

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS**

LEONARDO NASCIMENTO SILVA SANTOS

**VANTAGENS AMBIENTAIS, ECONÔMICAS E SOCIAIS DA
TRANSFORMAÇÃO DE UM CAMINHÃO DE COLETA DE RESÍDUOS
SÓLIDOS MOVIDO A DIESEL PARA BIOMETANO**

SÃO PAULO

2026

LEONARDO NASCIMENTO SILVA SANTOS

**VANTAGENS AMBIENTAIS, ECONÔMICAS E SOCIAIS DA TRANSFORMAÇÃO DE
UM CAMINHÃO DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS MOVIDO A DIESEL PARA
BIOMETANO**

**ENVIRONMENTAL, ECONOMIC AND SOCIAL ADVANTAGES OF
TRANSFORMATION A DIESEL-POWERED SOLID WASTE COLLECTION TRUCK
TO BIOMETHANE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito para obtenção do título de mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto

SÃO PAULO

2026

Santos, Leonardo Nascimento Silva.

Vantagens ambientais econômicas e sociais da transformação de um caminhão de coleta de resíduos sólidos movido a diesel para biometano. / Leonardo Nascimento Silva Santos. 2026.

117 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2026.

Orientador (a): Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto.

1. Biometano. 2. Descarbonização do transporte. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4. Economia circular. 5. Transformação veicular. 6. Cidades inteligentes e sustentáveis.

I. Pinto, Luiz Fernando Rodrigues. II. Título.

CDU 711.4

VANTAGENS AMBIENTAIS, ECONÔMICAS E SOCIAIS DA TRANSFORMAÇÃO DE UM CAMINHÃO DE COLETA DE RESÍDUOS SÓLIDOS MOVIDO A DIESEL PARA BIOMETANO

Leonardo Nascimento Silva Santos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito para obtenção do título de mestre em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, sendo a banca examinadora formada por:

Prof. Dr. Wladimir Henriques Motta – Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET-RJ

Profa Dra. Heidy Rodriguez Ramos – Escola Superior de Propaganda Marketing – ESPM

Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho – Universidade Nove de Julho – UNINOVE

São Paulo, 16 de junho de 2026.

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, à minha família que me apoiou e entendeu minhas ausências durante o período de estudo e a todos que caminharam comigo e me incentivaram, mostrando que a resiliência é um dos caminhos para nossas realizações.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Nove de Julho (UNINOVE) e ao Programa de Pós-Graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, pela oportunidade de realizar este mestrado, pela excelência da formação oferecida e pelo apoio institucional, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço, ainda, pela oportunidade de realizar minha primeira apresentação científica no XXI ENANPUR e de vivenciar minha primeira experiência internacional, marcos importantes em minha trajetória acadêmica.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto, meu orientador, expresso minha sincera gratidão pelo rigor intelectual, pela orientação dedicada. Sua capacidade de questionar, estimular a reflexão crítica e incentivar o aprofundamento científico foi essencial para o amadurecimento deste trabalho. Mais do que um orientador, foi um valioso parceiro intelectual nesta trajetória acadêmica.

Aos membros da Banca de Qualificação e Defesa, pela leitura criteriosa do manuscrito, pelas valiosas contribuições e pelos questionamentos que estimularam novas reflexões que contribuíram significativamente e aprimoraram a qualidade desta dissertação.

Aos colaboradores da empresa de coleta de resíduos sólidos, proprietária do caminhão transformado, pela disponibilidade, receptividade e prontidão no fornecimento das informações que subsidiaram o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos Kenny Lopes Rodrigues Leite e, em especial, Waldir Agnello, pelo incentivo, apoio e palavras de motivação ao longo desta jornada, especialmente nos momentos mais desafiadores. Agradeço, ainda, pela amizade e pelas experiências compartilhadas durante o módulo internacional em Medellín e a apresentação científica no XXI ENANPUR, que tornaram esta trajetória ainda mais enriquecedora.

E finalmente, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa e para meu crescimento acadêmico e pessoal.

RESUMO

A descarbonização do transporte rodoviário pesado constitui um dos principais desafios da transição energética e do desenvolvimento de cidades inteligentes e sustentáveis. Nesse contexto, o biometano produzido a partir de resíduos sólidos urbanos apresenta potencial para reduzir emissões atmosféricas, promover a economia circular e ampliar a sustentabilidade urbana. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar as vantagens ambientais, econômicas e sociais da transformação de um caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos, originalmente movido a diesel, para utilização de biometano proveniente de aterro sanitário no município de São Paulo. Adotou-se uma abordagem qualitativa com triangulação quantitativa, estruturada como estudo de caso único e complementada por revisão sistemática da literatura baseada no protocolo PRISMA. O modelo analítico integrou as dimensões ambiental, econômica e social sob a perspectiva da economia circular. O estudo contemplou o monitoramento operacional do veículo durante doze meses, análise de emissões pelo método Poço à Roda (WTW), avaliação econômica por meio do Custo Total de Propriedade (TCO) e análise dos impactos sociais associados ao combustível renovável. Na dimensão ambiental, os resultados demonstraram que o biometano apresenta desempenho ambiental superior ao diesel, com potencial de redução de 93,7% das emissões de gases de efeito estufa no ciclo completo do combustível, além de reduções de aproximadamente 89% nas emissões de óxidos de nitrogênio e 85% de material particulado. Na dimensão econômica, apresentou a viabilidade da transformação veicular, com menor custo operacional e retorno do investimento favorável. Na dimensão social, observou-se potencial contribuição para a melhoria da qualidade do ar, redução de impactos à saúde pública, fortalecimento da cadeia produtiva do biometano e geração de empregos associados à economia circular. Conclui-se que a utilização do biometano em caminhões de coleta de resíduos constitui uma alternativa tecnicamente viável, economicamente competitiva e ambientalmente eficaz, contribuindo para a gestão sustentável dos resíduos urbanos, a descarbonização do transporte pesado e o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: biometano; descarbonização do transporte; resíduos sólidos urbanos; economia circular; transformação veicular; cidades inteligentes e sustentáveis.

ABSTRACT

The decarbonization of heavy road transport is one of the main challenges of the energy transition and the development of smart and sustainable cities. In this context, biomethane produced from municipal solid waste has the potential to reduce atmospheric emissions, promote the circular economy, and enhance urban sustainability. This research aimed to evaluate the environmental, economic, and social advantages of transforming a municipal solid waste collection truck, originally powered by diesel, to use biomethane from a landfill in the city of São Paulo. A qualitative approach with quantitative triangulation was adopted, structured as a single case study and complemented by a systematic literature review based on the PRISMA protocol. The analytical model integrated the environmental, economic, and social dimensions from the perspective of the circular economy. The study included operational monitoring of the vehicle for twelve months, emissions analysis using the Well-to-Wheel (WTW) method, economic evaluation through Total Cost of Ownership (TCO), and analysis of the social impacts associated with renewable fuel. The results demonstrated that biomethane offers superior environmental performance compared to diesel, with the potential to reduce greenhouse gas emissions by 93.7% in the complete fuel cycle, in addition to reductions of approximately 89% in nitrogen oxide emissions and 85% in particulate matter. Economically, the viability of vehicle conversion was verified, with lower operating costs and a more favorable return on investment. Socially, a potential contribution to improving air quality, reducing impacts on public health, strengthening the biomethane production chain, and generating jobs associated with the circular economy was observed. It is concluded that the use of biomethane in waste collection trucks constitutes a technically viable, economically competitive, and environmentally effective alternative, contributing to the sustainable management of urban waste, the decarbonization of heavy transport, and the achievement of the Sustainable Development Goals.

Keywords: biomethane; decarbonization of transport; urban solid waste; circular economy; vehicle conversion; smart and sustainable cities.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo Conceitual Integrado: Ambiental + Econômico + Social.....	30
Figura 2 – Mercado Global de caminhões a GNV.....	37
Figura 3 – Produção de caminhões GNV/Biometano no Brasil.....	38
Figura 4 – Plantas de Biometano na Europa.....	41
Figura 5 – Estimativa de crescimento das plantas de Biometano até 2029.....	42
Figura 6 – Projeção da capacidade instalada de biometano 2024 – 2027.....	43
Figura 7 – Fluxograma Metodológico.....	54
Figura 8 – Metodologia PRISMA com palavras chaves “Vehicle”AND”Fuel”AND”Biomethane”.....	55
Figura 9 – Caminhão 24.260 CRM 6X2.....	59
Figura 10 – Especificações Técnicas do caminhão.....	60
Figura 11 – Distância x Horas em Operação (Acumulada) do caminhão transformado.....	61
Figura 12 – Desempenho dos caminhões.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Etapas da Análise WTW para o Biometano.....	31
Tabela 2 – Artigos selecionados para leitura na íntegra.....	47
Tabela 3 – Desempenho do caminhão a diesel em 2023.....	62
Tabela 4 – Fatores de Emissão e Parâmetros de Conversão Energética adotados.....	63
Tabela 5 – GEE emitidos pelo caminhão à diesel.....	66
Tabela 6 – Parâmetros adotados para NOx e MP caminhão à GNV / Biometano.....	69
Tabela 7 – Comparativo Anual de Emissões TTW: Diesel x GNV x Biometano RSU....	70
Tabela 8 – Análise WTW Comparativa: Intensidade de Carbono por Combustível.....	72
Tabela 9 – Composição dos custos de abastecimento dos caminhões movidos a diesel, GNV e a biometano no ano de 2025.....	73
Tabela 10 – Custos totais da transformação.....	78
Tabela 11 – Payback Descontado.....	80
Tabela 12 – Comparativo do payback simples e descontado.....	80
Tabela 13 – Comparativo dos custos totais em 10 anos Diesel x GNV x Biometano RSU.....	81
Tabela 14 – Sistematização dos Impactos Sociais da Transformação do Caminhão de Coleta de RSU para Biometano.....	83
Tabela 15 – Indicadores da Economia Circular na Cadeia Biometano RSU.....	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Massa anual de CO ₂ emitida pelo caminhão à diesel.....	64
Equação 2 – Normalização da massa anual de CO ₂ emitida pelo caminhão à diesel pela distância.....	64
Equação 3 – Massa anual de NO _x emitidos pelo caminhão à diesel.....	64
Equação 4 – Normalização da massa anual de NO _x emitida pelo caminhão à diesel pela distância.....	65
Equação 5 – Massa anual de MP emitidos pelo caminhão à diesel.....	65
Equação 6 – Normalização da massa anual de MP emitida pelo caminhão à diesel pela distância.....	65
Equação 7 – Massa anual de CO ₂ emitidos pelo caminhão à GNV.....	66
Equação 8 – Normalização da massa anual de CO ₂ emitida pelo caminhão à GNV pela distância.....	66
Equação 9 – Massa anual de CO ₂ emitidos pelo caminhão se fosse abastecido por Biometano.....	67
Equação 10 – Normalização da massa anual de CO ₂ emitida pelo caminhão se fosse abastecido por Biometano pela distância.....	67
Equação 11 – Massa anual de NO _x emitido pelo caminhão à GNV/Biometano.....	68
Equação 12 – Normalização da massa anual de NO _x emitido pelo caminhão à GNV/Biometano pela distância.....	68
Equação 13 – Massa anual de MP emitido pelo caminhão à GNV.....	68
Equação 14 – Normalização da massa anual de MP emitido pelo caminhão à GNV / Biometano pela distância.....	69
Equação 15 – Energia total consumida no caminhão à biometano.....	70
Equação 16 – Emissões WTW brutas do caminhão movido à biometano.....	71
Equação 17 – Crédito WTT (metano evitado) do caminhão movido a biometano.....	71
Equação 18 – Intensidade de carbono evitado pelo caminhão se movido biometano...72	
Equação 19 – Externalidades anuais (Diesel, GNV, Biometano).....	74
Equação 20 – Fator de desconto corrigido, $i = 8\%$ e $g = 3\%$	75
Equação 21 – VPL das externalidades ambientais.....	75
Equação 22 – VPL dos combustíveis.....	76

Equação 23 – Fator de desconto corrigido (F') sem taxa de crescimento.....	76
Equação 24 – VPL das manutenções.....	77
Equação 25 – Custo Total de Propriedade do caminhão movido à diesel.....	77
Equação 26 – Custo Total de Propriedade do caminhão movido à GNV / Biometano..	77
Equação 27 – Payback Simples para o caminhão transformado movido à GNV.....	78
Equação 28 – Payback Simples para o caminhão transformado movido à biometano..	79
Equação 29 – Economia Líquida do caminhão movido à (GNV / Biometano).....	79
Equação 30 – Payback descontado.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás – Associação Brasileira de Biogás

AD – Digestão Anaeróbica

ANFÁVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ANPET – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes

BEN – Balanço Energético Nacional

Bio-GNV – Biometano gasoso

CH₄ – Metano

CIBIOGÁS – Centro Internacional de Energias Renováveis

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

CO₂eq – Dióxido de carbono equivalente

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

EBA – Associação Europeia do Biogás

EGR – Recirculação de Gases de Exaustão

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

Fe – Fatores de emissão

GEE – Gases de efeito estufa

GNC – Gás Natural Comprimido

GNL – Gás Natural Liquefeito

GNV – Gás Natural Veicular

GWP – Global Warming Potential

HC – Hidrocarbonetos

HDTs – Heavy-Duty Trucks

HGV – Veículos Pesados de Mercadorias

H₂S – Sulfeto de hidrogênio

ICCT – International Council on Clean Transportation

IEA – International Energy Agency

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MP – Material Particulado
NOAA – National Oceanic & Atmospheric Administration
NH₃ – Amônia
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
ONU – Organização das Nações Unidas
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PPM – Partes por Milhão
PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses
PRONCOVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
TTW – Tank to Wheel
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
SCR – redução catalítica seletiva
SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de efeito estufa
SINISA – Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico
SLOCAT – Transport Climate and Sustainability Global Reporte
TCO – Custo total de propriedade
UE – União Europeia
VPL – Valor presente líquido
WHO – World Health Organization
WTW – Well to Wheel

SUMÁRIO

1 Introdução.....	17
1.1 Contextualização do tema.....	17
1.2 Problema de Pesquisa.....	18
1.3 Objetivos.....	23
1.3.1 Objetivos Gerais.....	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	23
1.4 Relevância da pesquisa.....	23
1.4.1 Relação com os ODS da Agenda 2030.....	23
1.4.2 Relação com Cidades inteligentes e sustentáveis.....	25
2 Fundamentação Teórica.....	27
2.1 Sustentabilidade urbana e descarbonização do transporte.....	27
2.2 Modelo Conceitual Integrado: Ambiental + Econômico + Social.....	29
2.2.1 Dimensão Ambiental – Análise do “poço a roda” (WTW).....	30
2.2.2 Dimensão Econômica – Custo Total de Propriedade (TCO).....	31
2.2.3 Dimensão Social – Impactos.....	32
2.3 Economia Circular.....	33
2.4 Papel dos Combustíveis Renováveis para sustentabilidade centro urbano.....	35
2.5 Biometano como solução para redução dos GEE.....	38
2.6 Obstáculos da Utilização do Biometano.....	40
2.7 Transformação veicular (O que é?).....	44
2.8 Comparação entre biometano e óleo diesel.....	47
2.8.1 Vantagens.....	49
2.8.2 Desvantagens.....	51
3 Metodologia.....	53
3.1 Método para revisão sistemática da literatura.....	54
3.2 Método estudo de caso.....	56
4 Resultados.....	59
4.1 Processo da transformação.....	59
4.2 Dados obtidos.....	61

4.2.1 Ambientais.....	63
4.2.1.1 Emissões do tanque a roda (TTW).....	63
4.2.1.2 Emissões do poço ao tanque (WTT).....	70
4.2.2 Econômicos.....	73
4.2.3 Sociais.....	82
4.2.4 Economia Circular.....	84
5 Discussões.....	87
5.1 Dimensão ambiental.....	87
5.2 Dimensão Econômica.....	88
5.3 Dimensão Social.....	88
5.4 Economia Circular.....	89
5.5 Discussão Integrada dos Resultados.....	90
6 Conclusão.....	91
Referências.....	95
Apêndice A – Monitoramento da distância percorrida e horas de operação do caminhão movido a gás.....	114
Apêndice B – Questionário sobre o desempenho do biometano como combustível na transformação de caminhões seminovos de coleta de resíduos sólidos urbanos.....	115

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo contempla a contextualização do tema, os problemas de pesquisa, os objetivos, e a relevância da pesquisa desse projeto de pesquisa.

1.1 Contextualização do tema

Um dos principais impulsionadores do aumento da poluição atmosférica e das emissões de gases de efeito estufa (GEE), é a queima de combustíveis fósseis não renováveis provenientes do petróleo, carvão e do gás natural (Zhang et al., 2024). O setor energético, aliado à ausência de tratamento adequado de resíduos sólidos urbanos e do agronegócio, contribui significativamente para o não cumprimento do Protocolo de Kyoto. Esse acordo, firmado em 1997, estabeleceu compromissos para a redução das emissões dos GEE (Kuriyama et al., 2018). Além disso, esses setores também falham no cumprimento dos objetivos do Acordo de Paris, assinado em 2015, que reforça a necessidade de ações para a mitigação das mudanças climáticas. Esse cenário impacta diretamente a agenda global de sustentabilidade definida na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável de 2015, afetando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, principalmente no que se refere às emissões dos GEE (Shanmugam et al., 2018).

No Brasil, em 2022, foram emitidas mais de 2,3 bilhões de toneladas de GEE em CO₂ equivalente (CO₂eq), conforme a métrica de potencial de aquecimento global (GWP) estabelecida pelo 5º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – AR5). As principais fontes dessas emissões são as mudanças no uso da terra, o desmatamento, a agropecuária, os processos industriais, o setor de energia e os resíduos. Os setores de energia e resíduos representam, respectivamente, cerca de 20% e 4% das emissões totais (SEEG, 2023). No setor energético, o transporte é o principal emissor, especialmente devido ao uso de combustíveis fósseis por caminhões e outros veículos pesados (Patrizio et al., 2022). O descarte inadequado de resíduos sólidos também contribui significativamente para esse problema (Ardolino; Parrillo, Arena, 2018).

A crescente demanda por energia limpa impulsiona a adoção de soluções sustentáveis. A substituição gradual de veículos pesados movidos a diesel por alternativas como híbridos, GNV, eletricidade ou hidrogênio é essencial para a redução das emissões de GEE (Chojnowski e Dziubak 2024). E nesse contexto, soluções que substituam combustíveis fósseis não renováveis por alternativas sustentáveis são cada vez mais valorizadas (Stettler et al., 2023).

O Brasil, devido à sua vasta extensão territorial, depende fortemente do transporte rodoviário para a movimentação de mercadorias e pessoas. Em 2020, o país registrava aproximadamente 2,9 milhões de caminhões em circulação, a maioria movida a combustíveis fósseis (DENATRAN, 2021). Em particular, os caminhões movidos à diesel que apresentam as maiores emissões unitárias, considerando o estágio da bomba à roda (Zhang et al., 2024).

A necessidade de descarbonização destaca a substituição de combustíveis fósseis por alternativas renováveis, como o biometano. Produzido a partir da purificação do biogás, o biometano é um combustível renovável com alto teor de metano, gerado pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Apesar de seu potencial para reduzir as emissões no setor de transportes, seu uso ainda é limitado e precisa ser ampliado (SLOCAT, 2023; Gustafsson et al., 2021), sendo amplamente abordado na literatura acadêmica como solução promissora e estudos indicam seu potencial competitivo em termos ambientais e econômicos, especialmente para o transporte público e de cargas pesadas (Noussan et al., 2024; Alao e Popoola, 2024; D'Adamo et al., 2020).

1.2 Problema de Pesquisa

O Brasil tem se destacado na transição energética no setor de transportes, especialmente no uso de combustíveis alternativos em veículos pesados, como o etanol, o biodiesel e, mais recentemente, o biometano, conforme Ferreira et. al., (2019). Segundo o relatório de síntese do Balanço Energético Nacional (BEN, 2025), cerca de 25,7% da matriz energética do transporte brasileiro já é composta por fontes renováveis. O uso do biodiesel em misturas obrigatórias no diesel fóssil e a ampliação de projetos com caminhões movidos a biometano demonstram um

avanço significativo na descarbonização do setor. Em comparação, outros países desenvolvidos priorizam estratégias diferentes, muitas vezes com foco em tecnologias de baixo carbono, mas com menor participação de biocombustíveis na matriz de transportes, o que destaca a singularidade do modelo brasileiro baseado em seu potencial agro energético (IEA, 2023).

Segundo discutido no 33º Congresso da ANPET (2019) e nas análises de Iwan et al. (2021), é crescente a necessidade de investimentos em políticas públicas e privadas que promovam tecnologias voltadas à descarbonização e à mitigação dos impactos ambientais, econômicos e sociais do setor de transportes. Na América do Sul, o Brasil se destaca como o maior emissor de CO₂ nesse setor (Franco et al., 2020).

Na pegada da descarbonização, foi apresentado na 3ª edição do Transport, Climate and Sustainability Global Status Report (SLOCAT) de 2023, que no mundo em geral, a quantidade de carbono para geração de energia utilizada no transporte de passageiros e mercadorias precisariam ser reduzidos à metade no período de 2020 até 2050. E no que tange a emissão de CO₂ seriam necessários ocorrer um decréscimo de aproximadamente 45% em relação ao transporte de pessoas e 76% em relação ao transporte de mercadorias, a partir da apropriação de políticas voltadas para maiores eficiências operacionais, maior colaboração nas cadeias de abastecimento e a maior utilização de rotas ferroviárias e fluviais. E além das alterações em relação à transição de tecnologias neste seguimento também é necessário a mudança de comportamento da sociedade como maior consciencialização pública para que o setor energético como um todo possa contribuir com as metas do acordo de Paris. (Lima et al., 2020).

O desafio de transformar o sistema de transportes e mobilidade para sociedades mais saudáveis e sustentáveis é primordial para a prosperidade socioeconômica de todos os países. Ocorrendo assim uma relação intrínseca entre os impactos causados por transportes movidos a combustíveis fósseis com as dificuldades de ser alcançar parte dos ODS 3, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15 e 17 da agenda 2030. (ONU, 2023)

A economia circular substitui o modelo linear de produção por um sistema regenerativo, no qual resíduos são reaproveitados como insumos, reduzindo a

extração de recursos e as emissões (Ellen MacArthur Foundation, 2013). O setor de transporte rodoviário de cargas representa um dos maiores desafios à consolidação da economia circular, dado seu elevado grau de dependência de combustíveis fósseis. No Brasil, o setor é responsável por uma parte significativa das emissões de CO₂, material particulado e outros poluentes atmosféricos em razão do uso intensivo de combustíveis fósseis (BNDES, 2024).

A sustentabilidade dos sistemas de manejo de resíduos sólidos urbanos é inversamente proporcional à geração de resíduos e rejeitos. Sistemas mais eficientes promovem melhorias na saúde pública, qualidade de vida, sustentabilidade ambiental e geração de renda. (SINISA, 2023).

No Brasil, o panorama das unidades de tratamento apresentou em 2021 o total de 5530 unidades em operação, das quais nas regiões nordeste com 47,3% e o Sudeste com 22,5% do total de 18,5 milhões de toneladas descartados de forma inadequada em lixões e aterros controlados (SINISA 2023). O que mostra que o Brasil assim como todos os países devem ser protagonistas no que se refere a coleta de resíduos sólidos para que este tópico dentro de economia circular funcione ambientalmente de forma correta. (Hoang et al., 2022).

Um dos tópicos da economia circular refere-se ao tratamento dos resíduos. E parte do lixo produzido diariamente no planeta, tem destino incorreto, causando assim impactos nos recursos hídricos, nos solos e nas emissões dos GEE. É necessário ações práticas para intervir no tratamento correto do lixo (Santos & Mendes, 2025). E conforme Sharma et al., (2021), o tratamento correto dos resíduos contribui para o progresso de alcançar os ODS dentro da economia circular. Porém requer interesse de todos os participantes da sociedade, órgãos públicos, privados e governo. (Ferronato et al., 2019).

No decorrer das últimas décadas, muitos estudos e atividades vem contribuindo para a evolução e disponibilidade de combustíveis menos poluentes e mais eficientes. (Gustafsson et al., 2022; D'Adamo et al., 2020; Dahlgren S et al., 2020). Porém a sociedade ainda é dependente dos combustíveis fósseis não renováveis como o diesel, a gasolina e o GNV que geram enormes impactos ao meio ambiente, seguindo no sentido contrário do desenvolvimento sustentável (Guzman, Arellana e Alvarez, 2020). E em se tratando dos veículos pesados, a

demanda pela substituição por combustíveis alternativos ganha cada vez maior destaque (Calise et al., 2023).

Os estudos sobre eletrificação dos transportes demonstram um crescente volume de pesquisas e aplicações práticas que têm sido implementadas em veículos de passageiros, leves e semipesados (Langshaw et al., 2020). Mas conforme Li et al., (2022) quando se trata de veículos pesados, como marítimos, aéreos (Combustível a bordo) e do transporte rodoviário o volume de estudos é menor em relação ao transporte eletrificado. Devido a autonomia dos veículos elétricos (VE), conflitos entre impactos ambientais voltados para aquisição da matéria prima, investimentos financeiros em tecnologia, na infraestrutura como visto por Chojnowski & Dziubak (2024).

O GNV é derivado do petróleo, com níveis de emissões de GEE menores que o diesel, porém, o ciclo de vida do diesel inclui várias etapas, desde a extração do petróleo até seu uso final como combustível refinado em veículos e a energia consumida por esses veículos. Este processo completo é conhecido como "do poço à roda". (Gustafsson et al., 2021). Conforme apresentado por Gustafsson et al. (2022), o uso do GNV ou Gás Natural Liquefeito (GNL) fóssil, em substituição ao diesel em caminhões pesados, não reduz o impacto das mudanças climáticas considerando o ciclo completo do poço à roda (WTW). Pelo contrário, pode aumentar esse impacto em até 10%. Mas quando se trata da renovação dos recursos naturais, também é um vilão quando comparado com outras possibilidades de combustíveis, como o biogás e o biometano oriundos de fontes renováveis.

A Digestão Anaeróbia (AD) é um processo de gerenciamento de resíduos e de recuperação energética mais empregado no mundo atualmente. E seguindo Hollas et al., (2021), mesmo sendo promissor a adoção da tecnologia da AD, deve ser cuidadosamente analisada para garantir a sua viabilidade ambiental.

O biogás é uma fonte de energia renovável, composto de gases oriundos dos processos de biodigestão de materiais orgânicos através da digestão anaeróbia e que conforme Bezerra et. al (2025) se utiliza da tecnologia dos biodigestores, a partir do tratamento de resíduos urbanos, da indústria e agropecuária. E conforme apresentado em audiência pública pela Associação Brasileira de Biogás (ABiogás 2023), o biogás apresenta vantagens como energia circular, aproveitamento do

passivo ambiental, caminho para a independência energética, descarbonização de setores chaves entre outras. Com mais de 885 plantas no Brasil distribuídas no país com uma produção diária de 4,6 MM m³ por dia (CIBIOGÁS 2023), porém este combustível ainda não é regulado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), quanto a sua distribuição e controle.

No setor energético, o biogás serve para produção de calor, vapor e eletricidade. Embora tenha o metano como principal componente, sua composição bruta, porém contém até 30% de CO₂, sulfeto de hidrogênio (H₂S) e amônia (NH₃) somados, impurezas que inviabilizam seu uso direto em motores de combustão interna (Keerthana et al., 2023). Após purificação, o biogás é transformado em Bio-GNV atinge cerca de 95% de metano, tornando-se uma fonte renovável de destaque que permite tanto o aproveitamento de resíduos quanto a redução de gases de efeito estufa (Joppert et al., 2018).

O papel deste combustível é extremamente importante ambiental, econômica e socialmente, principalmente no setor de transportes pois é alternativa na substituição do diesel e do GNV quando se trata de descarbonização, com uma redução de 89,3% de redução de intensidade de carbono (gCO₂eq/MJ), conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE 2022). Conforme dispõe a Lei nº 14.134 (BRASIL, 2021), para todos os fins, o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural terão tratamento regulatório equivalente ao gás natural, desde que atendidas as especificações estabelecidas pela ANP. E conforme Joppert *et al.*, (2018) essa substituição pode ser realizada a partir da inserção do biometano na rede de distribuição de gás natural, não deixando de avaliar ajustes necessários na infraestrutura, mesmo que utilizando a mesma rede de distribuição do GNV. Conforme Rajendran et al., (2019), o biometano como biocombustível de transporte em substituição ao diesel, proporciona transporte descarbonizado e ar limpo, acrescido de segurança energética, energia renovável.

A literatura sobre descarbonização de frotas pesadas é, em sua maioria, fragmentada. Estudos ambientais frequentemente ignoram o custo total de propriedade (TCO), enquanto avaliações econômicas desconsideram o ciclo completo de vida dos combustíveis (WTW). Análises restritas ao trecho de combustão (Tanque a roda) subestimam os impactos reais, sobretudo no caso do

biometano de RSU, cujo principal diferencial ambiental está no crédito de metano evitado no aterro sanitário, visível apenas por uma análise WTW completa (Atkins et al., 2021).

Dentro deste contexto permeia este projeto, visando preencher a lacuna de estudo voltado para a seguinte questão de pesquisa:

Quais as vantagens ambientais, econômicas e sociais da transformação de caminhões seminovos de coleta de resíduos movidos a diesel para biometano, produzidos a partir de resíduos sólidos urbanos, sob a perspectiva de economia circular na cidade de São Paulo?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar as vantagens da transformação de caminhão de coleta de RSU movido a diesel para biometano de aterro sanitário no município de São Paulo, sob os aspectos ambiental, econômico e social.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar na literatura parâmetros ambientais, econômicos, políticos, técnicos e sociais da substituição do diesel para o biometano em caminhões.
- Mensurar os impactos ambientais, econômicos, decorrentes da transformação de caminhões movidos a diesel para biometano.
- Analisar as implicações sociais decorrentes da transformação de caminhões movidos a diesel para biometano.

1.4 Relevância da pesquisa

1.4.1 Relação com os ODS da Agenda 2030

A utilização de biometano em veículos pesados contribui significativamente para o ODS 1, que busca erradicar a pobreza. Sua produção descentralizada a partir de resíduos orgânicos e dejetos agrícolas gera renda para comunidades rurais e agricultores familiares, enquanto diminui custos operacionais no transporte de cargas, favorecendo a competitividade de pequenos e médios produtores. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2023), o biometano impulsiona o desenvolvimento econômico rural através da geração de empregos e renda adicional, incluindo a comercialização de fertilizantes naturais resultantes do processo produtivo (IEA, 2023). A substituição do diesel por biometano em frotas de transporte público e logística também reduz custos de mobilidade urbana, beneficiando populações vulneráveis e fortalecendo a inclusão produtiva.

O uso do biometano como combustível para veículos pesados no Brasil conecta-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). Silva et al. (2021) destacam o potencial energético do biogás para geração elétrica, térmica e como biometano, substituindo fontes não renováveis no transporte. Esta alternativa energética viabiliza a descarbonização da frota de veículos pesados, alinhando-se às metas climáticas da Agenda 2030.

O biometano contribui significativamente para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) ao promover a economia circular através do aproveitamento de resíduos orgânicos. Segundo Balbueno et al. (2021) e Ardolino, Parrillo e Arena (2018), o crescimento populacional aumenta tanto a demanda energética quanto a geração de resíduos, tornando fundamental o desenvolvimento de tecnologias que convertam esses passivos ambientais em recursos energéticos. A digestão anaeróbia oferece uma solução eficaz para tratamento de resíduos orgânicos, produzindo simultaneamente biogás aproveitável como biocombustível. Assim, o biometano exemplifica a economia circular ao transformar resíduos urbanos, agrícolas e industriais em energia limpa para veículos pesados (Mandpe et al., 2022).

A implementação de frotas de veículos pesados movidos a biometano no Brasil fortalece o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) através do desenvolvimento de cadeias produtivas locais e da criação de infraestrutura energética descentralizada. De acordo com o CIBIOGÁS (2021), a produção de biogás no Brasil, com aplicação energética, no ano de 2020, foi de 1,83 bilhão de Nm³, valor correspondente a cerca de 2% do potencial do país, evidenciando o enorme potencial de crescimento para o setor de transportes. A produção de biogás e sua utilização para fins energéticos pode ser acessível a toda a população, pois existem desde biodigestores de grande porte, com um custo mais elevado, até os mais simples, demonstrando a viabilidade da tecnologia para diferentes escalas de aplicação no transporte rodoviário (Bidart et al., 2022).

Por fim, a adoção do biometano em veículos pesados representa uma estratégia fundamental para o alcance do ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) através da melhoria da qualidade do ar urbano. Segundo Silva et al., (2021), as ações do homem podem auxiliar no desenvolvimento de processos, resultando em alterações nas características biológicas, físicas e químicas do solo, água e atmosfera, sendo crucial adotar tecnologias que minimizem esses impactos. O uso do biometano em substituição ao diesel em veículos pesados contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, impactando diretamente na saúde pública. Ardolino; Parrillo, Arena (2018) destacam que a digestão anaeróbia representa um sistema balanceado que promove a conversão da matéria orgânica em CH₄ e CO₂, permitindo o controle das emissões quando utilizado como combustível veicular, ao contrário da disposição inadequada de resíduos que libera metano diretamente na atmosfera.

1.4.2 Relação com cidades inteligentes e sustentáveis

A relevância desta pesquisa busca apresentar a relação direta com cidades inteligentes e sustentáveis na ótica da tecnologia envolvida na transformação de caminhões movidos a diesel para o biometano na visão ambiental, assim como apresentado por Madhusudhanan et al., (2020) que um caminhão movido a

biometano emite 78% menos poluentes em comparado com o veículo movido a diesel. Economicamente mesmo tendo um percentual menor na autonomia do veículo quanto ao consumo de combustível, o caminhão movido a biometano tem um custo de abastecimento 30% menor comparado com seu concorrente (Gustafsson et al., 2021). E no caso de um caminhão de coleta dos RSU que tenham a sua disposição um aterro próprio ou não para a produção do seu próprio combustível renovável a partir do aproveitamento e gestão dos resíduos (Mandpe et al., 2022).

No âmbito social, a criação de novos postos de trabalho voltados à pesquisa sobre a transformação de caminhões de coleta de resíduos orgânicos pode contribuir significativamente para a sustentabilidade urbana. Segundo Kavitha et al. (2018), a gestão eficiente do lixo orgânico, aliada à sua conversão em biometano, não apenas reduz o desperdício alimentar e a degradação ambiental, mas também melhora a qualidade do ar e promove condições sociais mais equitativas. Estudos mais recentes, como os de Zhang et al. (2024), ressaltam que a implementação de tecnologias de valorização energética dos resíduos sólidos urbanos impulsiona a economia circular, favorecendo tanto o desenvolvimento sustentável quanto a inclusão socioeconômica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sustentabilidade urbana e descarbonização do transporte

O crescimento acelerado das cidades tem intensificado desafios relacionados ao consumo de energia, à mobilidade, à gestão de resíduos e às emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, a sustentabilidade urbana consiste na capacidade de promover o desenvolvimento econômico, a inclusão social e a proteção ambiental de forma integrada, assegurando qualidade de vida para as gerações presentes e futuras (Geissdoerfer et al., 2017). Essa abordagem está alinhada ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 da Agenda 2030, que propõe cidades mais inclusivas, resilientes e sustentáveis (ONU, 2015).

As cidades sustentáveis dependem da integração entre planejamento urbano, infraestrutura, inovação tecnológica e políticas públicas capazes de reduzir impactos ambientais e otimizar o uso dos recursos naturais. Nesse cenário, a economia circular fortalece a sustentabilidade urbana ao substituir o modelo linear de produção por um sistema regenerativo, no qual resíduos são reinseridos nos ciclos produtivos, reduzindo a extração de matérias-primas e as emissões de carbono (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Kirchherr et al., 2023).

Entre os principais desafios das cidades destaca-se a descarbonização dos sistemas urbanos. Segundo o IPCC (2023), a redução das emissões de carbono é indispensável para limitar os efeitos das mudanças climáticas, exigindo a adoção de estratégias como eficiência energética, expansão das fontes renováveis, valorização energética de resíduos e substituição de combustíveis fósseis por alternativas de baixo carbono. Nesse contexto, a produção de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos representa uma solução capaz de integrar gestão de resíduos, geração de energia renovável e mitigação das emissões de GEE, fortalecendo simultaneamente a economia circular e a transição energética (D'Adamo et al., 2020; Rajendran et al., 2019).

O setor de transportes ocupa posição estratégica nesse processo, pois permanece altamente dependente de combustíveis fósseis. A Agência Internacional

de Energia (IEA, 2023) destaca que esse setor figura entre os principais responsáveis pelas emissões globais relacionadas ao consumo de energia. No Brasil, onde o transporte rodoviário predomina na movimentação de cargas, caminhões movidos a diesel contribuem significativamente para as emissões de dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e material particulado, comprometendo a qualidade do ar e a saúde da população (Patrizio et al., 2022). Esse cenário é ainda mais crítico nos veículos de coleta de resíduos sólidos urbanos, cuja operação ocorre predominantemente em áreas densamente povoadas.

A transição para uma mobilidade sustentável requer a adoção de tecnologias e combustíveis capazes de reduzir esses impactos ambientais. Embora a eletrificação apresente avanços importantes para veículos leves, sua aplicação em caminhões pesados ainda enfrenta limitações relacionadas à autonomia, infraestrutura de recarga e custos operacionais (Li et al., 2022; Madhusudhanan et al., 2020). Dessa forma, combustíveis renováveis permanecem como alternativas estratégicas para a descarbonização do transporte pesado.

Entre essas alternativas, o biometano destaca-se por ser produzido a partir da purificação do biogás proveniente da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, possibilitando a substituição do diesel em veículos pesados e aproveitando, em grande parte, a infraestrutura existente para distribuição de gás. Além de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida do combustível, sua utilização contribui para o aproveitamento energético dos resíduos, diminuição das emissões de metano em aterros sanitários e fortalecimento das cadeias produtivas da economia circular (Prussi et al., 2021; Gustafsson et al., 2021).

Sob a perspectiva da sustentabilidade urbana, os benefícios do biometano extrapolam a dimensão ambiental. A redução das emissões atmosféricas favorece a melhoria da qualidade do ar e da saúde pública, enquanto a ampliação da cadeia produtiva do biometano estimula a geração de empregos, o desenvolvimento regional e a segurança energética (Alao; Popoola, 2024). Assim, a substituição gradual do diesel por combustíveis renováveis representa uma estratégia integrada para promover cidades mais sustentáveis, resilientes e alinhadas às metas globais de descarbonização.

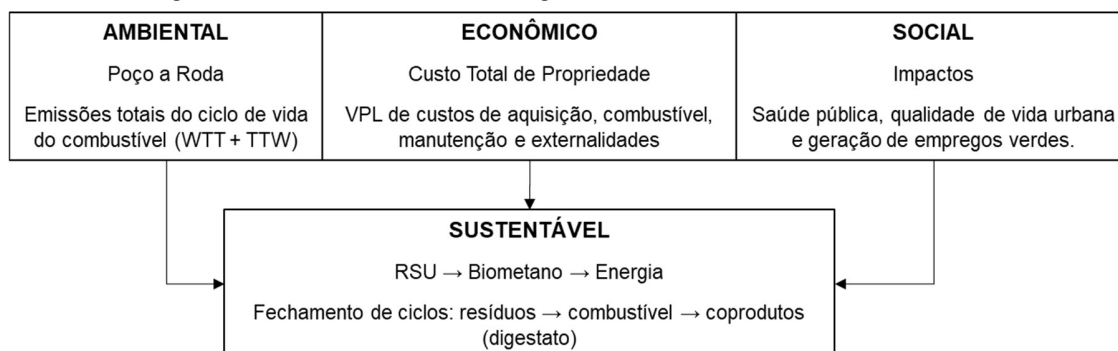
Dessa forma, a descarbonização do transporte rodoviário pesado deve ser compreendida como um elemento central da transição energética e do desenvolvimento urbano sustentável. A integração entre gestão de resíduos, produção de energia renovável, economia circular e mobilidade sustentável constitui uma oportunidade para reduzir impactos ambientais, ampliar a eficiência dos sistemas urbanos e fortalecer políticas públicas voltadas ao alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Nesse contexto, a utilização do biometano em caminhões de coleta de resíduos sólidos urbanos representa uma alternativa tecnicamente viável e compatível com a construção de cidades inteligentes e sustentáveis.

2.2 Modelo Conceitual Integrado: Ambiental + Econômico + Social

Grande parte da literatura sobre descarbonização de frotas pesadas movidas por biometano como combustível apresenta análises parciais. Limitando-se a estudos ambientais que desconsideram o custo total de propriedade (TCO) ou a avaliações econômicas que não contemplam o ciclo completo de vida dos combustíveis. Além de não relacionar com questões sociais como, saúde pública, qualidade de vida urbana e a geração de empregos verdes também atreladas a essas dimensões.

Esta dissertação propõe um modelo conceitual integrado que articula as três dimensões, ambientais, econômicas e sociais com a economia circular como eixo integrador em um quadro único (Figura 1), conforme apresentado a seguir.

Figura 1 – Modelo Conceitual Integrado: Ambiental + Econômico + Social



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.1 Dimensão Ambiental – Análise do “poço a roda” (WTW)

A análise do “poço a roda” (WTW) é o método de referência para a avaliação das emissões de GEE de combustíveis veiculares ao longo de toda a cadeia de suprimentos (Prussi et al., 2021). Ela se subdivide em duas etapas complementares:

- **Poço a tanque (WTT)** – Esta etapa abrange as emissões associadas a todas as fases anteriores ao uso do combustível no veículo, incluindo produção, processamento, transporte e distribuição até o ponto de abastecimento. No caso do diesel fóssil, consideram-se as emissões provenientes da extração do petróleo, do refino e da logística de distribuição (Gustafsson et al., 2021). Para o biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos (RSU), o escopo inclui a digestão anaeróbia da fração orgânica, o processo de purificação do biogás (upgrading para teores superiores a 95% de metano), bem como sua compressão e distribuição na forma de Bio-GNV (Mandpe et al., 2022). Um aspecto central dessa rota é a contabilização de emissões evitadas, a captura do metano gerado pela decomposição dos resíduos em aterros sanitários impede sua liberação direta à atmosfera. Considerando o elevado potencial de aquecimento global do metano, estimado entre 28 e 34 kgCO₂eq por kg de CH₄ em horizonte de 100 anos. Essa recuperação energética

resulta em créditos de emissões (Tabela 1) no balanço do ciclo de vida (Kavitha et al. 2018).

- Tanque a roda (TTW) – Compreende as emissões resultantes da combustão do combustível no motor do veículo. Para o diesel, o CO₂ emitido é de origem fóssil e para o biometano, o CO₂ resultante da combustão é de origem biogênica (carbono neutro no ciclo curto), e as emissões residuais são predominantemente de CH₄ fugitivo no sistema de abastecimento (Gustafsson et al., 2021).

Tabela 1 – Etapas da Análise WTW para o Biometano

Etapas WTW	Descrição	Processo Biometano RSU	Emissão típica (gCO₂eq/MJ)
Poço ao tanque (WTT)	Extração, produção, purificação e distribuição	Digestão anaeróbia RSU → biogás → purificação → Bio-GNV	-22,4 (crédito evitado)
Tanque a roda (TTW)	Combustão no motor do veículo	Ciclo Otto; CO ₂ biogênico (carbono neutro)	8,8 (CH ₄ fugitivo)
Poço a roda (WTW)	Ciclo completo do combustível	WTT + TTW; crédito de metano evitado no aterro	-13,6 (ciclo negativo)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Gustafsson et al. (2021) e EPE (2022).

2.2.2 Dimensão Econômica – Custo Total de Propriedade (TCO)

O TCO é uma metodologia de avaliação econômica que considera todos os custos associados à propriedade e operação de um ativo ao longo de seu ciclo de vida. Para veículos pesados, o TCO inclui o custo de aquisição ou transformação, custos de combustível, custos de manutenção, valor residual ao final do período e externalidades ambientais, quando internalizadas via precificação de carbono (Wang et. al., 2024).

Ao adquirir ou transformar um caminhão, é preciso considerar não apenas o valor de compra, mas também os custos operacionais, como combustível e manutenção (Madhusudhanan et al., 2020). A avaliação do TCO é fundamental para analisar a viabilidade econômica de substituir o diesel por combustíveis alternativos

de origem renovável. A comparação correta de alternativas exige que todos esses custos sejam trazidos a valor presente por uma taxa de desconto que reflita o custo de oportunidade do capital.

2.2.3 Dimensão Social – Impactos

A poluição atmosférica proveniente do transporte urbano tem sido reconhecida como um dos principais desafios ambientais e de saúde pública nas grandes cidades (Tamburini et. al., 2023). Em especial, as emissões de veículos pesados movidos a diesel estão associadas ao aumento da concentração de material particulado e óxidos de nitrogênio, contribuindo para a incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares, além da degradação da qualidade do ar urbano. Segundo Dahlgren (2020), a exposição contínua aos poluentes atmosféricos gerados pelo tráfego urbano afeta diretamente as condições de saúde da população, ampliando desigualdades sociais e pressionando os sistemas públicos de saúde. Nesse contexto, políticas de transição energética no setor de transportes tornam-se estratégicas para promover cidades mais sustentáveis e saudáveis.

A substituição do diesel por biometano em frotas pesadas surge como alternativa relevante para a redução das emissões atmosféricas e para o fortalecimento da sustentabilidade urbana (Ardolino et al., 2018). Além dos benefícios ambientais relacionados à mitigação de gases poluentes, o uso do biometano contribui para a melhoria da qualidade do ar, redução da exposição populacional a contaminantes e fortalecimento da saúde pública. De acordo com Alao e Popoola (2024), o aproveitamento energético de resíduos orgânicos para produção de biogás e biometano apresenta potencial não apenas ambiental, mas também econômico e social, ao estimular cadeias produtivas sustentáveis, geração de empregos verdes e inclusão socioeconômica associada à economia circular. Dessa forma, a valorização energética de resíduos sólidos urbanos representa importante estratégia para integrar descarbonização, desenvolvimento regional e sustentabilidade social.

2.3 Economia Circular

A economia circular pode ser compreendida como um sistema econômico regenerativo que redefine o fluxo tradicional “produção-uso-descarte” por meio da manutenção contínua de valor dos recursos. Em vez de tratar o fim de vida dos produtos como uma etapa final, busca-se reduzir ao máximo o consumo de matérias-primas virgens, manter componentes e materiais em uso pelo maior tempo possível e recuperar valor ao fim de cada ciclo de vida (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Segundo Kirchherr et al. (2023), esse paradigma envolve uma mudança sistêmica que integra objetivos ambientais, sociais e econômicos, criando sinergias entre todos os elos da cadeia de valor para benefício das gerações atuais e futuras.

A operacionalização da economia circular estrutura-se em três estratégias complementares, estreitamento de fluxos, que maximiza a eficiência no uso de recursos; desaceleração de ciclos, que prolonga a vida útil de produtos mediante reparação e reutilização; e fechamento de ciclos, que assegura a recuperação e reintegração de materiais no sistema produtivo (Bocken et al., 2016). Essas estratégias articulam-se sobre os pilares ambiental, econômico e social, conferindo resiliência e competitividade sustentável aos sistemas produtivos.

As intervenções em nível urbano são cruciais para organizar e aproveitar os fluxos de resíduos, impulsionando a adoção de um modelo de economia circular eficiente em âmbito local, regional, nacional e global. Para promover essa transição, é necessário elaborar estimativas rigorosas dos impactos ambientais, econômicos e éticos das iniciativas, fornecendo subsídios sólidos para a tomada de decisão. Uma estratégia promissora na gestão municipal de resíduos consiste em implementar práticas de economia circular que visem eliminar o envio de materiais a aterros, reinserindo-os nos ciclos produtivos e convertendo-os em energia limpa, contribuição importante para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e frear as mudanças climáticas (D’Adamo et al., 2020).

No setor de transporte pesado, a adoção de combustíveis renováveis como o biometano exemplifica a aplicação prática e a tendência de implementar a ideia

de desenvolvimento sustentável e economia circular (Biernat et al., 2021). Estudos de análise de ciclo de vida mostram que caminhões pesados movidos a biometano podem reduzir em até 70 % as emissões de gases de efeito estufa em comparação com motores a diesel convencionais, além de apresentar custos operacionais competitivos quando considerados benefícios ambientais e incentivos fiscais locais (Keogh et al., 2024).

Além de reduzir emissões, a conversão de frotas para biometano fecha ciclos de resíduos orgânicos e nutrientes ao transformar dejetos agroindustriais e urbanos em combustível veicular. Essa abordagem diminui a poluição local, produz biofertilizantes a partir do digestato e fortalece cadeias produtivas regionais. No entanto, desafios como os altos investimentos em infraestrutura de biometanização, a adaptação de motores e a implementação de políticas de incentivo demandam diálogo estreito entre empresas, governos e sociedade para viabilizar esse modelo realmente circular (Task 37, 2024). Contudo esse cenário vem mudando cada vez mais e nos últimos anos, em países da Europa e da América, onde a política de apoio ao biogás tem se concentrado, predominantemente, na produção de biometano destinado à injeção em redes de distribuição ou ao uso como combustível veicular.

O desenvolvimento do biometano para o setor de transportes, sob a ótica da economia circular, depende de infraestrutura dedicada, incentivos e isenções fiscais, mudança nos conhecimentos e comportamentos dos consumidores e de uma coordenação integrada entre todos os atores de mercado, de modo geral, essa transição para um sistema que valorize materiais hoje considerados resíduos é complexa, pois exige alinhamento entre oferta e demanda, apoiado por educação, inovação de mercado e dinâmicas políticas como subsídios e benefícios fiscais que estimulem sua adoção (D'Adamo et al., 2021) .

A economia circular oferece estratégias sustentáveis e viáveis para atender às rigorosas normas Euro 6 e Proconve P-8, que estabelecem limites severos para emissões veiculares (Prochatzki et al., 2023). A abordagem sistêmica da economia circular permite que empresas automotivas desenvolvam estratégias de

conformidade regulatória enquanto otimizam recursos existentes, transformando desafios normativos em oportunidades de eficiência operacional (Ferreira & Gonçalves, 2021).

A equivalência técnica entre as normas Euro 6 e Proconve P-8 estabelece uma estrutura regulatória que favorece práticas de economia circular na indústria de transporte pesado (Agrawal et al., 2021). A transição para veículos Euro 6 resultou em reduções de até 77% nos óxidos de nitrogênio (NOx) comparadas ao Euro 5, demonstrando o potencial dos avanços tecnológicos combinados com estratégias de remanufatura de sistemas de pós-tratamento (Cummins, 2023). Esta convergência regulatória catalisa a transformação de modelos de negócio tradicionais em direção à sustentabilidade, sendo que a economia circular abre um enorme campo de oportunidades para empresas que buscam integrar sustentabilidade desde o design até os serviços de pós-venda (Chaudhari et al., 2024).

2.4 O papel dos combustíveis renováveis para sustentabilidade em centros urbanos

A queima de combustíveis fósseis lança na atmosfera material particulado, gases como dióxido de carbono (CO₂), óxido de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) entre outros poluentes. Em se tratando do CO₂, conforme os dados da National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), de julho de 2022 até o abril de 2024 a concentração de CO₂ na atmosfera atingiu o recorde global de 426 partes por milhão (ppm), bem acima dos 400 ppm que foram atingidos nos primeiros anos após a assinatura do acordo de Paris de 2015. O que esclarece o quanto estes gases influenciam econômica, ambiental e socialmente toda população e no meio ambiente.

Os incentivos no setor de transportes estão voltados na sua maioria para veículos elétricos (Pääkkönen et al., 2019). Na União Europeia (UE), existem diretrizes para a circulação de veículos de transporte rodoviário que visam a substituição completa dos veículos com motores de combustão interna por veículos

elétricos até 2035. No entanto, essas diretrizes permanecem em discussão, pois vários países da UE têm levantado preocupações quanto à eficiência e sustentabilidade dessa medida no contexto da descarbonização total (Calise et al., 2023). A eletrificação é uma solução eficiente para reduzir as emissões dos GEE, particularmente em veículos de passageiros e de médio porte que operam em rotas urbanas e regionais (Li et al., 2022). Essa eficiência é ainda maior quando há uma ampla integração de fontes de energia renovável e de baixo carbono (Pääkkönen et al., 2019). No entanto, setores como aviação, transporte marítimo e parte significativa do transporte pesado enfrentam grandes desafios. A capacidade de carga, a limitação da densidade energética das baterias atuais e a necessidade de maior alcance dificultam a adoção dessas tecnologias em veículos pesados a curto e médio prazo (Madhusudhanan et al., 2020; Langshaw et al., 2020; Patrizio et al., 2022). As células a combustível de hidrogênio oferecem uma oportunidade promissora nesse setor devido à sua densidade de energia mais alta em relação ao armazenamento em baterias de íon de lítio, além de possibilitarem reabastecimento rápido (Atkins et al., 2021). Segundo Li et al. (2022), há vantagens adicionais, como o aproveitamento da infraestrutura de gás existente. No entanto, o hidrogênio ainda é amplamente produzido a partir de fontes fósseis com altas emissões de carbono, o que compromete a eficiência energética do processo, incluindo produção, transporte, armazenamento e utilização desse combustível em veículos.

Conforme sugerido por Gray et al. (2021), é viável empregar gás renovável, seja comprimido (GNC) ou liquefeito (GNL), em veículos pesados (caminhões). Evidenciado que no setor de transporte de mercadorias resultou em investimentos significativos em infraestruturas para viabilizar sua aquisição no mercado internacional e a sua posterior distribuição (Prussi et al., 2021; Bidart et al., 2022). Por diversas razões, como a diminuição do ruído operacional, segurança energética, economia e o potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, é importante considerar essa abordagem (Stettler et al., 2023).

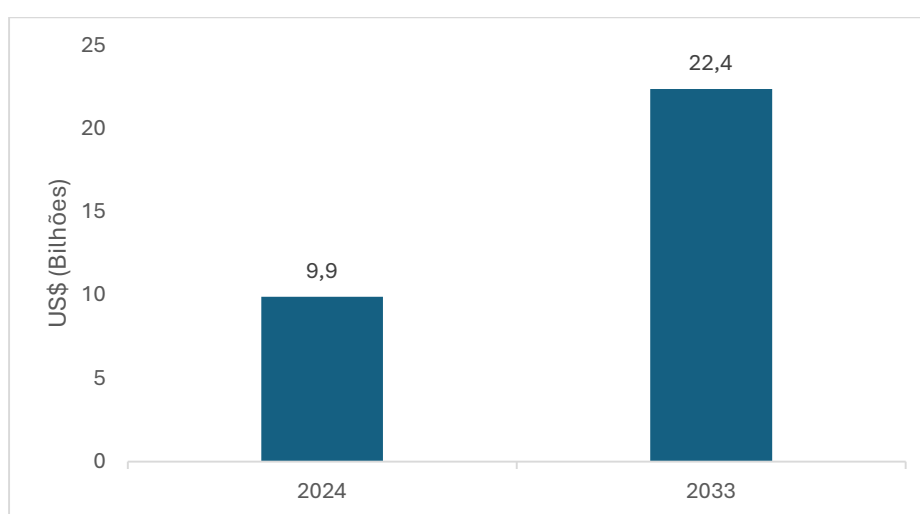
Em 2021, no continente europeu, o setor de transporte foi responsável por um terço da demanda global de energia e por um sexto das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), devido ao uso de combustíveis fósseis (D'Adamo et

al., 2021). Comparado ao diesel, o uso de gás natural comprimido ou liquefeito costuma resultar em uma redução nas emissões de GEE dos caminhões pesados (HDTs). Essa avaliação considera todo o ciclo de produção e uso dos combustíveis, conhecido como análise do poço à roda, e aponta que as reduções nas emissões de GEE podem chegar a até 16% (Speirs et al., 2020; Bidart et al., 2022).

O estudo de Calise et al. (2023) revelou que a União Europeia possuía aproximadamente 13,4 milhões de veículos rodoviários movidos a combustíveis alternativos, representando apenas 5% da frota total. Segundo Pääkkönen et al. (2019), a Associação Europeia de Veículos a Gás Natural e Biogás (NGVA) projetava que o número de caminhões movidos a metano alcançaria 480.000 unidades até 2030, indicando um crescimento exponencial na adoção desses veículos nas duas décadas seguintes.

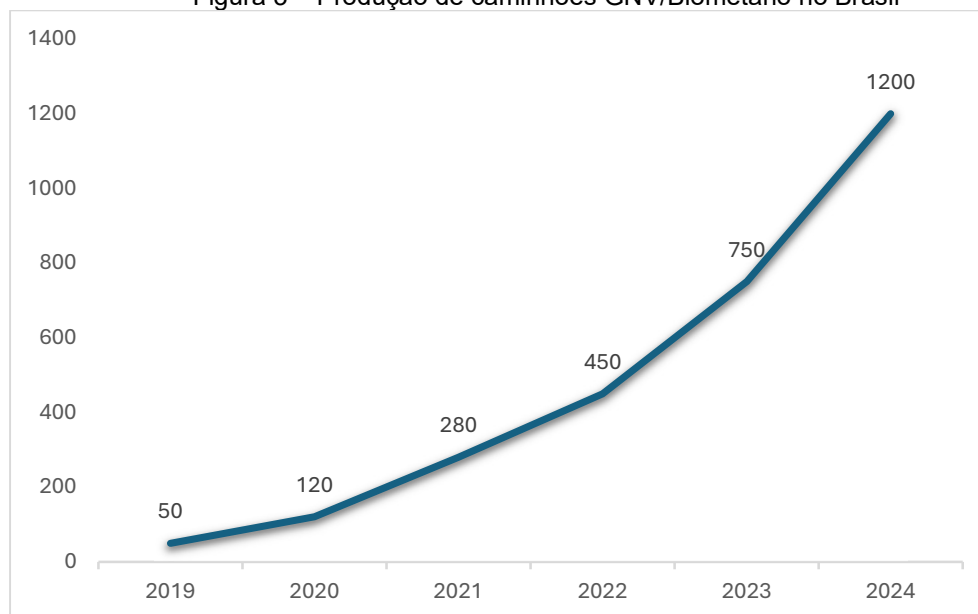
Conforme análise do Global CNG Truck Market Size de 2025 da figura 2, o mercado global de caminhões a GNV foi avaliado em US\$ 9,8 bilhões em 2024, com projeção de atingir US\$ 22,4 bilhões até 2033, representando uma taxa composta de crescimento anual de 9,7%. No cenário brasileiro, dados da ANFÁVEA (2024) demonstrou um crescimento expressivo de 1200% nos últimos 7 anos conforme apresentado na figura 3.

Figura 2 – Mercado Global de caminhões a GNV



Fonte: Global CNG Truck Market Size, 2025

Figura 3 – Produção de caminhões GNV/Biometano no Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nos dados da ANFÁVEA 2024

2.5 Biometano como solução para redução dos GEE

A substituição gradativa do diesel por combustíveis alternativos em caminhões pesados está intrinsicamente ligada às políticas de incentivo, à produção sustentável de combustíveis e à competitividade dos veículos elétricos. (Zhang et al., 2024). Assim como explorado por Prussi, et al. (2021), desde julho do mesmo ano o biogás está sendo contabilizado com a quota de 32 % de energias renováveis do consumo de energia da União Europeia, já para o Bio-GNV nos combustíveis eles preveem uma meta mínima de 14% da energia consumida no setor dos transportes, até 2030. Além de proporcionar poupanças de GEE, a utilização de biometano à base de resíduos proporciona benefícios ambientais, como a redução da destruição da camada de ozônio (Alao & Popoola, 2024).

Quanto aos impactos ambientais, as projeções indicam que os caminhões elétricos e aqueles alimentados exclusivamente por biometano oriundo de aterros sanitários demonstram reduções nas emissões do ciclo de vida da ordem de 70% e 68%, respectivamente, quando comparados aos veículos equivalentes propulsionados por diesel (ICCT, 2024). Contrastivamente, os veículos operados

exclusivamente com gás natural de origem fóssil podem apresentar emissões até 23% superiores às daquelas dos veículos diesel, atribuídas à menor eficiência energética dos motores e às emissões fugitivas de metano durante todo o ciclo de vida (Speirs et al., 2020).

A escolha da tecnologia mais adequada para a remoção de CO₂ do biogás depende de diversos fatores, como o grau de purificação exigido, o porte da planta, a concentração de contaminantes no biogás bruto e o valor agregado do biogás após o beneficiamento, especialmente quando convertido em biometano (DAE SABESP, 2018). Embora as tecnologias disponíveis apresentem desempenhos semelhantes, elas variam quanto à demanda energética e à eficiência em parâmetros operacionais, como a elevada concentração de metano no produto final e a minimização das perdas de metano para a atmosfera. Assim, a seleção da tecnologia deve ser orientada pelas condições específicas de cada empreendimento (DAE SABESP, 2018; Rodrigues & Almeida, 2023).

Pääkkönen et al. (2019) aborda que qualidade do biometano depende intrinsecamente da matéria-prima utilizada na sua produção para atender a sustentabilidade ambiental do combustível. Pois existem diferenças, por exemplo, entre as matérias-primas à base de culturas e à base de estrume animal, enquanto as tecnologias de armazenamento, gestão e produção também têm um papel a desempenhar. O estrume animal oferece o maior potencial técnico do biometano na UE em comparação com outras matérias-primas, constituindo 43% no caso de utilização dos transportes. E neste sentido é que D'Adamo et al. (2021) comenta o quanto necessário políticas municipais, estaduais e federais a melhoria da gestão dos resíduos seja das áreas urbanas ou agrícolas para incentivar a implementação e adoção de um modelo de Economia circular para tirar o máximo proveito deles com o objetivo de zero deposição em aterro, e reintroduzi-los nos processos produtivos. De fato, a recuperação de resíduos e sua transformação em energia limpa através purificação do biogás via processo de digestão anaeróbia e atualizados para Bio-GNV como combustível de transporte Alao & Popoola, (2024), podem contribuir positivamente para combater o agravamento da mudanças climáticas causados pelos combustíveis fósseis.

O custo de produção do biometano varia conforme a origem do biogás utilizado, mas é fortemente influenciado pela escala e capacidade da planta de purificação. Além desses fatores técnicos, políticas públicas também desempenham um papel relevante em diversos países, há incentivos como isenção de tributos para o uso veicular do biometano, subsídios voltados à implantação de infraestrutura e estímulos para a injeção do biometano na rede de distribuição de gás natural. (ICCT, 2024).

2.6 Obstáculos da utilização do biometano

O biometano, como alternativa de combustível, pode reduzir em até 76% as emissões dos GEE quando comparado a caminhões movidos a diesel (Atkins et al., 2021). Contudo, como destaca Bidart et al. (2022), sua viabilidade econômica depende de condições específicas, devido à complexidade das etapas da sua cadeia produtiva. Portanto, a implementação eficaz do biometano no setor de transportes exige estratégias de suporte que abranjam toda a cadeia de abastecimento, desde a produção e distribuição até as infraestruturas de abastecimento e as aplicações finais. Aggaransgi et al (2022) afirmavam que o biometano tendia a ser produzido em áreas rurais, longe dos principais centros populacionais. E que a falta de infraestrutura adequada é um obstáculo significativo para o desenvolvimento do biometano em determinadas regiões, especialmente no curto e médio prazo e reafirmado por (Noussan et al., 2024).

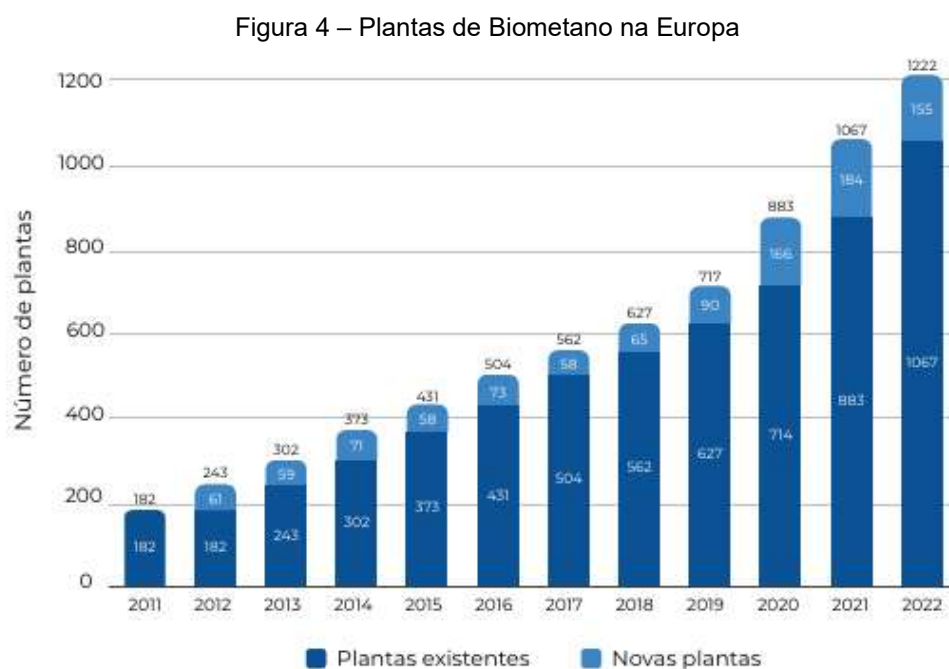
Uma transição verde eficaz no setor de transportes pode ser viabilizada com a produção de biometano, desde que acompanhada por medidas complementares, como a construção de postos de abastecimento de gás metano e a ampliação da frota de veículos movidos a gás natural, além disso, a implementação de usinas de biometano representa um avanço rumo à economia circular e pode contribuir para uma transição ecológica dupla ao promover o uso de energias renováveis no transporte e aprimorar a gestão de resíduos (D'Adamo et al., 2020).

A sustentabilidade financeira do biogás e do biometano constitui um fator crucial para sua viabilidade no mercado energético, especialmente quando

comparados ao gás natural, seu principal concorrente. A cadeia produtiva desses biocombustíveis enfrenta desafios adicionais, como a exigência de escala mínima para viabilizar economicamente os projetos, os elevados custos associados aos processos de limpeza e purificação do biogás, as tarifas de acesso à infraestrutura de transporte, incluindo os gasodutos de interligação até os pontos de injeção e a necessidade de compressão complementar para atender aos padrões técnicos exigidos para distribuição e uso (ABiogás, 2022).

Para promover a expansão do biometano como biocombustível, é essencial considerar a viabilidade econômica de toda a cadeia de valor, desde a produção do biogás até seu processamento e distribuição por meio de redes de gás e postos de abastecimento (Stettler et al. 2023). A sustentabilidade desse processo depende, ainda, da definição de um volume mínimo obrigatório de comercialização do biometano como combustível alternativo, garantindo retorno financeiro e atratividade para investimentos no setor. (Alao & Popoola, 2024)

Segundo a Associação Europeia do Biogás (EBA), a Europa chegou à marca de 1.222 plantas de biometano em 2022. (Figura 4)

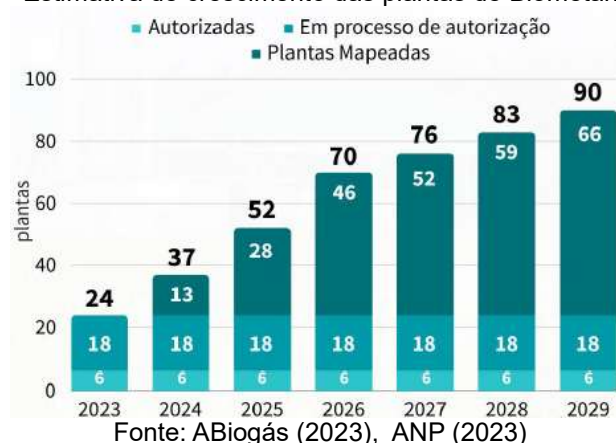


Fonte: EBA 2023

A utilização do biometano como biocombustível é uma realidade em inúmeros países. No Brasil, seguindo as resoluções ANP nº 8/2015, atual resolução ANP nº 906/2022 e ANP nº 685/2017, atual resolução ANP nº 886/2022 ele encontra-se regulado. O que possibilita também utilizá-lo no mesmo sistema de abastecimento, pois de acordo com o Decreto nº 10.712/2021 que autoriza a sua utilização em substituição ao GNV. Seguindo artigo 4º da Lei nº 14.134 (BRASIL, 2021), para todos os fins, o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural terão tratamento regulatório equivalente, desde que atendidas as especificações estabelecidas pela ANP.

Em 2018 havia 155 usinas de biogás no Brasil (CIBiogás, 2018). Uma quantidade bem pequena em relação ao tamanho da população do país, o que revelava o quão pequeno era o uso do potencial de biogás e do biometano (Joppert et al., 2018). Esse número aumentou exponencialmente para 885 plantas de biogás em 2023. E com a estimativa de crescimento de produção do biometano de 6,6 Mm³/dia até 2029 (ABiogás 2023). Ainda com um número modesto de plantas espalhadas e produção diária no país, se comparado com o biogás, porém com a expectativa de quase quadruplicar a quantidade de plantas até 2029, conforme figura 5 (ABiogás 2023).

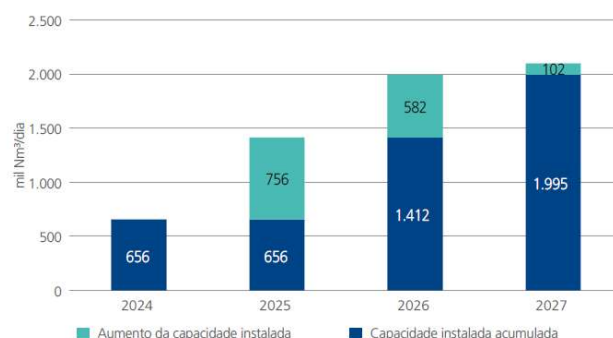
Figura 5 – Estimativa de crescimento das plantas de Biometano até 2029



Nesse contexto, a expectativa é de que haja forte crescimento da capacidade instalada de produção de biometano nos próximos anos. Para o CIBiogás (2025), o

Brasil deverá sair do patamar de 656 mil Nm³/dia em 2024 para 2 milhões Nm³/dia em 2027 (IEA 2023), ou seja, um aumento médio de 47% ao ano. (Figura 6)

Figura 6 – Projeção da capacidade instalada de biometano 2024 – 2027



Fonte: CIBiogás (2025)

Em outubro de 2024, foi sancionada a Lei nº 14.993/2024, também conhecida como Lei do Combustível do Futuro. Dentre os seus propósitos, ela promove as diretrizes para a transição energética no setor de transportes, incentiva a mobilidade sustentável de baixo carbono e visa a descarbonização do setor de combustíveis, assumidos pelo Brasil em acordos internacionais, como o Acordo de Paris, além de estabelecer o marco legal para a captura e o armazenamento geológico de dióxido de carbono. Um dos principais objetivos do projeto é reduzir as emissões nos setores de transporte (aviação e rodoviário) e no uso de gás natural (através do biometano).

A Lei Combustível do Futuro destaca o biometano como uma das soluções promissoras para a descarbonização do transporte pesado, por ser uma fonte renovável de baixa emissão de carbono, que promove a economia circular ao utilizar resíduos orgânicos, reduz a dependência de combustíveis fósseis importados e ainda incentiva a geração de renda no meio rural por meio da conversão de resíduos agropecuários em energia (Lei nº 14.993, 2024, art. 14).

A adoção da análise de ciclo de vida é estabelecida como o método mais preciso para calcular a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e determinar as vantagens ambientais proporcionadas por diferentes alternativas tecnológicas. Esta abordagem permite a quantificação dos impactos ecológicos em todas as etapas, englobando desde a obtenção de matérias-primas até a disposição

final do produto, incluindo processos de reciclagem ou reutilização quando pertinentes (Lei nº 14.993, 2024, art. 15).

A legislação estabelece medidas para promover a produção, distribuição, aquisição e operação de veículos de grande porte e equipamentos agrícolas alimentados por metano, incluindo outros tipos de veículos que utilizem este combustível. As diretrizes também abrangem a adaptação de veículos que operam com combustíveis alternativos para o uso de metano, assim como a troca de motores diesel por unidades novas movidas a metano que possuam aprovação dos organismos competentes de certificação (Lei nº 14.993, 2024, art. 16).

2.7 Transformação veicular (O que é?)

Caminhões pesados são comumente definidos como veículos comerciais com peso bruto superior a 15 toneladas, projetados para percorrer longas distâncias. Esses veículos possuem entre dois e quatro (ou mais) eixos e uma potência nominal que varia de 200 a 600 Kw (Stettler, et al., 2023). Esses veículos correspondem a aproximadamente 70% da atividade de transporte de mercadorias e são responsáveis por cerca de 50% do consumo energético dos caminhões (Noussan et al., 2024).

Conforme apresentado por Atkins et al. (2021), dados publicados pela Volvo Trucks (2020) indicaram que para a produção de seus caminhões das séries FM e FH um valor de 19,2 tCO₂e, foram liberados na atmosfera. Essas emissões de GEE de produção incorporadas podem ser amortizadas ao longo da vida útil do veículo, assumido pelo autor na ordem de 1.000.000 de km, que conforme cálculos, caminhões pesados (por exemplo, para longas distâncias) ainda são acrescidos de 1,9 kgCO₂eq/100 km.

Ao adquirir um caminhão, é preciso considerar não apenas o valor de compra, mas também os custos operacionais, como combustível e manutenção. Assim, a avaliação do custo total de propriedade e operação torna-se fundamental para analisar a viabilidade econômica de substituir o diesel por combustíveis alternativos de origem renovável (Zhang et al., 2024).

Para estimular o uso de biometano no transporte, é essencial renovar a frota antiga a gasolina e diesel por movidos a Bio-GNV (novos ou seminovos) e implementar uma rede de abastecimento de metano voltada especialmente a veículos pesados de carga e transporte público (D'Adamo et al., 2020).

Para frotas de grande porte, transformar caminhões motores movidos a diesel para operarem com combustíveis gasosos revela-se mais econômico do que trocar toda a frota por veículos novos a gás, essa transformação em ônibus e caminhões, inclui a instalação de sistemas de ignição por centelha e ajustes na injeção, permitindo operação bicomustível (metano e gasolina) ou exclusiva a metano. Embora diversos estudos tenham avaliado o desempenho e as emissões após essas modificações, poucas pesquisas investigaram como as emissões variam conforme os diferentes regimes de funcionamento do motor, analisando-se essa sensibilidade por meio do coeficiente de variação das grandezas de emissão em múltiplos estados operacionais (Biernat et al., 2021).

Um veículo de carga que utiliza biometano como combustível possui atributos específicos. Segundo a Scania (2021), seu motor é desenvolvido para operar com esse tipo de gás, apresentando ajustes distintos na taxa de compressão, nos sistemas de admissão e escape, nos tanques de armazenamento, nos componentes auxiliares, nos pneus, bem como na câmara de combustão, cabeçotes e válvulas. Além disso, adota-se o ciclo Otto, semelhante ao empregado em automóveis, o que resulta em níveis de ruído inferiores aos dos caminhões a diesel.

As emissões provenientes dos caminhões podem ser classificadas em duas categorias principais: reabastecimento e operação do veículo, englobando os principais gases de efeito estufa (GEE), tais como CO_2 e CH_4 . No processo de reabastecimento, as emissões de CO_2 são relativamente baixas, contudo, as emissões de CH_4 associadas ao GNV e, sobretudo, ao GNL, podem ser suficientemente elevadas para exercer um impacto relevante nas emissões totais do ciclo do poço à roda (Speirs et al., 2020).

O metano é um dos principais responsáveis pelas emissões de GEE em caminhões movidos a gás natural, devido ao seu elevado potencial de aquecimento global, que é de 23 a 36 vezes maior do que o do dióxido de carbono (Atkins et al.,

2021; Singh e Kalamdhad, 2022). Conforme apresentado por Speirs et al. (2020), os fatores mais importantes que influenciam as emissões de GEE na operação dos caminhões são a eficiência do veículo e o vazamento de CH_4 pelo escapamento.

Atualmente, nos países da Europa e no Brasil, a certificação de veículos novos, incluindo os veículos pesados de mercadorias (HGV), segue a regulamentação Euro VI. Essa norma exige a limitação de emissões de gases de efeito estufa, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (PM), além de outros poluentes, como hidrocarbonetos (HC). Embora a regulamentação Euro VI não aborde diretamente as emissões de CO_2 , na União Europeia (UE) é obrigatório, desde 2019, que os novos veículos alcancem reduções de 15% nas emissões de CO_2 a partir de 2025 e 30% a partir de 2030, em comparação com os níveis do ano de referência (Gray et al., 2021).

No estudo de Biernat et al., (2021), explica sobre a viabilidade do uso de combustíveis à base de metano para abastecer motores de combustão interna é determinada por diversos parâmetros, dos quais os mais importantes incluem, a composição química (como a concentração de metano, teor de poluentes e etc.), a resistência à combustão por detonação, as temperaturas de ignição e de autoignição, a constante estequiométrica do combustível, a taxa de combustão da mistura ar-combustível e o valor energético, medido pelo poder calorífico.

Um caminhão a gás natural veicular (GNV) operando exclusivamente com biometano pode apresentar custo total por quilômetro comparável ao de um caminhão movido a diesel, desde que os custos de produção e distribuição do biometano sejam aproximadamente 50% inferiores ao preço do gás natural fóssil (ICCT, 2024).

A frota de caminhões em circulação no Brasil caracteriza-se por elevada idade média. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), a substituição de veículos antigos e mais poluentes, fabricados até 1989, por caminhões novos a diesel possibilitaria a redução de cerca de 33,5% nas emissões de poluentes. Entretanto, a implementação de programas de renovação orientados à incorporação de tecnologias ainda menos poluentes que o diesel tende a potencializar os benefícios ambientais, além de contribuir para a consolidação de corredores de transporte sustentáveis.

No município de São Paulo, a descarbonização da frota dedicada à coleta de resíduos sólidos urbanos é estabelecida pela Lei nº 16.802/2018. Essa legislação determina a redução de 50% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) até 2028 e a eliminação total até 2038, em relação aos níveis observados em 2016. Para o material particulado (MP) e os óxidos de nitrogênio (NOx), são exigidas reduções de 90% e 80% até 2028, respectivamente, e de 95% para ambos até 2038. O cumprimento dessas metas demanda a rápida adoção de caminhões coletores com tecnologias de baixa ou nula emissão (ICCT, 2024).

2.8 Comparação entre biometano e óleo diesel

Os artigos consolidados da revisão sistemática estão explicados na seção de métodos.

Tabela 2 – Artigos selecionados a partir da revisão da literatura para leitura na íntegra

Aspecto		Vantagem	Desvantagem	Referências
Ambiental	Redução do GEE	X		Alao & Popoola (2024), Calise et al., (2024), Chojnowski & Dziubak (2024), Garlet et al., (2024), Keogh et al., (2024), Noussan et al., (2024), Zhang et al., (2024), Calise et al., (2023), Horváth & Szemesová (2023), Noussan et al., (2023), Stettler et al., (2023), Bidart et al., (2022a), Bidart et al., (2022b), Gustafsson et al., (2022), Li et al., (2022), Ramalho et al., (2022), Silva et al., (2022), Singh & Kalamdhad (2022), Atkins et al., (2021), D'Adamo et al. (2021), Gray et al. (2021), Gustafsson et al., (2021), Langshaw et al., (2021), Prussi, et al. (2021), D'Adamo et al., (2020), Dahlgren, S. (2020), Gustafsson et al., (2020), Langshaw et al., (2020), Madhusudhanan et al., (2020), Savickis et al., (2020), Speirs et al., (2020), Ferreira et al., (2019), Pääkkönen et al., (2019), Biernat et al., (2021), Ardolino, Parrillo & Arena (2018), Joppert et al., (2018), Herbes et al., (2018), Shanmugam et al., (2018)
	Redução de resíduos de aterros	X		Alao & Popoola (2024), Noussan et al., (2024), Ramalho et al., (2022), Silva et al., (2022), Singh & Kalamdhad (2022), Langshaw et al., (2021), Ardolino, Parrillo & Arena (2018), Herbes et al., (2018)
	Fuga de Metano ou NOx na produção e/ou abastecimento		X	Noussan et al., (2024), Stettler et al., (2023), Bidart et al., (2022a), Bidart et al., (2022b), Gustafsson et al., (2022), Langshaw et al., (2021), Prussi, et al. (2021), Dahlgren, S. (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da revisão sistemática PRISMA

Tabela 2 – Artigos selecionados a partir da revisão da literatura para leitura na íntegra

	Aspecto	Vantagem	Desvantagem	Referências
Econômico	Retorno de investimento	X		Alao & Popoola (2024), Calise et al., (2024), Keogh et al., (2024), Noussan et al., (2024), Calise et al., (2023), Stettler et al., (2023), Silva et al., (2022), Singh & Kalamdhad (2022), Atkins et al., (2021), Gustafsson et al., (2020), Madhusudhanan et al., (2020), Savickis et al., (2020), Speirs et al., (2020), Joppert et al., (2018)
	Redução de consumo de Óleo Diesel	X		Horváth & Szemesová (2023), Bidart et al., (2022b), D'Adamo et al. (2021), D'Adamo et al. (2020), Pääkkönen et al., (2019), Ardolino, Parrillo & Arena (2018)
	Preço menor do combustível (biometano)	X		Zhang et al., (2024), Bidart et al., (2022b), Atkins et al., (2021), Madhusudhanan et al., (2020)
	Necessidade de incentivo financeiro		X	Chojnowski & Dziubak (2024), Garlet et al., (2024), Calise et al., (2023), Keogh et al., (2024), Bidart et al., (2022a), Bidart et al., (2022b), Gustafsson et al., (2022), Li et al., (2022), Ramalho et al., (2022), Silva et al., (2022), Singh & Kalamdhad (2022), D'Adamo et al. (2021), Prussi, et al. (2021), D'Adamo et al. (2020), Dahlgren, S. (2020), Gustafsson et al., (2020), Langshaw et al., (2020), Savickis et al., (2020), Speirs et al., (2020), Pääkkönen et al., (2019), Ardolino, Parrillo & Arena (2018), Herbes et al., (2018)
Político	Incentivo na aquisição de veículos movidos a Biometano	X		Calise et al., (2023), Horváth & Szemesová (2023), Li et al., (2022)
	Ausência de Políticas Públicas		X	Chojnowski & Dziubak (2024), Keogh et al., (2024), Zhang et al., (2024), Horváth & Szemesová (2023), Bidart et al., (2022b), Ramalho et al., (2022), Silva et al., (2022), D'Adamo et al. (2021), Gustafsson et al., (2021), D'Adamo et al. (2020), Langshaw et al., (2020), Pääkkönen et al., (2019), Ardolino, Parrillo & Arena (2018)
Técnico	Maior autonomia do Biometano em longas distâncias	X		Chojnowski & Dziubak (2024), Gustafsson et al., (2022), Li et al., (2022), Gray et al. (2021), Prussi, et al. (2021), Dahlgren, S. (2020), Gustafsson et al., (2020), Langshaw et al., (2020), Madhusudhanan et al., (2020), Shanmugam et al., (2018)
	Maior autonomia do Biometano curtas distâncias (<500 km)	X		Langshaw et al., (2020), Madhusudhanan et al., (2020)
	Menor eficiência energética		X	Garlet et al., (2024), Gustafsson et al., (2022), Li et al., (2022), Ramalho et al., (2022), Langshaw et al., (2020), Madhusudhanan et al., (2020), Savickis et al., (2020)
	Maior incidência de manutenção		X	Garlet et al., (2024), Biernat et al., (2021), Madhusudhanan et al., (2020)
	Ausência de Infraestrutura e Abastecimento		X	Chojnowski & Dziubak (2024), Garlet et al., (2024), Keogh et al., (2024), Noussan et al., (2023), Bidart et al., (2022b), Gustafsson et al., (2022), Silva et al., (2022), Singh & Kalamdhad (2022), D'Adamo et al. (2020), Langshaw et al., (2020), Madhusudhanan et al., (2020), Savickis et al., (2020), Ferreira et al., (2019)
	Necessidade de espaço de armazenamento		X	Dahlgren, S. (2020), Langshaw et al., (2020)

Fonte: Elaborada pelo autor a partir da revisão sistemática PRISMA

Tabela 2 – Artigos selecionados a partir da revisão da literatura para leitura na íntegra

	Aspecto	Vantagem	Desvantagem	Referências
Social	Aumento na Criação de empregos	X		Alao & Popoola (2024), Dahlgren, S. (2020)
	Redução da pobreza	X		Alao & Popoola (2024), Dahlgren, S. (2020)
	Educação Ambiental	X		Alao & Popoola (2024), Ramalho et al., (2022), Silva et al., (2022), Singh & Kalamdhad (2022), D'Adamo et al. (2021), Ardolino et al., (2018)

Fonte: Elaborada pelo autor a partir da revisão sistemática PRISMA

2.8.1 Vantagens

O biometano apresenta significativo potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa no transporte de cargas, principalmente devido à neutralidade de CO₂ durante a combustão (Langshaw et al., 2020; Pääkkönen et al., 2019) e o estudo de Calise et al., (2023) apresentou uma redução de 86% de CO₂eq. A utilização de dados reais de emissões em condições operacionais reduz as incertezas na avaliação do ciclo tanque-à-roda, embora permaneça considerável variabilidade influenciada pelo tipo de veículo, sistemas de redução catalítica seletiva (SCR), padrões de condução e condições rodoviárias (Stettler et al., 2023). Para maximizar os benefícios ambientais, torna-se fundamental otimizar tanto os sistemas de motorização quanto os de pós-tratamento (Speirs et al., 2020). Os resultados de Singh & Kalamdhad (2022) nos mostram que os RSU aproveitados corretamente reduzem as emissões dos GEE. Adicionalmente, o processo de produção de biogás / biometano gera benefícios secundários importantes, incluindo melhorias no tratamento de resíduos, fortalecimento das estruturas do solo e redução na demanda por fertilizantes minerais (Ardolino; Parrillo, Arena, 2018).

Alao e Popoola (2024) demonstraram que com incentivos políticos o biometano podia proporcionar economia substancial, estimando uma redução anual de aproximadamente US\$ 100 milhões apenas na África do Sul ao substituir óleo diesel por Bio-GNV derivado de resíduos sólidos urbanos em frotas de transporte público. Os resultados de Calise et al., (2023) apresentaram que descontos oferecidos para a compra de caminhões movidos a combustíveis renováveis favoreceram o payback para aproximadamente 2 anos. Atkins et al., (2021) e

Madhusudhanan et al., (2020) afirmaram que a substituição do biometano pelo óleo diesel como combustível em veículos pesados poderia proporcionar uma redução de 30% a 40% no custo de abastecimento do combustível. E complementando que no estudo de Noussan et al., (2024) foi apresentado nos resultados que a utilização do Bio-GNV como combustível, reduziria a necessidade de importação de combustíveis fósseis.

Para que a transição energética seja eficaz, é essencial que políticas públicas apoiem a expansão da rede de abastecimento e o crescimento da frota de veículos compatíveis (Chojnowski e Dziubak, 2024; Calise et al., 2023). Persistem desafios relacionados à insuficiência de suporte legislativo adequado e à necessidade de marcos regulatórios que facilitem a implementação em larga escala. Campanhas educativas governamentais podem facilitar a compreensão pública sobre a importância da gestão eficiente de resíduos, estimulando a coleta seletiva e reduzindo o encaminhamento de materiais para aterros sanitários (D'Adamo et al., 2021).

Atualmente, o Bio-GNV tem aplicação concentrada em veículos pesados de curta distância, incluindo transporte público e coleta de resíduos, devido à autonomia limitada de aproximadamente 500 km (Dahlgren, 2020). Embora essa vantagem ambiental não se estenda uniformemente a todas as categorias de emissões, persistem problemas técnicos relacionados às fugas de metano durante o processo de abastecimento (Noussan et al., 2024; Gustafsson et al., 2022). O aperfeiçoamento dos sistemas de pós-tratamento e motorização representa um desafio técnico fundamental para maximizar a eficiência do combustível.

Além de constituir uma alternativa combustível renovável, o Bio-GNV destaca-se por promover soluções para problemas sociais através da produção de biogás (Dahlgren, 2020). Entretanto, persistem desafios como a resistência comunitária à instalação de usinas de biogás e biometano, exigindo estratégias de engajamento social mais efetivas. D'Adamo et al., (2021) afirmam que campanhas educativas podem facilitar a compreensão pública sobre a importância da gestão eficiente de resíduos, estimulando a coleta seletiva e reduzindo o encaminhamento de materiais para aterros sanitários. Assim como demonstraram Alao e Popoola (2024) a evidência que, mediante maior experiência prática e ampliação de

iniciativas, o Bio-GNV representa uma alternativa promissora para o setor de transportes, configurando-se como estratégia viável para alcançar as metas nacionais de desenvolvimento de um sistema de transporte sustentável, econômico e ambientalmente responsável.

2.8.2 Desvantagens

Estudos evidenciam os benefícios ambientais do biometano na redução de emissões de gases de efeito estufa (Zhang et al., 2024; Ramalho et al., 2022; Silva et al., 2022). Os resultados demonstram uma diminuição significativa das emissões em comparação aos combustíveis convencionais utilizados no transporte de mercadorias, resíduos sólidos urbanos e pessoas como gás natural e diesel (Bidart et al., 2022; Gustafsson et al., 2022). Stettler et al. (2023) projetam uma redução de até 66% nas emissões de GEE no ciclo de vida completo (WTW) do biometano em relação ao diesel. Contudo, Dahlgren (2020); Bidart et al., (2022a) ressaltam que os vazamentos de metano no processo de produção e abastecimento podem anular os benefícios climáticos da substituição de combustíveis fósseis por renováveis.

A adoção do biometano no transporte pesado demanda investimentos significativos, liderança política consistente e políticas estratégicas integradas (Horváth e Szemesová 2023). Conforme destacam Pääkkönen et al. (2019), é fundamental considerar as particularidades regionais e os atores locais em uma estratégia nacional de biogás, coordenando instrumentos de políticas diretas e indiretas de forma consistente.

Singh e Kalamdhad (2022) concluem que o biometano apresenta vantagem econômica em comparação à gasolina e ao diesel considerando o custo por unidade de combustível. Entretanto, essa vantagem é limitada pelos maiores custos de manutenção dos veículos movidos a combustível gasoso em relação aos veículos convencionais.

Zhang et al. (2024) identificaram que a principal questão para adoção de combustíveis alternativos em veículos pesados reside na análise de custos e benefícios para operadores de frota, especialmente no custo total de propriedade (TCO) e nas emissões do ciclo completo (WTW). Os autores, em concordância com

Gustafsson et al. (2021), observaram que combustíveis alternativos como gás natural comprimido, eletricidade, hidrogênio, biometano e óleo vegetal hidrogenado, apesar de funcionarem como vetores energéticos com alta dependência elétrica, não são necessariamente mais vantajosos que o diesel na análise de emissões WTW.

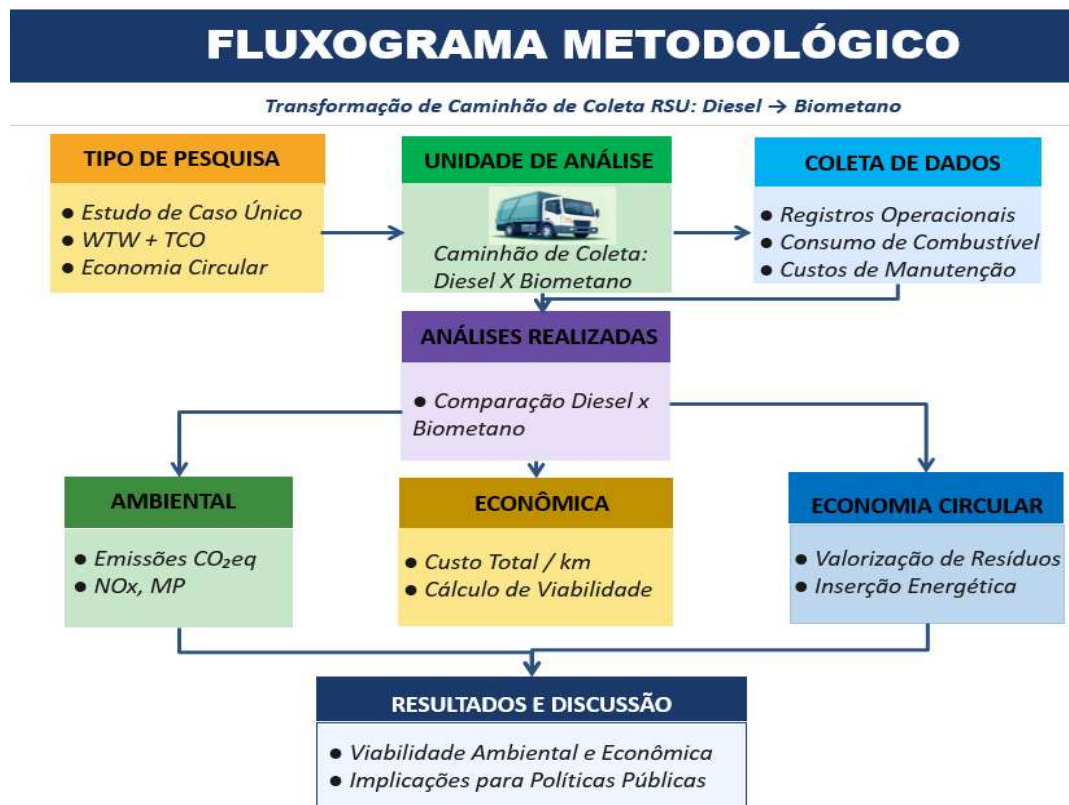
O estudo de Singh e Kalamdhad (2022) destacou que as emissões de metano na cadeia de suprimentos de Bio-GNV são significativas, porém reduzíveis mediante manutenção adequada e regulamentação ambiental rigorosa. A análise econômica aponta dois fatores críticos: a necessidade de subsídios ao preço do biometano, conforme sugerido por Pääkkönen et al. (2019), e a redução de custos operacionais e de capital das usinas para viabilidade a longo prazo. Adicionalmente, fatores como preferências do consumidor, custos irrecuperáveis, tendência dos investidores por mercados consolidados e escassez de postos de GNV limitam o potencial do biometano, aumentando as incertezas nas decisões de compra.

3 METODOLOGIA

A metodologia desta dissertação está estruturada em abordagem qualitativa com triangulação quantitativa, desenvolvida a partir de um estudo de caso único aplicado à transformação de um caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos movido a diesel para operação com biometano, no município de São Paulo (Figura 7). Inicialmente, realizou-se uma revisão sistemática da literatura baseada no protocolo PRISMA, com o objetivo de identificar parâmetros ambientais, econômicos, políticos, técnicos e sociais relacionados à descarbonização de frotas pesadas, ao uso do biometano e à economia circular. A avaliação ambiental foi conduzida por meio da metodologia do poço a roda (WTW), enquanto a análise econômica utilizou o modelo de Custo Total de Propriedade (TCO), complementado por indicadores financeiros como VPL e payback. As análises sociais consideraram impactos relacionados à qualidade do ar, saúde pública e geração de valor sustentável.

O caso é a transformação de um caminhão compactador de RSU Volkswagen Constellation 24.260 CRM 6X2, de diesel S-10 para GNV/biometano, operado por uma empresa de coleta de resíduos no município de São Paulo. Os dados foram coletados de janeiro até dezembro de 2023, através de 28 visitas durante aquele ano. A triangulação de dados envolveu documentos técnicos da transformação veicular, dados de monitoramento de consumo do caminhão transformado, cálculos das emissões e dos custos envolvidos, entrevista com o gestor de operações e aplicação de questionário com operadores e técnicos, comparando um caminhão similar operando a diesel na mesma rota.

Figura 7 – Fluxograma Metodológico



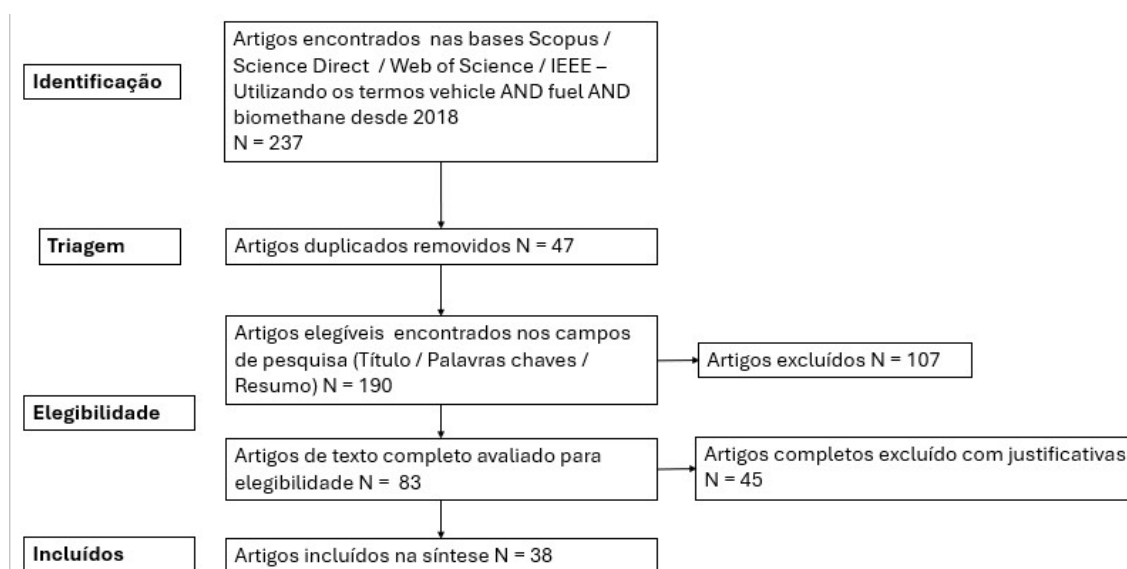
Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Método para revisão sistemática da literatura

A revisão sistemática da literatura buscou encontrar estudos aderentes ao tema da pesquisa. Os artigos incluídos nesta revisão foram selecionados com base em critérios sistemáticos, considerando sua relevância para o escopo estabelecido do sistema "do poço à roda" (WTW) do biometano como combustível para caminhões pesados. A seleção dos estudos relevantes embasada no conhecimento prévio dos autores acerca de pesquisas atuais e anteriores relacionadas a tecnologias de veículos de baixo carbono, qualidade do ar, transporte sustentável, digestão anaeróbica e áreas correlatas. Foi realizada em agosto de 2024 uma revisão sistemática da literatura por meio de uma pesquisa online nas bases de dados, ScienceDirect, Scopus, Web of Science e IEEE utilizando a metodologia PRISMA (Moher et al., 2010).

O processo de identificação foi iniciado realizando a busca com as combinações dos termos de pesquisa "Vehicle", "Fuel" e "Biomethane" e "Vehicle", "Diesel" e "Biomethane", nos campos de título, resumo e palavras chaves, a partir de 2018, o que retornou no total 237 artigos. No processo de triagem, foram removidos 47 artigos duplicados. No processo de elegibilidade, os 190 artigos que restaram foram lidos os títulos e após a leitura, foram excluídos 107 que não havia aderência, pois abordavam os termos da pesquisa de formas individuais e não em conjunto. Foram lidos os resumos dos 83 artigos que restaram e foram excluídos 45 artigos, com até citação dos três termos da pesquisa, porém fora do contexto da transformação de um caminhão de coleta de RSU movido a diesel para movido a biometano oriundo de aterro sanitário. Seguindo esse fluxo, chegando no processo de inclusão com 38 artigos para a leitura completa. Conforme apresentada na figura 8. Esses 38 artigos selecionados foram apresentados na Tabela 2 da seção 2.6.

Figura 8 – Metodologia PRISMA com palavras chaves "Vehicle"AND"Fuel"AND"Biomethane"



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado Moher et. al, (2010)

A partir da leitura dos 38 artigos da tabela 2, foram categorizados por vantagens e desvantagens nos seguintes aspectos, ambientais, técnicos, econômicos, políticos e sociais e analisados de forma individuais e em conjunto realizando a comparação entre os combustíveis fósseis e o biometano.

3.2 Método estudo de caso

Segundo Yin (2017), o estudo de caso qualitativo constitui uma estratégia de pesquisa apropriada para investigar fenômenos contemporâneos inseridos em seu contexto real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos e quando o pesquisador possui reduzido controle sobre os eventos investigados. Essa abordagem é particularmente indicada para responder questões do tipo "como" e "por que", permitindo compreender processos complexos por meio da utilização de múltiplas fontes de evidência. A confiabilidade dos resultados é fortalecida pela triangulação entre documentos, observações diretas, entrevistas e registros operacionais, possibilitando uma compreensão abrangente do fenômeno investigado.

Nesta pesquisa foi adotado o delineamento de estudo de caso único, por se tratar da análise aprofundada de um caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos transformado de diesel para GNV, com projeção operacional para utilização de biometano proveniente de aterro sanitário no município de São Paulo. A escolha desse caso fundamenta-se em seu caráter revelador, uma vez que representa uma aplicação real de uma tecnologia ainda pouco difundida no Brasil e que reúne, em um mesmo sistema, aspectos relacionados à descarbonização do transporte pesado, ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos e à economia circular. Assim, o estudo permite analisar, de forma integrada, os impactos ambientais, econômicos e sociais decorrentes da transformação veicular, oferecendo evidências empíricas relevantes para compreender as potencialidades e limitações dessa alternativa tecnológica em ambientes urbanos.

O planejamento metodológico foi estruturado de forma sequencial e integrada para atender ao objetivo geral da pesquisa e responder à questão central: quais são as vantagens ambientais, econômicas e sociais da transformação de caminhões seminovos de coleta de resíduos sólidos urbanos movidos a diesel para utilização de biometano produzido em aterros sanitários? Para isso, adotou-se uma abordagem qualitativa com triangulação quantitativa, combinando revisão sistemática da literatura, estudo de caso único, levantamento documental,

observação direta, monitoramento operacional do veículo, entrevistas e análises técnicas.

A pesquisa foi desenvolvida em etapas complementares. Inicialmente, realizou-se a fundamentação teórica e a revisão sistemática da literatura para identificar o estado da arte sobre descarbonização do transporte pesado, biometano, economia circular e avaliação de impactos ambientais, econômicos e sociais. Em seguida, definiu-se o caso de estudo a partir da parceria entre uma empresa especializada em soluções para motores a diesel e gás e uma empresa responsável pela coleta de resíduos sólidos urbanos, que disponibilizou um caminhão para acompanhamento técnico e operacional. Com base nesse contexto, foi elaborado o modelo conceitual integrado da pesquisa, articulando as dimensões ambiental, econômica e social sob a perspectiva da economia circular, orientando posteriormente a coleta, o tratamento e a análise dos dados obtidos.

A triangulação dos dados envolveu o manual técnico fornecido pela empresa que realizou a transformação veicular do caminhão, com dados do monitoramento em conjunto do consumo de gás com a empresa coletora RSU, os cálculos apresentados por essa dissertação para a quantificação emissões dos GEE, além da entrevista realizada presencialmente com o gestor das operações do veículo e finalizando com retorno do formulário (Apêndice B) respondido por dois motoristas e um técnico responsável pela manutenção.

A coleta dos dados de consumo do caminhão transformado (Apêndice A), foi realizada pelo pesquisador na garagem da empresa coletora de RSU, em visitas ocorridas de janeiro até dezembro de 2023 e os dados de consumo do caminhão similar movido a diesel foram informados pela empresa coletora de RSU (Tabela 3).

É importante esclarecer que por uma questão estratégica, durante o ano de 2023, o caminhão foi abastecido com GNV e que os cálculos apresentados para o biometano são projeções.

Os cálculos de emissões baseiam-se nos fatores de emissão e parâmetros de conversão energética (IEMA 2025, ANP 2023, EPE 2023, ABNT NBR 16890, EMEP/EEA 2023), abrangendo a quantificação dos GEE do diesel, GNV e biometano. E a viabilidade econômica da transformação e os benefícios da

economia circular foram analisados com base nos dados do Banco Central do Brasil (2024), BNDES (2024), Petrobras (2025) e EloGroup (2024).

Na observação direta foi acompanhado, o processo técnico de transformação do caminhão à movido diesel para o GNV/biometano em operação em suas rotas de atividade, assim como a verificação da disponibilidade de infraestrutura de produção e abastecimento do Bio-GNV e procedimentos de manutenção do veículo transformado.

A análise dos dados do conteúdo foi pautada nos temas relacionados aos aspectos ambientais, econômicos, políticos, técnicos e sociais, categorizados em vantagens e desvantagens da transformação do caminhão, identificados na revisão sistemática da literatura, com o questionário compartilhado (Apêndice B), e os impactos da dimensão social dentro da economia circular.

Por fim, os dados foram sistematizados, comparados e interpretados com embasamento da literatura científica e dos objetivos da pesquisa, fundamentando as discussões e conclusões da dissertação.

4 RESULTADOS

Este estudo de caso abordou a transformação de um caminhão de coleta de resíduos que originalmente circulava abastecido com óleo diesel e que foi transformado para ser abastecido com GNV de postos da zona leste de São Paulo ou de biometano na forma GNC produzido o através de biodigestores do próprio aterro sanitário, seguindo a determinação da prefeitura para atender às diretrizes do Plano de Ação Climática do Município de São Paulo, o PlanClima (PMSP).

4.1 Processo da transformação

O caminhão a diesel escolhido como referência foi o Volkswagen modelo Constellation 24.260 CRM 6X2 com motor MAN / D08 36 280 com EGR, P7 (Figura 8) com a função específica de compactador de lixo (mais severa), que dentre os modelos Baú / carreta, Munck, Roll on-rol off e basculante, é o que apresenta o maior consumo de energia entre as quatro categorias operadas na cidade de São Paulo (ICCT, 2024). Com as especificações técnicas do motor com 256 CV de potência, 900 Nm de torque e transmissão manual Eaton FS 6406-A (Figura 9). E que operacionalmente apresenta baixa velocidade média, devido às paradas frequentes, afetando a produtividade da rota, com alto consumo devido ao peso e paradas constantes e que impactam nos custos operacionais.

Figura 9 – Caminhão 24.260 CRM 6X2



Fonte: Revista Farol Alto, 2018

Figura 10 – Especificações Técnicas do caminhão

MAN /	256 (188)	900 @	Manual -	23.000 kg
D0836 260	@ 2.300	1.100 -	Eaton / FS	Peso Bruto
Motor	Potência	1.800	6406-A	Total (PBT) -
	Liq. Máx. -	Torque Liq.	Transmissão	Homologado
	cv (kW) @	Máx. - Nm		
	rpm (*)	@ rpm (*)		

Fonte: VWCO (2025)

Antes do envio do caminhão do proprietário para transformação a empresa parceira realizou o acompanhamento do veículo nas rotas previstas para aquisição de dados de potência, torque e consumo do caminhão escolhido abastecido com o diesel, com o objetivo do levantamento dos dados reais desses parâmetros e ambientalmente teve acesso aos dados de emissões de CO₂, NO_x e MP para que após a transformação pudessem medidos e ajustados.

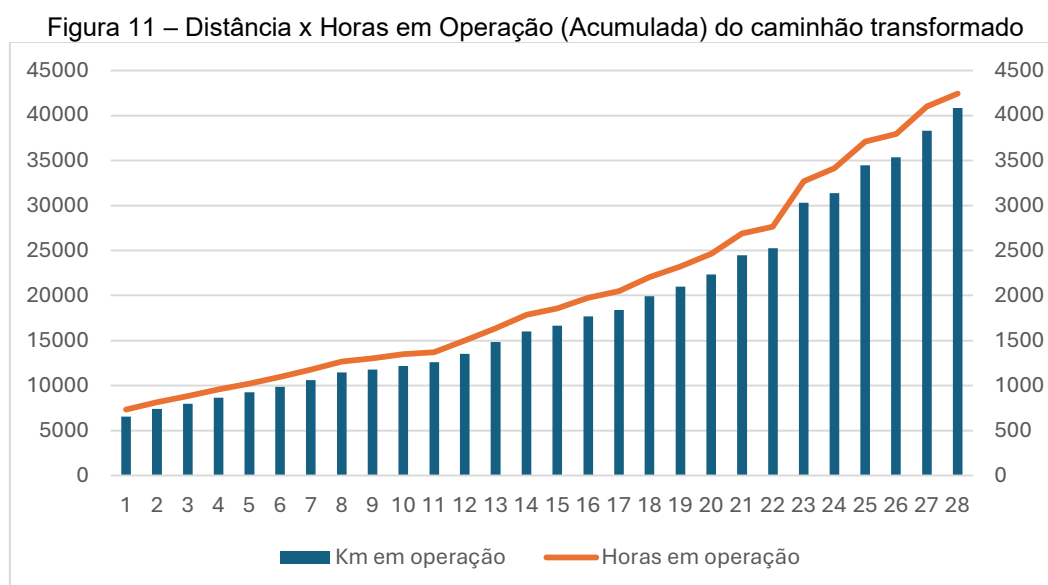
Em posse do caminhão, a empresa parceira realizou a transformação, substituindo o motor original do caminhão por um motor 6 cilindros a gás para ser abastecido tanto com GNV quanto biometano, liberado com 264 CV de potência e 984 Nm de torque. Foram retirados todos os componentes da linha de abastecimento de óleo diesel, e realizadas todas as adaptações necessárias como montagem do conjunto motor e câmbio no chassi do veículo, assim como a montagem dos suportes e cilindros de gás, com cilindros distribuídos pelo chassi do veículo atendendo um total de 160 m³ de autonomia. Com uma pressão de gás de 200 bar no sistema de alta pressão e após a passagem por uma válvula redutora, liberando 7 bar de pressão para o sistema interno do motor. E após todas as alterações mecânicas, o veículo foi liberado para a realização de todas as atividades de integração elétrica e eletrônica incluindo os ajustes de calibração, com testes de rodagem para garantir todas as condições de consumo, torque, potência originais do caminhão movido a óleo diesel com o foco na redução dos GEE.

Após os testes, o caminhão transformado foi enviado para o órgão certificador (INMETRO) para a atualização de documentação (Diesel para gás) e vistoria de todas as alterações do veículo para após a liberação, voltar rodar na rota definida pela empresa coletora de resíduos sólidos.

A entrega do caminhão transformado aconteceu em setembro de 2022 para os primeiros testes em rotas variáveis e em 28 de dezembro de 2022 foi colocado em operação em rota fixa, com abastecimento de 2 vezes ao dia, durante 6 dias na semana, com a quilometragem inicial para o motor a GNC em 6565 km e 863 horas de operação.

4.2 Dados obtidos

Ao longo de 2023, o pesquisador realizou 28 visitas técnicas, verificando as condições de consumo, desempenho, manutenções do caminhão transformado. Ao término do período de análise, o caminhão movido a gás acumulou 41846 km rodados, dos quais 35281 km em 2023 (Apêndice A), com consumo de 36.204 m³ de GNV e regime anual de operação de 3.621 horas (Figura 10). As trocas de óleo lubrificante e as manutenções do motor e do sistema de abastecimento de gás foram executadas pela empresa parceira, enquanto as operações, o abastecimento e as manutenções gerais permaneceram sob responsabilidade da empresa de coleta de resíduos urbanos.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados coletados na pesquisa

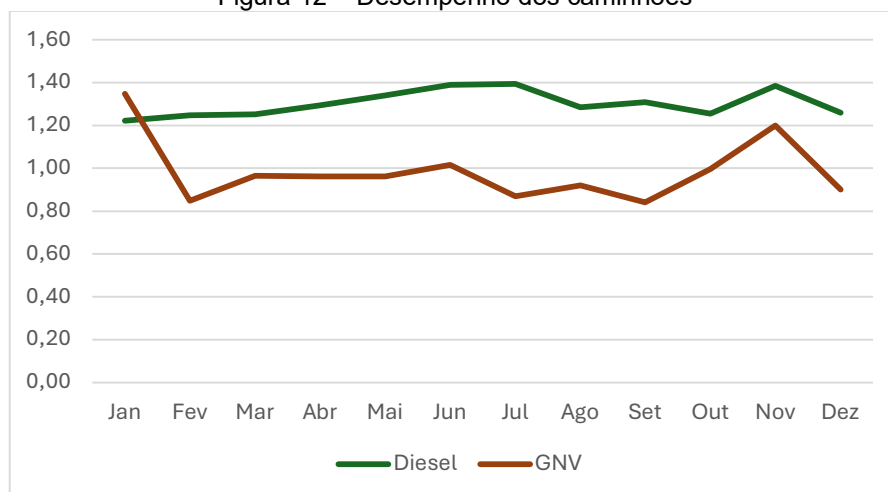
Tecnicamente a autonomia média do caminhão transformado movido a GNV foi de 0,97 Km/m³ (Tabela 3), percorrendo por 35281 Km durante 3621 horas de operação enquanto o caminhão similar a diesel apresentou um desempenho de 1,30 Km/L (Tabela 8) de autonomia, percorrendo por 47458 Km com horas de operação similar, pois o caminhão apresentou mais ciclos de manutenção conforme apresentado pela empresa de coleta de resíduos.

Tabela 3 – Desempenho dos caminhões a diesel e a gás em 2023

	Diesel			GNV		
	Litros	Km	Autonomia	M ³	Km	Autonomia
Janeiro	2906	3551	1,22	2316	3119	1,35
Fevereiro	2816	3514	1,25	3703	3136	0,85
Março	3254	4074	1,25	3146	3038	0,97
Abril	2764	3576	1,29	1922	1849	0,96
Maio	3436	4600	1,34	3363	3238	0,96
Junho	3174	4408	1,39	2381	2418	1,02
Julho	3191	4446	1,39	3348	2910	0,87
Agosto	3224	4139	1,28	5500	5060	0,92
Setembro	3253	4258	1,31	1293	1086	0,84
Outubro	3084	3869	1,25	3998	3981	1,00
Novembro	3184	4409	1,38	2450	2940	1,20
Dezembro	2077	2614	1,26	2784	2506	0,90
TOTAL	36363	47458	1,31	36204	35281	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados coletados na pesquisa

Figura 12 – Desempenho dos caminhões



Fonte: Com base nos dados coletados na pesquisa

4.2.1 Ambientais

Para os dados ambientais, foram adotados fatores de emissão (Fe) de CO₂, NOx e MP e parâmetros de conversão energética (Tabela 4) para um caminhão similar ao do estudo, movido a diesel que apresentou uma performance de 47458 Km rodados com consumo de 36363 litros de óleo diesel S-10 da Petrobras (diesel A) durante o mesmo período percorrendo a mesma rota do caminhão movido a GNV e biometano, a partir dos quais foram calculados os valores anuais de emissões de GEE (Equação 1).

Tabela 4 – Fatores de Emissão e Parâmetros de Conversão Energética adotados

Combustível / Norma	Fe CO ₂ (kg/L ou kg/m ³)	Fe NOx (kg/kg ou kg/m ³)	Fe MP (kg/kg)	Fonte
Diesel S-10 – PROCONVE P7	2,671 kg/L	0,006575 kg/kg	0,000055 kg/kg	IEMA 2025
GNV Fóssil	2,000 kg/m ³	0,000580 kg/m ³	0,00000945 kg/kg	IEMA 2025 / EMEP/EEA 2023, Tier 2
Biometano (RSU)	0,168 kg/m ³	0,000580 kg/m ³	0,00000945 kg/kg	IEMA 2025 / EMEP/EEA 2023, Tier 2
Densidade Diesel S-10	0,84 kg/L	—	—	ANP 2023
Densidade do biometano	0,75 kg/m ³	—	—	ABNT NBR 16890 / ANP
PCI Diesel	35,86 MJ/L	—	—	EPE 2023
PCI Biometano (95% CH ₄)	34,20 MJ/m ³	—	—	ISO 15403 / ANP
Intensidade de carbono do biometano RSU (WTW):	-13,6 gCO ₂ eq/MJ	—	—	EPE 2022

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.1.1 Emissões do tanque a roda (TTW)

A emissão anual de um poluente (p) pelo veículo durante a combustão é calculada por:

Equação 1 – Massa anual de CO₂ emitida pelo caminhão à diesel

$$E_{TTW}(p) = Fe(p) \times C(diesel) \quad (1)$$

Onde:

$E_{TTW}(p)$ = massa do CO₂ emitido anualmente (kg/ano);

$Fe(p)$ = fator de emissão do poluente p para o combustível (kg/L para diesel e kg/m³ para gás);

C = consumo anual de combustível (L/ano para diesel e m³/ano para gás);

$$E_{TTW}(CO_2) = 2,671 \times 36363$$

$$E_{TTW}(CO_2) = 97.125,57 \text{ kg/ano}$$

Equação 2 – Normalização da massa anual de CO₂ emitida pelo caminhão à diesel pela distância

$$E_{TTW}(CO_2_N) = \frac{E_{TTW}(CO_2)}{DTP} \quad (2)$$

Onde:

$E_{TTW}(CO_2_N)$ = massa do CO₂ emitido anualmente normalizado pela distância (kg CO₂/km);

$E_{TTW}(CO_2)$ = massa do CO₂ emitido anualmente (kg/ano);

DTP = Distância total percorrida pelo caminhão a diesel (km/ano);

$$E_{TTW}(CO_2_N) = \frac{97.125,57}{47.458}$$

$$E_{TTW}(CO_2_N) = 2,047 \text{ kg CO}_2/\text{km}$$

Para NO_x e MP no diesel, a equação é ajustada pela densidade ($\rho = 0,84$ kg/L);

Equação 3 – Massa anual de NO_x emitidos pelo caminhão à diesel

$$E_{TTW}(NO_x) = Fe(NO_x) \times C(diesel) \times \rho \quad (3)$$

$$E_{TTW}(NOx) = 0,006575 \times 36.363 \times 0,84$$

$$E_{TTW}(NOx) = 200,83 \text{ kg/ano}$$

Equação 4 – Normalização da massa anual de NOx emitida pelo caminhão à diesel pela distância

$$E_{TTW}(NOx_N) = \frac{E_{TTW}(NOx)}{DTP} \quad (4)$$

Onde:

$E_{TTW}(NOx_N)$ = massa do NOx emitido anualmente normalizado pela distância (kg NOx/km);

$E_{TTW}(NOx)$ = massa do NOx emitido anualmente (kg/ano);

DTP = Distância total percorrida pelo caminhão a diesel (km);

$$E_{TTW}(NOx_N) = \frac{200,83}{47.458}$$

$$E_{TTW}(NOx_N) = 4,23 \cdot 10^{-3} \text{ kg NOx/km}$$

Equação 5 – Massa anual de MP emitidos pelo caminhão à diesel

$$E_{TTW}(MP) = Fe(MP) \times C(diesel) \times \rho \quad (5)$$

$$E_{TTW}(MP) = 0,000055 \times 36.363 \times 0,84$$

$$E_{TTW}(MP) = 1,68 \text{ kg/ano}$$

Equação 6 – Normalização da massa anual de MP emitida pelo caminhão à diesel pela distância

$$E_{TTW}(MP_N) = \frac{E_{TTW}(MP)}{DTP} \quad (6)$$

Onde:

$E_{TTW}(MP_N)$ = massa do MP emitido anualmente normalizado pela distância (kg MP/km);

$E_TTW(MP)$ = massa do MP emitido anualmente (kg/ano);

DTP = Distância total percorrida pelo caminhão a diesel (km);

$$E_TTW (MP_N) = \frac{1,68}{47.458}$$

$$E_TTW (MP_N) = 3,54 \cdot 10^{-5} \text{ kg MP/km}$$

Tabela 5 – GEE emitidos pelo caminhão à diesel

Abastecimento (L/Ano)	Fe CO ₂ (Kg/L)	Emissão CO ₂ (Kg/Ano)	Fe NOx (Kg NOx/Kg Diesel)	Emissão NOx (Kg/Ano)	Fe MP (Kg MP/Kg Diesel)	Emissão MP (Kg/Ano)
36.363	2,671	97.125,57	$6,575 \cdot 10^{-3}$	200,83	$5,5 \cdot 10^{-5}$	1,68

Fonte: Elaborado pelo autor

Equação 7 – Massa anual de CO₂ emitidos pelo caminhão à GNV

$$E_TTW(CO_2) \text{ GNV} = Fe(CO_2) \times C(\text{GNV}) \quad (7)$$

Onde:

Fe (CO₂) = Fator de emissão de CO₂ para o GNV (kg / m³);

C (GNV) = Consumo de GNV (m³ / ano);

$$E_TTW(CO_2) \text{ GNV} = 2 \times 36.204$$

$$E_TTW(CO_2) \text{ GNV} = 72408 \text{ kg/ano}$$

Equação 8 – Normalização da massa anual de CO₂ emitida pelo caminhão à GNV pela distância

$$E_TTW (CO_2_N) \text{ GNV} = \frac{E_TTW(CO_2)}{DTP} \quad (8)$$

Onde:

$E_TTW(CO_2_N)$ = massa do CO₂ emitido anualmente normalizado pela distância (kg CO₂/km);

$E_TTW(CO_2)$ = massa do CO₂ emitido anualmente (kg/ano);

DTP = Distância total percorrida pelo caminhão a GNV (km);

$$E_{TTW} (CO_2_N)GNV = \frac{72408}{35281}$$

$$E_{TTW} (CO_2_N)GNV = 2,052 \text{ kg } CO_2/km$$

Equação 9 – Massa anual de CO₂ emitidos pelo caminhão se fosse abastecido por Biometano

$$E_{TTW}(CO_2)Biometano = Fe(CO_2) \times C(Biometano) \quad (9)$$

Onde:

Fe (CO₂) = Fator de emissão do CO₂ para o Biometano (Kg/m³);

C (Biometano) = Consumo do biometano (m³ / ano);

$$E_{TTW}(CO_2)Biometano = 0,168 \times 36.204$$

$$E_{TTW}(CO_2)Biometano = 6082 \text{ kg/ano}$$

Equação 10 – Normalização da massa anual de CO₂ emitida pelo caminhão se fosse abastecido por Biometano pela distância

$$E_{TTW} (CO_2_N) Biometano = \frac{E_{TTW}(CO_2)}{DTP} \quad (10)$$

Onde:

E_{TTW}(CO₂_N) Biometano = massa do CO₂ emitido anualmente normalizado pela distância (kg CO₂/km);

E_{TTW}(CO₂) Biometano = massa do CO₂ emitido anualmente (kg/ano);

DTP = Distância total percorrida pelo caminhão a Biometano (km);

$$E_{TTW} (CO_2_N)Biometano = \frac{6082}{35281}$$

$$E_{TTW} (CO_2_N) Biometano = 0,172 \text{ kg } CO_2/km$$

O biometano, após purificação em conformidade com a Resolução ANP nº 685/2017, apresenta composição equivalente ao GNV (≥ 96% de metano), o que

justifica a adoção dos mesmos fatores de emissão. Como os processos de combustão no motor são equivalentes, resultam emissões semelhantes de poluentes locais (NOx e MP). Assim, aplicam-se os fatores do EMEP/EEA (2023) da Tabela 4 para veículos pesados a gás natural, padrão Euro VI, em ciclo urbano.

Equação 11 – Massa anual de NOx emitido pelo caminhão à GNV/Biometano

$$E_{TTW}(NOx) = Fe(NOx) \times C(GNV/Bio\ GNV) \times \rho(GNV/Bio\ GNV) \quad (11)$$

$$E_{TTW}(NOx) = 0,580 \times 36204 \times 0,75$$

$$E_{TTW}(NOx) = 15750\ g/ano$$

$$E_{TTW}(NOx) = 15,75\ kg/ano$$

Equação 12 – Normalização da massa anual de NOx emitido pelo caminhão à GNV/Biometano pela distância

$$E_{TTW}(NOx_N)_{GNV/Biometano} = \frac{E_{TTW}(NOx)}{DTP} \quad (12)$$

$$E_{TTW}(NOx_N)_{GNV/Biometano} = \frac{15,75}{35281}$$

$$E_{TTW}(NOx_N)_{GNV/Biometano} = 4,6 \times 10^{-4}\ kg\ NOx/km$$

Equação 13 – Massa anual de MP emitido pelo caminhão à GNV

$$E_{TTW}(MP) = Fe(MP) \times C(GNV / Bio\ GNV) \times \rho(GNV / Bio\ GNV) \quad (13)$$

$$E_{TTW}(MP) = 0,00945 \times 36204 \times 0,75$$

$$E_{TTW}(MP) = 256,60\ g/ano$$

$$E_{TTW}(MP) = 0,256\ kg/ano$$

Equação 14 – Normalização da massa anual de MP emitido pelo caminhão à GNV/Biometano pela distância

$$E_{TTW} (MP_N) \text{ GNV} / \text{Biometano} = \frac{E_{TTW}(MP)}{DTP} \quad (14)$$

$$E_{TTW} (NOx_N) \text{ GNV} / \text{Biometano} = \frac{0,256}{35281}$$

$$E_{TTW} (MP_N) \text{ GNV} / \text{Biometano} = 7,26 \times 10^{-6} \text{ kg MP/km}$$

Tabela 6 – Massa de GEE emitidos pelo caminhão à GNV / Biometano

Combustível	Abastecimento (m³/Ano)	Fe CO ₂ (Kg/m³)	Emissão CO ₂ (Kg/Ano)	Fe NOx g NOx/kg GNV	Emissão NOx (Kg/Ano)	Fe MP (g MP/kg GNV)	Emissão MP (Kg/Ano)
GNV	36.204	2,00	72.408	0,58	15,75	0,00945	0,256
Biometano	36.204	0,168	6.082	0,58	15,75	0,00945	0,256

Fonte: Elaborado pelo autor. EMEP/EEA 2023

Os resultados da tabela 5, apresentam que o caminhão a diesel emitiu 97125 Kg de CO₂ no ano do estudo enquanto na tabela 6, apresenta que o caminhão movido a GNV emitiu 72408 Kg apresentando uma redução de 25,44%. Porém como os veículos percorreram distâncias diferentes, quando analisados pela normalização dessa variável, apresenta aproximadamente a emissão de 1% a mais que o diesel. O que faz sentido conforme os estudos de Garlet et al., (2024), Ramalho et al., (2022), Langshaw et al., (2020). Já, se o veículo tivesse sido abastecido com biometano, teriam sido emitidos 6082 kg de CO₂ e haveria uma redução de 91,3%, normalizado pela distância.

As emissões de NOx e MP para o caminhão a diesel comparadas com o caminhão, se abastecido com biometano chegariam em reduções próximas de 90% para o NOx e 80% para o MP, reflexo do baixo fator de emissão de CO₂ biogênico (0,168 kg/m³ da tabela 4) e da ausência de partículas no ciclo Otto.

Tabela 7 – Comparativo Anual de Emissões TTW: Diesel x GNV x Biometano RSU

Parâmetro	Diesel S-10	GNV Fóssil	Biometano RSU	Redução Biometano X Diesel
Distância (km)	47.458	35281	35281	—
CO ₂ anual (kg/ano)	97.125	72.408	6.082	↓ 93,7%
CO ₂ Norm. (kg/km)	2,047	2,052	0,172	↓ 91,3%
NOx anual (kg/ano)	200,83	15,75	15,75	↓ 92,2%
NOx norm. (kg/km)	$4,23 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-4}$	$4,6 \times 10^{-4}$	↓ 89,3%
MP anual (kg/ano)	1,68	0,256	0,256	↓ 84,8%
MP norm. (kg/km)	$3,54 \times 10^{-5}$	$7,26 \times 10^{-6}$	$7,26 \times 10^{-6}$	↓ 79,5%

Fonte: Calculados pelo autor.

4.2.1.2 Emissões do poço ao tanque (WTT)

A análise do tanque a roda (TTW) considera apenas as emissões da combustão. Para o biometano produzido a partir de RSU, entretanto, o maior diferencial ambiental reside na etapa do poço ao tanque (WTT) e utilizar o biogás do aterro sanitário, evita-se que o metano (CH₄) seja liberado diretamente na atmosfera sendo ele um gás 28 vezes mais potente que o CO₂ em termos de GWP100 (IPCC AR5).

Equação 15 – Energia total consumida no caminhão à biometano

$$E_{TOTAL} = C_{ano} (Biometano) \times PCI (Biometano) \quad (15)$$

Onde:

E_{total} = Energia total consumida pelo caminhão movido a biometano (MJ / ano);

C_{ano} (Biometano) = Consumo anual do caminhão (m³);

PCI = Poder calorífico inferior do Biometano (MJ / m³);

$$E_{TOTAL} = 36204 \times 34,20$$

$$E_{TOTAL} = 1.238.176,80 \text{ MJ / ano}$$

Equação 16 – Emissões WTW brutas do caminhão movido à biometano

$$E_{TOTAIS BRUTAS} = E_{Total} (Biometano) \times INT_C_RSU (Biometano) \quad (16)$$

Onde:

$E_{Totais Brutas}$ = Emissões WTW brutas do caminhão movido à biometano (kgCO₂eq/ano);

E_{Total} = Energia total consumida no caminhão à biometano (MJ / ano);

INT_C_RSU = Intensidade de carbono do biometano $RSU = -13,6 \text{ gCO}_2\text{eq/MJ}$ (EPE 2022);

$$E_{TOTAIS BRUTAS} = 1.238.176,80 \times (-13,6)$$

$$E_{TOTAIS BRUTAS} = -16.839.204 \text{ gCO}_2\text{eq/ano}$$

$$E_{TOTAIS BRUTAS} = -16.839 \text{ kgCO}_2\text{eq/ano}$$

Equação 17 – Crédito WTT (metano evitado) do caminhão movido a biometano

$$E_{CRÉDITO WTT} = E_{Totais Brutas} + E_{Emitidas TTW} (Biometano) \quad (17)$$

Onde:

$E_{CRÉDITO WTT}$ = Crédito WTT (metano evitado (kgCO₂eq/ano);

$E_{Totais Brutas}$ = Emissões WTW brutas do caminhão movido à biometano (kgCO₂eq/ano);

$E_{Emitidas TTW} (Biometano)$ = kgCO₂eq/ano;

$$E_{CRÉDITO WTT} = -16.839 + (-6.082)$$

$$E_{CRÉDITO WTT} = -22.921 \text{ kgCO}_2\text{eq/ano}$$

Tabela 8 – Análise WTW Comparativa: Intensidade de Carbono por Combustível

Combustível	Emissão TTW (kgCO ₂ eq/ano)	Crédito WTT (kgCO ₂ eq/ano)	Emissão WTW líquida (kgCO ₂ eq/ano)	Fonte
Diesel S-10	+97.126	+12.000 (extração/refino)	+109.126	Gustafsson et al. (2021) e EPE (2022)
GNV Fóssil	+72.408	+9.500 (extração/processamento)	+81.908	Gustafsson et al. (2021) e EPE (2022)
Biometano RSU	+6.082	-22.921 (metano evitado)	-16.839 ✓	EPE (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O caminhão transformado se fosse abastecido por biometano de RSU que é um combustível de carbono negativo no ciclo completo (WTW), apresentaria a remoção líquida de aproximadamente 0,46 kgCO₂eq por metro cúbico da atmosfera (Equação 18), pois o metano que seria emitido pelo aterro, seria capturado e convertido em CO₂ biogênico, que é considerado carbono neutro por ter sido absorvido previamente pela biomassa.

Equação 18 – Intensidade de carbono removido pelo caminhão se movido biometano

$$C_Removido (Biometano) = \frac{E_WTW \text{ líquida}}{Cons_ano} \quad (18)$$

Onde:

C_Removido = Intensidade de carbono removido pelo caminhão se movido biometano (kgCO₂eq / m³);

E_WTW líquida = Emissão total líquida do caminhão se movido a biometano (kgCO₂eq);

Cons_ano = Consumo anual do caminhão transformado abastecido pelo biometano (m³);

$$C_Removido (Biometano) = \frac{16.839}{36.204}$$

$$C_Removido (Biometano) = 0,46 \text{ kgCO}_2\text{eq} / \text{m}^3$$

Isso significa que substituir o diesel pelo biometano de RSU não apenas reduz emissões como representa uma remoção líquida de carbono da atmosfera.

4.2.2 Econômicos

O Custo Total de Propriedade (TCO) foi calculado como o Valor Presente Líquido (VPL) de todos os fluxos de caixa associados à propriedade e operação do veículo ao longo de um horizonte de 10 anos. E neste estudo, adota-se $i = 8\%$ ao ano, como taxa de desconto, correspondente à taxa livre de risco real esperada para o período de 2025 até 2035, acrescida de um prêmio de risco para projetos de transição energética no setor de resíduos, conforme relatórios do Banco Central do Brasil (2024) e do BNDES (2024), para financiamento de projetos ambientais. Considerando a dinâmica histórica e as projeções de crescimento da demanda energética global, adotou-se uma taxa real de crescimento dos combustíveis de $g = 3\%$ ao ano, consistente com valores de referência para gás natural (EPE 2023).

Tabela 9 – Composição dos custos de abastecimento dos caminhões movidos a diesel, GNV e a biometano no ano de 2025

Combustível (2025)	Consumo	Preço (R\$)	Custo Total (R\$)	KM Percorrido	Custo/km (R\$)
Diesel (L/ano)	36363	R\$ 6,12	R\$ 222.541,56	47458	R\$ 4,69
GNV 2025 (m³/ano)	36204	R\$ 4,75	R\$ 171.970,95	35281	R\$ 4,87
Biometano (m³/ano)	36204	R\$ 3,00	R\$ 108.613,23	35281	R\$ 3,07

Fonte: Elaborado pelo autor. Adotado, preços da Petrobrás (2025) e EloGroup (2024)

O custo por quilômetro rodado do caminhão abastecido com GNV apresentou desempenho inferior, sendo 4% mais caro que o diesel. Comparado com o biometano, seu desempenho é 58% pior. Já o Bio-GNV demonstrou maior competitividade econômica, com uma redução de custos de 35% em relação ao diesel (Tabela 10).

A empresa coletora de resíduos sólidos não forneceu os custos reais das manutenções dos caminhões. E este estudo adotou como parâmetros iniciais os custos de R\$ 45000 para o caminhão movido a diesel e de R\$ 52000 para o caminhão movido a gás, pois a manutenção em veículos movidos a combustível

gasoso é superior à dos veículos a combustível líquido (Gustafsson et al. 2020). E não foi considerado aumento durante os anos, seguindo os estudos de Singh e Kalamdhad (2022).

Durante o estudo, a empresa de coleta de resíduos não conseguiu medir os impactos ocorridos no seu aterro sanitário com aquisição do caminhão movido a gás relacionado a destinação da produção e consumo do biometano como combustível, pois por uma questão estratégica naquele ano, o biogás produzido foi destinado em quase sua totalidade para o setor de energia elétrica.

Vale salientar que o preço do biometano ainda não está definido de forma clara, pois é negociado de forma individual por parte das empresas produtoras. Porém estima-se que em 2026 será comercializado por aproximadamente R\$ 3,00 (EloGroup 2024).

Para os dados econômicos foram considerados o investimento na transformação do caminhão no valor de R\$ 350.000, consumo anual dos combustíveis e o preço médio do diesel, do GNV no período de 2025 (Petrobras, 2025) e do biometano (Argus, 2024).

O custo social do carbono adotado R\$ 250/tCO₂ Brasil (2021), refletindo valores compatíveis com o contexto brasileiro e os cálculos de externalidade foram através da equação 19.

Equação 19 – Externalidades anuais (Diesel, GNV, Biometano)

$$C_{ext} = E_{WTW} \times SSC \quad (19)$$

Onde:

E_{WTW} = Emissões líquidas dos combustíveis (kgCO₂eq/ano);

SSC = custo social do carbono (tCO₂);

C_0 = custo de aquisição ou transformação do veículo (R\$);

$C_{comb}(t)$ = custo de combustível no ano t (R\$);

$C_{manut}(t)$ = custo de manutenção no ano t (R\$);

$C_{ext}(t)$ = custo externalidades ambientais no ano (R\$);

i = taxa de desconto (% ano);

T = horizonte de análise (anos);

g = taxa de crescimento dos combustíveis e externalidades (% ano);

$$C_{ext} = E_{WTW} \times \frac{250}{1000}$$

$$C_{ext}(Diesel) = 109126 \times \frac{250}{1000}$$

$$C_{ext}(Diesel) = R\$ 27.282$$

$$C_{ext}(GNV) = 81908 \times \frac{250}{1000}$$

$$C_{ext}(GNV) = R\$ 20.478$$

$$C_{ext}(Biometano) = -16839 \times \frac{250}{1000}$$

$$C_{ext}(Biometano) = R\$ - 4210$$

O VPL dos combustíveis e das externalidades ambientais equação 21, foi calculado através da multiplicação dos custos anuais pelo fator de desconto corrigido (F) da equação 20.

Equação 20 – Fator de desconto corrigido, i = 8% e g = 3%

$$F = \frac{1 - \left(\frac{1+g}{1+i}\right)^T}{i - g} \quad (20)$$

$$F = \frac{1 - \left(\frac{1+0,03}{1+0,08}\right)^{10}}{0,08 - 0,03}$$

$$F = 7,5506$$

Equação 21 – VPL das externalidades ambientais

$$VPL = C_{EXT} \times F \quad (21)$$

$$VPL(Diesel) = 27282 \times 7,5506$$

$$VPL(Diesel) = R\$ 205.996$$

$$VPL(GNV) = 20478 \times 7,5506$$

$$VPL(GNV) = R\$ 154.622$$

$$VPL(Biometano) = -4210 \times 7,5506$$

$$VPL(Biometano) = R\$ -31.788$$

Equação 22 – VPL dos combustíveis

$$VPL = C_{COMB} \times F \quad (22)$$

$$VPL(Diesel) = 222.541,56 \times 7,5506$$

$$VPL(Diesel) = R\$ 1.680.329$$

$$VPL(GNV) = 171.970,95 \times 7,5506$$

$$VPL(GNV) = R\$ 1.298.487$$

$$VPL(Biometano) = 108.613,26 \times 7,5506$$

$$VPL(Biometano) = R\$ 820.095$$

Para o VPL das manutenções (equação 24), foi calculado através da multiplicação dos custos anuais de manutenção adotados pelo fator de desconto corrigido (F') sem considerar a taxa de crescimento (g) equação 23.

Equação 23 – Fator de desconto corrigido (F') sem considerar a taxa de crescimento

$$F' = \sum \frac{1}{(1+i)^t} \quad (23)$$

$$F' = \sum \frac{1}{(1+0,08)^{10}}$$

$$F' = 6,71$$

Equação 24 – VPL das manutenções

$$VPL = C_{MANU} \times F' \quad (24)$$

$$VPL (Diesel) = 45.000 \times 6,71$$

$$VPL (Diesel) = R\$ 301.954$$

$$VPL (GNV / Biometano) = 52.000 \times 6,71$$

$$VPL (GNV / Biometano) = R\$ 348.924$$

Equação 25 – Custo Total de Propriedade do caminhão movido à diesel

$$TCO = (VPL_{comb} + VPL_{manut} + VPL_{ext}) \quad (25)$$

$$TCO (Diesel) = 1.680.329 + 301.954 + 205.996$$

$$TCO (Diesel) = R\$ 2.188.279$$

Equação 26 – Custo Total de Propriedade do caminhão movido à GNV / Biometano

$$TCO (GNV) = (VPL_{comb} + VPL_{manut} + VPL_{ext}) + C_0 \quad (26)$$

$$TCO (GNV) = 1.298.487 + 348.924 + 154.622 + 350.000$$

$$TCO (GNV) = R\$ 2.152.033$$

$$TCO (Biometano) = 820.095 + 348.924 - 31.788 + 350.000$$

$$TCO (Biometano) = R\$ 1.487.231$$

Tabela 10 – Custos totais da transformação

Custo na Transformação veicular	Diesel	GNV	Biometano	Fonte
	(veículo em uso)	R\$ 350.000	R\$ 350.000	
Custo do Combustível (R\$/ano)	R\$ 222.542	R\$ 171.971	R\$ 108.613	Calculado neste estudo de caso
Custo de Manutenção estimada anual (R\$/ano)	R\$ 45.000	R\$ 52.000	R\$ 52.000	Gustafsson et al. (2022) / Singh & Kalamdhad (2022)
Custo de Externalidades CO ₂ R\$ 250/tCO ₂	R\$ 27.282	R\$ 20.478	-R\$ 4.210	Brasil (2021)
Custos (Combustível, Manutenção, externalidades) R\$/ano	R\$ 294.824	R\$ 244.449	R\$ 156.403	Calculado neste estudo de caso
Custo TOTAL	R\$ 294.824	R\$ 594.449	R\$ 506.403	Calculado neste estudo de caso
Economia x diesel	-	R\$ 50.375	R\$ 138.421	Calculado neste estudo de caso

Fonte: Elaborado pelo autor

Equação 27 – Payback Simples para o caminhão transformado movido à GNV

$$PS (GNV) = \frac{C_0}{C_{oper} (Diesel) - C_{oper} (GNV)} \quad (27)$$

Onde:

C_{oper} (Diesel) = Custos operacionais do caminhão a diesel (R\$);C_{oper} (GNV) = Custos operacionais do caminhão a GNV (R\$);C_{oper} (Biometano) = Custos operacionais do caminhão a biometano (R\$);

$$PS (GNV) = \frac{350.000}{294.824 - 244.449}$$

$$PS (GNV) = 6,95 \text{ anos}$$

Se abastecido por biometano apresentaria os valores da Equação 28.

Equação 28 – Payback Simples para o caminhão transformado movido a biometano

$$PS (Biometano) = \frac{C_0}{C_{oper} (Diesel) - C_{oper} (Biometano)} \quad (28)$$

$$PS (Biometano) = \frac{350.000}{294.824 - 156.403}$$

$$PS (Biometano) = 2,52 \text{ anos}$$

Economia líquida (FC_i) da equação 29, foi calculada pela diferença entre os custos de combustível, manutenção e externalidades do caminhão diesel com os caminhões a gás.

Equação 29 – Economia líquida do caminhão movido a gás (GNV / Biometano)

$$FC_{T_GNV} / Biometano = C_{TOTAL (DIESEL)} - (C_{COMB} + C_{MANUT} + C_{EXT}) \quad (29)$$

$$FC_T(GNV) = 294.824 - 244.449$$

$$FC_T(GNV) = R\$ 50.375$$

$$FC_T(Biometano) = 294.824 - 156.403$$

$$FC_T(Biometano) = R\$ 138.421$$

Para os cálculos do payback descontado, foi calculado pela equação 30, Blank e Tarquin (2024).

Equação 30 – Cálculo do Payback descontado

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} = Investimento \quad (30)$$

Tabela 11 – Payback Descontado

	GNV		BIOMETANO	
	FLUXO	ACUMULADO	FLUXO	ACUMULADO
1	R\$ 46.644	R\$ 46.644	R\$ 128.168	R\$ 128.168
2	R\$ 44.484	R\$ 91.128	R\$ 122.234	R\$ 250.402
3	R\$ 41.189	R\$ 132.317	R\$ 113.180	R\$ 363.581
4	R\$ 38.138	R\$ 170.455	R\$ 104.796	R\$ 468.377
5	R\$ 35.313	R\$ 205.767	R\$ 97.033	R\$ 565.410
6	R\$ 32.697	R\$ 238.465	R\$ 89.846	R\$ 655.256
7	R\$ 30.275	R\$ 268.740	R\$ 83.190	R\$ 738.446
8	R\$ 28.033	R\$ 296.772	R\$ 77.028	R\$ 815.474
9	R\$ 25.956	R\$ 322.728	R\$ 71.322	R\$ 886.796
10	R\$ 24.033	R\$ 346.762	R\$ 66.039	R\$ 952.836
11	R\$ 22.253	R\$ 369.015		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 – Comparativo do payback simples e descontado

Combustível	Payback simples	Payback descontado
GNV	~7 anos	~10 anos
Biometano	~2,5 anos	~3 anos

Fonte: Elaborado pelo autor

Economicamente, nas condições apresentadas considerando o abastecimento do caminhão transformado somente com GNV o payback simples do investimento levaria aproximadamente 7 anos (Equação 27) e se fosse abastecido com biometano, o retorno aconteceria em aproximadamente 3 anos (Equação 28), indo no mesmo sentido dos estudos de Alao e Popoola (2024); Stettler et al., (2023) e Madhusudhanan et al., (2020). Já os cálculos do payback descontado evidenciaram que o GNV apresenta viabilidade marginal com biometano. A diferença entre payback simples e descontado foi pequena no biometano e significativa no GNV, reforçando a superioridade do uso do biometano.

Tabela 13 – Comparativo dos custos totais em 10 anos Diesel x GNV x Biometano RSU

Componente dos Custos	Diesel S-10 (R\$)	GNV Fóssil Transformado (R\$)	Biometano RSU Transformado (R\$)
Aquisição / Transformação veicular	0 (veículo em uso)	R\$ 350.000	R\$ 350.000
Combustível (2025)	R\$ 222.542	R\$ 171.971	R\$ 108.613
VPL Combustível	R\$ 1.680.329	R\$ 1.298.487	R\$ 820.095
Manutenção estimada anual	R\$ 45.000	R\$ 52.000	R\$ 52.000
VPL Manutenção	R\$ 301.954	R\$ 348.924	R\$ 348.924
Externalidades CO ₂ (R\$ 250/tCO ₂ eq)	R\$ 27.282	R\$ 20.478	R\$ -4.210
VPL Externalidades CO ₂ (R\$250/tCO ₂ eq)	R\$ 205.996	R\$ 154.622	R\$ -31.788
Custos Totais	R\$ 2.188.279	R\$ 2.152.033	R\$ 1.487.231
Redução de custo	Referência	R\$ 36.246	R\$ 701.048
Payback simples da transformação	—	~ 7 anos	~ 2,5 anos
Payback descontado	—	~ 10 anos	~ 3 anos

Fonte: Elaborada pelo autor

Com o aprofundamento do estudo considerando a estrutura da empresa de coleta de resíduos destinando a produção do biogás para a purificação e transformação para o biometano, a tendência que o retorno aconteceria em menor tempo. O que desperta a necessidade e importância do aprofundamento deste estudo.

4.2.3 Sociais

Os resultados obtidos indicam que a substituição do diesel pelo biometano apresenta benefícios sociais indiretos relevantes, especialmente nas áreas de saúde pública e geração de empregos associados à economia circular. Embora o estudo não tenha realizado medições epidemiológicas diretas, a redução estimada de aproximadamente 89% das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e de 85% das emissões de material particulado (MP) sugere potencial contribuição para a melhoria da qualidade do ar urbano. Esses poluentes são reconhecidamente associados ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, sobretudo em populações expostas ao tráfego intenso de veículos pesados (WHO, 2021).

Além dos ganhos relacionados à saúde, a cadeia produtiva do biometano favorece a geração de empregos verdes em atividades ligadas à coleta de RSU, gestão de resíduos, operação de biodigestores, purificação do biogás, distribuição de combustível renovável e manutenção de sistemas energéticos associados. Alao e Popoola (2024). Diferentemente dos combustíveis fósseis, cuja cadeia de suprimentos é concentrada em poucas regiões produtoras, o biometano permite a descentralização da produção energética, promovendo desenvolvimento econômico regional e ampliação das oportunidades de trabalho qualificadas. Segundo a IEA, (2024), a expansão da indústria global de biogás e biometano possui elevado potencial de geração de empregos locais devido à necessidade de operação contínua das plantas e da logística associada ao aproveitamento dos resíduos orgânicos.

No contexto da cidade de São Paulo, a integração entre gestão de resíduos sólidos urbanos e produção de biometano fortalece os princípios da economia circular ao transformar passivos ambientais em recursos energéticos, gerando benefícios sociais adicionais por meio da criação de empregos, da valorização de resíduos e da melhoria da qualidade ambiental urbana (Mandpe et al. 2022).

Tabela 14 – Sistematização dos Impactos Sociais da Transformação do Caminhão de Coleta de RSU para Biometano

Dimensão Social	Evidência	Benefício	Fonte
Saúde pública	Redução estimada de 89% das emissões de NOx	Menor incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares associadas à poluição atmosférica urbana	Dahlgren et al. (2020); WHO (2021)
Saúde pública	Redução estimada de 85% das emissões de material particulado (MP)	Menor exposição populacional a poluentes tóxicos e melhoria da qualidade do ar	Tamburini et al. (2023); WHO (2021)
Qualidade de vida urbana	Menor emissão de poluentes provenientes da coleta de resíduos	Ambientes urbanos mais saudáveis, especialmente em áreas densamente povoadas	Ardolino et al. (2018); Alao e Popoola (2024)
Economia Circular	Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos	Valorização de resíduos anteriormente tratados como passivos ambientais	Mandpe et al. (2022); D'Adamo et al. (2020)
Empregos verdes	Expansão da cadeia de produção e distribuição de biometano	Criação de empregos em operação de plantas, logística, manutenção e serviços técnicos especializados	IEA (2024); Alao e Popoola (2024)
Desenvolvimento regional	Produção descentralizada de combustível renovável	Fortalecimento das economias locais e aumento da renda associada ao setor de resíduos e energia	IEA (2024); CIBiogás (2025)
Inclusão socioeconômica	Integração entre saneamento, gestão de resíduos e energia renovável	Ampliação de oportunidades econômicas associadas à economia circular	Kavitha et al. (2018); Zhang et al. (2024)
ODS da Agenda 2030	Contribuição para os ODS 3, 8, 11, 12 e 13	Promoção simultânea de saúde, trabalho decente, sustentabilidade urbana e ação climática	ONU (2015); IEA (2024)

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados indicam que os benefícios da transformação do caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos para operação com biometano não se restringem à mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Observa-se potencial contribuição para a melhoria da saúde pública, decorrente da redução dos poluentes

atmosféricos locais, bem como para a geração de empregos verdes e fortalecimento da economia circular. Dessa forma, a adoção do biometano amplia os benefícios sociais associados à gestão sustentável dos resíduos urbanos, reforçando sua aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e ao conceito de cidades inteligentes e sustentáveis.

Conforme respondido pelos técnicos (Apêndice B), mesmo não havendo incentivo financeiro de algum órgão público no processo da transformação do primeiro caminhão da empresa de coleta de resíduos para circular na cidade de São Paulo abastecido com GNC, o acompanhamento da performance ambiental, econômica e técnica, atraiu os olhares dos investidores para a participação em eventos do setor de transportes, meio ambiente e energia para discussões com órgãos como a prefeitura de São Paulo, empresas de transporte coletivo e frotistas, voltadas para as tecnologias existentes para descarbonização da frota de veículos pesados do estado de São Paulo, sem o investimento de aquisição de um caminhão novo.

4.2.4 Economia Circular

A articulação das estratégias de economia circular, fechamento do ciclo de matéria orgânica, prolongamento da vida útil e estreitamento da demanda de recursos, orientam a análise da transformação de caminhões movidos a diesel para biometano de RSU. Os indicadores resultantes relacionam-se com Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), conforme tabela 15.

Na dimensão de fechamento do ciclo, cada caminhão operando com biometano de aterro sanitário desvia significativa quantidade de resíduos orgânicos que, sem captura, gerariam metano de elevado potencial de aquecimento global. Esse crédito negativo de carbono na fase WTT é o principal responsável pelo perfil de emissões líquidas negativas do biometano RSU no ciclo WTW completo. O processo gera ainda digestato aproveitável como biofertilizante, agregando valor ao ciclo produtivo.

Na dimensão prolongamento da vida útil, a transformação do caminhão seminovo evita a fabricação de um veículo novo, poupando expressivo volume de

emissões incorporadas. Em frotas de grande porte, como a existente em São Paulo, esse potencial se amplia consideravelmente, tornando o prolongamento da vida útil uma alavanca relevante para a redução das emissões.

Na dimensão estreitamento da demanda de recursos, a substituição do diesel pelo biometano de RSU reduz diretamente a demanda por combustíveis fósseis, estreitando o fluxo de recursos não renováveis no sistema de transporte. O biometano, produzido a partir de resíduos sólidos urbanos, constitui uma fonte de energia renovável que substitui insumos de elevada intensidade carbônica. Sua intensidade carbônica ao longo do ciclo de vida é significativamente menor que a do diesel, o que reforça o papel do Bio-GNV não apenas como alternativa energética, mas como vetor de descarbonização do setor de coleta urbana de resíduos.

Tabela 15 – Indicadores da Economia Circular na Cadeia Biometano RSU

Estratégia EC	Indicador	ODS correlatos
Fechamento do ciclo	RSU orgânico desviado do aterro	11 e 12
Fechamento do ciclo	Crédito de metano evitado (WTT)	13
Fechamento do ciclo	Digestato gerado (biofertilizante)	2 e 12
Prolongamento da vida útil	Extensão de vida útil do caminhão transformado	12
Prolongamento da vida útil	Emissões incorporadas evitadas (Futura frota de caminhões movidos a biometano)	13
Estreitamento da demanda de recursos	Energia renovável substituída por RSU	7
Estreitamento da demanda de recursos	Intensidade carbônica WTW (diesel x biometano)	13

Fonte: Elaborado pelo autor

Em setembro de 2025, foi compartilhado um questionário (Apêndice B) que foi respondido pelo técnico e pelos motoristas da empresa de coleta de resíduos e com dados obtidos pelos cálculos das emissões, ficou evidenciada a redução de CO₂, NO_x e MP comparando o caminhão movido a diesel com o caminhão movido a gás.

Mesmo sem acesso aos dados financeiros completos, como os gastos com as manutenções, as informações obtidas através do questionário respondidos pelos técnicos, mostrou que o caminhão sendo abastecido com o GNV durante o período de análise apresentou um custo total de abastecimento similar ao movido a diesel, considerando que tivesse percorrido a mesma distância.

Foi mencionado pelo técnico de manutenção quanto à redução dos ciclos de manutenção, onde foi informado sobre a redução de intervenções sobre vazamentos referentes ao sistema de alimentação e circulação do óleo diesel, além de que as trocas de óleo lubrificante e filtros ficaram sob responsabilidade da empresa parceira. A redução do ruído durante a operação para o caminhão movido a GNV também foi um ponto positivo mencionado. Como ponto negativo apontado pelos motoristas foi o tempo de resposta no pedal de acelerador na partida do veículo, o que já era previsto conforme a tecnologia do motor (ciclo otto) e o tipo de combustível (gás).

5 DISCUSSÕES

5.1 Dimensão Ambiental

Os resultados do estudo de caso demonstraram que a transformação do caminhão de coleta de resíduos sólidos urbanos resultou em reduções expressivas das emissões atmosféricas quando analisado o cenário de abastecimento com biometano. Enquanto o caminhão movido a diesel apresentou emissão anual de 97.125 kg de CO₂, o cenário projetado para o biometano indicou apenas 6.082 kg de CO₂, representando redução de 93,7% nas emissões absolutas e de 91,3% quando normalizadas pela distância percorrida. Além disso, foram observadas reduções absolutas de aproximadamente 92% nas emissões de NO_x e 85% de material particulado. Esses resultados superam os percentuais encontrados em estudos internacionais que apontam reduções entre 68% e 76% das emissões de gases de efeito estufa para caminhões abastecidos com biometano em comparação ao diesel (Atkins et al., 2021; ICCT, 2024). A diferença pode ser explicada pela matéria-prima utilizada neste estudo, o biometano proveniente de resíduos sólidos urbanos, cuja captura do metano evita emissões que ocorreriam naturalmente nos aterros sanitários, ampliando significativamente os benefícios climáticos.

Os resultados também reforçam a importância da abordagem do “Poço a roda” (WTW) adotada na pesquisa. Conforme discutido por Gustafsson et al. (2021) e Prussi et al. (2021). No presente estudo, a contabilização dos créditos associados ao metano evitado permitiu identificar um balanço de carbono negativo, corroborando os argumentos de Mandpe et al. (2022) e D’Adamo et al. (2020) sobre o potencial do aproveitamento energético de resíduos para a mitigação das mudanças climáticas. Em contrapartida, observou-se que o GNV apresentou redução absoluta de CO₂, mas desempenho semelhante ao diesel quando as emissões foram normalizadas pela distância percorrida, resultado que converge com os achados de Gustafsson et al. (2022), que alertam para as limitações ambientais do gás natural fóssil em avaliações completas do ciclo de vida.

5.2 Dimensão Econômica

Sob a perspectiva econômica, os resultados demonstraram que a transformação veicular é financeiramente viável, sobretudo quando associada ao abastecimento com biometano. A análise do Custo Total de Propriedade (TCO) para um horizonte de dez anos indicou custo acumulado de R\$ 1,49 milhão para o cenário com biometano, valor aproximadamente R\$ 701 mil inferior ao observado para o caminhão movido a diesel. O payback simples estimado foi de aproximadamente 2,5 anos, enquanto o payback descontado permaneceu próximo de 3 anos. Esses resultados corroboram os estudos de Madhusudhanan et al. (2020), Stettler et al. (2023) e Alao e Popoola (2024), que identificaram o custo do combustível como principal determinante da competitividade econômica do biometano no transporte pesado.

A análise também evidencia que os benefícios econômicos do biometano vão além da simples substituição do combustível. Quando incorporadas as externalidades ambientais monetizadas, observa-se que o biometano apresenta valor negativo de emissões de carbono, característica inexistente nos combustíveis fósseis. Esse resultado reforça a discussão proposta por Wang et al. (2024), segundo a qual avaliações econômicas mais completas devem incluir custos ambientais e climáticos ao longo do ciclo de vida dos combustíveis. Entretanto, os achados também revelam que a expansão dessa tecnologia depende da consolidação de mecanismos de mercado capazes de remunerar os benefícios ambientais gerados, como créditos de carbono e incentivos previstos pela Lei do Combustível do Futuro (Lei nº 14.993/2024). Sem tais mecanismos, parte da vantagem econômica identificada pode não ser plenamente capturada pelos operadores de frotas.

5.3 Dimensão Social

Os resultados sociais indicam que os principais benefícios da transformação estão associados à melhoria da qualidade do ar urbano e à redução dos impactos da poluição atmosférica sobre a saúde pública. A redução estimada de

aproximadamente 89% das emissões de NOx e 85% das emissões de material particulado sugere potencial diminuição da exposição da população a poluentes diretamente relacionados ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares. Embora a pesquisa não tenha realizado medições epidemiológicas diretas, os resultados convergem com Dahlgren et al. (2020), Tamburini et al. (2023) e WHO (2021), que destacam os veículos pesados movidos a diesel como importantes fontes de degradação da qualidade do ar em centros urbanos. Dessa forma, a substituição do diesel pelo biometano pode ser interpretada como uma estratégia de saúde pública associada à mobilidade sustentável.

Além dos benefícios sanitários, os resultados evidenciam potencial para geração de empregos verdes e fortalecimento das economias locais. A cadeia produtiva do biometano envolve atividades de coleta e tratamento de resíduos, operação de biodigestores, purificação do biogás, logística de distribuição e manutenção especializada, criando novas oportunidades de trabalho qualificadas. Esses achados corroboram os argumentos de Alao e Popoola (2024), IEA (2024) e Kavitha et al. (2018), que identificam a valorização energética dos resíduos como vetor de desenvolvimento regional e inclusão socioeconômica. Assim, os benefícios sociais observados não se restringem à redução da poluição atmosférica, mas abrangem também a geração de renda e o fortalecimento das cadeias produtivas vinculadas à economia circular.

5.4 Economia Circular

Os resultados obtidos permitem interpretar a transformação do caminhão como um exemplo concreto de aplicação dos princípios da economia circular. O estudo demonstrou que os resíduos sólidos urbanos, tradicionalmente tratados como passivos ambientais, podem ser convertidos em combustível renovável para abastecer a própria frota responsável pela sua coleta. Esse modelo cria um ciclo fechado de recursos, no qual resíduos são reinseridos no sistema produtivo na forma de energia, reduzindo simultaneamente a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa. Tal resultado está alinhado com a

concepção de economia circular proposta pela Ellen MacArthur Foundation (2013), bem como com as estratégias de fechamento de ciclos descritas por Bocken et al. (2016) e Kirchherr et al. (2023).

Os achados também corroboram estudos recentes que apontam o biometano como uma das aplicações mais avançadas da economia circular no setor de transportes. Keogh et al. (2024) destacam que a utilização de resíduos para produção de combustível renovável permite combinar ganhos ambientais, econômicos e sociais em uma única solução tecnológica. No entanto, os resultados desta pesquisa também evidenciam uma divergência importante entre o potencial teórico e a realidade brasileira. Embora o modelo seja tecnicamente viável e ambientalmente vantajoso, sua ampliação depende da expansão da infraestrutura de produção, purificação e distribuição do biometano, conforme alertado por Bidart et al. (2022), Noussan et al. (2024) e Stettler et al. (2023). Dessa forma, a consolidação da economia circular associada ao biometano exige não apenas inovação tecnológica, mas também políticas públicas integradas envolvendo os setores de resíduos sólidos, saneamento, energia e mobilidade urbana.

5.5 Discussão Integrada dos Resultados

A análise conjunta dos resultados demonstra que os benefícios ambientais, econômicos e sociais não ocorrem de forma isolada, mas constituem dimensões interdependentes de uma mesma estratégia de sustentabilidade urbana. A redução das emissões gera ganhos para a saúde pública; a valorização dos resíduos criam novas oportunidades econômicas e a utilização do biometano fortalece simultaneamente a descarbonização dos transportes e a gestão sustentável dos resíduos urbanos. Esses resultados confirmam o modelo conceitual integrado proposto na dissertação e reforçam a argumentação de Geissdoerfer et al. (2017), Korhonen et al. (2018) e Raworth (2017), segundo os quais soluções sustentáveis devem ser avaliadas pela sua capacidade de produzir benefícios simultâneos nas dimensões ambiental, econômica e social.

6 CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como objetivo geral avaliar as vantagens da transformação de caminhões de coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) movidos a diesel para biometano produzido a partir de aterro sanitário no município de São Paulo, sob os aspectos ambiental, econômico e social. Com base na revisão da literatura, na análise documental, nos dados operacionais do estudo de caso e na aplicação do modelo conceitual integrado proposto, conclui-se que o objetivo da pesquisa foi plenamente alcançado. Os resultados obtidos permitiram identificar, mensurar e analisar os impactos decorrentes da substituição do diesel pelo biometano, demonstrando que essa alternativa constitui uma solução tecnicamente viável e alinhada aos princípios da sustentabilidade urbana, da economia circular e da descarbonização do transporte.

Sob a perspectiva ambiental, os resultados evidenciaram que a utilização do biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos apresenta desempenho superior ao diesel quando analisada por meio da abordagem do ciclo de vida “poço à roda” (WTW). A captura e o aproveitamento energético do metano gerado nos aterros sanitários permitiram reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, reforçando o potencial do biometano como instrumento de mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a diminuição das emissões de poluentes atmosféricos locais, especialmente material particulado e óxidos de nitrogênio, demonstra potencial para melhorar a qualidade do ar urbano e contribuir para a saúde pública. Esses resultados corroboram a literatura que aponta o biometano como uma das principais alternativas renováveis para a descarbonização do transporte pesado.

Na dimensão econômica, verificou-se que a transformação do veículo apresenta potencial de viabilidade financeira quando analisada sob a ótica do custo total de propriedade (TCO). A redução dos gastos com combustível e a possibilidade de aproveitamento de uma fonte energética produzida localmente contribuem para aumentar a competitividade operacional das frotas. Os resultados demonstram que os benefícios econômicos não se limitam aos operadores de transporte, mas se estendem à cadeia produtiva do biometano, incentivando

investimentos em infraestrutura energética, inovação tecnológica e desenvolvimento regional. Dessa forma, a pesquisa evidencia que a transição energética pode ocorrer de forma economicamente sustentável, especialmente quando apoiada por instrumentos regulatórios e políticas públicas adequadas.

Em relação à dimensão social, a pesquisa demonstrou que os benefícios da substituição do diesel pelo biometano transcendem os aspectos ambientais e econômicos. A redução da poluição atmosférica está diretamente associada à melhoria das condições de saúde da população exposta ao tráfego urbano, especialmente em grandes centros metropolitanos. Além disso, a expansão da cadeia produtiva do biometano cria oportunidades para geração de empregos verdes em atividades relacionadas à gestão de resíduos, operação de plantas de biogás e biometano, logística, manutenção e serviços especializados. Esses resultados reforçam a contribuição da transição energética para a promoção da qualidade de vida e do desenvolvimento sustentável nas cidades.

A pesquisa também demonstrou que a economia circular constitui o principal elemento integrador das dimensões analisadas. O aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para produção de biometano transforma um passivo ambiental em recurso energético renovável, promovendo o fechamento de ciclos produtivos e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. O modelo analisado evidencia como a gestão de resíduos, a produção de energia renovável e a mobilidade sustentável podem atuar de forma sinérgica para gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais simultaneamente. Essa integração representa uma importante contribuição para o desenvolvimento de cidades mais inteligentes, resilientes e sustentáveis.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento científico ao propor e aplicar um modelo conceitual integrado que articula as dimensões ambiental, econômica e social sob a perspectiva da economia circular. A literatura analisada demonstrou que muitos estudos abordam essas dimensões de forma isolada, enquanto esta pesquisa buscou integrá-las em uma estrutura analítica única voltada à avaliação da transformação de caminhões de coleta de resíduos para utilização de biometano. Dessa forma, a dissertação contribui para reduzir uma lacuna identificada na

literatura sobre descarbonização do transporte pesado, especialmente no contexto brasileiro e urbano.

Do ponto de vista prático, os resultados oferecem subsídios relevantes para gestores públicos e privados. Para a gestão pública, a pesquisa demonstra o potencial da integração entre políticas de resíduos sólidos, mobilidade urbana, energia renovável e mitigação climática, fornecendo evidências que podem apoiar programas municipais de descarbonização de frotas e valorização energética dos resíduos. Para o setor privado, os resultados indicam oportunidades de redução de custos operacionais, fortalecimento da imagem corporativa associada à sustentabilidade e adequação às exigências ambientais cada vez mais rigorosas. Além disso, os achados podem auxiliar tomadores de decisão na elaboração de estratégias voltadas à transição energética e ao cumprimento de metas climáticas nacionais e internacionais.

As contribuições para a sociedade também são significativas. A utilização do biometano produzido a partir de resíduos sólidos urbanos favorece a redução dos impactos ambientais associados à disposição inadequada de resíduos, contribui para a melhoria da qualidade do ar, fortalece a saúde pública, estimula a geração de empregos verdes e promove o uso mais eficiente dos recursos naturais. Nesse sentido, os resultados reforçam a aderência da pesquisa aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030, especialmente os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

Apesar das contribuições apresentadas, esta pesquisa possui limitações. O estudo foi desenvolvido a partir de um estudo de caso específico no município de São Paulo, o que pode limitar a generalização dos resultados para outras realidades geográficas, econômicas e institucionais. Além disso, determinadas variáveis econômicas e operacionais estão sujeitas a alterações ao longo do tempo, como preços dos combustíveis, incentivos regulatórios, disponibilidade de infraestrutura de abastecimento e evolução tecnológica dos veículos. Outra limitação refere-se à disponibilidade de dados primários relacionados aos impactos sociais,

especialmente aqueles associados à saúde pública e à geração de empregos, que exigiriam monitoramento longitudinal para avaliação mais precisa.

Como agenda para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar a aplicação do modelo conceitual integrado para diferentes tipos de frotas pesadas e contextos urbanos, permitindo análises comparativas entre regiões e tecnologias. Sugere-se ainda a realização de estudos quantitativos sobre os impactos do biometano na saúde pública, na geração de empregos verdes e na redução dos custos sociais associados à poluição atmosférica. Pesquisas futuras também poderão comparar o desempenho ambiental, econômico e social do biometano com outras alternativas de descarbonização, como eletrificação, hidrogênio renovável e combustíveis sintéticos. Por fim, recomenda-se aprofundar a análise de políticas públicas, instrumentos regulatórios e mecanismos de financiamento capazes de acelerar a expansão da infraestrutura de produção e distribuição de biometano no Brasil.

Em síntese, esta dissertação demonstra que a transformação de caminhões de coleta de resíduos sólidos urbanos movidos a diesel para biometano representa uma estratégia tecnicamente viável, economicamente promissora, ambientalmente eficaz e socialmente benéfica. Mais do que uma alternativa energética, o biometano configura-se como um vetor de integração entre mobilidade urbana sustentável, gestão de resíduos, economia circular e ação climática, contribuindo para a construção de cidades inteligentes e sustentáveis alinhadas aos desafios contemporâneos da transição para uma economia de baixo carbono.

Referências

- Aggarangsi, P., Moran, J., Koonaphapdeelert, S., & Tippayawong, N. (2022). Performance comparison of biomethane, natural gas and gasoline in powering a pickup truck. *Biofuels*, 13(8), 957–964.
<https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2041231>
- Agrawal, R., Wankhede, V. A., Kumar, A., & Luthra, S. (2020). Analysing the roadblocks of circular economy adoption in the automobile sector: Reducing waste and environmental perspectives. *Business Strategy and the Environment*, 30, 1051–1066. <https://doi.org/10.1002/bse.2669>.
- Alao, M. A., & Popoola, O. M. (2024). Techno-economic assessment of bio-compressed natural gas as a transport fuel for South African Provinces. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 205
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114820>.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2022). *Resolução ANP n. 886, de 29 de setembro de 2022*. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em:
<https://leis.org/institucionais/br/anp/lei/resolucao/2022/886/resolucao-n-886-2022-estabelece-a-especificacao-e-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-no-territorio-nacional>.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). (2022).

Resolução ANP n. 906, de 18 de novembro de 2022. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional.

Diário Oficial da União, Brasília, DF. Disponível em:

<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022>.

Ardolino, F., Parrillo, F., & Arena, U. (2018). Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. *Journal of Cleaner Production*, 174, 462-476.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.320>

Argus. Falando de Mercado: O preço do biometano no Brasil. (2024). Disponível em: <https://www.argusmedia.com/pt/news-and-insights/energy-and-commodity-podcasts/falando-de-mercado-o-preco-do-biometano-no-brasil-mar-2024>.

Associação Brasileira de Biogás (ABiogás 2023). Disponível em:

<https://abiogas.org.br/>

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14064-1: Gases de efeito estufa - Parte 1: Especificação com orientações a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

Atkins, P., Milton, G., Atkins, A., & Morgan, R. (2021). A Local Ecosystem Assessment of the Potential for Net Negative Heavy-Duty Truck

Greenhouse Gas Emissions through Biomethane Upcycling. *Energies*, 14(4), 806. <https://doi.org/10.3390/en14040806>

Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET 2019)
<https://www.anpet.org.br/33anpet/index.php/pt/>

Balbuena, L. R., Tiburtino, S., Lorene A., Nogueira, M. L., Maciel, J. C., & Da Costa, R. B. (2021). Tratamento de resíduos sólidos no município de Bonito, Mato Grosso do Sul, Brasil, correlacionado com dados externos. *Interações Campo Grande*, 22(3).

<https://doi.org/10.20435/inter.v22i3.2768>

Banco Central do Brasil (BCB). Relatório de Inflação, junho 2024. Brasília, 2024.
<https://www.bcb.gov.br/content/ri/relatorioinflacao/202406/ri202406p.pdf>.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). (2024). Uma proposta de cálculo do prêmio mínimo de risco em projetos de infraestrutura. *Revista do BNDES*, 60, 311-337.
https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/27708/1/PRArt_216527_Proposta%20de%20cálculo%20do%20prêmio%20mínimo_.pdf.

Bezerra, D. M. D., Cândido, E. E. S., Silva, A. B., Purificação, M. M., Filho, E. D. S., & Guerra, A. de L. R. (2025). Biodigestores: Produção de biogás e sua utilização na agricultura familiar. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, 4(1). <https://doi.org/10.61164/rnm.v4i1.3607>

Bidart, C., Wichert, M., Kolb, G., & Held, M. (2022). Biogas catalytic methanation for biomethane production as fuel in freight transport - A carbon footprint assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112802>.

- Bidart, C., Wichert, M., Kolb, G., & Held, M. (2022). Biomethane as Fuel for Freight Transport – a Comprehensive Lca Approach for a GHG Emission Reduction Assessment. *SSRN*, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4052266>
- Biernat, K., Samson-Brek, I., Chlopek, Z., Owczuk, M., & Matuszewska, A. (2021). Assessment of the Environmental Impact of Using Methane Fuels to Supply Internal Combustion Engines. *Energies*.14(11), 3356.
<https://doi.org/10.3390/en14113356>
- Blank, L. T. & Tarquin, A. J. (2024). *Engineering Economy*. 9. ed. New York: McGraw Hill, 2024.
- Bocken, N. M. P., De Pauw, I., Bakker, C., & Van D. G. B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of industrial and Production Engineering*, 33(5), 308-320.
<https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Brasil. (2021, 8 de abril). Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021. Dispõe sobre as atividades de transporte de gás natural e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural; e altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999.
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14134.htm.
- Brasil. (2024, 8 de outubro) Lei nº 14.993, de 8 de outubro de 2024. Institui o Combustível do Futuro, dispõe sobre a mobilidade sustentável de baixo carbono e regula as atividades de captura e estocagem geológica de dióxido de carbono. <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>

Brasil, Ministério da Economia, Secretaria Especial de Produtividade e Competitividade, Secretaria de Desenvolvimento da Infraestrutura. (2021). *Guia geral de análise socioeconômica de custo-benefício de projetos de investimento em infraestrutura* (Versão 2). Brasília:

SDI/ME. <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/governanca/comite-interministerial-de-governanca/arquivos/guia-geral-de-analise-socioeconomica-de-custo-beneficio.pdf>

Brasil, Ministério de Minas e Energia. (2025). *Biometano emite até 2,5 vezes menos CO₂ do que eletricidade para veículos, aponta relatório*. Governo Federal. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biometano-emite-ate-2-5-vezes-menos-co2-do-que-eletricidade-para-veiculos-aponta-relatorio>.

Centro Internacional de Energia Renováveis (CIBIOGÁS). *Panorama do Biogás no Brasil 2020*. Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2021/04/PANORAMA-DO-BIOGÁS-NO-BRASIL-2020-v.8.0-1.pdf>.

Chaudhari, S., Nimbalkar, S., Lung, B., Gonzalez, M., Hill, B., & Esch B. (2024). Key strategies in industry for circular economy: Analysis of remanufacturing and beneficial reuse. *Technology Innovation for the Circular Economy*. 279-296. <http://doi.org/10.1002/9781394214297.ch22>

Chojnowski, J., & Dziubak T. (2024). Multi-Criteria Analysis of Semi-Trucks with Conventional and Eco-Drives on the EU Market. *Energies*. 17(5) 1018. <https://doi.org/10.3390/en17051018>

- Cimmino, L., Calise, F., Cappiello, F. L., & Viciodomini, M. (2023). Dynamic Analysis of a Power Plant Producing Liquefied Biomethane for Heavy Road Transport. *Proceedings of Ecos* 1735-1746. <https://DOI: 10.52202/069564-0157>
- Climate Watch Historical GHG Emissions 2022. Washington, DC: World Resources Institute. Available, Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>.
- Cummins Inc. (2023). Cummins Technical Publications. Disponível em: <https://www.cummins.com/parts/manuals-and-technical-documents>
- D'Adamo, I., Falcone, P. M., Gastaldi, M., & Morone, P. (2020). RES-T trajectories and an integrated SWOT-AHP analysis for biomethane. Policy implications to support a green revolution in European transport. *Energy Policy*. 138. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111220>
- D'Adamo, I., Falcone, P. M., Huisingh, D., & Morone, P. (2021). A circular economy model based on biomethane: What are the opportunities for the municipality of Rome and beyond? *Renewable Energy*, 163, 1660-1672. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.072>
- Dahlgren, Sofia. (2020). Biogas-based fuels as renewable energy in the transport sector: an overview of the potential of using CBG, LBG and other vehicle fuels produced from biogas. *Biofuels*. 13(5), 587–599. <https://doi.org/10.1080/17597269.2020.1821571>
- Departamento Nacional de Transito (Denatran). Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2021>.

Devi, M. K., Manikandan, S., Kumar, P. S., Yaashikaa, P. R., Oviyapriya, M., & Rangasamy, G. (2023). A comprehensive review on current trends and development of biomethane production from food waste: Circular economy and techno economic analysis. *Fuel*. 351.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128963>

Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Disponível em:

<https://content.ellenmacarthurfoundation.org>

EloGroup. Disponível em: [https://elogroup.com/insights/biometano-e-amonia-](https://elogroup.com/insights/biometano-e-amonia-verdevenda/#:~:text=Fonte:%20EloGroup%2C%20considerando%20pre%C3%A7o%20de,Rocha%20e%20Soares%20(2021).)

[verdevenda/#:~:text=Fonte:%20EloGroup%2C%20considerando%20pre%C3%A7o%20de,Rocha%20e%20Soares%20\(2021\).](https://elogroup.com/insights/biometano-e-amonia-verdevenda/#:~:text=Fonte:%20EloGroup%2C%20considerando%20pre%C3%A7o%20de,Rocha%20e%20Soares%20(2021).)

EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023. *European Environment Agency*, Chapter 1.A.3.Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles. Disponível em:

<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao781/Panorama%20de%20Biometano.pdf>.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em:

<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>.

Farolalto.com.br. Disponível em: <https://farolalto.com.br/2018/05/volkswagen-lanca-o-constellation-24-260-compacto/>

Ferreira, C. & Gonçalves, Gil. (2021). A Systematic Review on Life Extension Strategies in Industry: The Case of Remanufacturing na Refurbishment. *Electronics*. 10(21) 2669.

<https://doi.org/10.3390/electronics10212669>

Ferreira, S. F., Buller, L. S., Berni, M., & Carneiro, T. F. (2019). Environmental impact assessment of end-uses of biomethane. *Journal of Cleaner Production*. 230, 613 – 621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.034>.

Ferronato, N., Rada, E. C., Portillo, M. A. G., Cioca, L. I., Ragazi, M., & Torretta, V. (2019). Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. *Journal of environmental management*. 230, 366-378.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.095>

Ferella, F., Cucchiella, F., D'Adamo, I., & Gallucci, K. (2019). Techno-economic assessment of biogas upgrading in a developed market. *Journal of Cleaner Production*. 210, 945-957. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.073>.

Franco, L. S., Doliveira, S. L. D., & Franco, A. C. (2020). Desenvolvimento sustentável e o transporte urbano em países da América do Sul: uma revisão sistemática. *Revista Metropolitana De Sustentabilidade*. 10(3), 159–181. <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/2331>

Garlet, R. A., Fagundez., Jean, L.S., Hausen, R. B., Roso, V. R., Lanza Nova, T.D.M., Gonçalves, S. N. P., & Martins, M. E.S. (2024). Prospects of performance, emissions and cost of methane-based fuels in a spark-ignition

engine compared to conventional Brazilian fuels. *Fuel*. 357.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129788>.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Brocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., Carvalho, M. M., & Evans, S. (2018). Business models and supply chains for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 190(20), 712-721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159>

Geisdoerfer, M., Pieroni, M. P. P., Pigosso, D. C. A., & Soufani, K. (2020). Circular business model: a review. *Journal of Cleaner production*. 277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123741>

Gray, N., Mcdonagh, S., O'shea, R., Smyth, B., & Murphy, J. D. (2021). Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the maritime, aviation and haulage sectors. *Advances in Applied Energy*. 1. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008>

Guerra-Mota, M., & Aquino, T. (2024). Getting biomethane out of the shadow: a framework analysis in Portugal and Brazil. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05182-4>

Gustafsson, M., Cruz, I., Svensson, N., & Karlsson, M. (2020) Scenarios for upgrading and distribution of compressed and liquefied biogas — Energy, environmental, and economic analysis, *Journal of Cleaner Production*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120473>.

Gustafsson, M., Svensson, N., Eklund, M., & Möller, B. F. (2021). Well-to-wheel climate performance of gas and electric vehicles in Europe. *Transportation*

Research Part D: Transport and Environment, 97.

<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102911>.

Gustafsson, M., & Svensson, N. (2021). Cleaner heavy transports – Environmental and economic analysis of liquefied natural gas and biomethane. *Journal of Cleaner Production*, 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123535>.

Guzman, L. A., Arellana, J., & Alvarez, V. (2020). Confronting congestion in urban areas: Developing Sustainable Mobility Plans for public and private organizations in Bogotá. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 134, 321-335. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.019>

Herbes, C., Chovellon, S., & Lacombe, J. (2018). Towards marketing biomethane in France – French consumers' perception of biomethane. *Energy, Sustainability and Society*, 8(37). <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0179-7>

Hoang, A. T., Goldfarb, J. L., Foley, A. M., Lichtfouse, E., Kumar, M., Xiao, L., Ahmed, S. F., Said, Z., Luque, R., Bui, V. G., Nguyen, X. P. (2022). Production of biochar from crop residues and its application for anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 363. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127970>

Hollas, C. E., Do Amaral, K. G. C., Lange, M. V., Higarashi, M. M., Steinmetz, R. L. R., Barros, E. C., Mariani, L. F., Nakano, V., Kunz, A., Pereira, A. S., & Jannuzzi, G. M. (2022). Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: Electricity and biomethane production. *Journal of Cleaner Production*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131654>

Horváth, J., & Szemesová, J. (2023). Is a Carbon-Neutral Pathway in Road Transport Possible? A Case Study from Slovakia. *Sustainability*. 15(6).

<https://doi.org/10.3390/su151612246>

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Relatório anual 2023. Disponível em:

https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2026/03/2025_inventariorodoviarioIEMAMMACCAC.pdf

Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Brasil atualiza inventário de emissões do transporte rodoviário no país. São Paulo. Disponível em:

<https://energiaeambiente.org.br/brasil-atualiza-inventario-de-emissoes-do-transporte-rodoviario-no-pais-20251202>

International Council on Clean Transportation. (ICCT). Descarbonização da frota de coleta de resíduos sólidos em São Paulo. Disponível em:

<https://theicct.org/publication/descarbonizacao-da-frota-de-coleta-de-residuos-solidos-em-sao-paulo-oct24/>.

International Energy Agency (IEA). A perspective on the state of the biogas industry in 12 member countries of IEA Bioenergy Task 37. *Bioenergy*.

Disponível em: <https://task37.ieabioenergy.com/country-reports/2024-a-perspective-on-the-state/>

International Energy Agency (IEA). Special section: Biogas and biomethane.

Renewables. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023/special-section-biogas-and-biomethane>

Iwan, S., Nürberg, M., Jedlinski, M., & Kijewski, K. (2021). Efficiency of light electric vehicles in last mile deliveries—Szczecin case study. *Sustainable Cities and Society*, 74.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103167>

- Joppert, C. L., Perecin, D., Santos, M. M., Coelho S. T., & Camacho, J. L. P. (2018). A short-cut model for predicting biomethane availability after biogas upgrading. *Journal of Cleaner Production*, 200, 148-160.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.269>
- Keogh, N., Corr, D., & Monaghan, R. F. D. (2024). An environmental and economic assessment for biomethane injection and natural gas heavy goods vehicles. *Applied Energy*, 360, abr. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122800>.
- Kirchher, J., Yang, N., Spüntrup, F. S., Heerink, M. J., & Hartley, K. (2023). Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 194.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001>.
- Kanojia, A., & Visvanathan, C. (2021). Assessment of urban solid waste management systems for Industry 4.0 technology interventions and the circular economy. *Waste Management & Research*, 39(11), 1414-1426.
<https://doi.org/10.1177/0734242X21992424>
- Kavitha, S., Tysklind, M., & Upadhyayula, V. K.K. (2018). Use of Liquefied Biomethane (LBM) as a Vehicle Fuel for Road Freight Transportation: A Case Study Evaluating Environmental Performance of Using LBM for Operation of Tractor Trailers. *Procedia CIRP*, 69, 517-522.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.133>.
- Korhonen, J., Honksalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37– 46.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>.

- Kuriyama, A., & Abe, N. (2018). Ex-post assessment of the Kyoto Protocol – quantification of CO₂ mitigation impact in both Annex B and non-Annex B countries. *Applied Energy*, 220, 286-295.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.025>
- Langhshaw, L., Ainalis, D., Acha, S., Shah, N., & Stettler, M. E. J. (2020). Environmental and economic analysis of liquefied natural gas (LNG) for heavy goods vehicles in the UK: A Well-to-Wheel and total cost of ownership evaluation. *Energy Policy*, 137.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111161>.
- Li, K., Acha, S., Sunny, N., & Shah, N. (2022). Strategic transport fleet analysis of heavy goods vehicle technology for net-zero targets. *Energy Policy*, 168.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112988>
- Mandpe, A., Paliya, S., Gedam, V. V., Patel, S., Tyagi, L., & Kumar, S. (2023). Circular economy approach for sustainable solid waste management: A developing economy perspective. *Waste Management & Research*, 41(3), 499-511. <https://doi.org/10.1177/0734242X221126718>
- Madhusudhanan, A. K., Na, X., Boies, A., & Cebon, D. (2020). Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102530>
- Miki, R. E. (2018). Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso como combustível veicular. *Dae Sabesp*, 209(66). DOI: 10.4322/dae.2017.022

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & GROUP, The Prisma. (2010).

Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *International Journal of Surgery*, 8(5), 336-341.

<https://doi.org/10.1016/j.ijsu.2010.02.007>

Muñoz, E., & Navia, R. (2021). Circular economy in urban systems: How to measure the impact? *Waste Management & Research*, 39(2), 197-198.

<https://doi.org/10.1177/0734242X21989173>

National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). Disponível em:

<https://nauticalcharts.noaa.gov/hsrp/recommendations/2018/HSRP-Research-Development-28feb2018.pdf>.

NGV Global. Disponível em: [https://transportproject.org/wp-](https://transportproject.org/wp-content/uploads/2024/04/NGVA-Annual-Report-2023-FINAL.pdf)

[content/uploads/2024/04/NGVA-Annual-Report-2023-FINAL.pdf](https://transportproject.org/wp-content/uploads/2024/04/NGVA-Annual-Report-2023-FINAL.pdf).

Noussan, M., Negro V., Prussi, M., & Chiaramonti, D. (2024). The potential role of biomethane for the decarbonization of transport: An analysis of 2030 scenarios in Italy. *Applied Energy*, 355.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122322>.

Organização das Nações Unidas (ONU) Disponível em:

<https://news.un.org/pt/audio/2023/11/1823917>.

Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Disponível em:

<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>

Pääkkönen, A., Aro, K., Aalto, P., Konttinen, J., & Kojo, M. (2019). The Potential of Biomethane in Replacing Fossil Fuels in Heavy Transport – A Case Study on Finland. *Sustainability*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/su11174750>

Petrobrás. (2025). Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/w/diesel/sp>.

- Prochatzki, G., Mayer, R., Haenel, J., Schimidt A., Götze, U., Ulber, M., Fisher, A., & Arnold, M. G. (2023). A critical review of the current state of circular economy in the automotive sector. *Journal of Cleaner Production*, 425. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138787>
- Prussi, M., Julea, A. M.; Lonza, L., & Thiel, C. (2021). Biomethane as alternative fuel for the EU road sector: analysis of existing and planned infrastructure. *Energy Strategy Reviews*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100612>.
- Rajendran, K., O'gallachoir. B., & Murphy, J. D. (2019). The combined role of policy and incentives in promoting cost efficient decarbonisation of energy: a case study for biomethane. *Journal of Cleaner Production*, 219(10). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.298>
- Raworth, K. (2017). Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist. London: *Chelsea Green Publishing*.
- Rodrigues, L., & Palhares A. P. F. (2022). Panorama de aproveitamento energético do biogás dos tratamentos de esgoto sanitário e de resíduos sólidos urbanos. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/16911>.
- Santos, G. R., & Mendes, A. T. (2025). Resíduos sólidos, reciclagem e economia circular: desafios às políticas públicas. Rio de Janeiro: *Ipea*, 45(3112). DOI: <https://dx.doi.org/10.38116/td3112-port>
- SÃO PAULO. Lei 16.802, de 17 de janeiro de 2018. Dispõe sobre o uso de fontes motorizadas de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do

efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo e da outras providências. Disponível em:

<https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16802-de-18-de-janeiro-de-2018>.

SCÂNIA trucks, www.scania.com/br/pt/home/products/trucks/gas-truck.html.

Sharma, H. B., Vanapalli, K. R., Samal, B., Cheela, V. R., Dubey, B. K. &

Bhattacharya, J. (2021). Circular economy approach in solid waste management system to achieve UN-SDGs: Solutions for post-COVID recovery. *Science of the Total Environment*, 800.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149605>

Silva, R. F., Moura, L. L., Gavião, L. O., Pontes, A. T., Lima, G. A. B., & Bidone, E.

D. (2021). Interdependências e trade-offs entre os objetivos do desenvolvimento sustentável: avaliação de municípios brasileiros pelas três dimensões da sustentabilidade. *Interações*, 22(2), 637–52.

<https://doi.org/10.20435/inter.v22i2.2720>

Silva, S. T. S., Barros, R. M., Dos Santos, I. F. S., Crispim, A. M. C., Filho, G. L. T.,

Lora, E. E. S. (2022). Technical and economic evaluation of using biomethane from sanitary landfills for supplying vehicles in the Southeastern region of Brazil. *Renewable Energy*, 196, 1142 – 1157.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.020>.

Singh, P., & Kalamdhad, A. S. (2022). Biomethane plants based on municipal solid

waste and wastewater and its impact on vehicle sector in India – An Environmental-economic-resource assessment. *Environmental Technology & Innovation*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102330>

Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

(SEEG 2023). Disponível em:

<https://plataforma.seeg.eco.br/?yearRange%5B0%5D=1990&yearRange%5B1%5D=2024&emissionType%5B0%5D=1&emissionType%5B1%5D=300&gas=8&groupBy=Sector&rankBy=State>.

Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento Básico. (SINISA 2023).

Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/sinisa/sinisa-1>

Speirs, J., Balcombe, P., Blomerus, P., Stettler, M., Achurra-Gonzalez, P., Woo, M., Ainalis, D., Cooper, J., Sharafian, A., Merida, W., Crow, D., Giarola, S., Shah, N., Brandon, & N. Hawkes, A. (2020). Natural gas fuel and greenhouse gas emissions in trucks and ships. *Progress in Energy*, 2.

<https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab56af>

Stern, N. (2007). The Economics of Climate Change: **The Stern Review**.

Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/destaques/sternreview_report_complete.pdf

Stettler, M. E.J., Woo, M., Ainalis, D., Gonzalez, P. A., Speirs, J., Cooper, J., Lim, D. H., Brandon, N., & Hawkes, A. (2023). Review of Well-to-Wheel lifecycle emissions of liquefied natural gas heavy goods vehicles. *Applied Energy*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120511>

Studart Filho, R. Viabilidade econômica do uso de biogás de aterro sanitário para abastecimento de veículos pesados. 2020. Dissertação (Mestrado em

Bioenergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2020. Disponível em:

https://run.unl.pt/bitstream/10362/133350/1/Filho_2021.pdf.

Tamburini, M., Perneti, R., Anelli, M., Oddone, E., Morandi, A., Osuchowski, A., Villani, S., Montomoli, C., & Monti, M.C. (2023). Analysing the Impact on Health and Environment from Biogas Production Process and Biomass Combustion: A Scoping Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20, 5305. <https://doi.org/10.3390/ijerph20075305>

Transport Climate And Sustainability Global Report (SLOCAT). Disponível em:

<https://slocat.net/4th-edition-of-the-transport-climate-and-sustainability-the-global-status-report-2025/>.

Tratzi, P., Torre, M., Paolini, V., Tomassetti, L., Montiroli, C., Manzo, E., Petracchini, F. (2022). Liquefied biomethane for heavy-duty transport in Italy: A well-to-wheels approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103288>

Volvo Trucks Global. Environmental Footprint Calculator. Disponível em:

https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/information-and-tools/environmental-footprint/environment-footprint-calculator.html?lang=en&market=gb&view=single&trucks=fh_aero lng&ucategories=regional,longhaul.

VWCO.com.br. Disponível em: <https://ofertas.vwco.com.br/familiaconstellation>.

Wang, H., & Pei, Z. (2020). Urban Green Corridors Analysis for a Rapid Urbanization City Exemplified in Gaoyou City, Jiangsu. *Forests*, 11(12) <https://doi.org/10.3390/f11121374>

Wang, Z., Acha, S., Bird, M., Sunny, N., Stettle, M. E.J; Wu, B., & Shah, N. (2024).

A total cost of ownership analysis of zero emission powertrain solutions for the heavy goods vehicle sector. *Journal of Cleaner Production*, 434.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139910>.

World Health Organization. (WHO). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. *Genebra*: WHO, 2021. Disponível em:

<https://iris.who.int/handle/10665/345329>.

Yin R. K. (2017). Case study research: Design and methods. 3 ed. Sage Publications.

Zhang, X., Lin, Z., Hao, H., Xu, H., Wang, Z., & Li, S. (2024). Environment-economic comparison of potential alternative fuel heavy-duty trucks in China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 131.

<https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104206>.

**APÊNDICE A – Monitoramento da distância percorrida e horas de operação
do caminhão movido a gás**

Data	Painel (Km)	Horímetro (horas)	Distância percorrida (Km)	Período (Horas)
04/01/2023	126560	863	1034	109
12/01/2023	127397	947	837	84
19/01/2023	127981	1014	584	67
26/01/2023	128645	1087	664	73
03/02/2023	129255	1153	610	66
10/02/2023	129860	1226	605	73
16/02/2023	130594	1309	734	83
23/02/2023	131466	1398	872	89
27/02/2023	131781	1435	315	37
03/03/2023	132152	1477	371	42
08/03/2023	132619	1501	467	24
17/03/2023	133497	1635	878	134
29/03/2023	134819	1768	1322	133
13/04/2023	136012	1917	1193	149
20/04/2023	136668	1988	656	71
02/05/2023	137705	2104	1037	116
11/05/2023	138389	2182	684	78
25/05/2023	139906	2337	1517	155
07/06/2023	140973	2454	1067	117
22/06/2023	142324	2595	1351	141
12/07/2023	144492	2822	2168	227
20/07/2023	145234	2895	742	73
30/08/2023	150294	3398	5060	503
21/09/2023	151380	3546	1086	148
19/10/2023	154489	3841	3109	295
26/10/2023	155361	3925	872	84
23/11/2023	158301	4234	2940	309
14/12/2023	160807	4375	2506	141
TOTAL			35281	3621

APÊNDICE B – Questionário sobre o desempenho do biometano como combustível na transformação de caminhões seminovos de coleta de resíduos sólidos urbanos.

1. A empresa mede o impacto da substituição do Diesel pelo Biometano como combustível de caminhão quanto a redução das emissões dos gases de efeito estufa (GEE)? Quais?

Marque todas que se aplicam.

- ☐ CO₂
- ☐ NO_x
- ☐ Particulado
- ☐ CO
- ☐ Outro

2. De que forma o uso do Biometano como combustível de caminhões reduziu a quantidade dos resíduos no aterro? (Quantidade)
3. As medições indicaram redução de emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) no caminhão transformado? Quanto?
4. Em quanto tempo ocorreu o retorno financeiro da transformação do caminhão seminovo movido a diesel para o Biometano?
5. Qual foi a redução do consumo de óleo diesel (Litros) no caminhão transformado para rodar com Biometano?
6. Qual o custo do Biometano para a empresa? Qual a diferença percentual comparado com o diesel?
7. A transformação do caminhão para rodar com o combustível gasoso, recebeu algum subsídio municipal, estadual ou federal?
8. O caminhão transformado atendeu a autonomia para as rotas escolhidas? Qual a média de quilometragem (diária) que o veículo percorre?
9. Em relação ao uso dos veículo transformado, quais foram os feedbacks dos motoristas? (Atuação do pedal, autonomia)
10. Ocorreu o aumento do ciclo de manutenções do caminhão transformado gerou impactos para empresa? Quais?

11. Foram necessárias adequações na infraestrutura do aterro sanitário para o abastecimento do Biometano no caminhão transformado? Quais?
12. Foram criadas oportunidades de postos de trabalho no projeto de transformação do caminhão de coleta de resíduos sólidos movido a Biometano? Quais?
13. A empresa difundiu a importância do Biometano como combustível ambientalmente amigável para os colaboradores e para a sociedade?