	10,70	12,00	13,10	10,80	7,62-11,85

FONTE: Serven Wye (2013) apud Garcilasso et al. (2018)

2.6.3 Análise do Ciclo de Vida do Biometano

A análise do ciclo de vida (ACV) é definida por Romanelli (2021) como um método para a avaliação dos sistemas de produção (ou serviços) que vincula os aspectos ambientais e seus impactos desde o início da “vida” do produto (a extração das matérias-primas) até o final (quando o produto é descartado por não ser mais útil), abrangendo também todas as etapas

intermediárias (manufatura, transporte, uso). O autor também salienta que a ACV é regulamentada por normas internacionais como a série ISO 14.040 de Gestão ambiental.

Machado et al. (2020a) em uma revisão de 45 artigos científicos que tratam sobre as emissões totais no ciclo de vida de diferentes opções de combustíveis para transporte rodoviário de carga, observou que o biogás tem 100% de chance de reduzir as emissões de GEE, em comparação ao diesel. Da mesma forma, um estudo de Lyng e Brekke (2019) voltado para o abastecimento de ônibus indicou que o diesel é a pior opção em termos de potencial de destruição da camada de ozônio. As emissões menos impactantes na categoria aquecimento global foram os combustíveis elétricos a partir de energia hidrelétrica; óleo vegetal hidratado (*Hydrotreated Vegetable Oil - HVO*), produzida a partir de óleo de cozinha residual; e biometano. Os resultados mostram também que o biometano tem impacto baixo em todas as categorias utilizadas para análise do seu ciclo de vida, sendo que os impactos ambientais do biometano obtido através da biomassa de esterco foram superiores aos do biometano de resíduos alimentares.

Veículos com emissões inexistentes são uma utopia, pois as emissões ocorrem em diferentes etapas do ciclo de vida dos combustíveis, alguns emitem mais na produção e outros no momento da condução (LYNG; BREKKE, 2019). No caso das emissões de metano relativas ao biogás e biometano, é fundamental o monitoramento contínuo da cadeia de suprimentos, para detecção e reparo de vazamentos.

Para Lorenzi et al. (2018), um fator determinante para que os benefícios do biometano não sejam diluídos na substituição ao diesel é o teor de carbono da fonte de eletricidade utilizada para abastecimento das plantas. Estas devem, preferencialmente, ser autossuficientes em energia.

2.6.4 Caminhões a Gás

O transporte é provavelmente o setor mais relevante para o biometano, pois é o menos descarbonizado e requer o menor incentivo por tonelada de CO₂ evitado, mais especificamente 115 Euros/tCO₂ evitado em relação ao biometano como combustível substituto do diesel (RAJENDRAN; O'GALLACHOIR; MURPHY, 2019)

No caso do gás natural veicular (GNV), por também se tratar de um combustível fóssil, ele praticamente não reduz as emissões de GEE, embora provoque uma emissão menor de material particulado quando comparado ao diesel (MACHADO et al., 2020a). Isso, associado

a um preço mais atrativo que o diesel e a um mercado mais estruturado que o do biometano tem feito do GNV um combustível de transição até o biometano.

Contudo, nem o GNV nem o biometano têm as propriedades necessárias para serem utilizados nos motores de ciclo Diesel, sendo a conversão desses motores uma alternativa viável, apesar de complexa e custosa quando comparada a dos veículos leves. No estudo de Oliveira et al. (2022), é abordado que a conversão pode ocorrer por meio das seguintes técnicas: i) ottonização, na qual o motor veicular é integralmente adaptado para uso exclusivo com GNV ou biometano, mas tende a perder potência por conta das alterações significativas necessárias no motor original, ii) dual-fuel, que permite operação do motor apenas com diesel ou com uma mistura de diesel e combustível gasoso. Esta não é a opção ambientalmente mais adequada, porque o motor não pode operar exclusivamente com gás, mas, proporciona autonomia para o condutor do veículo ir aonde não existe abastecimento de gás disponível.

Já o motor ciclo Otto dedicado, ou seja, sem adaptações, projetado e fabricado intencionalmente para operar com gás, geralmente é aplicado em veículos pesados, como caminhões e ônibus, substituindo totalmente o motor a diesel. Fazendo um comparativo com os caminhões movidos a diesel, os seguintes aspectos positivos dos caminhões a biometano, com motor ciclo Otto dedicado, merecem destaque: i) não há perda de performance; ii) o torque é satisfatório, algo importante na coleta de resíduos, que demanda diversas partidas rápidas em trajetos reduzidos; iii) emitem até 90% menos CO₂; iv) são 20% menos ruidosos; v) proporcionam economia em torno de 17% no custo operacional; vi) atendem à norma europeia Euro 6; vii) têm sistema anti explosão (JORNADA, 2020; SCANIA, 2020).

Madhusudhanan et al. (2020) relatam que, considerando somente custos de combustível e capital, o *payback* de caminhões a biometano ocorre em torno de 2 anos. Em contrapartida, os caminhões com motor do ciclo Otto dedicado têm um preço de venda cerca de 30% superior aos caminhões das versões com motor do ciclo diesel. O quesito autonomia também é inferior, pois como o gás tem uma densidade energética menor, ele ocupa mais volume no caminhão, o que requer maior frequência de reabastecimento (ESTADÃO, 2022).

Na atualidade, já existem algumas iniciativas estabelecidas no setor de transportes de veículos movidos a gás, como a empresa New Holland, com o lançamento do trator agrícola T6; a Scania, com a linha de caminhões pesados (como o da FIGURA 4) e ônibus; e a IVECO com o caminhão pesado Hi-way. A empresa MWM também tem oferecido serviço de conversão de caminhões a diesel, para operarem com motores a biometano.

FIGURA 4 – CAMINHÃO COMPACTADOR DE RESÍDUOS MOVIDO A GÁS



FONTE: a autora

2.6.5 Realidade do Biometano no Brasil

No Brasil, desde a década de 1980, há a tentativa de se estimular o uso de gás no setor de transporte. Entretanto, ainda hoje, esse tipo de combustível é subaproveitado (MACHADO et al., 2020b). Conforme salientado por Franco et al. (2021), no caso do biometano, ele tem potencial para absorver grande parte da demanda de combustível do transporte rodoviário, assim como do hidrovial também. E no setor industrial ele pode ser utilizado em empilhadeiras e outros equipamentos, mediante pequenas adaptações.

Estima-se que o Brasil desperdiça, anualmente, mais de 45 bilhões de metros cúbicos de biometano, o que seria suficiente para substituir 70% do consumo atual de diesel no país (ABILOGÁS, 2021). Machado et al. (2020b) explicam que uma das razões para esta deficiência consiste na falta do desenvolvimento de políticas públicas, regulamentações e de incentivo ao uso de biometano, mecanismos estes que fortalecem o mercado e, conseqüentemente, atraem investidores.

Para Abiogás (2021), o impacto mais relevante ao meio ambiente causado pelo biogás e pelo biometano é o fato de sua aplicação demandar sistemas de gestão eficientes de rejeitos, o que tende a beneficiar o processamento de resíduos como um todo.

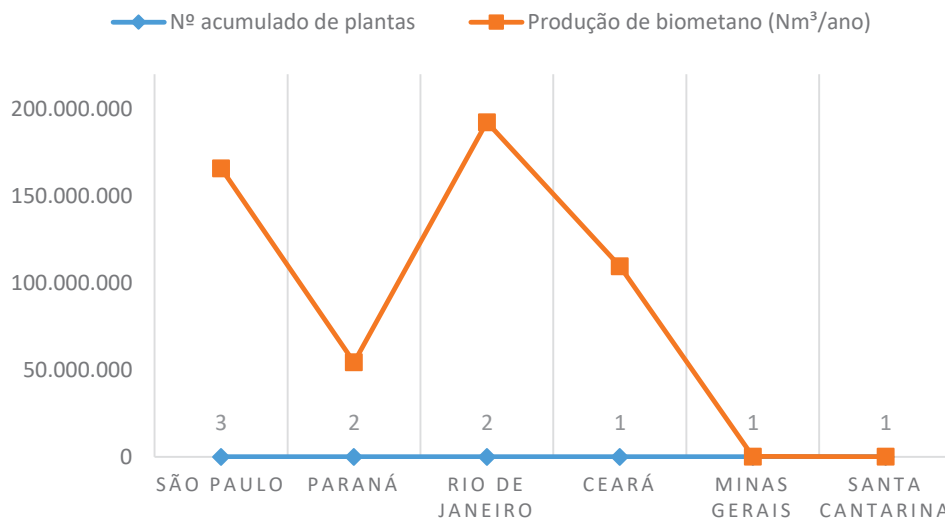
Uma reflexão válida para a dificuldade de inserção ampliada do biometano, e de outras fontes renováveis, em detrimento ao uso dos combustíveis fósseis, é que as tecnologias de energia renovável devem competir no curto prazo com fontes fósseis estabelecidas. Isso não é

uma competição justa, pois a fonte fóssil existe em abundância e seu processamento foi otimizado ao longo de gerações, mas os fósseis liberam CO₂, sendo o diesel uma das principais fontes de deterioração da qualidade do ar (EPA, 2015 apud RAJENDRAN; O'GALLACHOIR, MURPHY, 2019, p. 279).

De acordo com a Cibiogás (2022), apenas 10 plantas de biometano estão em operação no Brasil, as quais, juntas, produzem anualmente 522,17 milhões de m³ de biometano. 6 delas têm biomassa proveniente do setor de saneamento (4 autorizadas pela ANP a produzir e comercializar biometano), com produção correspondente a 83% do total produzido no país.

Maiores detalhes sobre a produção brasileira de biometano constam no Gráfico 3, pelo qual se percebe que Rio de Janeiro e São Paulo lideram, com 192.368.007 e 165.812.500 de m³ produzidos por ano, respectivamente.

GRÁFICO 3 – NÚMERO DE PLANTAS DE BIOMETANO POR ESTADO E QUANTIDADE DE PRODUÇÃO



FONTE: adaptado de BiogasMap (2022)

De acordo com a ANP, a instalação GNR Fortaleza é a única produtora de biometano do Brasil com permissão para injetar biometano em rede de distribuição de gás natural, podendo abastecer indústrias, postos de GNV, residências e estabelecimentos comerciais (GUERREIRO, 2020). O autor esclarece que as diferentes legislações estaduais em vigor no país conferem um impedimento ao produtor de biometano que tenha interesse em fazer injeção na rede de distribuição de gás natural, uma vez que algumas companhias estaduais de gás possuem o direito exclusivo de exploração e distribuição de gás canalizado.

As vantagens de injetar biometano na rede de distribuição de gás natural (procedimento já amadurecido em outros países) incluem o transporte a longas distâncias a

custos mais baixos, o uso direto por usuários em quaisquer localidades com a rede disponível, o fornecimento de gás em postos de serviço para o abastecimento de veículos a gás natural, etc. (FIEP; SENAI, 2016).

No Brasil, a infraestrutura de gás natural ainda é precária, contando com reduzido número de postos de abastecimento. O sistema de distribuição por gasodutos tem 9.409 km de extensão (EPE, 2020) e contempla mais a área litorânea, o que é considerado uma barreira para sua disseminação. Contudo, mesmo sem um sistema completo de gasodutos, o biometano pode ser transportado através de caminhões, da mesma forma que o gás natural comprimido (GNC) e o gás natural liquefeito (GNL), desde que seja odorado em conformidade com a resolução ANP N° 685 de 29/06/2017, para que seja sentido pelo olfato em caso de vazamento (BRASIL, 2017). Isso caracteriza uma alternativa interessante para a geração descentralizada do biometano no país, fazendo com que tal recurso seja disponibilizado em lugares sem infraestrutura de recebimento por gasoduto (MULLER, 2018).

De acordo com Muller (2018), considerando o alto custo da construção de tubulações de longas distâncias e a atrelagem ao interesse do governo, o transporte de biometano em caminhões feixe se mostra uma alternativa viável, desde que não ultrapasse um raio de atuação de até 150 km de distância. Essa alternativa poderia ser otimizada com o próprio caminhão sendo movido a biometano.

Outras barreiras encontradas na literatura para disseminação do biometano no país são: i) custos elevados para instalação de uma usina de produção e purificação do biogás, bem como para contratação de mão de obra qualificada; ii) falta de segurança nas estruturas regulatórias, não gerando confiança para novos investidores apostarem no setor; iii) falta de apoio político para implantação dos projetos vinculados ao biometano; iv) dificuldade em obtenção de financiamentos ou, até mesmo, precariedade em políticas de incentivo ao seu uso (FRANCO et al., 2021), pontos que devem ser solucionados com o Programa Nacional Metano Zero. O preço do biometano no mercado e a disponibilidade de crédito para adequação ou renovação das frotas também têm forte influência na sua disseminação (EPE, 2018).

A Alemanha é um exemplo notório de política governamental positiva ao uso do biogás e do biometano, que se sucedeu da seguinte maneira: aplicação de um forte subsídio em uma fase inicial, forçando o mercado a se adaptar, e, aos poucos, remoção do subsídio até o ponto no qual um mercado autossustentável esteja estruturado. Essa estratégia permitiu, inclusive, que a indústria alemã de biogás gere receitas por meio de transferência de tecnologia e consultoria de serviços para outros países (RAJENDRAN; O'GALLACHOIR; MURPHY,

2019). Além disso, a Alemanha exporta parte do excedente produzido para países como Holanda e Suíça (GHAIB, 2017 apud FRANCO et al. 2021).

O número de usinas de biometano na Europa aumentou em 51% entre 2018 e 2020, quando 729 plantas foram contabilizadas. A Alemanha é a maior detentora de usinas de biometano, seguida da França e do Reino Unido (EBA, 2020). Em contrapartida, Statista (2022c) apud Awogbemi e Kallon (2022) apontam que a região da Ásia e Oceania apresentam o maior potencial para produção futura de biometano, seguida pelos Estados Unidos, Canadá e América Latina.

Em média, a participação do biometano veicular na Europa é de cerca de 17%. No caso da Alemanha, apenas 1,4% do biometano é usado em aplicações de transporte, ao contrário da Suécia, que usa 97% de seu biometano em aplicações de transporte. Uma possível razão para isso é que a eletricidade e o aquecimento na Suécia já usam uma grande parcela de energias renováveis enquanto o setor de transporte não, semelhantemente ao que ocorre no Brasil (AGGARANGSI et al., 2022)

3 METODOLOGIA

3.1 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Considerou-se para este estudo as seguintes capacidades disponíveis de aterros sanitários: 100mil, 500mil, 1 milhão e 2 milhões de habitantes, ficando pré-estabelecido que todos têm 10% a mais de capacidade instalada, uma vez que a produção de resíduos a serem descartados têm ritmo crescente.

A escolha das capacidades foi feita com base no IBGE (2021) que, para o ano de 2021, indicou que mais da metade da população brasileira (57,7%) se concentra em municípios com mais de 100 mil habitantes, sendo 25,8% da população distribuída em municípios com 100 a 500 mil habitantes, 10% em municípios com 500 a 1 milhão de habitantes e 21,9% em municípios com mais de 1 milhão de habitantes. Além do mais, a Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2019) enfatiza que, para a implantação de aterros sanitários em municípios com menos de 100 mil habitantes, é indispensável a adoção de consórcios, devido aos altos custos atrelados. Logo, como a presente pesquisa não pretende contemplar tal particularidade, debruçou-se sobre o estudo dos municípios com população a partir de 100 mil habitantes.

Os cálculos para quantificação do biometano e os cálculos adicionais necessários até a viabilidade econômica foram realizados para cada população, considerando um horizonte temporal de 15 anos, que é o tempo mínimo de vida útil de aterros sanitários.

Há variados modelos de caminhões compactadores de carga traseira disponíveis no mercado brasileiro, porém, atualmente, somente um é fabricado com motor ciclo Otto dedicado. Trata-se do modelo P280 4x2 (toco) abastecido a gás. Por ser uma exclusividade no ramo da coleta de resíduos no Brasil, ele foi o modelo escolhido para nortear os cálculos.

O meio de transporte do biometano foi delimitado pela opção de enchimento de cilindros pressurizados, ao invés da opção de injeção na rede de distribuição de gás natural, afinal, a pesquisa pretende simular a operação de aterros sanitários em qualquer região brasileira, não cabendo estudar a opção de injeção em gasodutos, visto que estes têm disponibilidade geográfica restrita.

Para veículos pesados, Franca e Ferreira (2020) sugerem que seja adotado o rendimento do biometano igual a 2,02 km/m³, mas quando se trata de caminhões coletores de lixo esse rendimento é inferior, independentemente do tipo de combustível, por conta das peculiaridades da operação já mencionadas anteriormente. Assumiram-se duas hipóteses para a variável rendimento do caminhão coletor compactador de resíduos: i) uma baseada na experiência do

primeiro cliente a adquirir o equipamento foco dessa pesquisa (nome confidencial); ii) a outra baseada no projeto e expectativas do fabricante Scania (2023). Para a primeira hipótese, 1,05 km/m³ e 1,15 km/L foram os valores adotados de biometano e de diesel. Para a segunda hipótese, adotou-se os rendimentos de 1,85 km/m³ e 2,30 km/L. Logo, para a hipótese 1, o consumo de biometano adotado foi de 0,95 m³/km e o de diesel 0,87 L/km. Para a hipótese 2, o consumo de biometano adotado foi de 0,54 m³/km e o de diesel 0,44 L/km.

A distância total média percorrida por dia foi simulada matematicamente para ambas as hipóteses.

3.2 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

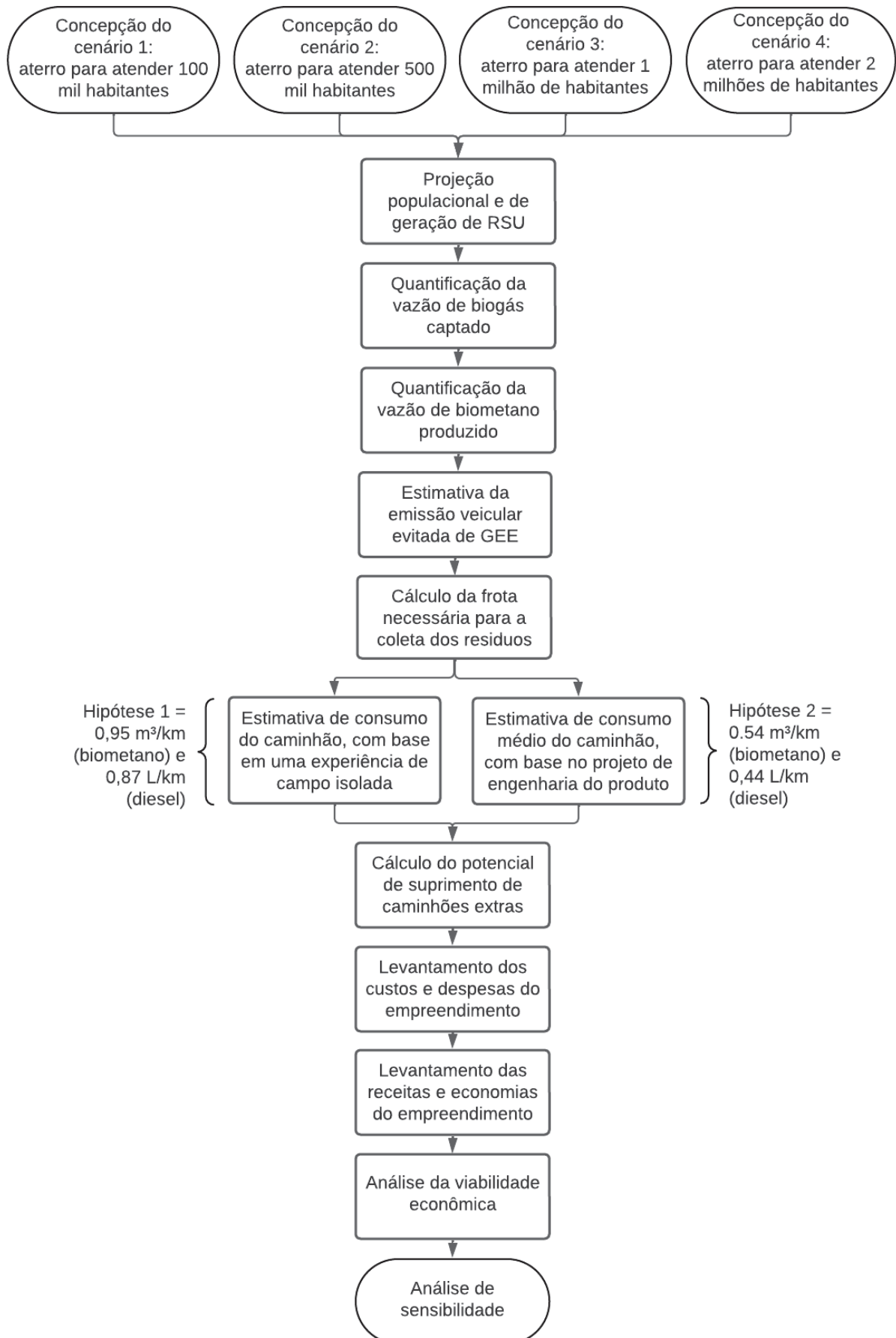
As evidências do presente estudo contemplam a revisão bibliográfica, as cotações virtuais concedidas pelo sócio-diretor de uma empresa especialista em purificação de biogás (JANUS & PERGHER, 2023), a aplicação de questionário semiestruturado com o gestor de frota responsável pelo acompanhamento em campo de um caminhão do mesmo modelo escolhido para este estudo (nome confidencial), bem como contato via e-mail com a equipe comercial do fabricante do chassi (SCANIA, 2023) e via aplicativo WhatsApp com o Engenheiro que projetou o implemento compactador (USIMECA, 2023), para obtenção de dados adicionais.

A organização dos dados, aplicação das equações apresentadas na revisão bibliográfica, análises quantitativas e criação de gráficos foram realizadas por meio do programa Microsoft Excel.

3.3 ESTRUTURA METODOLÓGICA

O passo a passo seguido para o desenvolvimento da pesquisa está exemplificado no fluxograma da Figura 5.

FIGURA 5 – Fluxograma metodológico



FONTE: a autora

3.4 PROJEÇÃO POPULACIONAL

Adotou-se a taxa anual de crescimento da população brasileira igual a 0,5%, conforme consta em World Bank (2021). O cálculo da projeção populacional é apresentado na Equação 1.

$$P_n = P_0 \cdot e^{r \cdot n} \quad (1)$$

Onde:

P_n : população prevista para um determinado ano;

P_0 : população atual;

r : taxa anual de crescimento da população;

n : número de anos de extrapolação.

3.5 QUANTIFICAÇÃO DE GÁS

Para o cálculo de quantificação de metano gerado em aterros sanitários, optou-se por seguir o modelo cinético proposto pelo IPCC (1996), pelo fato dele considerar as especificidades do resíduo, além de projetar a emissão para as mais diferentes condições de resíduos depositados (LYRA et al., 2018).

O potencial de geração de metano dos resíduos depositados em aterros sanitários é calculado pela Equação 2.

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot COD_f \cdot FCH_4 \text{biogás} \cdot 16/12 \quad (2)$$

Onde:

L_0 : potencial de geração de metano dos resíduos ($m^3 \cdot t_{RSD}^{-1}$).

FCM: fator de correção de metano (%)

COD: fração de carbono orgânico degradável no lixo ($kg_C \cdot kg_{RSD}^{-1}$)

COD_f : fração do carbono orgânico que pode se decompor ($kg_C \cdot kg_{RSD}^{-1}$)

$FCH_4 \text{biogás}$: fração de metano no biogás (%)

16/12: relação de massas atômicas na conversão de carbono (C) para metano (CH_4).

A unidade do L_0 na equação acima será dada em kg_{CH_4}/kg_{RSD} . Para transformá-la em $m^3 \cdot t_{RSD}^{-1}$, deve-se dividir o valor de L_0 por $0,0007168 \text{ t/m}^3$ (densidade do metano).

O IPCC propõe alguns valores padrões de parâmetro para o método. A partir disso, considerou-se para este estudo que $FCM = 1$ (para aterro bem gerenciado); e $FCH_4\text{biogás} = 50\%$.

Para encontrar o valor da fração de carbono orgânico no lixo, utiliza-se a composição gravimétrica dos resíduos exposta na Equação 3 a seguir:

$$COD = (0,4.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,4.D) + (0,3.E) \quad (3)$$

Onde:

COD: fração de carbono orgânico do lixo (%)

A: fração de papel e papelão no lixo (%)

B: fração de resíduos de parques e jardins no lixo (%)

C: fração de restos de alimentos no lixo (%)

D: fração de tecidos no lixo (%)

E: fração de madeira no lixo (%)

Como a composição gravimétrica dos resíduos não é conhecida, adotou-se os dados fornecidos pelo IPCC (2019) para a América do Sul, já que estes incluem o Brasil, conforme Tabela 4. Esta composição foi considerada constante ao longo do período de estudo de 15 anos.

TABELA 4 - Composição gravimétrica de RSU – região da América do Sul

Resíduos de alimentos (%)	Resíduos de jardim (%)	Resíduos de papel (%)	Resíduos de madeira (%)	Resíduos de tecido (%)
54,1	3,3	12,4	0	1,7

FONTE: IPCC (2019)

A fração de carbono orgânico do lixo que pode se decompor de forma anaeróbia considera, entre outros fatores, a temperatura, o pH, a umidade e a composição dos resíduos na zona de degradação anaeróbia e é obtida pela Equação 4.

$$COD_f = 0,014.T + 0,28 \quad (4)$$

Onde:

T: temperatura na zona anaeróbia dos resíduos (35°C).

Finalmente, na Equação 5, consta o cálculo da quantidade de metano gerado, mediante consideração de cada ano de operação do aterro, uma vez que a vazão de gás em aterros a partir da digestão anaeróbia varia ao longo dos anos.

$$PCH_4aterro = K.Rx.L0(1-e^{-k.t}) \quad (5)$$

Onde:

$PCH_4aterro$: potencial de geração de metano do aterro ($m^3.ano^{-1}$)

K: constante de decaimento (0,115 para clima tropical – resíduo úmido)

Rx: fluxo de resíduo em aterro por ano (t_{RSD})

L0: potencial de geração de metano ($m^3.t_{RSD}^{-1}$)

t: ano de deposição dos resíduos no aterro (início de operação)

Para estimar o fluxo de resíduos anual aportado nos aterros foi utilizada a Equação 6 abaixo.

$$Rx = \left[\frac{(RSUd). (Pn). (dias no ano). (% aterro)}{1000} \right] \quad (6)$$

Onde:

RSUd: resíduos sólidos gerados por habitante por dia (kg_{RSD})

% aterro: porcentagem de resíduos destinados ao aterro

Considerou-se que todo resíduo coletado segue para aterro sanitário, ou seja, de forma simplificada, % aterro = 0,92 e que RSUd = 1 (ABRELPE, 2021).

O potencial de produção de biogás e de biometano em aterro obedece às Equações 7 e 8, respectivamente:

$$P_{biogás} = \frac{PCH_4aterro}{FCH_4biogás} \quad (7)$$

$$P_{biometano} = \frac{PCH_4aterro}{FCH_4biometano} \quad (8)$$

Onde:

$FCH_4biogás$: fração de metano no biogás (%)

$FCH_4biometano$: fração de metano no biometano (%)

Pbiogás: potencial de produção de biogás de aterro ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

Pbiometano: potencial de produção de biometano de aterro ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

Para este estudo, optou-se pela seguinte estimativa conservadora, baseada em Janus & Pergher (2023): $\text{FCH}_4\text{biometano} = 95\%$.

3.5.1 Índice de Recuperação de Biogás

Do volume total de biogás gerado nos aterros sanitários, apenas uma parte consegue ser captada e canalizada para aproveitamento, conforme visto na revisão de literatura da presente pesquisa. Considerou-se uma eficiência de 75% de coleta de biogás de aterro, seguindo a sugestão de CETESB (2006).

Então, a Equação 9 deve ser utilizada para obter a quantidade de biogás efetivamente coletada por meio de aterros sanitários

$$\text{IRBG} = \text{Pbiogás} \cdot \text{ECbg} \quad (9)$$

Onde:

IRBG: índice de recuperação de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

ECbg: eficiência de coleta de biogás (%)

3.5.2 Índice de Recuperação de Biometano

Do volume total de biogás efetivamente captado nos aterros sanitários, apenas uma parte consegue ser purificada em biometano. Considerou-se uma eficiência de 85% de purificação de biogás de aterro, tendo como parâmetro a experiência de Janus e Pergher (2023).

Então, utiliza-se a Equação 10 para obter a quantidade de biometano captado por meio de aterros sanitários, considerando as perdas do processo.

$$\text{IRBM} = \text{IRBG} \cdot \text{ECbm} \quad (10)$$

Onde:

IRBM: índice de recuperação de biometano ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)

ECbm: eficiência de coleta de biometano (%)

3.6 EMISSÕES EVITADAS DE GEE

Com base nas recomendações do IPCC (1996), as emissões de GEE são calculadas por meio das Equações 11 e 12.

$$E_{geeD} = QD.FE \quad (11)$$

$$E_{geeB} = QB.FE \quad (12)$$

Onde:

E_{geeD} : emissão de GEE pelo diesel (gCO₂eq)

E_{geeB} : emissão de GEE pelo biometano (gCO₂eq)

QB: quantidade de biometano consumido (MJ)

QD: quantidade de diesel consumido (MJ)

FE: fator de emissão (gCO₂eq/MJ)

Pelo Relatório publicado pela ICCT (2021), o fator de emissão médio do biometano é - 30 gCO₂eq/MJ, enquanto que para o óleo diesel o fator de emissão é de 95,1 gCO₂eq/MJ (MELLIOS, G., GOULIAROU, E; 2020)

Para verificar o quanto se deixa de emitir com a utilização do biometano para abastecimento veicular em substituição ao óleo diesel, em um primeiro momento, é necessário calcular a equivalência energética entre estes dois combustíveis, ou seja, o quanto de óleo diesel é correspondente ao volume gerado de biometano. Para isso, a ABiogás (c2013) explica que cada litro de diesel equivale a 1,08 m³ de biometano. Para calcular o volume de biometano necessário para substituir o consumo de diesel basta multiplicar o consumo de diesel por esse fator de conversão.

Obtendo o valor correspondente de óleo diesel em litro, é necessário obter os valores de biometano e de diesel em MJ. Para isso, multiplica-se o volume de combustível pelo seu PCS. Logo, a quantidade de combustível em MJ é expressa pela Equação 13, de Silva et al. (2022):

$$Q_{combustível}(MJ) = V_{combustível}.PCS.4,1868 \left(\frac{KJ}{Kcal} \right).1000 \left(\frac{mega}{kg} \right) \quad (13)$$

Onde:

$V_{combustível}$: volume de combustível

PCS: Poder Calorífico Superior

Para o PCS do óleo diesel e do Biometano, os valores considerados foram 9.159 Kcal/l (COPERGÁS, c2022) e 8.555 Kcal/m³ (ARSESP, 2016).

Então, de posse dos valores de emissão de GEEs para os combustíveis em análise, a quantidade de emissões de GEEs evitadas é igual a diferença entre a emissão provocada pelo óleo diesel e a provocada pelo biometano, como na Equação 14.

$$E_{geeT} = E_{geeD} - E_{geeB} \quad (14)$$

Onde:

E_{geeT} : emissão total de GEE (tCO_{2eq}).

Nesta equação, a unidade de E_{geeT} é dada em gCO_{2eq}, para transformá-la em tCO_{2eq} basta dividir o resultado por 1.000.000.

3.7 AUTONOMIA VEICULAR DO BIOMETANO

Há 3 etapas a serem seguidas na coleta de resíduos, conforme comenta Ribeiro (2017), que são: i) o equipamento se desloca da garagem para o setor de coleta em um determinado "TDesloc1"; ii) o equipamento realiza o percurso completo de coleta estipulado em um determinado TColeta"; iii) o equipamento chega completamente carregado no aterro sanitário e retorna para área de coleta ou para a garagem, em um determinado "TDesloc2".

Dessa forma, cada um desses tempos pode ser expresso pelas Equações 15, 16 e 17.

$$T_{Desloc1} = \frac{2 \cdot Dg}{Vt} \quad (15)$$

$$T_{Coleta} = \frac{L}{Vc} \quad (16)$$

$$T_{Desloc2} = 2 \cdot \frac{Dd}{Vt} \quad (17)$$

Onde:

Dg: distância a ser percorrida da garagem ao setor de coleta (km)

Vt: velocidade média do equipamento nas vias (km/h)

L: comprimento do percurso completo de coleta (km)

Vc: velocidade média do equipamento coletando os RSU nas vias (km/h)

Dd: distância entre a área de coleta e a área de despejo dos resíduos (km)

Por sua vez, o tempo total de coleta pode ser definido como na Equação 18.

$$T_{total} = T_{Desloc1} + T_{Coleta} + (T_{Desloc2}) \cdot Qvg \quad (18)$$

Onde:

Qvg: quantidade de vezes que cada equipamento precisa ir à área de rejeição, ou seja, a razão entre a quantidade de lixo a ser coletada e a capacidade do equipamento.

Neste trabalho, considerou-se que cada equipamento opera em 2 turnos por dia e realiza 2 viagens por jornada de trabalho, ou seja, 4 viagens por dia, seguindo as observações de Pinheiro e Ferreira (2017).

Os parâmetros de velocidade Vc e Vt foram baseados em TCM-GO (2016) e Ribeiro (2017).

Como a quilometragem percorrida diariamente por um caminhão depende fortemente das rotas programadas pelas empresas de coleta e das distâncias espaciais do município em questão, foi necessário realizar estimativas por meio de manipulações matemáticas para conseguir contabilizá-la.

Primeiramente, assumiu-se Dg igual a 5km (RIBEIRO, 2017) e Dd igual a 12,5km, que é o valor médio entre as distâncias mínima (5km) e máxima (20km) do centro gerador de resíduo até o aterro sanitário, especificadas em IMASUL (2016).

Então, dividindo o tempo total de coleta por uma jornada de trabalho diária e fixando em L o número de frota necessário para realizar a tarefa, é possível descobrir a incógnita faltante “L”, como exibido na Equação 19.

$$L = Vc \cdot (J - 2 \cdot \frac{Dg}{Vt} - 2 \cdot \frac{Dd}{Vt} \cdot Qvg) \quad (19)$$

Onde:

J: duração útil da jornada de trabalho (h/turno)

Para uma jornada de 44 horas semanais, adota-se 7,33 h/turno, ou seja, a fração da jornada para 6 dias, que é a quantidade semanal de dias de coleta (PINHEIRO E FERREIRA, 2017).

Também é necessário conhecer o volume total de resíduos que deve ser coletado diariamente no município, o que é possível por meio de adaptações à Equação 6, seguido da divisão pelo peso específico do lixo compactado no Brasil, que, de acordo com Ribeiro (2017), corresponde à razão entre a massa do lixo solto e o volume que o lixo ocupa. Esta característica é imprescindível no dimensionamento de equipamentos. O autor sugere o valor de 600 kg/m³ (200 kg/m³ para o lixo solto, com taxa de compactação de 3 para 1). Isso resulta na Equação 20.

$$Ry = \frac{\left(\frac{Rx \cdot 1000}{365}\right)}{600} \quad (20)$$

Onde:

Ry: volume diário de resíduo em aterro (m³/dia)

Ciente do alto investimento para compor uma frota de caminhões a gás, buscou-se otimizar a utilização deles e, por isso, a frequência de coleta foi considerada diária, o que significa que não ocorre armazenamento de lixo por parte do contribuinte.

A Equação 21 expressa a quantidade total de viagens necessárias por jornada de trabalho.

$$QTvg = \frac{Ry}{\frac{C}{2}} \quad (21)$$

Onde:

QTvg: quantidade total de viagens até a área de rejeição;

C: capacidade do caminhão (m³)

Para o caminhão toco (foco desse estudo), a capacidade de carga é equivalente a 15 m³, de acordo com informações da empresa USIMECA Usina Mecânica S/A (USIMECA). Porém, considera-se que a capacidade efetiva é igual a 10,5 m³, ou seja, 70% da capacidade nominal, devido à variação de peso específico aparente e à imprecisão da geração per capta, assim como orienta TCM-GO (2016).

Logo, a quantidade de caminhões necessária para satisfazer a quantidade de viagens calculada é obtida pela Equação 22.

$$Nf = \frac{QTvg}{2} \quad (22)$$

Onde:

Nf: número de frota.

A quilometragem percorrida por 1 caminhão por jornada de trabalho é dada pela Equação 23.

$$Kmj = L + 2.Dg + 2.Dd.Qvg \quad (23)$$

Portanto, por dia, a quilometragem total percorrida por caminhão é obtida pela Equação 24.

$$Kmd = 2.Kmj \quad (24)$$

3.8 COMPOSIÇÃO DE CUSTOS, RECEITAS E ECONOMIAS

A análise de todos os custos envolvidos no empreendimento se faz necessária, como o investimento inicial relativo ao sistema de captação de biogás, cujo memorial de cálculo e custo estimado foi baseado sumariamente em CETESB (2006); a etapa de tratamento e purificação, além dos custos com operação e manutenção da planta, que foram orçados com a empresa Janus & Pergher - fabricante nacional de equipamentos de conversão do biogás em biometano por meio da tecnologia PSA.

Outra etapa de suma importância para a tomada de decisão é o levantamento dos benefícios obtidos por meio do empreendimento. Com essa finalidade, estudou-se a suposição de autoconsumo para abastecimento de frota própria e venda do biometano restante, caso exista.

Dessa forma, considerou-se a economia de combustível alcançada com a substituição do diesel pelo biometano de produção própria. Para definir o preço de compra do diesel, procedeu-se com consulta ao Levantamento de Preços de Combustíveis (LPC) fornecido pela ANP (2023), por meio do qual se calculou a média de janeiro de 2022 a abril de 2023.

Quanto ao biometano, para a situação de autoconsumo, foi utilizado o custo referente à produção em aterros, ou seja, custo este que é formado pela quantidade de biometano produzida a cada ano dividida pelo OPEX do ano correspondente.

Para a situação da venda do biometano excedente, primeiro verificou-se no LPC da ANP (2023) o preço médio do GNV, com filtro de pesquisa de janeiro de 2022 a abril de 2023,

e então aplicou-se um desconto hipotético de 15% em cima do preço médio, a fim de tornar o biometano mais atrativo frente ao GNV na decisão de compra por parte do consumidor.

O levantamento dos preços de Diesel e GNV, com tributos inclusos, consta na Tabela 5.

TABELA 5 – PREÇO DO GNV E DO DIESEL

Referência	GNV (R\$/m³)	Diesel (R\$/L)
jan/22	4,45	5,5
fev/22	4,64	5,11
mar/22	4,73	6,29
abr/22	4,76	6,6
mai/22	5,24	6,15
jun/22	5,3	7,2
jul/22	5,1	7,46
ago/22	5,05	7,1
set/22	4,99	6,85
out/22	4,9	6,56
nov/22	4,8	6,58
dez/22	4,77	5,56
jan/23	4,73	6,33
fev/23	4,6	6,06
mar/23	4,52	5,88
abr/23	4,51	5,76
Média	4,82	6,31

FONTE: ANP (2023)

O custo dos caminhões novos a gás também precisou ser somado ao investimento inicial de cada cenário. O preço do caminhão de lixo é composto pela soma do preço do chassi com o preço do implemento compactador. O primeiro foi consultado na tabela da Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE), escolhendo a opção zero quilômetro, marca Scania e modelo P280 4x2 (E5). Como ainda não consta na base de dados a versão a gás, atribuiu-se um acréscimo de 30% no preço da versão a diesel, conforme sugestão da Scania. O segundo foi obtido junto à empresa USIMECA, fabricante responsável pela comercialização da caçamba e da porta traseira dos caminhões que foram vendidos até o presente momento.

Desse modo, o investimento em cada caminhão coletor compactador de resíduo é de R\$ 1.140.000,00, sendo R\$ 860.000 referente ao chassi e R\$ 280.000 referente ao implemento.

3.8.1 Dimensionamento básico dos equipamentos de coleta de biogás

O cálculo do número de drenos constituintes do sistema de coleta de gás de aterro obedece à Equação 25:

$$ND = \frac{AA}{\pi \cdot r^2} \quad (25)$$

Onde:

ND: número de drenos

AA: área do aterro (m²)

r: raio de influência de cada dreno (m)

CETESB (2006) orienta que o valor adotado para o raio de influência do dreno seja de 25 metros e a área do aterro é calculada conforme Equação 26.

$$AA = Ry \cdot 0,56 \quad (26)$$

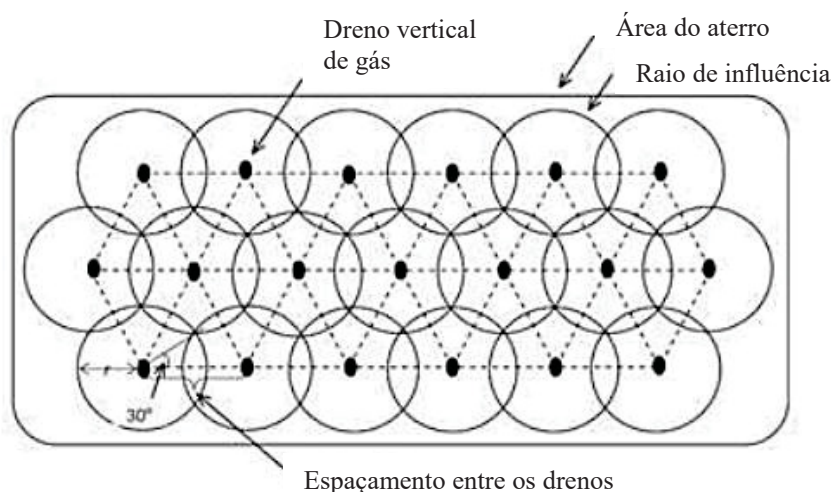
Para dimensionar a metragem necessária de tubos, deve-se calcular primeiro o espaçamento entre os drenos, conforme indica a Equação 27.

$$X = 2 \cdot r \cdot \cos 30^\circ \quad (27)$$

Onde:

X = espaçamento entre os drenos (m).

FIGURA 6 -Distribuição triangular equidistante para drenos verticais de gás



FONTE: adaptado de Santos e Silva (2018)

Assim, o total aproximado de metros de tubo demandado para construção do sistema de captação do gás de aterro sanitário é obtido pela Equação 28.

$$TB = (ND - 1).X \quad (28)$$

Onde:

TB: tubulação de drenagem (m)

3.9 VIABILIDADE ECONÔMICA

Na análise econômica foram considerados alguns parâmetros elucidados por Samanez (2010), entre eles: i) VPL, que é o ganho total com a implantação do projeto durante um determinado período (Equação 29); ii) *Payback* descontado, que mensura o tempo de recuperação do investimento feito; iii) TIR, que determina a taxa de rentabilidade mínima para um projeto ser atraente.

$$VPL = -I0 + \sum_{n=1}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} \quad (29)$$

Onde:

I0: investimento no sistema de captação, tratamento e purificação de biogás (R\$), além do investimento extra na compra dos caminhões para ciclo otto dedicado.

Fn: fluxo de caixa, ou o lucro obtido a cada ano com a adoção do biometano no projeto (R\$), considerando o abatimento dos custos de OPEX.

n: vida útil do empreendimento (anos);

i: taxa de desconto.

A taxa de desconto é normalmente considerada como a taxa mínima de atratividade (TMA), que corresponde a menor taxa que o investidor espera, de forma a considerar o investimento atrativo. Neste trabalho, optou-se pela taxa básica de juros da economia, representada pela SELIC, cuja projeção para 2024 é igual a 10%, conforme consta no relatório FOCUS de expectativas de mercado, elaborado pelo Banco Central do Brasil (BCB, 2023). Quanto maior o valor da taxa Selic, menor o VPL, e menos arriscado é investir em títulos do tesouro nacional do que investir em projetos.

O projeto só é considerado economicamente viável se o VPL for positivo, ou seja, tem valor maior do que o custo para implantá-lo.

Para os cálculos de *Payback* e TIR basta saber os seguintes preceitos:

- O *Payback* é o ano onde o VPL se iguala a zero, ou seja, o momento em que o investimento passa a ser recuperado;
- A TIR é a taxa intrínseca de rendimento do projeto que dá o VPL nulo. Ela deve ser maior que a TMA.

É importante citar que no projeto será considerada apenas uma parcela de investimento, o qual foi simulado como composto por 100% de capital próprio, ou seja, sem financiamento por capital de terceiros.

Outra premissa importante adotada neste estudo é que a usina produtora de biometano não terá frota específica para realizar a logística de distribuição, limitando-se a entregar o gás para os transportadores externos retirarem junto ao aterro.

Quanto à depreciação dos bens de capital, o valor residual deles não fará parte da análise econômica, pois para os equipamentos do aterro e da usina de biometano foi considerado que o limite de vida útil é o mesmo que o tempo de operação do aterro, não sendo necessário investimento em revitalização no decorrer desses 15 anos. Já para os caminhões coletores compactadores de resíduos, considerou-se que após 7 anos de operação eles serão sucateados e substituídos por novos. Para isso, o cálculo de dimensionamento de frota foi feito com dados de geração de resíduos atualizados, para que a composição da frota ficasse adequada à necessidade de coleta.

Custos com manutenção do caminhão a gás não foram incluídos nos cálculos de análise econômica porque eles não diferem muito dos custos com manutenção dos caminhões a diesel. Inclusive, o caminhão que está em operação (da hipótese 1) tem apresentado custos inferiores em comparação ao da versão à diesel, conforme relato do responsável pelo equipamento.

3.10 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Neto (2017) explica que a análise de sensibilidade consiste na variação de parâmetros de entrada em uma dada faixa de valores, com a pretensão de medir os efeitos produzidos por esta variação nos critérios de decisão econômica de um projeto.

A análise do tipo univariada é a forma mais usual, na qual se varia um parâmetro por vez, mantendo-se os demais constantes, pois assim é possível que os efeitos ocorridos no resultado econômico do projeto sejam analisados individualmente (NETO, 2017).

Buscando contemplar situações específicas que não fizeram parte do escopo da pesquisa, mas que podem impactar diretamente nos resultados econômicos alcançados, os parâmetros escolhidos para a análise de sensibilidade deste trabalho foram:

- Preço de venda do Biometano

A alteração no preço de venda do biometano de R\$ 4,10 (preço base adotado no estudo) para R\$ 4,82 (preço de venda igual ao do GNV para consumidor direto) e R\$ 3,71 (preço de venda igual ao do GNV para postos de combustível) são as situações submetidas à análise de sensibilidade deste parâmetro. Cabe destacar que o preço de R\$ 3,71 foi consultado na opção mais recente do boletim mensal de acompanhamento da Indústria de Gás Natural, divulgado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2023).

- Investimento em caminhões a gás

Cogitando-se que, ao invés de um caminhão novo, o produtor prefira investir na adaptação da sua frota à diesel por meio da técnica de ottonização, ou mesmo substituir o motor a diesel por um completamente novo a gás; procedeu-se com a alteração no preço de compra do caminhão compactador de resíduos, de R\$ 1.140.000,00 (preço base adotado no estudo) para R\$ 855.000,00 (redução de 25% no preço de compra do caminhão) e R\$ 570.000,00 (redução de 50% no preço de compra do caminhão).

- Distâncias percorridas mensalmente pelos caminhões

A distância percorrida por um caminhão coletor compactador de resíduos foi calculada em 173,3 km/dia, o que corresponde a 5.199 km/mês, tendo como base a distância da garagem ao ponto de coleta igual a 5 km e a distância do ponto de coleta ao aterro sanitário igual a 12,5 km. Porém, uma alteração nesse último valor talvez afete consideravelmente os resultados da distância total que cada caminhão percorre por mês. Mantendo fixa a distância do ponto de coleta ao aterro e variando a distância da garagem ao ponto de coleta tanto para 5 km quanto para 20 km (que são as distâncias mínimas e máximas aceitáveis), a distância total muda para 3.699 km/mês e 6.699 km/mês, respectivamente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 GERAÇÃO DE RSU

De posse da previsão da população que deverá ser atendida ano a ano, determina-se o fluxo anual de resíduos, levando em conta a porcentagem de resíduos que segue para aterro e a geração per capita. A Tabela 6 apresenta a quantidade de resíduos gerados pela população dos cenários 1, 2, 3 e 4. Coerentemente, o montante de resíduo acompanha o crescimento da população, ou seja, o aterro que atende o maior número de habitantes também é o maior receptor de resíduos, e vice-versa.

TABELA 6 – RESÍDUOS GERADOS ANUALMENTE NOS ATERROS SANITÁRIOS

Ano	Resíduos (t)			
	100.000 habitantes	500.000 habitantes	1.000.000 habitantes	2.000.000 habitantes
0	33.580	167.900	335.800	671.600
1	33.748	168.742	337.483	674.966
2	33.917	169.587	339.175	678.350
3	34.087	170.437	340.875	681.750
4	34.258	171.292	342.584	685.167
5	34.430	172.150	344.301	688.602
6	34.603	173.013	346.027	692.053
7	34.776	173.881	347.761	695.522
8	34.950	174.752	349.504	699.009
9	35.126	175.628	351.256	702.512
10	35.302	176.508	353.017	706.034
11	35.479	177.393	354.786	709.573
12	35.656	178.282	356.565	713.129
13	35.835	179.176	358.352	716.704
14	36.015	180.074	360.148	720.296
15	36.195	180.977	361.953	723.907

FONTE: a autora

4.2 VAZÃO DE GÁS

Assim, a partir da quantidade de resíduos sólidos gerada anualmente, realiza-se o cálculo das Equações relacionadas à obtenção da vazão de metano correspondente a cada cenário, cujas variáveis já são conhecidas. Os resultados são: potencial de geração de metano

dos resíduos igual a $102,5 \text{ m}^3 \cdot \text{t}_{\text{RSD}}^{-1}$, fração de carbono orgânico no lixo igual a $0,43 \text{ kgc} \cdot \text{kg}_{\text{RSD}}^{-1}$ e fração de carbono orgânico que pode se decompor igual a $0,77 \text{ kgc} \cdot \text{kg}_{\text{RSD}}^{-1}$.

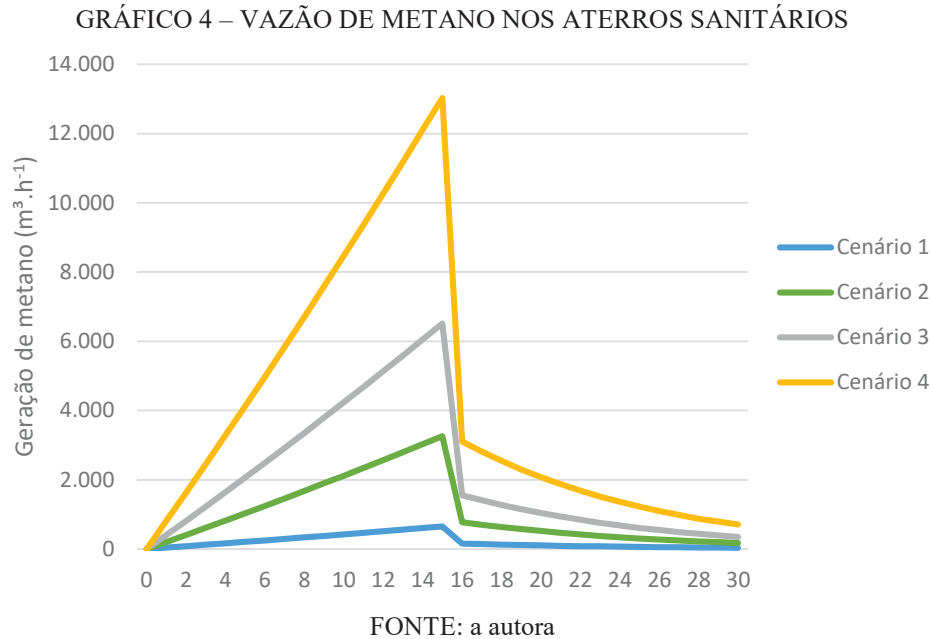
Dessa forma, foi possível a construção da Tabela 7, onde é demonstrada a vazão de metano gerado em cada cenário, durante um período de 30 anos. Confirmou-se o que já era esperado: quanto maior a quantidade de habitantes, maior a vazão de metano, devido à correlação com a geração de resíduos. Esta percepção é válida para todos os cenários analisados.

TABELA 7 – VAZÕES DE METANO PARA TODOS OS ATERROS SANITÁRIOS (m^3/h)

Ano	Cenário 1 (m^3/h)	Cenário 2 (m^3/h)	Cenário 3 (m^3/h)	Cenário 4 (m^3/h)
1	40,49	202,44	404,88	809,76
2	81,38	406,91	813,82	1.627,63
3	122,68	613,42	1.226,84	2.453,69
4	164,40	822,00	1.643,99	3.287,98
5	206,53	1.032,65	2.065,29	4.130,58
6	249,08	1.245,39	2.490,77	4.981,54
7	292,05	1.460,23	2.920,47	5.840,93
8	335,44	1.677,20	3.354,40	6.708,81
9	379,26	1.896,31	3.792,62	7.585,24
10	423,51	2.117,57	4.235,15	8.470,29
11	468,20	2.341,01	4.682,01	9.364,03
12	513,33	2.566,63	5.133,25	10.266,51
13	558,89	2.794,45	5.588,90	11.177,80
14	604,90	3.024,49	6.048,98	12.097,97
15	651,35	3.256,77	6.513,54	13.027,08
16	155,19	775,93	1.551,86	3.103,73
17	140,74	703,68	1.407,35	2.814,70
18	127,39	636,95	1.273,91	2.547,81
19	115,12	575,60	1.151,19	2.302,38
20	103,87	519,37	1.038,75	2.077,49
21	93,60	468,02	936,04	1.872,09
22	84,25	421,25	842,50	1.684,99
23	75,75	378,75	757,50	1.515,00
24	68,04	340,22	680,44	1.360,88
25	61,07	305,35	610,70	1.221,41
26	54,77	273,85	547,71	1.095,42
27	49,09	245,44	490,88	981,77
28	43,97	219,85	439,69	879,38
29	39,36	196,82	393,63	787,26
30	35,22	176,11	352,23	704,46

FONTE: a autora

O Gráfico 4 sumariza tais informações; nele, observa-se que a geração de metano aumenta conforme mais resíduos são depositados no aterro com o passar dos anos, até que essa produção de gás chega ao seu valor máximo no último ano de funcionamento de cada aterro. A partir deste ponto a tendência é que a curva decaia, uma vez que o aterro já não recebe RSU e a geração de gás ocorre mediante decomposição do material orgânico residual.



Com a fração de metano presente no biogás igual a 50%, a quantidade de biogás gerado é o dobro do valor de CH₄. Entretanto, a fim de que os resultados sejam condizentes com a realidade, as perdas no processo de coleta do biogás devem ser consideradas. Logo, a Tabela 8 indica a vazão de biogás gerado anualmente e seus respectivos índices de recuperação.

TABELA 8 – VAZÕES DE BIOGÁS PARA TODOS OS ATERROS (continua)

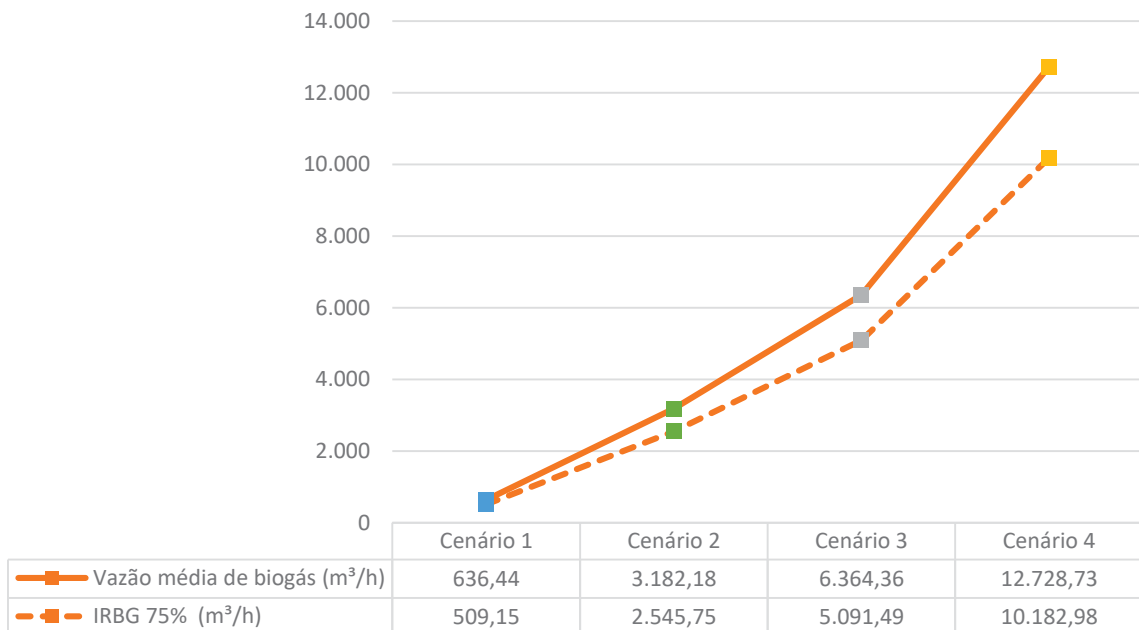
Ano	Cenário 1 (m ³ /h)		Cenário 2 (m ³ /h)		Cenário 3 (m ³ /h)		Cenário 4 (m ³ /h)	
	Biogás	IRBG 75%	Biogás	IRBG 75%	Biogás	IRBG 75%	Biogás	IRBG 75%
1	81,0	60,7	404,9	303,7	809,8	607,3	1.619,5	1.214,6
2	162,8	122,1	813,8	610,4	1.627,6	1.220,7	3.255,3	2.441,5
3	245,4	184,0	1.226,8	920,1	2.453,7	1.840,3	4.907,4	3.680,5
4	328,8	246,6	1.644,0	1.233,0	3.288,0	2.466,0	6.576,0	4.932,0
5	413,1	309,8	2.065,3	1.549,0	4.130,6	3.097,9	8.261,2	6.195,9
6	498,2	373,6	2.490,8	1.868,1	4.981,5	3.736,2	9.963,1	7.472,3
7	584,1	438,1	2.920,5	2.190,3	5.840,9	4.380,7	11.681,9	8.761,4
8	670,9	503,2	3.354,4	2.515,8	6.708,8	5.031,6	13.417,6	10.063,2

									(conclusão)
9	758,5	568,9	3.792,6	2.844,5	7.585,2	5.688,9	15.170,5	11.377,9	
10	847,0	635,3	4.235,1	3.176,4	8.470,3	6.352,7	16.940,6	12.705,4	
11	936,4	702,3	4.682,0	3.511,5	9.364,0	7.023,0	18.728,1	14.046,0	
12	1.026,7	770,0	5.133,3	3.849,9	10.266,5	7.699,9	20.533,0	15.399,8	
13	1.117,8	838,3	5.588,9	4.191,7	11.177,8	8.383,3	22.355,6	16.766,7	
14	1.209,8	907,3	6.049,0	4.536,7	12.098,0	9.073,5	24.195,9	18.146,9	
15	1.302,7	977,0	6.513,5	4.885,2	13.027,1	9.770,3	26.054,2	19.540,6	

FONTE: a autora

Compilando as informações dos 4 cenários e comparando-os, no Gráfico 5 são apresentadas as vazões médias de biogás gerado e de biogás captado, sendo os pontos azuis referentes aos valores do cenário 1, os pontos verdes referentes ao cenário 2, os pontos cinzas referentes ao cenário 3 e os pontos amarelos referentes ao cenário 4.

GRÁFICO 5 – COMPARATIVO DE VAZÃO DE BIOGÁS ENTRE TODOS OS CENÁRIOS



FONTE: a autora

O mesmo raciocínio é aplicável para a geração de biometano, pois o processo de purificação do biogás também não ocorre com 100% de eficiência. Na Tabela 9 consta a vazão de biometano (m³/h) gerado anualmente e seus respectivos índices de recuperação.

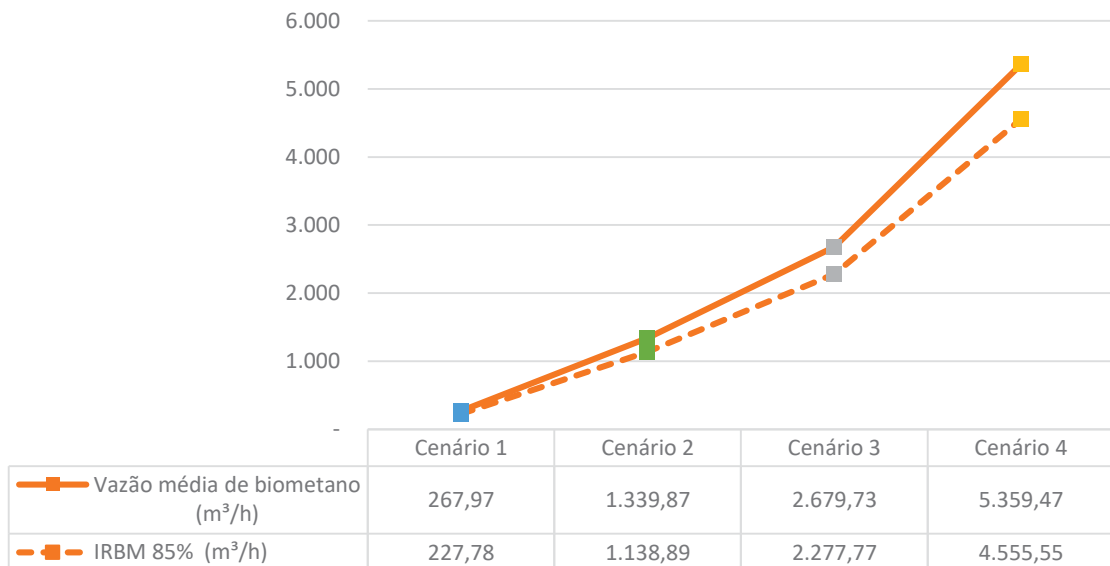
TABELA 9 – VAZÃO DE BIOMETANO PARA TODOS OS ATERROS SANITÁRIOS

Ano	Cenário 1 (m ³ /h)		Cenário 2 (m ³ /h)		Cenário 3 (m ³ /h)		Cenário 4 (m ³ /h)	
	Biometano	IRBM 85%	Biometano	IRBM 85%	Biometano	IRBM 85%	Biometano	IRBM 85%
1	32,0	27,2	159,8	135,8	319,6	271,7	639,3	543,4
2	64,2	54,6	321,2	273,1	642,5	546,1	1.285,0	1.092,2
3	96,9	82,3	484,3	411,6	968,6	823,3	1.937,1	1.646,6
4	129,8	110,3	648,9	551,6	1.297,9	1.103,2	2.595,8	2.206,4
5	163,0	138,6	815,2	693,0	1.630,5	1.385,9	3.261,0	2.771,8
6	196,6	167,1	983,2	835,7	1.966,4	1.671,4	3.932,8	3.342,9
7	230,6	196,0	1.152,8	979,9	2.305,6	1.959,8	4.611,3	3.919,6
8	264,8	225,1	1.324,1	1.125,5	2.648,2	2.251,0	5.296,4	4.502,0
9	299,4	254,5	1.497,1	1.272,5	2.994,2	2.545,0	5.988,3	5.090,1
10	334,4	284,2	1.671,8	1.421,0	3.343,5	2.842,0	6.687,1	5.684,0
11	369,6	314,2	1.848,2	1.570,9	3.696,3	3.141,9	7.392,7	6.283,8
12	405,3	344,5	2.026,3	1.722,3	4.052,6	3.444,7	8.105,1	6.889,4
13	441,2	375,0	2.206,1	1.875,2	4.412,3	3.750,4	8.824,6	7.500,9
14	477,6	405,9	2.387,8	2.029,6	4.775,5	4.059,2	9.551,0	8.118,4
15	514,2	437,1	2.571,1	2.185,5	5.142,3	4.370,9	10.284,5	8.741,9

FONTE: a autora

O gráfico 6 faz um comparativo dos 4 cenários, apresentando as vazões médias de biometano gerado e de biometano captado. Os pontos azuis são referentes aos valores do cenário 1, os pontos verdes referentes ao cenário 2, os pontos cinzas referentes ao cenário 3 e os pontos amarelos referentes ao cenário 4.

GRÁFICO 6 – COMPARATIVO DE VAZÃO DE BIOMETANO ENTRE TODOS OS CENÁRIOS



FONTE: a autora

4.3 EMISSÕES DE GEE

Ao comparar o óleo diesel com o biometano, considerando a substituição de um pelo outro, as emissões evitadas são estatisticamente significativas. Na tabela 10 ilustra-se a quantidade total (soma) produzida de biometano ao longo de 15 anos pelos aterros dos cenários 1, 2, 3 e 4, bem como a equivalência energética desta produção em óleo diesel, o que permitiu calcular as emissões evitadas totais.

TABELA 10 – EMISSÕES EVITADAS DE GEE

Cenário	Volume				Emissões		Emissões evitadas (tCO ₂ eq)
	Biometano (m ³)	Diesel (L)	Biometano (MJ)	Diesel (MJ)	Biometano (gCO ₂ eq)	Diesel (gCO ₂ eq)	
1	3,00E+07	2,77E+07	1,07E+15	1,06E+15	-3,22E+16	1,01E+17	1,33E+11
2	1,50E+08	1,39E+08	5,36E+15	5,31E+15	-1,61E+17	5,05E+17	6,66E+11
3	3,00E+08	2,77E+08	1,07E+16	1,06E+16	-3,22E+17	1,01E+18	1,33E+12
4	5,99E+08	5,54E+08	2,14E+16	2,13E+16	-6,43E+17	2,02E+18	2,66E+12

FONTE: a autora

Como o cenário 4 apresenta a maior produção de biometano, ele, conseqüentemente, contribuiu para a maior quantidade de emissões evitadas de CO₂, mais especificamente 177,63 bilhões de tCO₂eq por ano (média simples). Até mesmo o cenário 1, que apresenta menor produção de biometano, contribui com 8,88 bilhões de tCO₂eq por ano (média simples).

Também é interessante observar a quantidade de diesel que o biometano tem potencial de suprir, de acordo com a capacidade de cada aterro. Em média simples, 1,85 bilhões de litros anuais, referente ao cenário 1, e 36,95 bilhões de litros, referente ao cenário 4.

4.4 AUTONOMIA VEICULAR DO BIOMETANO

A estimativa da quantidade de caminhões que podem ser abastecidos com biometano depende do comprimento do percurso de coleta e da quilometragem total percorrida por cada caminhão, calculados em 26,65 km e 173,30 km, respectivamente. A partir disso, obtém-se os resultados da Tabela 11 para os demais parâmetros envolvidos.

TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS PROJETOS

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Volume de resíduo em aterro (m ³ /dia)	153	7767	1533	3067
Nº de viagens até a área de rejeição (un.)	7	37	73	146
Quantidade de frota antes da renovação (un.)	4	18	37	73
Quantidade de frota após a renovação (un.)	4	19	38	76

FONTE: a autora

O número de frota refere-se à quantidade inicial necessária de caminhões para a coleta de resíduos dos municípios representados pelos 4 cenários. Porém, como foi considerada a renovação de frota no 8º ano e o montante de resíduos aumentaria no decorrer desses anos, o número de frota foi matematicamente atualizado a fim de suprir adequadamente a demanda de coleta.

4.5 POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES

Conforme relatado nos procedimentos metodológicos, o biometano efetivamente captado teve como uso prioritário o abastecimento da frota de caminhões coletores compactadores de resíduos que operam nos próprios aterros sanitários estudados. Todavia, havendo excesso de geração de biometano, ele seria utilizado para venda a consumidor direto.

Nesse momento, o consumo de biometano dos caminhões é determinante para a próxima etapa dos cálculos, que é de fato o potencial de abastecimento de caminhões compactadores de resíduos. Duas hipóteses de consumo foram analisadas (hipótese 1: 0,95 m³/km de biometano e 0,87 L/km de diesel; hipótese 2: 0,54 m³/km e 0,44 L/km), pois o consumo apresentado pelo caminhão em campo (caso isolado) foi diferente do consumo esperado pelo fabricante, e a utilização de apenas um caso isolado não deve representar o universo da pesquisa como um todo, devido à variabilidade que ocorre de acordo com as condições das ruas onde os equipamentos trafegam, com o estado de manutenção dos equipamentos e até mesmo com a técnica de dirigibilidade adotada.

Hipótese 1:

A tabela 12 retrata o volume de biometano mensal disponível para venda (subtraiu-se os volumes de biometano utilizados para autoconsumo) nos 4 cenários estudados da hipótese 1. Nota-se que no cenário 1 apenas o primeiro ano não apresenta excedente de biometano para ser vendido. Em todos os demais anos a geração ultrapassa a demanda de autoconsumo. Os cenários 2, 3 e 4 apresentam excedente de biometano em todos os anos analisados.

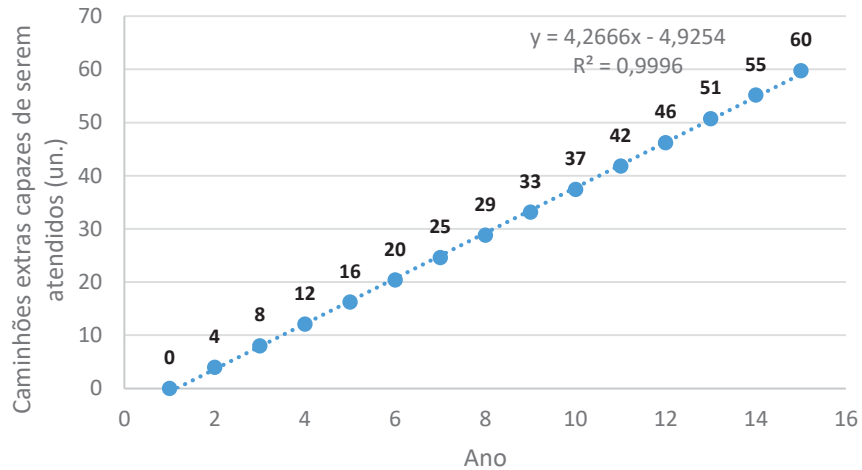
TABELA 12 – VOLUME DE BIOMETANO EXCEDENTE PARA TODOS OS CENÁRIOS

Ano	Cenário 1 (m³/mês)	Cenário 2 (m³/mês)	Cenário 3 (m³/mês)	Cenário 4 (m³/mês)
1	0,00	8.907,33	12.875,61	30.690,27
2	19.564,00	107.698,11	210.457,17	425.853,39
3	39.519,74	207.476,82	410.014,58	824.968,21
4	59.674,55	308.250,87	611.562,68	1.228.064,41
5	80.029,93	410.027,73	815.116,42	1.635.171,89
6	100.587,37	512.814,94	1.020.690,83	2.046.320,72
7	121.348,39	616.620,06	1.228.301,07	2.461.541,19
8	142.314,52	716.511,66	1.433.023,32	2.866.046,64
9	163.487,29	822.375,51	1.644.751,03	3.289.502,05
10	184.868,25	929.280,30	1.858.560,60	3.717.121,19
11	206.458,95	1.037.233,79	2.074.467,57	4.148.935,14
12	228.260,95	1.146.243,81	2.292.487,61	4.584.975,23
13	250.275,84	1.256.318,24	2.512.636,48	5.025.272,95
14	272.505,19	1.367.465,01	2.734.930,03	5.469.860,05
15	294.950,61	1.479.692,12	2.959.384,23	5.918.768,46

FONTE: a autora

Então, a partir do volume de biometano disponível para venda, o Gráfico 7 apresenta a estimativa da quantidade de caminhões a serem atendidos no Cenário 1, considerando que o modelo e as configurações de operação são iguais aos dos caminhões destinados a autoconsumo. No ano 2 o excedente de biometano já é suficiente para atender 4 caminhões extras mensalmente, ou seja, a mesma quantidade de caminhões demandada para autoconsumo.

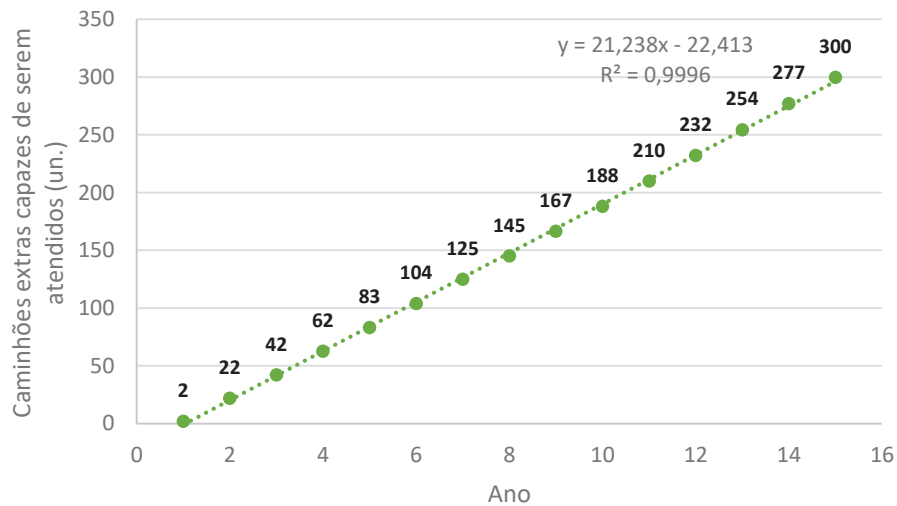
GRÁFICO 7 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 1



FONTE: a autora

No cenário 2, o potencial de suprimento de caminhões extras inicia em 02 unidades e alcança seu limite em 300 unidades, conforme Gráfico 8, atingindo o dobro da demanda de autoconsumo antes de completar 3 anos de empreendimento.

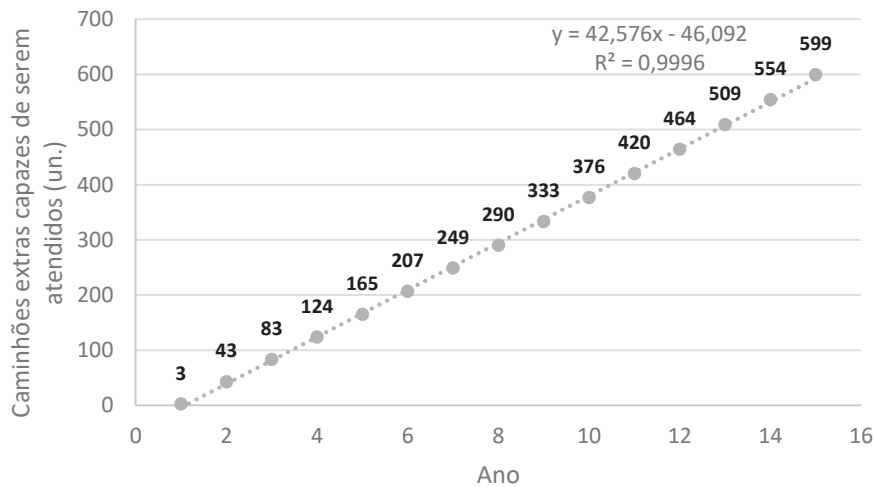
GRÁFICO 8 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 2



FONTE: a autora

Quanto ao cenário 3, o Gráfico 9 mostra que até 599 caminhões podem ser atendidos no 15º ano de vida útil do aterro. Isso significa que, dos 37 caminhões destinados à coleta do Cenário 3, há potencial 16 vezes superior de atender a uma possível demanda externa de consumo.

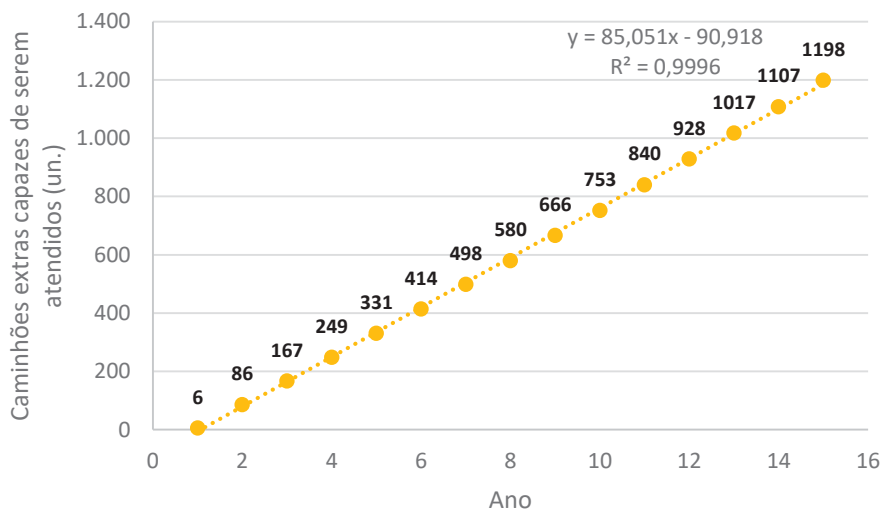
GRÁFICO 9 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 3



FONTE: a autora

Para o Gráfico 10, representativo do cenário 4, o potencial máximo é de 1.198 caminhões extras. Essa quantidade supera a dos demais cenários, uma vez que o aterro em questão responde pela maior geração de biometano, proporcional à sua capacidade de recebimento de resíduos.

GRÁFICO 10 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 4



FONTE: a autora

Hipótese 2:

A Tabela 13 retrata o volume de biometano disponível para venda (subtraiu-se os volumes de biometano utilizados para autoconsumo) nos 4 cenários estudados da hipótese 2. É possível observar que, mesmo atendendo à demanda de autoconsumo, todos os cenários apresentaram excedente de biometano para ser vendido durante os 15 anos de geração.

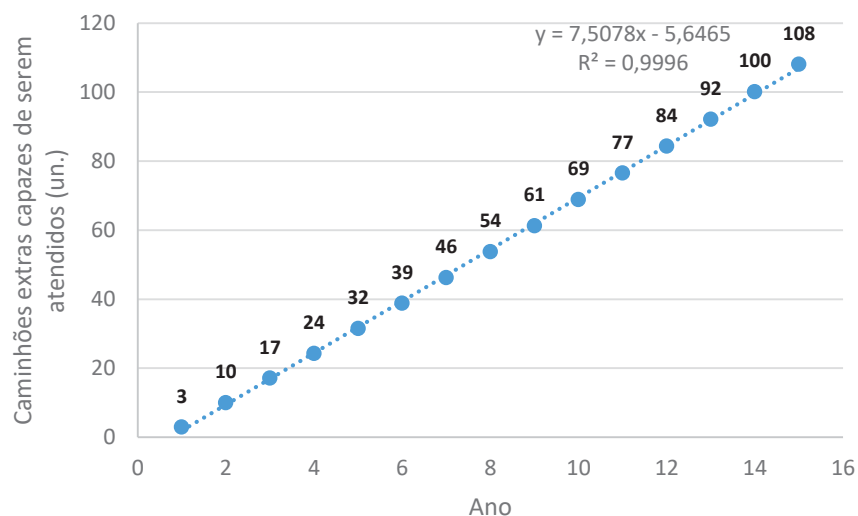
TABELA 13 – VOLUME MENSAL EXCEDENTE DE BIOMETANO PARA TODOS OS CENÁRIOS

Ano	Cenário 1 (m ³ /mês)	Cenário 2 (m ³ /mês)	Cenário 3 (m ³ /mês)	Cenário 4 (m ³ /mês)
1	8.332,21	47.275,95	91.744,44	186.296,34
2	28.090,36	146.066,73	289.326,00	581.459,46
3	48.046,10	245.845,44	488.883,41	980.574,28
4	68.200,91	346.619,49	690.431,51	1.383.670,48
5	88.556,29	448.396,35	893.985,25	1.790.777,96
6	109.113,73	551.183,56	1.099.559,66	2.201.926,79
7	129.874,75	654.988,68	1.307.169,90	2.617.147,26
8	150.840,88	757.011,87	1.514.023,74	3.028.047,48
9	172.013,65	862.875,72	1.725.751,45	3.451.502,89
10	193.394,61	969.780,51	1.939.561,02	3.879.122,03
11	214.985,31	1.077.734,00	2.155.467,99	4.310.935,98
12	236.787,31	1.186.744,02	2.373.488,03	4.746.976,07
13	258.802,20	1.296.818,45	2.593.636,90	5.187.273,79
14	281.031,55	1.407.965,22	2.815.930,45	5.631.860,89
15	303.476,97	1.520.192,33	3.040.384,65	6.080.769,30

FONTE: a autora

O Gráfico 11 apresenta a estimativa da quantidade de caminhões a serem atendidos no Cenário 1, considerando que o modelo e as configurações de operação são iguais aos dos caminhões destinados a autoconsumo. No ano 2 o excedente de biometano já é suficiente para atender 10 caminhões extras mensalmente, ou seja, mais que o dobro da quantidade de caminhões demandada para autoconsumo.

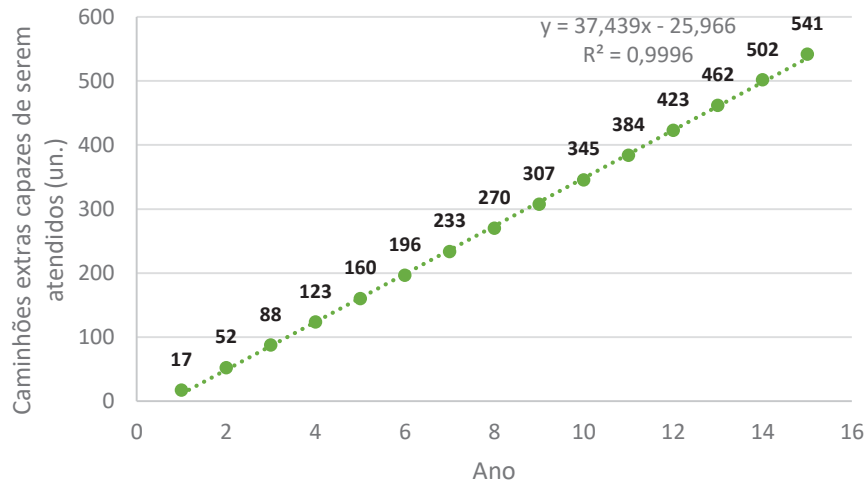
GRÁFICO 11 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 1



FONTE: a autora

No cenário 2, o potencial de suprimento de caminhões extras inicia em 17 unidades e alcança seu limite em 541 unidades, conforme Gráfico 12, atingindo o dobro da demanda de autoconsumo por volta de 1 ano e meio de empreendimento.

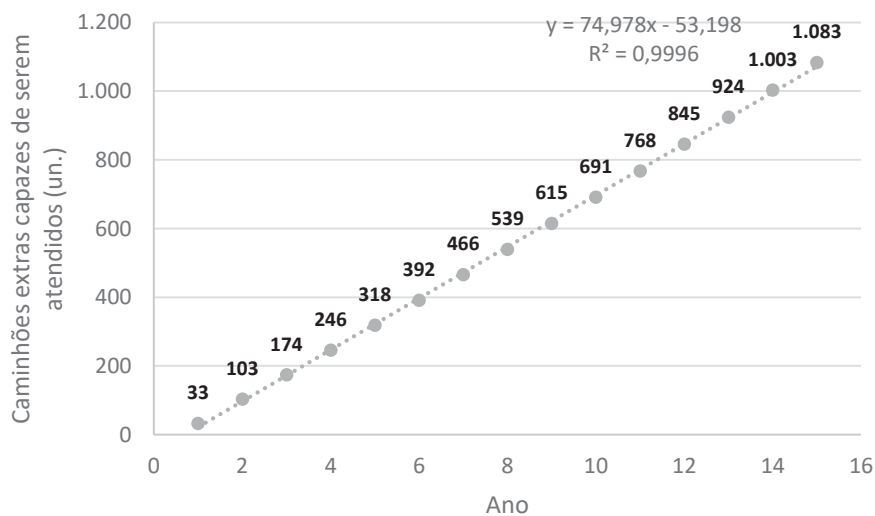
GRÁFICO 12 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 2



FONTE: a autora

Quanto ao cenário 3, o Gráfico 13 mostra que até 1.083 caminhões podem ser atendidos no 15º ano de vida útil do aterro. Isso significa que, dos 37 caminhões destinados à coleta do Cenário 3, há potencial 29 vezes superior de atender a uma possível demanda externa de consumo.

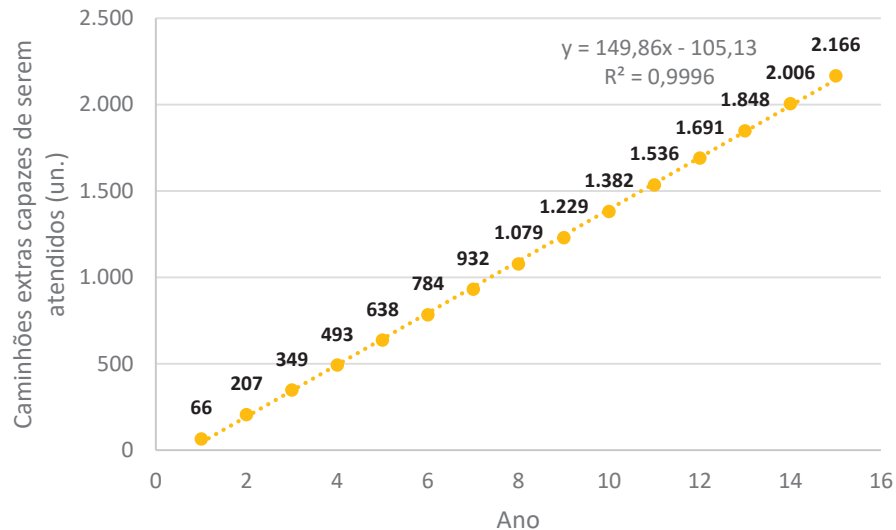
GRÁFICO 13 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO 3



FONTE: a autora

Para o Gráfico 14 abaixo, representativo do cenário 4, o potencial máximo é de 2.166 caminhões extras mensais. Essa quantidade supera a dos demais cenários, uma vez que o aterro em questão responde pela maior geração de biometano, proporcional à sua capacidade de recebimento de resíduos.

GRÁFICO 14 – POTENCIAL DE SUPRIMENTO DE CAMINHÕES EXTRAS PARA O CENÁRIO



FONTE: a autora

4.6 COMPOSIÇÃO DE CUSTOS, RECEITAS E ECONOMIAS

A partir do cálculo do espaçamento entre drenos (43 metros), a Tabela 14 retrata a configuração do aterro, seus componentes para coleta e queima do biogás, bem como contabiliza os custos totais na implementação deles.

TABELA 14 – CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE BIOGÁS DO ATERRO

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Área do aterro (m ²)	53.503	267.514	535.029	1.070.058
Quantidade de drenos (un.)	28	37	273	545
Custo total de drenos (R\$)	28.000	137.000	273.000	545.000
Metragem de tubos (m)	1.129	5.816	11.674	23.391
Custo total de tubos (R\$)	282.250	1.454.000	2.918.500	5.847.750
Quantidade de flare (un.)	1	1	1	1
Custo total de flare (R\$)	200.000	200.000	200.000	200.000

FONTE: a autora

O CAPEX total da presente pesquisa é subdividido em 3 partes, conforme Tabela 15.

TABELA 15 – CAPEX DETALHADO DOS ATERROS SANITÁRIOS (R\$)

Custo CAPEX	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Coleta e queima do biogás (R\$)	510.250,0	1.791.000,0	3.391.500,0	6.592.750,0
Limpeza e purificação do biogás (R\$)	3.376.534,2	14.212.246,9	27.756.887,9	54.846.169,8
Aquisição de caminhões a gás (R\$)	4.560.000,0	20.520.000,0	42.180.000,0	83.220.000,0
Total (R\$)	8.286.784,2	35.803.246,9	71.848.387,9	141.738.919,8

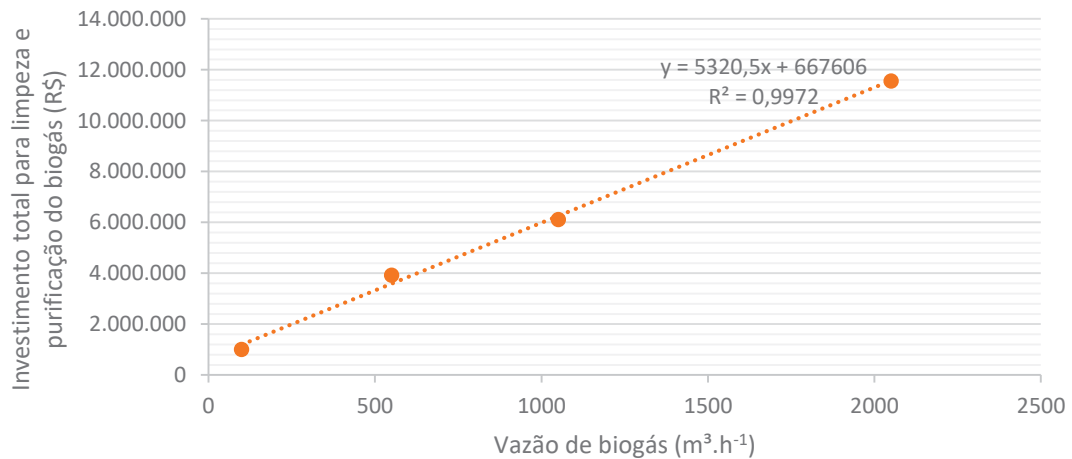
FONTE: a autora

O custo médio de CAPEX para aquisição de caminhões a gás é simplesmente a multiplicação do número de frota pelo preço do caminhão coletor compactador de resíduos (R\$ 1.114.000,00).

O custo médio de CAPEX para limpeza e purificação do biogás foi obtido com auxílio da equação de correlação do Gráfico 15.

O CAPEX total foi baseado na média dos 15 anos de operação dos aterros, não representando a vazão mínima nem a vazão máxima prevista de biogás, pois ICLEI (2009) menciona que usualmente a implantação do sistema de extração é feita em fases, ampliando as instalações conforme o aumento da geração de biogás, a fim de reduzir o investimento inicial.

GRÁFICO 15 – CAPEX PARA LIMPEZA E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS



FONTE: a autora

A respeito do OPEX, ele é subdividido em 2 partes, conforme Tabela 16.

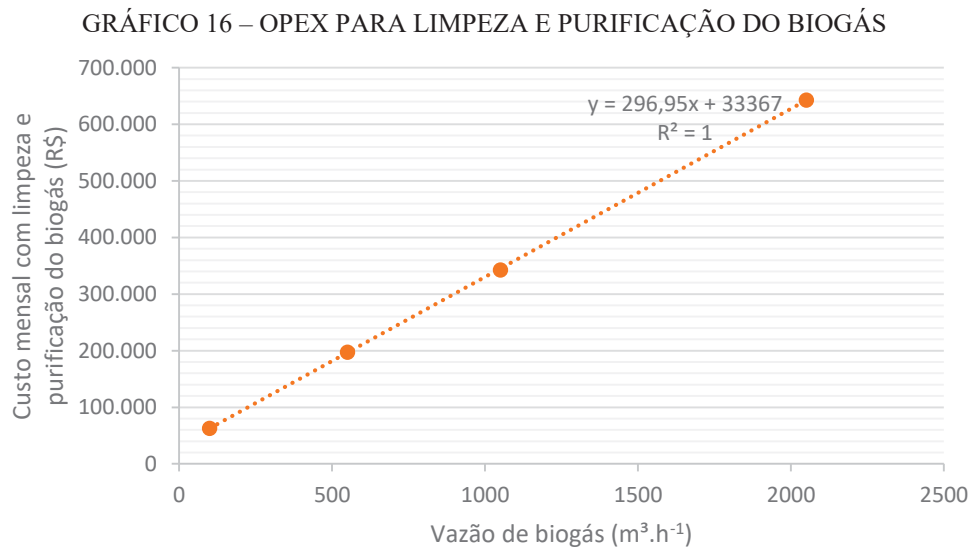
TABELA 16 – OPEX DETALHADO DOS ATERROS SANITÁRIOS (R\$)

Custo OPEX	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Linha de biogás (R\$)	25.512,5	89.550,0	169.575,0	329.637,5
Linha de biometano (R\$)	2.214.706,2	9.471.914,9	18.543.425,7	14.007.670,3

FONTE: a autora

O custo médio de OPEX da linha de biogás foi considerado fixo, como 5% do CAPEX para coleta e queima do biogás, conforme Santos, Barros e Filho (2018) fizeram.

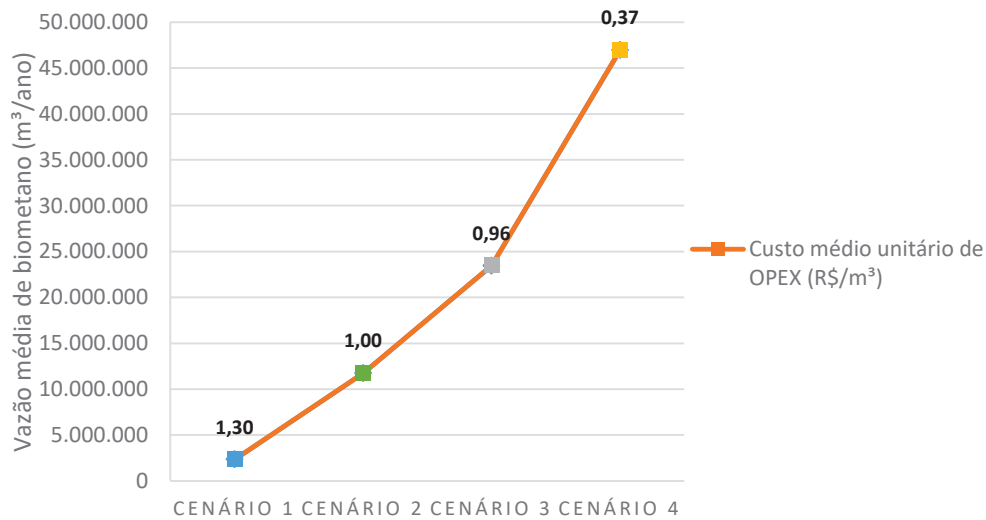
Quanto ao OPEX da linha de biometano, sua média foi incluída na tabela apenas para fins comparativos, pois para fornecer maior confiabilidade aos cálculos, empregou-se um OPEX variando anualmente de acordo com a vazão de biogás dos 4 cenários contemplados nesse estudo, com auxílio da equação de correlação do Gráfico 16, que apresenta uma boa aproximação ao conjunto de dados.



FONTE: a autora

No gráfico 17 a seguir é feita a relação do valor médio de OPEX (R\$/m³) com a vazão de produção média de biometano dos aterros sanitários (m³/ano), por meio do qual fica evidenciada a economia de escala alcançada com aterros sanitários de maior porte, afinal, é grande a diferença de custo de OPEX entre o cenário 1 e o cenário 4, mais precisamente R\$ 0,93/m³ de biometano.

GRÁFICO 17 – CUSTO UNITÁRIO DE OPEX PARA CADA CENÁRIO



FONTE: a autora

Hipótese 1:

As receitas e economias alcançadas pelos projetos em cada cenário, anualmente, podem ser observadas na Tabela 17 e 18, para a hipótese 1. Esses dados são necessários para o cálculo do fluxo de caixa, no qual soma-se as receitas e subtrai-se as despesas.

As receitas retratam a venda do biometano excedente a R\$ 4,10/m³ e as economias são referentes às despesas evitadas com a não utilização de diesel na frota.

TABELA 17 – RECEITA OBTIDA ANUALMENTE COM A VENDA DO BIOMETANO EXCEDENTE

Cenário 1 (R\$)	Cenário 2 (R\$)	Cenário 3 (R\$)	Cenário 4 (R\$)
0,00	438.240,60	633.479,94	1.509.961,13
962.548,90	5.298.747,02	10.354.492,77	20.951.986,81
1.944.371,36	10.207.859,30	20.172.717,35	40.588.435,96
2.935.988,02	15.165.942,62	30.088.883,97	60.420.769,21
3.937.472,41	20.173.364,55	40.103.727,83	80.450.456,92
4.948.898,52	25.230.495,14	50.217.989,02	100.678.979,30
5.970.340,88	30.337.706,92	60.432.412,57	121.107.826,40
7.001.874,47	35.252.373,62	70.504.747,24	141.009.494,48
8.043.574,80	40.460.875,27	80.921.750,55	161.843.501,10
9.095.517,88	45.720.590,64	91.441.181,29	182.882.362,57
10.157.780,20	51.031.902,28	102.063.804,56	204.127.609,11
11.230.438,80	56.395.195,28	112.790.390,57	225.580.781,14
12.313.571,21	61.810.857,33	123.621.714,65	247.243.429,30
13.407.255,48	67.279.278,65	134.558.557,30	269.117.114,61
14.511.570,17	72.800.852,10	145.601.704,21	291.203.408,42

FONTE: a autora

TABELA 18 – ECONOMIA OBTIDA ANUALMENTE COM A TROCA DO DIESEL PELO BIOMETANO

Cenário 1 (R\$)	Cenário 2 (R\$)	Cenário 3 (R\$)	Cenário 4 (R\$)
1.027.474,21	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.164.845,26	12.672.181,93	25.001.872,46
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67
1.369.965,61	6.507.336,67	13.014.673,34	26.029.346,67

FONTE: a autora

Hipótese 2:

As receitas e economias alcançadas por ano com cada cenário de projeto relacionado à hipótese 2 de consumo do caminhão são expostas na Tabela 19 e 20.

TABELA 19 - RECEITA OBTIDA ANUALMENTE COM A VENDA DO BIOMETANO EXCEDENTE

Cenário 1 (R\$)	Cenário 2 (R\$)	Cenário 3 (R\$)	Cenário 4 (R\$)
409.944,53	2.325.976,70	4.513.826,37	9.165.779,78
1.382.045,81	7.186.483,12	14.234.839,21	28.607.805,45
2.363.868,27	12.095.595,41	24.053.063,79	48.244.254,60
3.355.484,93	17.053.678,72	33.969.230,41	68.076.587,85
4.356.969,32	22.061.100,65	43.984.074,27	88.106.275,57
5.368.395,44	27.118.231,24	54.098.335,45	108.334.797,94
6.389.837,79	32.225.443,02	64.312.759,01	128.763.645,05
7.421.371,38	37.244.983,95	74.489.967,90	148.979.935,81
8.463.071,71	42.453.485,61	84.906.971,21	169.813.942,43
9.515.014,79	47.713.200,97	95.426.401,95	190.852.803,90
10.577.277,12	53.024.512,61	106.049.025,22	212.098.050,44
11.649.935,72	58.387.805,62	116.775.611,23	233.551.222,46
12.733.068,13	63.803.467,66	127.606.935,32	255.213.870,63
13.826.752,39	69.271.888,98	138.543.777,97	277.087.555,94
14.931.067,08	74.793.462,44	149.586.924,87	299.173.849,75

FONTE: a autora

TABELA 20 - ECONOMIA OBTIDA ANUALMENTE COM A TROCA DO DIESEL PELO BIOMETANO

Cenário 1 (R\$)	Cenário 2 (R\$)	Cenário 3 (R\$)	Cenário 4 (R\$)
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.117.852,78	6.408.919,60	12.644.625,15
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28
692.856,17	3.291.066,82	6.582.133,64	13.164.267,28

FONTE: a autora

4.7 ANÁLISE DE VIABILIDADE

Nesta etapa foi realizada a determinação dos indicadores financeiros (VPL, TIR e *Payback* descontado). Os resultados também foram obtidos de acordo com as 2 hipóteses de consumo já mencionadas anteriormente.

Hipótese 1:

A análise de viabilidade para a hipótese 1 é contemplada pela tabela 21.

TABELA 21 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE

Cenário	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	25.995.563,43	31,72	6
2	148.963.723,82	38,18	5
3	301.247.865,90	38,53	5
4	741.597.237,57	43,25	4

FONTE: a autora

O VPL se mostrou positivo para os 4 cenários analisados, com crescimento diretamente proporcional à capacidade dos aterros.

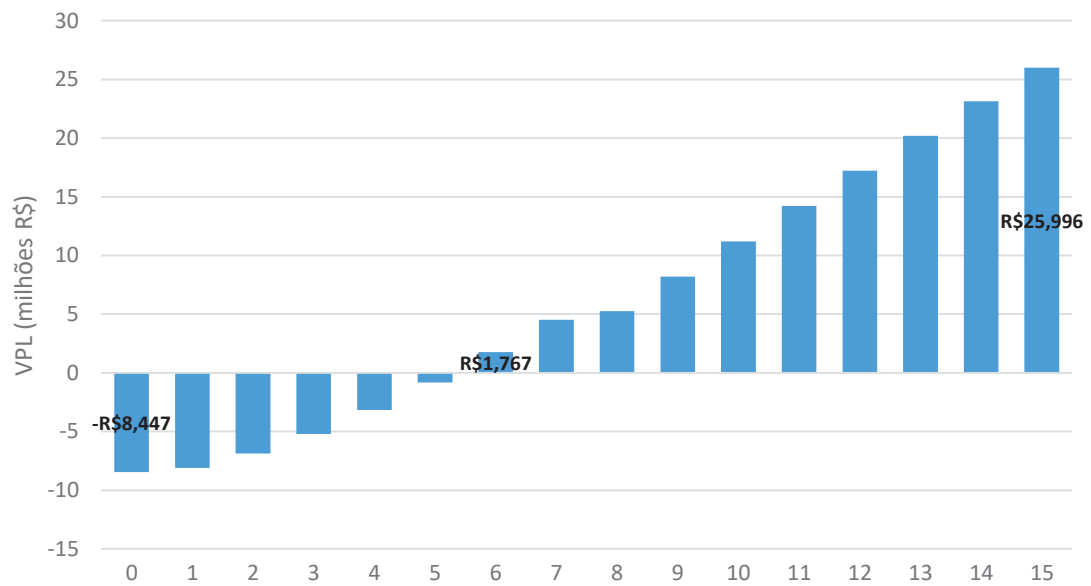
Todas as TIR também foram superiores à TMA (10%).

O tempo máximo de retorno do investimento foi de 6 anos (cenário 1) e o mínimo foi de 4 anos (cenário 4).

Portanto, o projeto baseado na hipótese 1 é viável economicamente e não deve ser rejeitado. O cenário 4 é a opção mais rentável, por apresentar o maior VPL, maior TIR e menor *Payback*, frente aos demais.

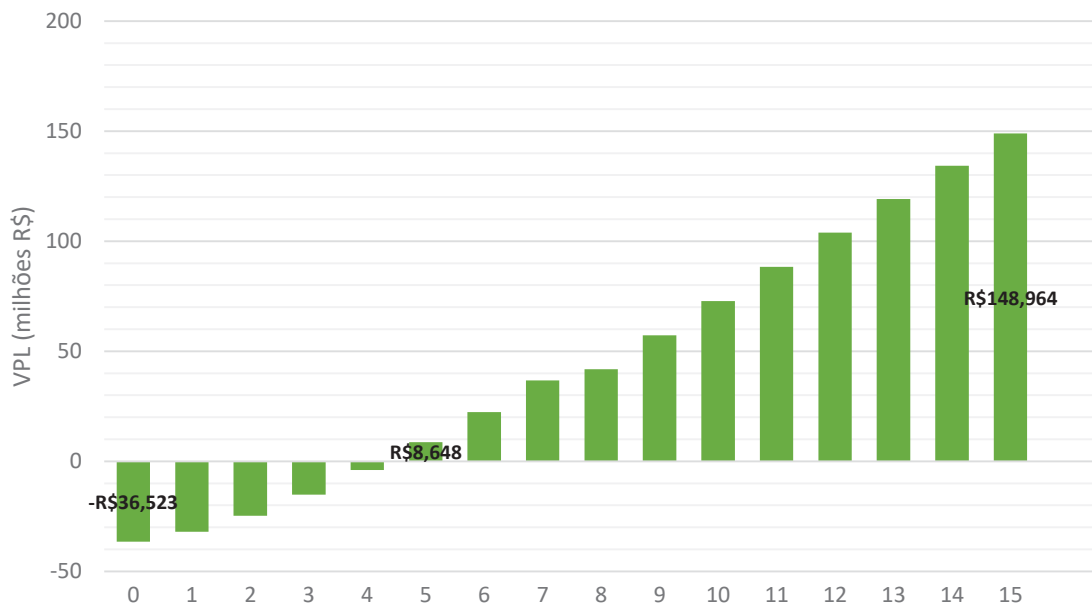
Os Gráficos 18, 19, 20 e 21 ilustram o VPL correspondente a cada cenário da hipótese 1, bem como o *Payback* descontado.

GRÁFICO 18 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 1



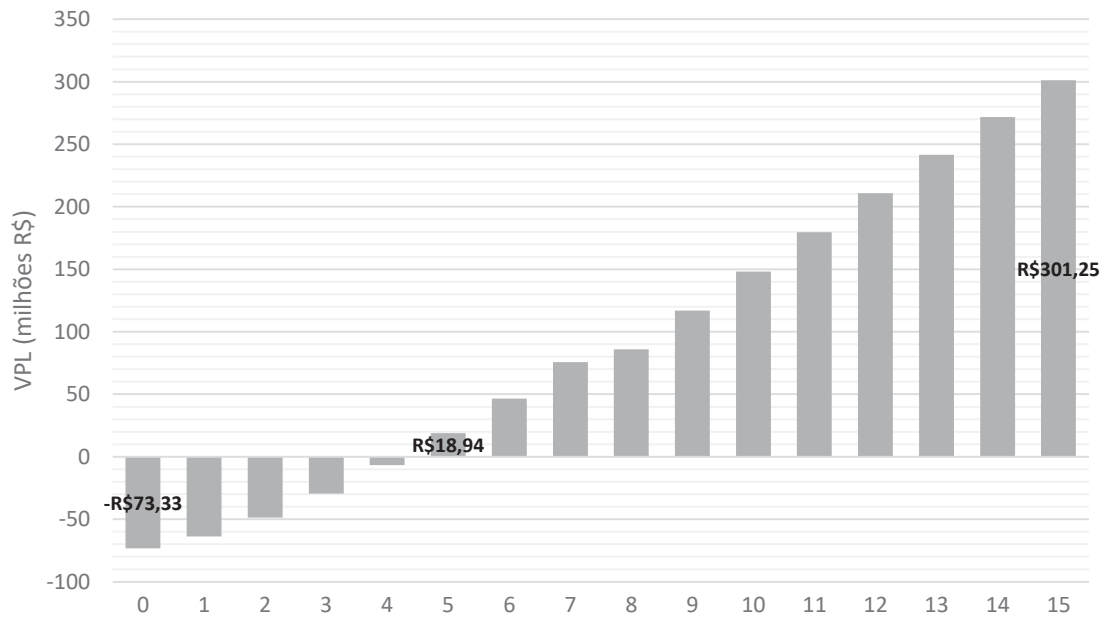
FONTE: a autora

GRÁFICO 19 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 2



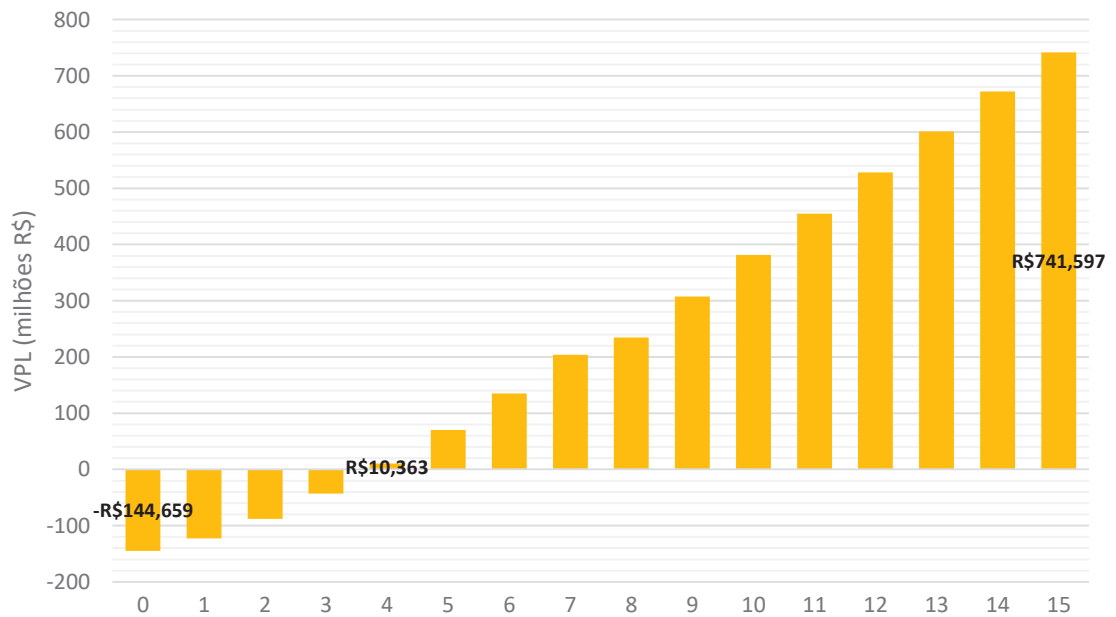
FONTE: a autora

GRÁFICO 20 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 3



FONTE: a autora

GRÁFICO 21 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 4



FONTE: a autora

Hipótese 2:

Os resultados dos indicadores financeiros para a Hipótese 2 estão contemplados na Tabela 22.

TABELA 22 – RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE

Cenário	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	24.338.813,88	30,39	6
2	139.970.013,68	36,11	5
3	282.946.904,20	36,40	5
4	705.308.855,58	41,14	5

FONTE: a autora

Assim como na hipótese 1, o VPL se mostrou positivo para os 4 cenários analisados na hipótese 2, sendo o crescimento diretamente proporcional à capacidade dos aterros.

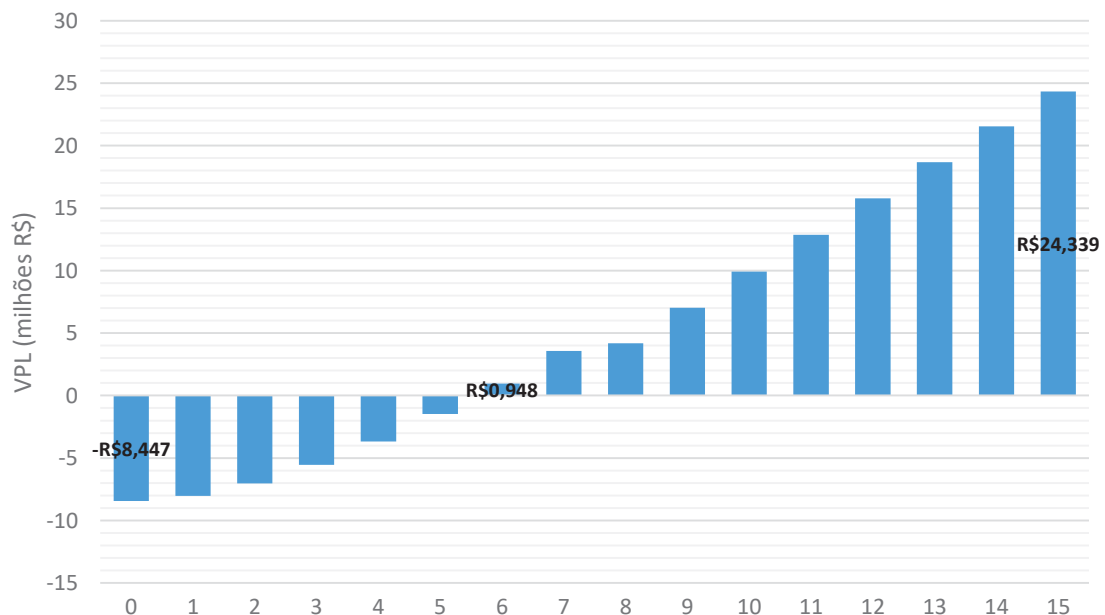
Todas as TIR também foram superiores à TMA (10%).

O tempo máximo de retorno financeiro foi de 6 anos (cenário 1) e o mínimo foi de 5 anos (cenário 2, 3 e 4).

Portanto, o projeto baseado na hipótese 2 também é viável economicamente e não deve ser rejeitado. O cenário 4 é a opção mais rentável, por apresentar o maior VPL e a maior TIR.

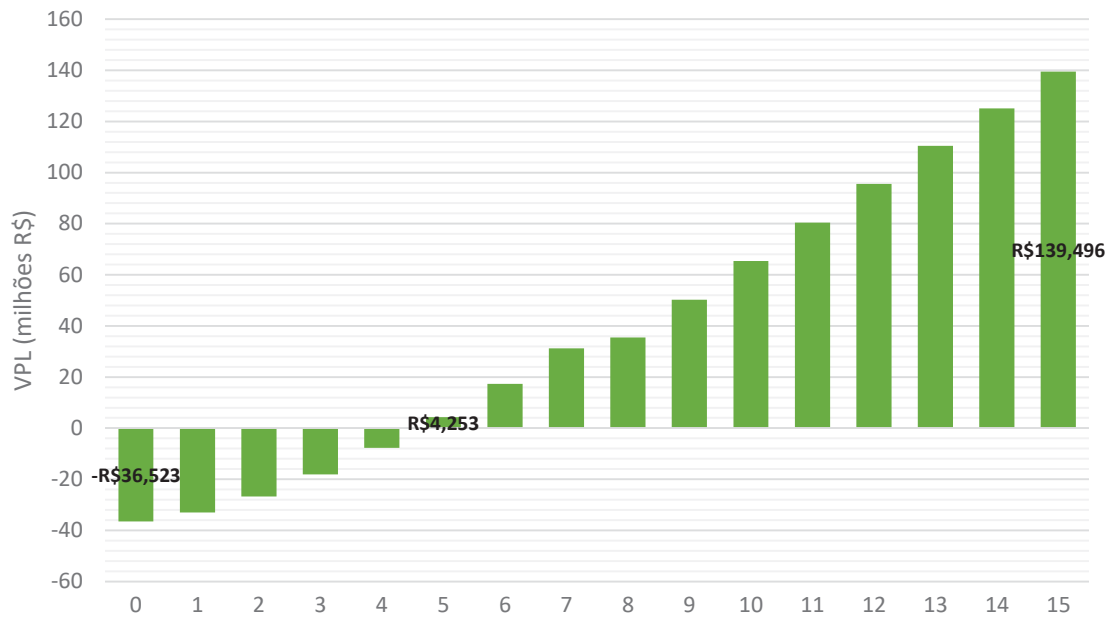
Os Gráficos 22, 23, 24 e 25 ilustram o VPL correspondente a cada cenário da hipótese 2, bem como o *Payback* descontado.

GRÁFICO 22 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 1



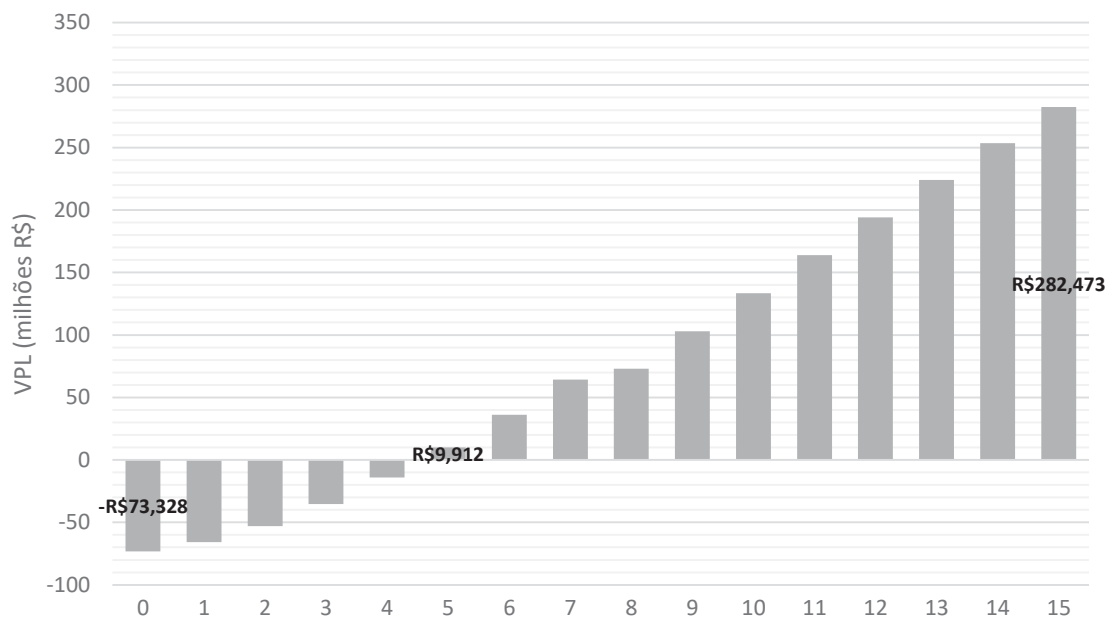
FONTE: a autora

GRÁFICO 23 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 2



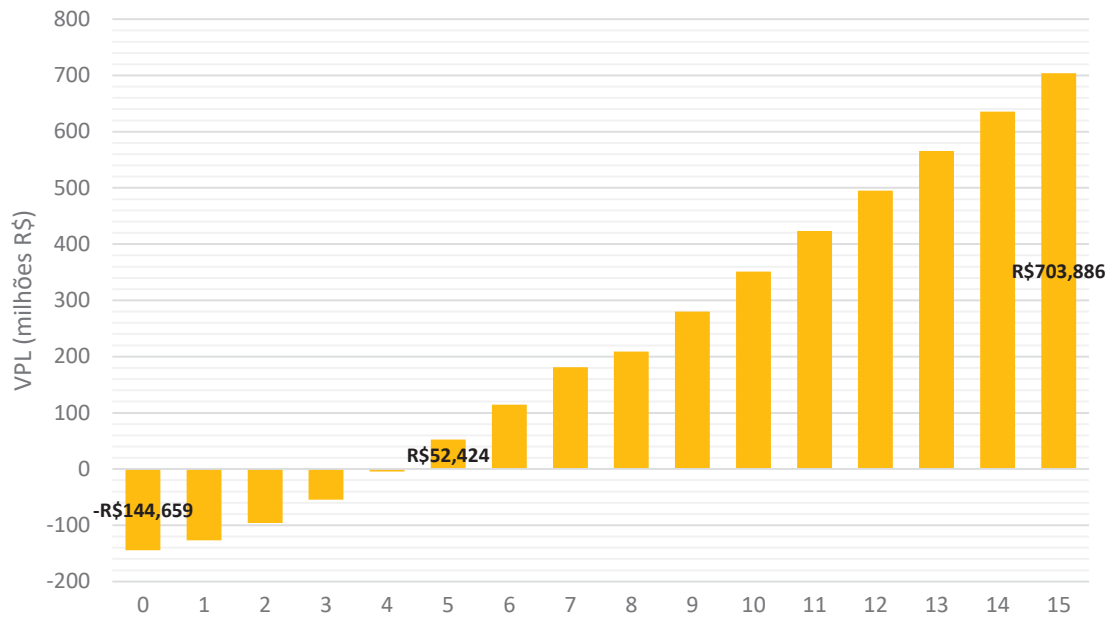
FONTE: a autora

GRÁFICO 24 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 3



FONTE: a autora

GRÁFICO 25 – FLUXO DE CAIXA PARA O CENÁRIO 4



FONTE: a autora

4.8 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A fim de identificar os cenários mais sensíveis à variação dos parâmetros-chave estipulados para essa pesquisa, as análises adiante demonstram os indicadores financeiros (VPL, TIR e *Payback* descontado) atualizados para cada parâmetro-chave.

- Parâmetro preço de venda do biometano

Pelas Tabelas 23 e 24 observam-se os resultados para as hipóteses 1 e 2, referente à alteração no preço de venda do biometano, de R\$ 4,10 para R\$ 4,82 (preço igual ao do GNV) e R\$ 3,71 (preço a postos de combustível).

Hipótese 1:

TABELA 23 – SENSIBILIDADE AO PREÇO DE VENDA DO BIOMETANO

Cenário	Preço igual ao do GNV			Preço para postos de combustível		
	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	33.100.396,39	35,29	5	22.147.112,24	29,57	6
2	185.012.592,86	42,02	4	129.437.253,10	35,89	5
3	373.137.852,03	42,32	4	262.307.456,75	36,28	5
4	885.584.961,76	46,73	4	663.603.886,96	41,21	4

FONTE: a autora

Neste caso, comparando o preço de venda do biometano a R\$ 4,82 com o preço base de R\$ 4,10, o VPL sofre incremento na ordem de R\$ 7.104.832,97, R\$ 36.048.869,03, R\$ 71.889.986,12 e R\$ 143.987.724,19, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 27,33% no valor do VPL inicial, que era igual a R\$ 25.995.563,43. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 19,42%, que era igual a R\$ 741.597.237,57.

A TIR de todos os cenários também sofre incremento, sendo o maior na ordem de 3,84% para o cenário 2 e o menor de 3,48% para o cenário 4.

Quanto ao *Payback*, não há alteração considerável a ser mencionada.

Ao comparar o preço de venda do biometano a R\$ 3,71 com o preço base de R\$ 4,10, o VPL sofre declínio na ordem de R\$ 3.848.451,19, R\$ 19.526.470,73, R\$ 39.940.409,15 e R\$ 77.993.350,61, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 14,80% no valor do VPL inicial. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 10,52%.

A TIR de todos os cenários também sofre declínio, sendo o maior na ordem de 2,29% para o cenário 2 e o menor de 2,04% para o cenário 4.

Quanto ao *Payback*, não há alteração considerável a ser mencionada.

Hipótese 2:

TABELA 24 - SENSIBILIDADE AO PREÇO DE VENDA DO BIOMETANO

Cenário	Preço igual ao do GNV			Preço para postos de combustível		
	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	32.002.444,62	34,59	6	20.187.680,56	27,88	7
2	178.590.754,49	40,58	5	119.050.445,74	33,45	5
3	360.070.295,24	40,84	5	241.171.734,05	33,77	5
4	859.673.728,24	45,26	4	621.694.549,55	38,74	5

FONTE: a autora

Neste caso, comparando o preço de venda do biometano a R\$ 4,82 com o preço de R\$ 4,10, o VPL sofre incremento na ordem de R\$ 7.663.630,74, R\$ 38.620.740,81, R\$ 77.123.391,04 e R\$ 154.364.872,66, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 31,49% no valor

do VPL inicial, que era igual a R\$ 24.338.813,88. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 21,89%, que era igual a R\$ 705.308.855,58.

A TIR de todos os cenários também sofre incremento, sendo o maior na ordem de 4,47% para o cenário 2 e o menor de 4,12% para o cenário 4.

Quanto ao *Payback*, apenas o cenário 4 declina 1 ano, não havendo alteração considerável a ser mencionada para os demais cenários.

Ao comparar o preço de venda do biometano a R\$ 3,71 com o preço de R\$ 4,10, o VPL sofre declínio na ordem de R\$ 4.151.133,32, R\$ 20.919.567,94, R\$ 41.775.170,15 e R\$ 83.614.306,03, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 17,06% no valor do VPL inicial. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 11,85%.

A TIR de todos os cenários também sofre declínio, sendo o maior na ordem de 2,66% para o cenário 2 e o menor de 2,40% para o cenário 4.

Quanto ao *Payback*, apenas o cenário 1 tem incremento de 1 ano, não havendo alteração considerável a ser mencionada para os demais cenários.

- Parâmetro investimento em caminhões a gás

Nas Tabelas 25 e 26 constam os resultados para as hipóteses 1 e 2, respectivamente, referente à alteração no preço de compra do caminhão compactador de resíduos, de R\$ 1.140.000,00 para R\$ 855.000,00 (custo 25% menor) e R\$ 570.000,00 (custo 50% menor).

Hipótese 1:

TABELA 25 – SENSIBILIDADE AO INVESTIMENTO EM CAMINHÕES A GÁS

Cenário	Custo 25% menor			Custo 50% menor		
	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	27.667.381,84	35,09	5	29.339.200,25	39,3	5
2	156.619.861,29	42,48	4	164.275.998,75	48,03	4
3	316.845.140,83	43,01	4	332.442.415,76	48,83	4
4	772.506.787,42	48,14	4	803.416.337,28	54,53	4

FONTE: a autora

Neste caso, comparando o preço de compra do caminhão compactador de resíduos de R\$ 855.000,00 com o preço base de R\$ 1.140.000,00, o VPL aumenta na ordem de R\$

1.671.818,41, R\$ 7.656.137,46, R\$ 1.559.724,93 e R\$ 30.909.549,86, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 é o mais sensível, com alteração de 6,43% no valor do VPL inicial, que era igual a R\$ 25.995.563,43. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 4,17%, que era igual a R\$ 741.597.237,57.

A TIR de todos os cenários também sofre aumento, sendo a maior diferença na ordem de 4,89% para o cenário 4 e a menor de 3,37% para o cenário 1.

Quanto ao *Payback*, os cenários 1, 2 e 3 apresentam redução de 1 ano cada, enquanto o cenário 4 não tem alteração considerável a ser mencionada.

Ao comparar o preço de compra do caminhão compactador de resíduos de R\$ 570.000,00 com o preço base de R\$ 1.140.000,00, o VPL aumenta na ordem R\$ 3.343.636,83, R\$ 15.312.274,93, R\$ 31.194.549,86 e R\$ 61.819.099,71, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 12,86% no valor do VPL inicial. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 8,34%.

A TIR de todos os cenários também sofre aumento, sendo a maior diferença na ordem de 11,28% para o cenário 4 e a menor de 7,58% para o cenário 1.

Quanto ao *Payback*, todos os cenários apresentam redução de 1 ano, com exceção do cenário 4, que não tem alteração considerável a ser mencionada.

Hipótese 2:

TABELA 26 - SENSIBILIDADE AO INVESTIMENTO EM CAMINHÕES A GÁS

Cenário	Custo 25% menor			Custo 50% menor		
	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	26.010.632,29	33,64	6	27.682.450,71	37,69	5
2	147.626.151,15	40,1	5	155.282.288,61	45,20	4
3	298.544.179,12	40,55	5	314.141.454,05	45,89	4
4	736.218.405,43	45,69	4	767.127.955,29	51,60	4

FONTE: a autora

Neste caso, comparando o preço de compra do caminhão compactador de resíduos de R\$ 855.000,00 com o preço base de R\$ 1.140.000,00, o VPL de cada cenário aumenta na mesma ordem observada para a hipótese 1. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 é o mais

sensível, com alteração de 6,87% no valor do VPL inicial, que era igual a R\$ 24.338.813,88. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 4,38%, que era igual a R\$ 705.308.855,58.

A TIR de todos os cenários também sofre aumento, sendo a maior diferença na ordem de 4,55% para o cenário 4 e a menor de 3,25% para o cenário 1.

Quanto ao *Payback*, somente o cenário 4 tem redução de 1 ano, enquanto os demais cenários não têm alteração considerável a ser mencionada.

Ao comparar o preço de compra do caminhão de resíduos de R\$ 570.000,00 com o preço base de R\$ 1.140.000,00, o VPL de cada cenário aumenta na mesma ordem observada para a hipótese 1. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 13,74% no valor do VPL inicial. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 8,76%.

A TIR de todos os cenários também sofre aumento, sendo a maior diferença na ordem de 10,46% para o cenário 4 e a menor de 7,30% para o cenário 1.

Quanto ao *Payback*, todos os cenários apresentam redução de 1 ano, sem exceção.

- Parâmetro distância percorrida por caminhão

As Tabelas 27 e 28 apresentam os resultados dos indicadores financeiros para as hipóteses 1 e 2, respectivamente, referente à alteração da distância percorrida mensalmente por cada caminhão para a distância mínima e a máxima aceitáveis.

Hipótese 1:

TABELA 27 – SENSIBILIDADE À DISTÂNCIA PERCORRIDA POR CAMINHÃO

Cenário	Distância mínima considerada			Distância máxima considerada		
	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	23.079.028,06	28,98	6	28.912.098,79	34,54	5
2	144.955.209,91	37,25	5	152.972.237,74	39,12	5
3	293.091.092,07	37,58	5	309.404.639,74	39,50	5
4	725.423.435,91	42,30	4	757.771.039,23	44,21	4

FONTE: a autora

Neste caso, comparando a distância percorrida mensalmente por um caminhão igual a 3.699km com a distância base de 5.199km, o VPL sofre redução na ordem de R\$ 2.916.535,36, R\$ 4.008.513,91, R\$ 8.156.773,84 e R\$ 16.173.801,66, para os cenários 1, 2, 3 e 4,

respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 11,22% no valor do VPL inicial, que era igual a R\$ 25.995.563,43. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em 2,18%, que era igual a R\$ 741.597.237,57.

A TIR de todos os cenários também sofre redução, sendo a maior diferença na ordem de 2,74% para o cenário 1 e a menor diferença de 0,93% para o cenário 2.

Quanto ao *Payback*, não há alteração considerável a ser mencionada.

Ao comparar a distância percorrida por um caminhão igual a 6.699km/mês com a distância base de 5.199km/mês, o VPL de cada cenário sofre incremento na mesma ordem do VPL para a distância de 3.699km/mês visto anteriormente. Sendo assim, o cenário 1 também é o mais sensível e o cenário 4 é o menos sensível.

A TIR de todos os cenários também sofre incremento, sendo o maior na ordem de 2,82% para o cenário 1 e o menor de 0,94% para o cenário 2.

Quanto ao *Payback*, apenas o cenário 1 apresenta redução de 1 ano enquanto nos demais não há alteração considerável a ser mencionada.

Hipótese 2:

TABELA 28 - SENSIBILIDADE À DISTÂNCIA PERCORRIDA POR CAMINHÃO

Cenário	Distância mínima considerada			Distância máxima considerada		
	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)	VPL (R\$)	TIR (%)	PAYBACK (anos)
1	24.030.822,42	30,09	6	24.646.805,34	30,70	6
2	138.556.338,24	35,78	5	141.383.689,12	36,43	5
3	280.070.269,34	36,07	5	285.823.539,05	36,73	5
4	699.604.869,84	40,81	5	711.012.841,31	41,47	5

FONTE: a autora

Neste caso, comparando a distância percorrida mensalmente por um caminhão igual a 3.699km com a distância base de 5.199km, o VPL sofre redução na ordem de R\$ 307.991,46, R\$ 1.413.675,44, R\$ 2.876.634,86 e R\$ 5.703.985,74, para os cenários 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Contudo, em termos percentuais, o cenário 1 se mostra o mais sensível, com alteração de 1,27% no valor do VPL inicial, eu era igual a R\$ 24.338.813,88. Já o cenário 4 é o menos sensível, alterando o VPL em apenas 0,81%, que era igual a R\$ 705.308.855,58.

A TIR de todos os cenários também sofre redução, mas de valor pouco significativo.

Quanto ao *Payback*, não há alteração considerável a ser mencionada.

Ao comparar a distância percorrida por um caminhão igual a 6.699km/mês com a distância base de 5.199km/mês, o VPL de cada cenário sofre incremento na mesma ordem do VPL para a distância de 3.699km/mês visto anteriormente. Sendo assim, o cenário 1 também é o mais sensível e o cenário 4 é o menos sensível.

A TIR de todos os cenários também sofre incremento, mas de valor pouco significativo. Quanto ao *Payback*, não há alteração considerável a ser mencionada.

5 CONCLUSÃO

Além de atingir o seu objetivo principal, os resultados obtidos permitiram responder à questão central da pesquisa, uma vez que o biometano proveniente de aterros sanitários apresentou grande potencial para abastecimento de caminhões coletores compactadores de resíduos, servindo tanto para suprir a necessidade de autoconsumo dos caminhões atrelados aos aterros dos 4 cenários estudados quanto para atender a consumidores externos que façam uso do mesmo modelo de equipamento e tenham as mesmas características operacionais.

Apesar dos altos custos para implantação de um sistema de aproveitamento energético do biometano, percebeu-se que o custo de OPEX unitário é muito inferior ao custo para adquirir o diesel junto aos postos de combustível. Além disso, mesmo havendo perdas no sistema de coleta de biogás e no processo de purificação, a quantidade de biometano gerada pelas toneladas de resíduos depositadas nos aterros é suficiente para viabilizar os projetos referentes aos 4 cenários analisados, pois todos apresentam retorno financeiro positivo dentro do tempo de vida útil de 15 anos. Para fins de comparação, pode-se afirmar que o cenário 4 é o mais atrativo, tendo apresentado VPL acima de 700 milhões de reais para as 2 hipóteses de rendimento veicular analisadas; e o cenário 1 o menos atrativo, apesar de ter apresentado VPL acima de 20 milhões para as 2 hipóteses de rendimento veicular analisadas.

A emissão potencialmente evitada de GEE variou, de forma acumulada, de 133,3 bilhões a 2,6 trilhões de tCO₂eq, o que, além de representar uma preciosa oportunidade para a descarbonização do setor de transportes, também pode contribuir com lucros adicionais, mediante a comercialização de CBIOs.

Dentre os parâmetros considerados para a análise de sensibilidade, o preço de venda do biometano foi o que apresentou maior capacidade de alteração do VPL, em seguida o preço de compra do caminhão e, por último, a distância percorrida por caminhão.

Cabe destacar que o cenário 1 foi o mais sensível em todos os 3 parâmetros analisados, o que condiz com o fato dele ser o menos rentável dentre os demais cenários. A distância entre o ponto de coleta de resíduos e o aterro sanitário praticamente não influenciou nos resultados financeiros, exceto para o caso do cenário 1 na Hipótese 1 de rendimento veicular.

A redução de 50% no custo do caminhão foi a situação que mais impactou positivamente no tempo de *Payback* e na TIR dos projetos.

A injeção do biometano excedente em rede de gás natural mostrou ser uma opção economicamente viável, em termos de preço de venda aos postos de combustível, apesar de ser uma opção menos rentável que a opção de venda do biometano a consumidor direto.

A pesquisa serve de base para outros estudos que incentivem a geração de biometano proveniente de aterros sanitários. Fica como sugestão para trabalhos futuros a análise do impacto da adesão dos projetos ao RENOVABIO; a perspectiva de ampliação das opções de meios de transporte que possam se beneficiar com a adoção do biometano; e uma análise econômica mais detalhada, que considere a taxa de inflação nos fluxos de caixa e contemple mais indicadores financeiros.

REFERÊNCIAS

AGGARANGSI, P. et al. Performance comparison of biomethane, natural gas and gasoline in powering a pickup truck. **Biofuels**. v. 13, n. 8, 2022. DOI: 10.1080/17597269.2022.2041231

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15849: Resíduos Sólidos Urbanos - Aterros sanitários de pequeno porte** - Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. 1 ed. Rio de Janeiro, 2010. 24 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas (RNTRC)**, Brasília, 2020. Disponível em: <<https://www.antt.gov.br/web/guest/rntrc>>. Acesso em: 07 jun. 2022

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução nº 8, de 30.1.2015 - DOU 2.2.2015**. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. Brasil, 2015. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n8-2015?origin=instituicao&q=8/2015>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). **Resolução nº 685, de 29 de junho de 2017**. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Brasil, 2017. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/?q=685%2F2017&types=24>>. Acesso em: 19 ago. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS (ANP). Preços de revenda e de distribuição de combustíveis. Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis>> Acesso em: 20 jan. 2023

AGÊNCIA REGULADORA DE SANEAMENTO E ENERGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO (ARSESP). **Dispõe sobre a proposta de regulação da introdução do biometano na rede de distribuição de gás natural**. Nota Técnica NTG 004/2016. São Paulo, 2016.

Disponível em:

<http://www.arsesp.sp.gov.br/consultaspublicasbiblioteca/ntg_n_004_2016.pdf> Acesso em: 25 abr. 2023

AMBIENTE BRASIL. **Caminhões de lixo são os que mais emitem dióxido de carbono**. 2011. Disponível em: <<https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2011/10/24/75973-caminhoes-delixo-sao-os-que-mais-emitem-dioxido-de-carbono.html>> Acesso em: 22 jun 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS E DO BIOMETANO (ABIOGÁS). **Perguntas frequentes**. c2013. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/perguntas-frequentes/>> Acesso em: 07 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS E DO BIOMETANO (ABIOGÁS). **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano (PNBB)**. São Paulo, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2021.

ASSUNÇÃO, C. R. L.; BORSCHIVER, S.; MENDES, S. A. P. Avaliação de tendências para a produção e utilização de biometano por meio de Tech-Mining & Roadmapping. **Rio Oil & Gas Expo and Conference**, 2020.

AWOGBEMI, O.; KALLON D. V. V. Valorization of agricultural wastes for biofuel applications. **Heliyon**, v. 8, 2022. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e11117

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Relatório Focus**. 2023. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>> Acesso em: 30 abr. 2023

BIOGASMAP. **Painel dinâmico de plantas de biogás e biometano brasileiras**. 2022.

Disponível em:

<<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODc2NThhOGItOTc2Ny00ZDc1LWl5MTMtYjYwZTRlYjFiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWU5NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>> Acesso em: 14 jul. 2022.

BLOG JORNADA: SOLUÇÕES DE TRANSPORTE SUSTENTÁVEL. **Tudo o que você queria saber**. Disponível em:

<<https://jornadascania.com.br/jornada06/03tiraduvidas.php#sobreScania>> Acesso em: 25 mar. 2022

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 03 de ago. 2010. Seção 1, p. 3.

CARVALHO, M. V. **Análise econômica das opções de biometanização, compostagem e reciclagem para tratamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/20992/1/MatheusVieiraCarvalho_Dissert.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2022

CARVALHO, Q. R. et al. **Oportunidades Enterradas: Geração Elétrica a partir do Biogás de Resíduos Sólidos Urbanos**. Editora da UFES, 2019. 1 ed., 320 p.

CAVALEIRO, A. J., ALVES, M. M. Digestão anaeróbia. **Revista Ciência Elementar**. V. 8(01):009, mar., 2020.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE). **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 4. ed. São Paulo, 2018.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Manual do usuário do programa de computador Biogás e uso energético – aterros – versão 1.0**. Secretaria do Meio Ambiente, Ministério da Ciência e Tecnologia. São Paulo: 2006. 61 p. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/biogas/software/>> Acesso em: 05 fev. 2023.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (CIBIOGÁS). **Panorama do biogás no Brasil: 2021**. Foz do Iguaçu, 2022. Relatório Técnico. Disponível em: <<https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2022/04/NT-PANORAMA-DO-BIOGAS-NO-BRASIL-2021.pdf>> Acesso em: 18 mai. 2022

CLEMENTINO, W. da S. **Análise de condicionantes para injeção do biometano na rede de distribuição de gás canalizado**. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Setor de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1230386>> Acesso em: 11 fev. 2022

CLIMATE & CLEAN AIR COALITION (CCAC). **United Nations Environment Programme**. Disponível em: <<https://www.ccacoalition.org/en/content/short-lived-climate-pollutants-slcp>> Acesso em: 03 mai. 2022

COELHO, J. M. Gás natural em veículos pesados em um contexto de transição energética. In: II Seminário internacional Mobilidade a Gás Natural: a solução para o Brasil. 2019.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE GÁS (COPERGÁS). **Industrial**. Recife, c2022. Disponível em: <<https://www.copergas.com.br/produtos/industrial/>> Acesso em: 11 ago. 2022

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Meio Ambiente e Saneamento**. Prazo para instalação dos aterros sanitários deve ser adequado à realidade local, defende CNM. 2019. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/prazo-para-instalacao-dos-aterros-sanitarios-deve-ser-adequado-a-realidade-local-defende-cnm>> Acesso em: 06 jul. 2023

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT do Transporte 2021**: estatísticas consolidadas. 2021. Disponível em <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/File/PrincipaisDados.pdf>> Acesso em: 10 mai. 2022

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Boletim Ambiental**. Programa Ambiental do Transporte (DESPOLUIR). 2022. Disponível em: <<https://cmsdespoluir.cnt.org.br/Documents/Site%20Novo/Boletins/Boletim%20Ambiental%20Agosto%202022.pdf>>. Acesso em: 08 mai. 2022

CONTRERA, R. C. Biometanização de resíduos sólidos orgânicos. In: V Simpósio sobre Resíduos Sólidos. USP, São Carlos (SP), 2017.

CORDEIRO, F. B. **Análise de tecnologias de digestão anaeróbia para tratamento de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Setor de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em: <<http://epqb.eq.ufrj.br/download/tecnologias-de-digestao-anaerobia-para-tratamento-de-fracao-orgânica-de-resíduos-sólidos-urbanos.pdf>> Acesso em: 24 jun. 2022

CRIPPA, M., et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. **Nature Research**. 2021. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/349903586_Food_systems_are_responsible_for_a_third_of_global_anthropogenic_GHG_emissions> Acesso em: 02 mai. 2023

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudo sobre a Economicidade do Aproveitamento dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro para Produção de Biometano.** Nota Técnica DEA 019/2018. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-309/NT%20Biometano%20de%20Aterro%20vf%200192018.pdf>> Acesso em: 16 mai. 2022

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Indicativo de Gasodutos de Transporte.** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-531/PIG_2020_Final_30nov20.pdf> Acesso em: 24 abr. 2022

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Demanda Energética do Setor de Transportes.** Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf> Acesso em: 03 fev. 2022

ESTADÃO. **Scania a gás P 280 6x4 mira setor canavieiro; veja o preço.** 2022. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/scania-a-gas-p-280-6x4-mira-setor-canavieiro-veja-o-Preco/#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20marca,tabela%20da%20versão%20a%20dies el.>> Acesso em: 28 mar. 2022

EIDAM, E. L. Efeitos de seleção preliminar de resíduos sólidos urbanos na produção de biogás em aterros sanitários: estudo de caso em Ponta Grossa, Paraná Brasil. 2019. 12f. Monografia (Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION (EBA). **European Biomethane Map 2020.** Disponível em: <<https://www.europeanbiogas.eu/the-european-biomethane-map-2020-shows-a-51-increase-of-biomethaneplants-in-europe-in-two-years/>> Acesso em: 01 ago. 2022

FARIA, D. V. A.; LEITE L. B. G.; OLIVEIRA, W. F. Análise da viabilidade econômica e financeira do uso do biogás como geração de receita acessória: um estudo de caso no aterro CVR do Cacau, Ilhéus/BA. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Salvador, 2021.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ (FIEP) E SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL DO PARANÁ (SENAI-PR). **Oportunidades da cadeia produtiva de biogás para o estado do Paraná.** Curitiba (PR), 2016, 144p.

FERNANDES, B. A. et al. Estudo da emissão de gases da combustão do diesel S10 e blendas de butanol. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21.; 2016, Fortaleza: ABEQ, 2016.

FERREIRA, S. F. et al. Environmental impact assessment of end-uses of biomethane, **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 613-621, 2019. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.034

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS (TABELA FIPE). **Preço médio de veículos**. Disponível em: <<https://veiculos.fipe.org.br>> Acesso em: 01 fev. 2023

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **ONU: 17% de todos os alimentos disponíveis para consumo são desperdiçados**. 2021. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1379033/>> Acesso em: 10 abr. 2022

FRANCA, S. L.; FERREIRA, O. B. Túneis de Metanização como tecnologia de tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. **Revista Ineana**. V. 08, n. 01, p.58 – 74, Rio de Janeiro, 2020.

FRANCO, C. A. et al. Advances and challenges on the technologies and applications of biomethane. **Energy Sources**. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2021.

GARCILASSO, V. P. et al. **Tecnologia de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: Synergia, Editora Concórdia, USP, 2018.

GUERREIRO, E. M. da S. **Potencial de aproveitamento energético de biometano gerado em aterros sanitários: estudo de casos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 2020. Disponível em: <<http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2020/Dissert-PEAMB-2020-Erica-Machado-Guerreiro.pdf>> Acesso em: 16 jul. 2022

GUIMARÃES, G. A. A et al. Avaliação da ecoeficiência da produção de biometano via biogás. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

ICLEI, Governos Locais para a Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento de biogás**. São Paulo, 2009, V. 1, 81 p. Disponível em: <<http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.html>> Acesso em: 21 de dez. 2022

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). Life-Cycle greenhouse gas emissions of biomethane and hydrogen pathways in the European Union. Washington, 2021

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. 2022a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/index.html?utm_source=portal&utm_medium=popclock&utm_campaign=novo_popclock> Acesso em: 26 ago. 2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Séries históricas e estatísticas: taxa de urbanização**. 2022b. Disponível em: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>> Acesso em: 26 ago. 2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE divulga estimativa da população dos municípios para 2021**. 2021. Disponível em:

<<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31461-ibge-divulga-estimativa-da-populacao-dos-municipios-para-2021>>

Acesso em: 03 jul. 2023

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DO MATO GROSSO DO SUL (IMASUL). **Critérios para pré-seleção de áreas para implantação de aterros sanitários**. 2016. Disponível em:

<<https://www.imasul.ms.gov.br/wp-content/uploads/2016/01/Critérios-para-seleção-de-áreas-de-aterro-sanitário.pdf>> Acesso em: 07 set. 2022

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – **AR6 Mudanças Climáticas 2021: A Base da Ciência Física**. 2021. Disponível em:

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf>.

Acessado em: 01 mai. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 5, Waste, chapter 2, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual**. Vol.3, 1996. Disponível em:

<<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: 04 ago. 2022

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Mitigation of climate change**. Working Group III. Chapter 11, Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU), Cambridge Univ Press, Cambridge, UK, 2014.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION (ISWA). O futuro do setor de gestão de resíduos: tendências, oportunidades e desafios para a década (2021-2030). 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Road transport: the cost of renewable solutions**. 2013.

JAGTAP, N.J., DALVI, V.H., 2021. Feasibility study of bio-methane economy in India. **Biomass Bioenergy**, v. 149, 106059. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106059.

JANUS & PERGHER. **Biometano**. 2020. Disponível em:

<<https://januspergher.com.br/index.php/biometano/>> Acesso em: 08 jun. 2022

JANUS & PERGHER. **Purificação de Biogás a partir de Aterros Sanitários**. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: geraldopergher@januspergher.com.br. 14 fev. 2023.

KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: A short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, [s.l.], v. 31, p.113-120, mar. 2014.

KAZA et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development Series; Washington, D. C.: World Bank, 2018.

LAWSON, N et al. Techno-economic assessment of biological biogas upgrading based on Danish biogas plants. **Journal Energie**, 14 8252, 2021.

LIMA, A. de et al. Análise da recuperação energética do biogás de aterros sanitários, **Revista InterfacEHS**, v. 12, n. 1, p. 68-81, 2017.

LIMA, C. A. **Panorama da coleta seletiva na cidade do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.urb.puc-rio.br/upload/dissertations/1513160_2018_CompletosS4AULiPYZmKTTNXxw75.pdf> Acesso em: 01 jul. 2022

LORENZI, G. et al. Life Cycle Assessment of biogas upgrading routes. In: 10th International Conference on Applied Energy. Hong Kong, China, 2018.

LYNG, k. A.; BREKKE, A. Environmental Life Cycle Assessment of biogas as a fuel for transport compared with alternative fuels. **Energies**, 12 p., 2019.

LYRA, G. B et al. Estimativa de geração de biogás em aterro sanitário no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n.7, P. 2276-2286, 2018.

MACHADO, P. G. et al. Review of life cycle greenhouse gases, air pollutant emissions and costs of road medium and heavy-duty trucks. **Wiley Periodicals**, 18p., 2020a.

MACHADO, P. G. et al. Natural gas vehicles in heavy-duty transportation – A political-economic analysis for Brazil. [s.l.], vol. 9, p. 22-39, 2020b.

MAGALHÃES et al. A Gestão de resíduos sólidos na cidade do Rio de Janeiro. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ed. 06, Vol. 11, pp. 56-71, jun. 2020.

MALINOWSKY, C. **Tratamento dos resíduos sólidos orgânicos da UFSC através de biodigestor anaeróbio**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 22 jun. 2022

MARTÍN-HERNÁNDEZ, E., GUERRAS, L.S., MARTÍN, M., 2020. Optimal technology selection for the biogas upgrading to biomethane. **J. Clean. Prod.**, v. 267, 122032. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122032.

MAJDINASAB, A.; ZHANG, Z.; YUAN, Q. Modelling of landfill gas generation: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 16, n. 2, p. 361–380, 2017.

MARANA, K. B. B. et al. Análise comparativa do potencial de produção de biometano a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos em dois cenários: aterro sanitário de biodigestores. In: X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Fortaleza: IBEAS, 2019.

MARIANI, L. Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2018.

Disponível em: < https://www.saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2020/05/Mariani_Leidiane_D.pdf> Acesso em: 28 jul. 2022.

MARTINS, R. D. Potencial energético e produção de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos e resíduos vitivinícola na cidade de Bento Gonçalves e região. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Pelotas, 2018.

MAVRIDIS, S.; VOUDRIAS, E. A. Using biogas from municipal solid waste for energy production: Comparison between anaerobic digestion and sanitary landfilling. **Energy Conversion and Management**, 2021. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114613

MELLIOS, G.; GOULIAROU, E. Greenhouse gas intensities of road transport fuels in the EU in 2018: monitoring under the Fuel Quality Directive. **European Topic Centre on Climate change mitigation and energy**. Belgium, Nov. 2020.

MENEGHELLO, M. M. **Avaliação da utilização de biodigestores como alternativa aos resíduos sólidos urbanos da região metropolitana da Baixada Santista**. Dissertação (Mestrado em Bioprodutos e Bioprocessos) - Universidade Federal de São Paulo, SP, 2021.

Disponível em:

<<https://repositorio.unifesp.br/xmlui/bitstream/handle/11600/62082/20211008%20Fernanda%20Meneghello%20-%20Defesa%20RSUBS%20%28A%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

Acesso em:

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Política Nacional de Biocombustíveis (RENOVABIO). **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Diário Oficial da União. Brasil, Brasília (DF), 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME): **Boletim Mensal do Acompanhamento da Indústria de Gás Natural**. Fevereiro/2023. Disponível em: < https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2023/02-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-fevereiro-de-2023_parcial.pdf/view> Acesso em: 02 jun. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Programa Nacional Metano Zero**. Brasília, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/climaozoniodesertificacao/ProgramaMetanoZero.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2022.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Aproveitamento Energético do Biogás de Aterro Sanitário. Brasília. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario.html>> Acesso em: 27 jun. 2023

MULLER, M. Estudo sobre a cadeia produtiva do biometano e seu uso em veículos no Brasil. Monografia (Especialização em Energias Renováveis) – Setor de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

NADALETTI, W. C. C. et al. Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: a review. **Renew Sustain Energy**, 41:277–83, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.08.052.

NETO, D. P. Processo de Otimização aplicada à análise de risco de investimento em geração de energia elétrica com Fontes Renováveis. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e de Computação) – EMC, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/7793/5/Tese%20-%20Daywes%20Pinheiro%20Neto%20-%202017.pdf>> Acesso em: 10 mar. 2023

NOGUEIRA T. **Aula: Poluição Atmosférica.** Universidade de São Paulo (SP), 2018. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/material/mftandra2/ACA0225/Meteorologia_Poluição%20Atmosférica_Thiago.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2022

OLIVEIRA et al. BIOMETRUCK: Modificação de motores diesel para utilização de combustíveis renováveis em caminhões de coleta de lixo. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica Automotilística) - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo (SP), 2022.

PARITOSH, K. et al. Food Waste to Energy : An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling. *BioMed Research International*, v. 2017, 2017

PINHEIRO, I. S., FERREIRA, J. A. Economicidade dos serviços de coleta e transporte de resíduos sólidos urbanos. Relatório do Programa de pesquisa da Escola de Contas e Gestão do Tribunal de Contas do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

PROJETO BRASIL-ALEMANHA DE FOMENTO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS NO BRASIL (PROBIOGÁS). **O Estado da Arte da Tecnologia de Metanização Seca.** Ministério das cidades, Brasília (DF), 2015a.

PROJETO BRASIL-ALEMANHA DE FOMENTO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS NO BRASIL (PROBIOGÁS). **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: Substratos, Digestores e uso do biogás.** Ministério das Cidades, Brasília (DF), 2015b.

RAJENDRAN, K.; O'GALLACHOIR, B.; MURPHY, J. D. The combined role of policy and incentives in promoting cost efficient decarbonisation of energy: A case study for biomethane. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 278-290. 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.298

RIBEIRO, R. L. M. Dimensionamento de um coletor compactador de resíduos sólidos urbanos sobre chassi. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

ROMANELLI, T. L. AULA 9: Análise de ciclo de vida (ACV). Universidade de São Paulo: Departamento de Engenharia de Biosistemas, SP, 2021. Disponível em: <<https://eaulas.usp.br/portal/video.action?idItem=17649>>. Acesso em: 30 jul. 2022

SAMANEZ, C. P. **Matemática Financeira.** São Paulo: Pearson, 2010.

SANT'ANNA, A. et al. O estado da qualidade do ar no Brasil. **WRI Brasil**, Working Paper. 2021.

SANTOS, A. de P.; SILVA, E. A. Análise e dimensionamento para implantação de um aterro sanitário para as cidades de Jaraguá, Jesúpolis e São Francisco de Goiás. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Unievangélica, Anápolis – Goiás, 2018.

SANTOS, G. et al. Otimização da captação de metano de um aterro sanitário do Nordeste brasileiro, **Revista Principia**, João Pessoa, n. 47, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/3366/1177>>. Acesso em: 05 ago. 2022

SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; FILHO, G.L.T Economic study on LFG energy projects in function of the number of generators. **Sustainable Cities and Society**, v. 41, p. 587-600, 2018. DOI: 10.1016/j.scs.2018.04.029

SANTOS, M. V. dos. **Principais problemas dos motores a biogás e tecnologias de biometanização: estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Taubaté, SP, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/4723/1/Marcelo%20Valerio%20dos%20Santos.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2022

SCANIA. **Caminhões Scania Movidos a Gás**. 2020. Disponível em: <https://www.scania.com/content/dam/www/market/br/pdfs1/especificacoes/caminhoes/00087-2020_caminhoes_a_gas_Low.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2022

SCANIA. **Solicitação #13818**. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: faleconosco_scaniabrasil@support.mail.scania.com. 25 jan. 2023.

SHANMUGAM, K. et al. Social Cost benefit analysis of operating compressed biomethane (CBM) transit buses in cities of developing nations: a case study. **Sustainability**. 11 4190, 2019.

SILVA, B. L. M; MEZZARI, P. M. Tratamento e Purificação de Biogás. In: AMARAL, A. C. do; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019. P. 69-93.

SILVA, F. P. F. et al. Políticas públicas para o transporte rodoviário de cargas no Brasil: impactos sobre a demanda energética e a emissão de poluentes atmosféricos. **Rio Oil & Gas**. Rio de Janeiro: 2020. DOI: 10.48072/2525-7579.rog.2020.540

SILVA, R.F. et al. Diagnóstico das Emissões Atmosféricas de Origem Veicular na Área Urbana De Campo Mourão – Pr. In: XX Congresso Brasileiro de engenharia Química. Florianópolis, SC: 2014.

SILVA, S. T. S. et al. Technical and economic evaluation of using biomethane from sanitary landfills for supplying vehicles in the Southeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 196, p. 1142-1157, 2022. DOI: 10.1016/J.RENENE.2022.07.020

SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG).

Emissões por setor: Resíduos. 2022. Disponível em:

<<https://plataforma.seeg.eco.br/sectors/residuos>>. Acesso em: 30 mai. 2022

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Panorama do Saneamento no Brasil**. Brasília, 2021.

SOARES, L. M. **Previsão das Emissões Veiculares com a implantação gradativa de veículos híbridos e elétricos na cidade do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro (RJ), 2019. Disponível em: <<file:///E:/Laiza%20Molezon%20Soares.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2022

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos – Caieiras. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**. V. 22, n. 5, p. 993-1003, 2017.

SOARES, R. F. **Reaproveitamento energético dos resíduos orgânicos**. Ambiental Mercantil Notícias, São Paulo, mar. 2021. Entrevista. Disponível em: <<https://noticias.ambientalmercantil.com/31/03/2021/reaproveitamento-energetico-dos-residuos-organicos/>>. Acesso em: 14 jun. 2022

STILPEN, M. R.; STILPEN, D. V. de S.; MARIANI, L. F. Análise do Programa Renovabio no Âmbito do setor de Biogás e Biometano do Brasil. **Revista Brasileira de Energia**. Rio de Janeiro, Vol. 24, nº 4, 2018.

TRIBUNAL DE CONTAS DOS MUNICÍPIOS DO ESTADO DE GOIÁS (TCM-GO). **Manual De Orientações para Análise de Serviços de Limpeza Urbana**. Goiânia, 2016.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Food waste index report**. 2021. Disponível em:

<<https://drive.google.com/file/d/1KTB1mq9sSWXx38bDfvF0PQy0sEKYsgrn/view>>. Acesso em: 11 abr. 2022

VECCHI, T. P. B. Otimização de rotas dos caminhões de coleta de resíduos sólidos urbanos. Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Maringá, 2016.

Disponível em: <<http://repositorio.uem.br:8080/jspui/bitstream/1/3664/1/000224304.pdf>>

Acesso em: 09 dez. 2022

WORLD BANK. **Social**. 2021. Disponível em:

<<https://data.worldbank.org/country/brazil?locale=pt>> Acesso em: 03 set. 2022