XXI Encontro Nacional da ANPUR
Curitiba
19 a 23 de Maio de 2025
ideias, políticas e práticas em territorialidades do Sul Global

TRANSFORMAÇÃO DE CAMINHÕES A DIESEL PARA BIOMETANO: VANTAGENS E DESVANTAGENS NO CONTEXTO URBANO

Leonardo Nascimento Silva Santos
Universidade Nove de Julho | leosantos26@uni9.edu.br

Kenny Lopes Rodrigues Leite
Universidade Nove de Julho | Kenny_lrl@uni9.edu.br

Waldir Agnello
Universidade Nove de Julho | w.agnello@uni9.edu.br

Luiz Fernando Rodrigues Pinto
Universidade Nove de Julho | luiz.rodrigues@uni9.pro.br

Sessão Temática 08: MOBILIDADE UBANA E DIREITO À CIDADE

Resumo: O aumento das emissões de GEE oriundos dos combustíveis fósseis, com 20% vindo do setor de transportes, é um desafio. O acesso as energias renováveis principalmente nos centros urbanos, desempenham um papel decisivo na luta contra os efeitos dos gases de efeito estufa, e o biometano é uma realidade como uma alternativa limpa para reduzir essas emissões. Diante deste contexto, este trabalho busca preencher a lacuna de estudos direcionados à seguinte questão de pesquisa: Quais são vantagens e desvantagens da transformação de caminhões movidos a diesel para o biometano? Para responder ao questionamento, o objetivo principal deste trabalho é identificar as vantagens e desvantagens da transformação de caminhões movidos a diesel para o biometano, utilizando revisão sistemática com o método PRISMA. Os resultados mostram que a maioria dos artigos apontam vantagens ambientais no uso de BIO-GNV, mas 80% destacam barreiras políticas e econômicas como desvantagens. Apesar das limitações teóricas e da falta de dados quantitativos robustos, o estudo evidencia a necessidade de maior empenho público e privado para fomentar o uso de combustíveis renováveis.

Palavras-chave: biometano; veículos pesados; transformação; GEE; combustíveis renováveis;

TRANSFORMATION OF DIESEL TRUCKS TO BIOMETHANE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES IN THE URBAN CONTEXT

Abstract: *The increase in GHG emissions from fossil fuels, with 20% coming from the transportation sector, is a challenge. Access to renewable energy, especially in urban centers, plays a decisive role in the fight against the effects of greenhouse gases, and biomethane is a reality as a clean alternative to reduce these emissions. Given this context, this work seeks to fill the gap in studies directed at the following research question: What are the advantages and disadvantages of transforming diesel-powered trucks to biomethane? To answer this question, the main objective of this work is to identify the advantages and disadvantages of transforming diesel-powered trucks to biomethane, using a systematic review with the PRISMA method. The results show that most articles point to environmental advantages in the use of BIO-NGV, but 80% highlight political and economic barriers as disadvantages. Despite theoretical limitations and the lack of robust quantitative data, the study highlights the need for greater public and private commitment to promote the use of renewable fuels.*

TRANSFORMACIÓN DE CAMIONES DIESEL A BIOMETANO: VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN EL CONTEXTO URBANO

Resumen: *El aumento de las emisiones de GEI procedentes de combustibles fósiles, de las cuales el 20% proviene del sector del transporte, es un desafío. El acceso a las energías renovables, los centros urbanos, juega un papel decisivo contra los efectos de los gases de efecto invernadero, y el biometano es una realidad como alternativa limpia para reducir estas emisiones. Ante este contexto, este trabajo busca llenar el vacío en los estudios dirigido a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de transformar camiones diésel a biometano? Para responder a la pregunta, el objetivo principal de este trabajo es identificar las ventajas y desventajas de transformar camiones propulsados por diésel a biometano, mediante una revisión sistemática con el método PRISMA. Los resultados muestran que la mayoría de los artículos señalan ventajas ambientales en el uso del BIO-GNV, pero el 80% destaca barreras políticas y económicas como desventajas. A pesar de las limitaciones teóricas y la falta de datos cuantitativos sólidos, el estudio destaca la necesidad de un mayor compromiso público y privado para promover el uso de combustibles renovables.*

Palabras clave: *biometano; vehículos pesados; transformación; GEIE combustibles renovables;*

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais impulsionadores do aumento da poluição atmosférica e das emissões de gases de efeito estufa, é a queima de combustíveis fósseis não renováveis provenientes do petróleo, carvão e do gás natural (Zhang et al., 2024). Setores energéticos, por meio da queima de combustíveis fósseis e a falta de tratamento de resíduos sólidos, tanto orgânicos das cidades quanto do agronegócio, são protagonistas no que tange ao não cumprimento de parte do Protocolo de Kyoto. Este protocolo, estabelecido em 1997, definiu a responsabilidade e o compromisso dos países em reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (Kuriyama, A et al., 2018). Além disso, esses setores também falham em atender ao principal objetivo do Acordo de Paris, assinado em dezembro de 2015, que trata das responsabilidades diretas e indiretas na redução dos GEEs. Esse cenário teve impacto na agenda global adotada na Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, realizada em setembro de 2015, afetando parcialmente os Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, principalmente em relação às emissões de GEE (Shanmugam et al., 2019).

As categorias de mudança de uso da terra e floresta, agropecuária, processos industriais, energia e de resíduos são praticamente que responsáveis pelas emissões dos GEE no Brasil, sendo que as duas últimas, representam aproximadamente 20% e 4% respectivamente (SEEG 2023). Dentro da categoria de energia, o setor de transportes é o que mais contribui, Patrizio et al. (2022), juntamente com a significativa contribuição da categoria de resíduos, decorrente do descarte incorreto e subaproveitamento dos resíduos sólidos (Ardolino; Parrillo, Arena, 2018).

A crescente demanda por energia limpa visa preservar o meio ambiente. Medidas como a substituição gradual de veículos pesados a diesel por alternativas híbridas, elétricas, a GNV ou hidrogênio têm impacto limitado isoladamente, mas são essenciais para reduzir emissões de gases de efeito estufa (Chojnowski: Dziubak 2024). Nesse cenário, soluções sustentáveis que substituam combustíveis fósseis ganham cada vez mais destaque (Stettler et al., 2023).

Atualmente, 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 de gases de efeito estufa (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 (GNV) ou liquefeito (GNL), em veículos pesados (caminhões). E 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 (WTW), e aponta que as reduções nas emissões de GEE podem chegar a até 16% (Speirs et al., 2020; Bidart et al., 2022). Entretanto, a economia de GEE é limitada pela menor eficiência dos motores a gás em comparação aos motores a diesel, pelo vazamento de metano durante o abastecimento e pelo fato de o gás natural ainda ser um combustível fóssil (Speirs et al., 2020; Gustafsson et al., 2022; Bidart et al., 2022).

No Brasil, um país de dimensões continentais, o transporte, especialmente o de caminhões, desempenha um papel significativo no consumo de energia e nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Em particular, os caminhões tradicionais a diesel apresentam as maiores emissões unitárias, considerando o estágio da bomba à roda (PTW) (Zhang et al., 2024). O modal rodoviário é fundamental ao desenvolvimento econômico, sendo protagonista para a movimentação interna de mercadorias, bens de consumo e pessoas (Chojnowski; Dziubak 2024).

O cenário ambiental atual exige cada vez mais adquirir práticas de descarbonização e assim como apresentado na 3ª edição do Transport, Climate and Sustainability Global Status Report (SLOCAT, 2023), para que consumo de combustíveis fosseis, como por exemplo nos caminhões seja reduzida, a possibilidade da substituição por combustíveis renováveis alternativos como o biometano, necessita ainda mais ser explorada (Gustafsson et. al., 2021).

O estudo de Calise et al. (2023) revelou que havia aproximadamente 13,4 milhões de veículos rodoviários movidos a combustíveis alternativos na União Europeia, o que correspondia apenas cerca de 5% do total de veículos. (Pääkkönen et al., 2019) comentam que até 2030 haverá um aumento com relação aos caminhões movidos a metano para 480.000 unidades, seguindo as informações da Associação Europeia de Veículos a Gás Natural e Biogás (NGVA). Na época, as estimativas já apontavam para um crescimento exponencial na adoção de veículos movidos por combustíveis alternativos nos próximos 20 anos.

O Bio–GNV é uma alternativa para a descarbonização do setor de transportes e cumpre os requisitos da União Europeia para biocombustíveis avançados (Patrizio et al., 2022). Tecnicamente, o gás natural fóssil (GNV) pode ser substituído pelo biometano renovável, seja na forma comprimida até 200 bar, ou liquefeita (LBM). Ele é produzido a partir de materiais orgânicos, como Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), resíduos agrícolas e dejetos de animais,

que são submetidos à digestão anaeróbica para gerar biogás. Conforme exposto no estudo de (Singh e Kalamdhad, 2022), os RSU se aproveitados corretamente podem substituir mais de 4 toneladas do consumo de diesel numa visão global. No entanto, menos de 2,5% do potencial líquido de BIO-GNV era utilizado naquele período. Em seguida, o biogás é purificado para remover poluentes como o dióxido de carbono (CO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S) e amônia (NH_3), utilizando tecnologias como membranas, biofiltros e lavadores de água. Após essa purificação, o biometano passa a ter propriedades similares às do gás natural (Calise et al., 2024). Dessa forma, ele surge como uma alternativa viável para uma rede de gás mais sustentável (Speirs et al., 2020; Gustafsson et al., 2022).

O biometano, como alternativa de combustível, pode reduzir em até 76% as emissões de gases de efeito estufa (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. A falta de infraestrutura adequada pode ser um obstáculo significativo para o desenvolvimento do biometano em determinadas regiões, especialmente no curto e médio prazo (Noussan et al., 2024).

O uso do biometano no setor de transportes é uma peça fundamental nas estratégias de descarbonização, sendo amplamente debatido na literatura atual. Diversos estudos comparam seu desempenho ambiental e econômico como soluções convencionais em segmentos como o transporte público e o transporte de carga pesada (Noussan et al., 2024). Contudo, as pesquisas disponíveis concentram-se predominantemente em veículos novos, comparando o biometano com veículos de transporte tradicionais movidos a combustíveis fósseis ou com alternativas de baixo carbono.

Diante deste contexto, este trabalho busca preencher a lacuna de estudos direcionados à utilização de fonte de energia renovável como combustível para veículos automotores, com a seguinte questão de pesquisa: "Quais são vantagens e desvantagens da transformação de caminhões movidos a diesel para o biometano?

Para responder ao questionamento, o objetivo principal deste trabalho é identificar e analisar, as vantagens e desvantagens da transformação de caminhões movidos a diesel para o biometano.

Este artigo está estruturado em quatro seções. Na próxima seção será apresentada a fundamentação teórica sobre os impactos dos tipos de combustíveis. O método de pesquisa está mostrado na seção 3. Os resultados que consolida as vantagens e desvantagens estão

mostrados na seção 4. Este artigo é finalizado com a seção 5 que mostra a conclusão do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NAS CIDADES

Os níveis de gases de efeito estufa na atmosfera observados globalmente pela Climate Watch em 2021 chegou a 49,6 Gt C02eq. No Brasil, de acordo com o sistema de estimativas e emissões de gases (SEEG, 2023), no ano de 2022 foram liberados mais de 2,3 bilhões de toneladas de gases de efeito estufa na escala de gás carbono equivalente (C02eq) pela métrica de potencial de aquecimento global (GWT) e segundo os fatores de conversão estabelecido no 5° relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC – AR5), oriundos da agropecuária, energia, mudança de uso da terra e floresta, processos industriais e resíduos.

As emissões provenientes de veículos pesados de transporte de mercadorias e urbanos têm um impacto significativo nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de representarem riscos à saúde pública (Stettler et al., 2023). Além disso, a aviação e o transporte marítimo também têm uma parcela considerável nas emissões globais, devido queima combustível pesado, derivado do petróleo bruto (Pääkkönen et al., 2019 e Speirs et al., 2020). Esses veículos contribuem para a degradação da qualidade do ar, liberando uma variedade de poluentes, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não queimados (HC) e material particulado (PM).

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 de GNL (gás natural liquefeito) 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%, devido à menor.

Caminhões pesados, com peso bruto acima de 15 toneladas, são projetados para longas distâncias, possuindo de dois a quatro eixos e potência entre 200 e 600 kW (Stettler et al., 2023). Eles representam 70% do transporte de mercadorias e consomem cerca de 50% da energia usada por caminhões (Noussan; 2023). As emissões provenientes desses 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).

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 (NOx) 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).

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 ou ventilação do motor. Caminhões movidos a gás natural emitem menos CO_2 em comparação com os equivalentes a diesel.

Em se tratando do CO_2, conforme os dados National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) de julho de 2022 até o abril de 2024 a concentração de CO_2 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.

Segundo Atkins et al. (2021), dados da Volvo Trucks (2020) apontam que a produção dos caminhões FM e FH emite 19,2 tCO_2eq. O autor supõe que esse valor seja representativo da indústria. Essas emissões podem ser diluídas ao longo da vida útil do veículo, estimada em 1.000.000 km, resultando em 1,9 $kgCO_2eq/100$ km para caminhões pesados de longa distância.

No contexto de conservação de energia e redução de emissões, tanto as políticas e regulamentações governamentais quanto a conscientização ambiental das empresas atuam como forças motrizes substanciais para a adoção de caminhões pesados (HDTs) movidos a combustíveis alternativos. (Zhang et al., 2024).

2.2 COMBUSTÍVEIS VIÁVEIS PARA REDUÇÃO DOS GEE (BIOMETANO COMO SOLUÇÃO)

A substituição progressiva 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 UE, 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

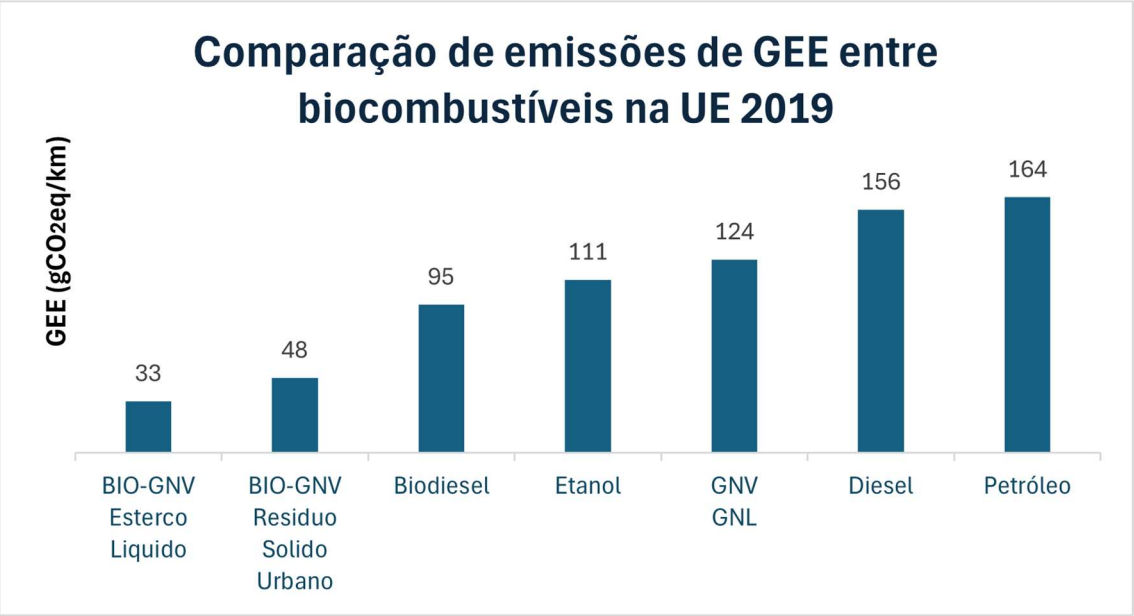
base de resíduos proporciona benefícios ambientais, como a redução da destruição da camada de ozônio (Alao; Popoola, 2024).

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 Art. 4º Conforme o disposto no § 2º do art. 3º da Lei nº 14.134, de 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. Em 2018 havia 155 usinas de biogás. (CIBIOGAS, 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 MM^3/dia até 2029 (ABIOGÁS 2023).

Em setembro de 2024, a câmara dos deputados do Brasil, aprovou o Projeto de Lei nº 528/2020, conhecido como "Combustível do Futuro". A proposta incentiva a mobilidade sustentável de baixo carbono e visa a descarbonização do setor de combustíveis, 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). Agora, o projeto aguarda apenas a sanção presidencial.

Biernat et al. (2021) discutem a viabilidade de combustíveis à base de metano para motores de combustão interna, destacando fatores como composição química, resistência à detonação, temperaturas de ignição e autoignição, constante estequiométrica, taxa de combustão e poder calorífico. Pääkkönen et al. (2019) enfatizam que a qualidade do biometano depende da matéria-prima utilizada, com destaque para o estrume animal, que representa 43% do potencial técnico do biometano na UE para transporte. E neste sentido é que D'Adamo et al. (2021) reforçam a importância de políticas públicas para melhorar a gestão de resíduos urbanos e agrícolas, promovendo a economia circular e evitando deposições em aterros. De fato, a recuperação de resíduos e sua transformação em energia limpa através purificação do biogás via processo de digestão anaeróbica (AD) 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.

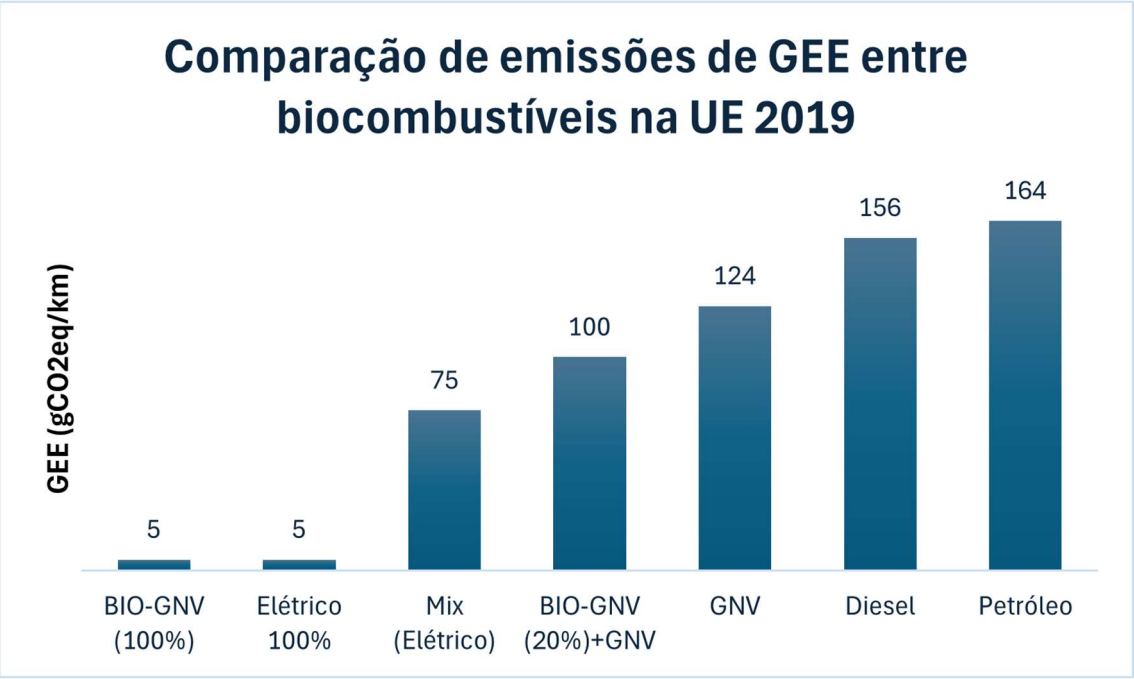
Figura 1 - Comparação das emissões de GEE entre biocombustíveis na UE 2019.



Adaptado D'Adamo et al. (2021)

Na figura 1, D'Adamo et al. (2021) mostram o quanto biometano é capaz de reduzir significativamente os níveis de emissões em relação aos combustíveis fósseis.

Figura. 2 – Comparação de emissões de GEE entre biocombustíveis na UE 2019



Adaptado D'Adamo et al. (2021)

Na figura 2, D'Adamo et al. (2021) apresentaram que tanto o biometano quanto os veículos elétricos poderiam reduzir significativamente os níveis de emissões em relação aos combustíveis fósseis.

O biometano pode ser usado como combustível comprimido a 200 bar ou liquefeito a -162 °C (LBM), sendo que a liquefação exige maior purificação. Gustafsson et al. (2022) apontam que o LBM consome mais energia que o Bio-GNV (0,03-0,04 kWh/MJ vs. 0,02-0,03 kWh/MJ), mas tem menor impacto no aquecimento global devido ao menor vazamento de metano. Por outro lado, o biometano comprimido exige maior espaço para armazenamento (Dahlgren, S. 2020).

A liquefação do biometano é uma alternativa viável para a produção de LBM, um combustível de alta densidade energética, ideal para veículos pesados e para distribuição em áreas sem rede de gás. Isso aumenta a atratividade do combustível (Shanmugam et al., 2018). Quando combinada com energia solar, a liquefação reduz o consumo de energia primária (Calise et al., 2024). Além disso, essa abordagem diminui significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente com a gestão de estrume (Patrizio et al., 2022). No entanto, motores SI com Bio-GNV emitem menos GEE do que os motores HPDI com LBM. O processo de limpeza elimina impurezas como H_2S, NH_3, siloxanos e umidade, e a purificação remove CO_2, ajustando o gás conforme as normas específicas para o biometano (Joppert et al., 2018).

A redução das emissões dos GEE ao longo do ciclo de vida do biometano, em comparação com os combustíveis convencionais, ocorre não apenas pelo processo de combustão no motor, mas também pela tecnologia empregada em sua produção. O tipo de substrato usado na fermentação do metano tem um impacto decisivo na diminuição das emissões de GEE em todo o ciclo de vida do combustível (Biernat et al., 2021). Os resultados apresentados por Bidart et al. (2022) indicaram que as emissões variam de 0,28 a 0,72 kg de CO_2-eq./m^3 na produção de biometano por meio da purificação do biogás e de 0,42 a 1,04 kg de CO_2-eq./m^3 pela metanação catalítica. Devido à neutralidade de emissões na fase de uso do biometano em caminhões, as emissões totais são significativamente menores em comparação com os combustíveis fósseis, como gás natural e diesel (Bidart et al., 2022).

No estudo de Gustafsson et al. (2022) mostra que cerca de 500 kg de CO_2-eq./MWh são reduzidos em uma perspectiva de ciclo de vida em comparação com a gasolina ou o diesel. Outro estudo de Dahlgren, S. (2020) relata que a gaseificação do Bio-GNV gera gás de síntese, uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono (CO). E esse gás pode ser utilizado na produção de outros combustíveis e, ao deslocar o CO, é possível obter hidrogênio a partir dele. Além disso, o gás de síntese pode ser empregado na produção de metanol, que, por sua vez, pode ser convertido em éter dimetílico (DME). Esses resultados destacam os benefícios

ambientais do Bio-GNV no transporte de mercadorias, promovendo a sustentabilidade por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

É necessário substituir veículos antigos, especialmente os movidos a gasolina e diesel, por modelos novos elétricos e movidos a (Bio-GNV). E as emissões de GEE podem ser mitigadas por meio de diversas estratégias, como o aumento da eficiência operacional dos veículos, a adoção de combustíveis mais limpos e o aprimoramento dos sistemas de pós-tratamento (Zhang et al., 2024). Isso deve ser acompanhado da construção e operação de uma infraestrutura de abastecimento voltada principalmente para veículos pesados que utilizam metano, abrangendo tanto o transporte de cargas quanto o transporte público. Essas medidas impulsionarão o uso do biometano em toda a indústria de transportes (D'Adamo et al., 2021). Embora seja promovido como uma solução para descarbonizar o setor, é fundamental estimar suas potenciais economias. Por um lado, o uso de biometano pode proporcionar significativas reduções de emissões ao considerar a análise do "tanque à roda" (TTW). Por outro, fatores como emissões fugitivas de metano durante a combustão e vazamentos nos tanques podem reduzir consideravelmente essas vantagens (Prussi et al., 2021).

O custo de investimento dos caminhões movidos a gás é geralmente entre 25% e 50% maior do que o dos caminhões a diesel (Speirs et al., 2020). No entanto, esses custos mais elevados de capital e manutenção podem ser equilibrados por economias nos custos de combustível, já que o gás natural e o biometano são mais baratos do que o diesel, além de se beneficiarem de taxas de imposto reduzidas para combustíveis alternativos. Os custos de produção do biometano não são competitivos em comparação aos combustíveis fósseis. Consequentemente, a sua sustentabilidade econômica está estritamente ligada à adoção de subsídios (D'Adamo et al., 2021). E Prussi et al. (2021) propõem como soluções, incentivos fiscais com regimes de tributação reduzida, como impostos de consumo mais baixos, subsídios para a compra ou substituição de veículos e financiamentos ou subsídios para a instalação de infraestrutura de reabastecimento, entre outros. Entretanto, a Diretiva de Infraestrutura para Combustíveis Alternativos exige que os Estados-Membros da UE desenvolvam políticas nacionais para promover e expandir a infraestrutura necessária para combustíveis alternativos, incluindo GNV e GNL (Stettler et al., 2023). No estudo de Prussi et al. (2021) apresentou que o potencial de produção do Bio-GNV iria contribuir no setor de transportes da EU (Em geral) do ponto de vista técnico dos combustíveis gasosos. Pääkkönen et al. (2019) Verificaram que a utilização de todo o potencial do biometano no setor de transporte pesado na Finlândia, reduziria pela metade as emissões de GEE do setor, bem como suas emissões de NOx, independentemente de um cenário escolhido.

Os fatores de emissão atribuídos ao biometano são frequentemente considerados como "carbono líquido zero" ou "carbono neutro", em conformidade com as diretrizes internacionais para inventários de gases de (GEE) e com as normas contábeis formais estabelecidas. Essa classificação pressupõe que o CO_2 emitido durante a combustão do combustível (TTW) é

compensado pelo CO_2 capturado pela matéria-prima utilizada em sua produção, ao longo do crescimento. Contudo, as emissões provenientes das etapas de poço à roda (WTT) não são necessariamente nulas, devido aos gases emitidos nas fases de produção, transformação, refino e transporte do biometano (Stettler et al., 2023).

No entanto, a adoção desse combustível renovável em veículos pesados enfrenta alguns desafios. Stettler et al. (2023) aponta que as emissões ligadas à produção, transformação e transporte precisam ser geridas com atenção para garantir que seu uso traga benefícios climáticos reais. Isso enfatiza a importância de uma abordagem integrada na avaliação do ciclo de vida. Além disso, seu uso para transporte compete com aplicações em eletricidade e aquecimento, onde o biogás pode ser mais econômico, especialmente quando se consideram possíveis estruturas de incentivo financeiro (Pääkkönen et al., 2019).

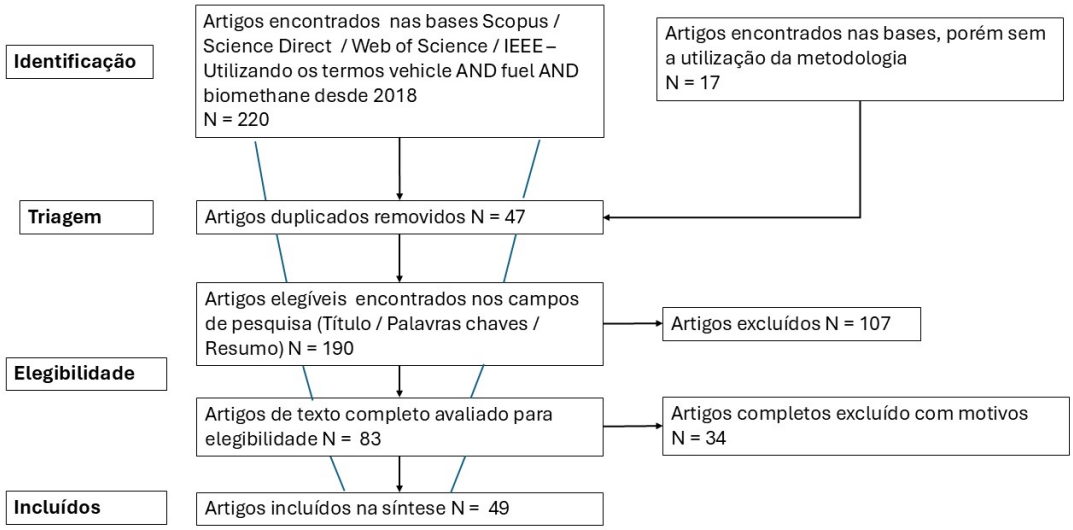
3 METODOLOGIA

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.

Primeiramente foi realizada em junho de 2024, uma busca nas bases de dados de forma aleatória, sem a utilização de uma metodologia e sem atentar na combinação de palavras chaves e o que retornou uma quantidade de 17 artigos. Após foi realizada em agosto de 2024 uma revisão sistemática da literatura através de uma pesquisa online nos bancos de dados, ScienceDirect, Scopus, Web of Science e IEEE utilizando a metodologia PRISMA.

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 220 artigos. No processo de triagem, foram removidos 47 artigos duplicados, considerando também a pesquisa realizada em junho de 2024. No processo de elegibilidade, os 190 artigos que restaram foram lidos os títulos e após a leitura, foram excluídos 107 que não havia aderência com o objetivo da pesquisa, e ainda no mesmo processo, foram lidos os resumos dos 83 artigos que restaram e foram excluídos com motivos 34 artigos. Assim chegando no processo de inclusão com 49 artigos para a leitura completa (Figura 3).

Figura. 3 – Metodologia PRISMA com palavras chaves "Vehicle"AND"Fuel"AND"Biomethane"



FONTE: PRÓPRIO AUTOR

A partir da leitura dos 49 artigos, foram categorizadas as vantagens nos aspectos ambientais, técnicos e econômicos e as desvantagens nos aspectos ambientais, políticos, técnicos e econômicos de forma individuais e em conjunto realizando a comparação entre os combustíveis fosseis e o biometano.

4 RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA DAS VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS COMBUSTÍVEIS

Na compilação dos 49 artigos analisados (tabela 1), a categorização das vantagens e desvantagens (Figura 5) e (Figura 6) sobre a utilização do biometano em veículos pesados foram distribuídos entre os aspectos ambientais, econômicos e técnicos para as vantagens

entre os aspectos ambientais, econômicos, políticos e técnicos para as desvantagens, analisados individualmente e em conjunto.

Tabela 1: Artigos selecionados para leitura na íntegra

Referências	Aspectos (Vantagens)	Aspectos (Desvantagens)
Alao; Popoola. (2024)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Políticos e Econômicos
Calise et al., (2024)	Ambientais e Econômicos	Politicos
Chojnowski; Dziubak (2024)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Políticos e Econômicos
Garlet et al., (2024)	Ambientais e Técnicos	Técnicos
Gustafsson et al., (2024)	Ambientais	Técnicos e Econômicos
Noussan et al., (2024)	Ambientais e Econômicos	Políticos e Econômicos
Zhang et al., (2024).	Ambientais	Ambientais, Políticos e Econômicos
Calise et al., (2023)	Ambientais e Econômicos	Econômicos
Horváth; Szemesová. (2023)	Ambientais e Técnicos	Políticos e Econômicos
Noussan et al., (2023)	Ambientais e Econômicos	Políticos
Osman et al., (2023)	Ambientais	Políticos e Econômicos
Katreddi et al., (2023)	Ambientais	Políticos, Econômicos e Técnicos
Stettler et al., (2023)	Ambientais	Ambientais
Bidart et al., (2022)	Ambientais	Ambientais
Bidart et al., (2022a)	Ambientais e Econômicos	Ambientais
Gustafsson et al., (2022)	Ambientais e Técnicos	Políticos e Econômicos
Keogh et al., (2022)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Políticos e Econômicos
Li et al., (2022)	Ambientais	Políticos e Econômicos
Menegheti et al., (2022)	Ambientais e Econômicos	Políticos e Econômicos
Ramalho et al., (2022)	Ambientais e Econômicos	Políticos e Econômicos
Singh; Kalamdhad. (2022)	Ambientais e Econômicos	Ambientais, Políticos e Econômicos
Silva et al., (2022)	Ambientais	Políticos e Econômicos
Tonrangklang; Therdyothin, Preechawuttipong. (2022)	Ambientais e Econômicos	Políticos e Econômicos
Tratzi et al., (2022)	Ambientais	Ambientais
Atkins et al., 2021	Ambientais e Econômicos	Políticos
Biernat et al., (2021)	Ambientais e Técnicos	Econômicos
D'Adamo et al. (2021)	Ambientais e Técnicos	Políticos e Econômicos
Limpachoti; Theinnoi. (2021)	Ambientais	Técnicos
Gustafsson et al., (2021)	Ambientais	Políticos
Gray et al., (2021)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Políticos e Econômicos
Prussi et al. (2021)	Ambientais e Técnicos	Ambientais, Políticos e Econômicos
Zlateva; Terziev. (2021)	Ambientais e Técnicos	Técnicos
D'Adamo et al. (2020)	Ambientais e Técnicos	Políticos, Econômicos e Técnicos
Dahlgren, S. (2020)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Ambientais, Econômicos e Técnicos
Gustafsson et al., (2020)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Políticos e Econômicos
Langshaw et al., (2020)	Ambientais e Técnicos	Técnicos
Madhusudhanan et al., (2020)	Ambientais, Econômicos e Técnicos	Políticos e Econômicos
Savickis et al., (2020)	Ambientais	Políticos, Econômicos e Técnicos
Speirs et al., (2020)	Ambientais e Econômicos	Econômicos
Ferreira et al. (2019)	Ambientais	Políticos e Econômicos
Owczuk et al., (2019)	Ambientais e Técnicos	Ambientais e Técnicos
Anna Pääkkönen et al., (2019)	Ambientais e Técnicos	Políticos e Econômicos
Shanmugam et al., (2019)	Ambientais e Econômicos	Políticos e Econômicos

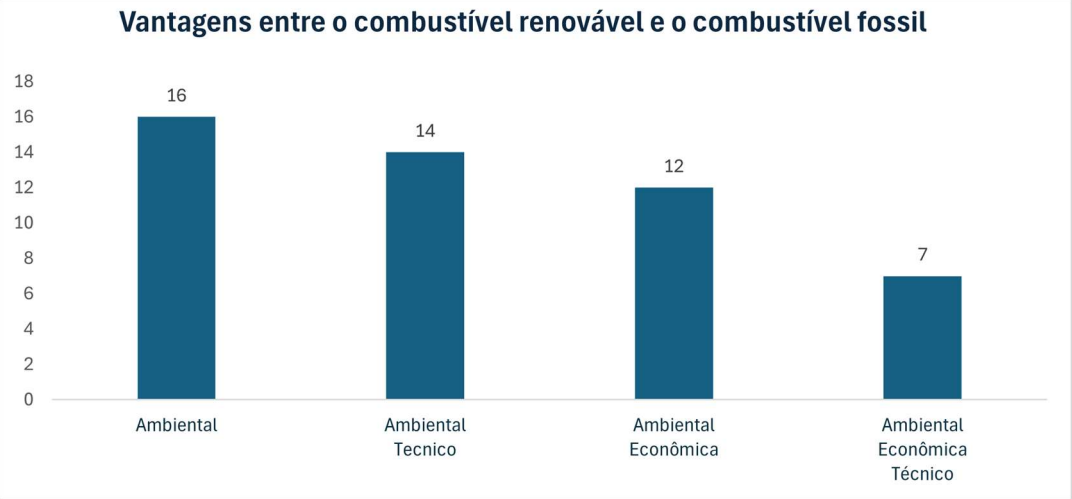
Fonte: Próprio autor

Tabela 1: Artigos selecionados para leitura na íntegra (Continuação)

Referências	Aspectos (Vantagens)	Aspectos (Desvantagens)
Ardolino et al., (2018)	Ambientais	Econômicos
Carsten; Chouvellon, Lacombe (2018)	Ambientais e Técnicos	Políticos e Econômicos
Joppert et al., (2018)	Ambientais e Técnicos	Políticos e Econômicos
Lue; Bhudtiyatanee, (2018)	Ambientais e Técnicos	Econômicos
Shanmugam et al., (2018)	Ambientais	Ambientais
Zang et al., (2018)		

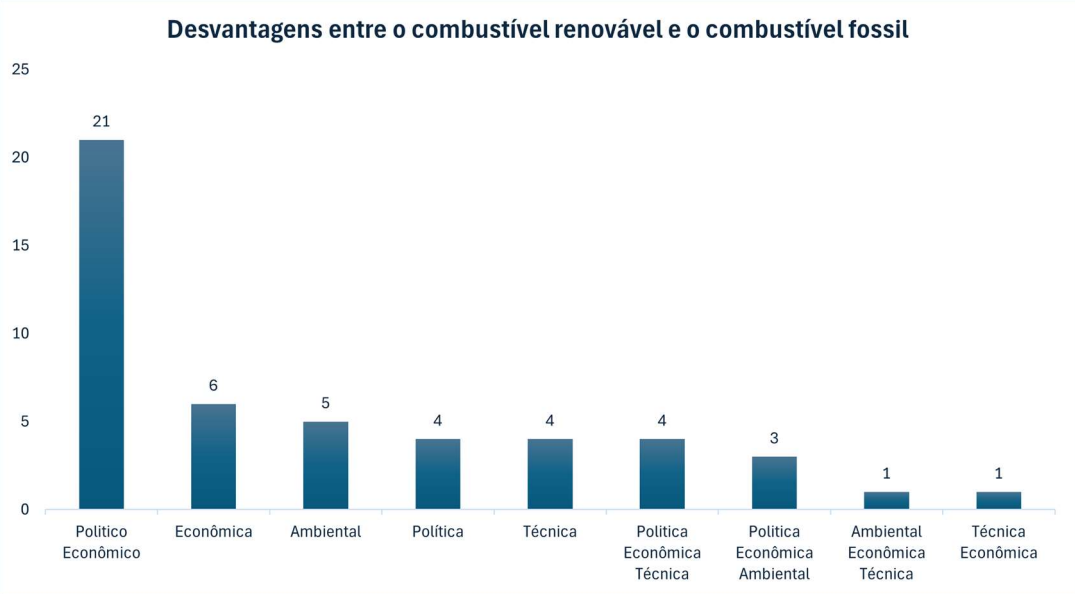
Fonte: Próprio autor

Figura. 4 – Vantagens entre o combustível renovável e o combustível fossil



Fonte: Próprio autor

Figura. 5 – Desvantagens entre o combustível renovável e o combustível fóssil



Fonte: Próprio autor

Sobre as análises foi constatado que na totalidade dos artigos selecionados apresentaram algum tipo de vantagem ambiental quanto a utilização do biometano, sendo somente neste aspecto ou em conjuntos com outros demonstrados. No entanto existem situações em que o aspecto ambiental é visto simultaneamente também como uma desvantagem como apresentado sobre o LBM, Shanmugam et al. (2019) e no que trata sobre a emissões de NOx apresentados por (Patrizio et al., 2022). O estudo apresentou que 24,48% dos autores reconhecem que os aspectos ambientais e econômicos apresentam vantagens significativas para a utilização do Bio-GNV e LBM, como Noussan et al. (2024) que apresentou o estudo de caso com resultados, demonstrando a contribuição potencial do biometano na descarbonização de ônibus urbanos, Alao; Popoola. (2024), mostram que o custo da produção de Bio-GNV em todas as províncias é muito menor do que o custo do GNV na África do Sul (0,8073 USD/m3) e que o projeto de usinas de Bio-GNV é lucrativo com VPL positivo. No estudo de Speirs et al. (2020) complementa que para algumas situações o período de retorno investido num veículo a Bio-GNV pode acontecer a partir de 15 meses, mas em contrapartida o investimento no custo de capital de um veículo novo a gás é mais alto em comparação com o veículo a diesel. A combinação dos aspectos ambientais, econômicos e técnico em relação as vantagem foi apresentada em 14,28% dos artigos. Os autores em geral reafirmam sobre a melhora nas emissões dos GEE, Gustafsson et al. (2022); Gray et al. (2021); Keogh et al., (2022), assim como Bidart et al. (2022) que questiona sobre a efetivação dessa redução. Dahlgren, S. (2020) aborda que o LBM ter mais autonomia do que o BIO-GNV, porém com uma necessidade de investimento e tecnicamente um veículo mais estruturado para suportar os tanques de LBM.

Na visão ambiental e técnica, 28,57% dos autores observaram benefícios do LBM, como Prussi et al. (2021) relata que o transporte de mercadorias, rodoviário ou marítimo, é considerado uma opção adequada, especialmente para transportadoras de longo curso, desde que aumente a confiança dos investidores na ampliação de utilização deste combustível, acompanhando a mesma constatação de Langshaw et al. (2020) e que também reforçam que o biometano comprimido seja mais adequado para distâncias menores, mas aborda sobre a desvantagem sobre a disponibilidade uma rede de abastecimento acessível ao público. D'Adamo et al. (2021) se aprofunda sobre o protagonismo do biometano como agente efetivo na aplicação de energia circular desde que acompanhado de subsídio econômicos, menos impostos sobre os veículos pesados de mercadoria e com ações políticas sobre a infraestrutura ainda limitada. Garlet et. al., (2024) faz parte dos autores que tecnicamente verificaram que o Bio-GNV atende os padrões de emissões EURO-6 para NOx e CO, com ressalvas apresentadas por Prussi et al., (2021) sobre a melhora da emissão do NOx quando se trata do biometano liquefeito, mas devido a questões com o menor poder calorífico, podem influenciar no aumento do CH_4 e NH_3.

Além de 42,85% dos artigos mencionarem especificamente barreiras políticas e econômicas, 38,77% também em algum momento afirmaram desvantagens políticas ou econômicas. Deixando fora desta abordagem os aproximados 18,38% dos artigos que apontaram como

desvantagens ou o aspecto ambiental ou o técnico. O que expos o quanto é crucial a adoção de políticas públicas que garantam subsídios para atrair investimentos, Gustafsson et al. (2022) entende que embora existam claros incentivos ambientais para o uso de LBM, ainda parece difícil competir economicamente com o preço do GNL, também identificado por (Calise et al., 2023). Pääkkönen et al. (2019) e Katredi et al., (2023) reforçam sobre a ação dos governos através da cobrança de menos impostos sobre as aquisições de novos veículos pesados movidos a combustíveis alternativos como também nas suas manutenções. Para que a rentabilidade seja viável (Alao; Popoola, 2024, Tonrangklang; Therdyothin, Preechawuttipong 2022; e Gray et al. 2021).

Após as análises dos artigos, fica evidenciado o quão é importante a adoção de medidas tomadas pelo governos no que tange aos investimentos sejam para operacionalizar o uso do biometano seja na forma liquefeita ou gasosa, mas também o investimentos em mais estudos para que se diminuam as barreiras e tenham mais práticas de descarbonização afim de mitigar e diminuir as emissões dos gases de efeito estufa na atmosfera.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE BIOMETANO E ÓLEO DIESEL

4.2.1 TÉCNICOS E AMBIENTAIS

O biometano, quando usado como combustível no transporte de cargas, pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, graças à neutralidade de CO_2 na fase de combustão. Contudo, essa alternativa não gera a mesma redução para outros tipos de emissões de GEE. Pesquisas apontam os benefícios ambientais do Bio-GNV, destacando como ele contribui para a diminuição dessas emissões. Os resultados indicam uma queda significativa em comparação aos combustíveis mais comuns no transporte de mercadorias, como o gás natural e o diesel (Bidart et al., 2022). Em análise feita por Stettler et al. (2023), projeções das emissões de GEE no ciclo de vida completo (WTW) do biometano em relação ao diesel sugerem uma redução de até 66%. Entretanto, conforme ressaltado por Dahlgren, S. (2020) grandes vazamentos de metano podem facilmente anular os benefícios climáticos de substituir um combustível fóssil por um combustível renovável.

O uso de dados reais de emissões em condições de condução reduz a incerteza na avaliação das emissões de GEE no ciclo TTW, mas ainda há grande variabilidade, influenciada pelo tipo de veículo, SCR, hábitos de direção e condições das estradas (Stettler et al., 2023). A maximização dos benefícios do gás natural e biometano como combustíveis depende da otimização do motor e do pós-tratamento (Speirs et al., 2020). O Bio-GNV tem sido utilizado principalmente em veículos pesados de curta distância, como transporte público e coleta de

lixo, devido à sua autonomia de aproximadamente 500 km, limitando seu uso em longas distâncias (Dahlgren, S., 2020).

4.2.2 POLÍTICOS E ECONÔMICOS

A adoção do biometano no transporte pesado exige investimentos significativos, uma liderança política forte e a implementação de políticas estratégicas e integradas para o setor. É essencial que as particularidades regionais e os atores locais sejam mais considerados dentro de uma estratégia nacional de biogás, com uma coordenação cuidadosa entre instrumentos de políticas diretas e indiretas em um cenário consistente (Pääkkönen et al., 2019). (Singh e Kalamdhad, 2022) concluíram que na Índia, o biometano é uma escolha econômica em comparação com a gasolina e o diesel. No entanto, a vantagem limita-se ao custo por unidade de combustível, uma vez que o custo de manutenção dos veículos a combustível gasoso é superior ao dos veículos a combustível líquido.

Na revisão da literatura realizada por Zhang et al. (2024), revelou que a principal questão para a adoção de combustíveis alternativos em veículos pesados, em substituição ao diesel, reside nos custos e benefícios para os operadores de frota, especialmente na análise do custo total de propriedade (TCO) e na comparação das emissões do ciclo completo (WTW). Zhang et al. (2024), em concordância com Gustafsson et al. (2021), apontaram que combustíveis alternativos para veículos pesados, como gás natural comprimido, eletricidade, hidrogênio, biometano e óleo vegetal tratado com hidrogênio, embora atuem como vetores de energia com alta dependência de eletricidade, podem não ser necessariamente mais vantajosos que o diesel na análise de emissões do ciclo WTW.

D'Adamo et al. (2021) aponta que a conscientização sobre o potencial do biometano é limitada. Campanhas educativas podem ajudar o público a compreender a importância de uma gestão eficiente de resíduos, promovendo a coleta seletiva e reduzindo o envio de resíduos a aterros. Embora o Bio-GNV traga oportunidades para a sociedade, existem desafios, como a resistência à instalação de usinas de biogás-biometano e a falta de suporte legislativo adequado. No setor privado, incentivos como isenções fiscais e certificados de combustível também estão disponíveis. No entanto, para uma transição verde eficaz, é essencial que a produção de Bio-GNV seja acompanhada pela ampliação de postos de gás metano e pelo aumento da frota de veículos a gás natural (GNVs).

4.2.3 AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

(Singh e Kalamdhad, 2022) destacam que as emissões de metano na cadeia de suprimentos de Bio-GNV na Índia são significativas, mas podem ser reduzidas com manutenção adequada e regulamentação ambiental rigorosa. A análise econômica aponta dois fatores principais: o preço do biometano, que deve ser subsidiado, como sugerido por Pääkkönen et al. (2019), e a necessidade de reduzir custos operacionais e de capital das usinas de Bio-GNV para viabilidade a longo prazo, já que os custos de produção dependem dos preços das matérias-

primas. Além disso, fatores como preferência do consumidor, custos irrecuperáveis, escolha de investidores por mercados consolidados e escassez de postos de GNV limitam o potencial do biometano e aumentam a incerteza na decisão de compra.

Nos países em desenvolvimento, a deposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é a forma mais comum de gestão de resíduos; na África do Sul, por exemplo, 90% dos RSU gerados seguem para essa destinação. No entanto, essa ação provoca emissões fugitivas de gases de efeito estufa, contaminação das águas próximas e liberação de odores desagradáveis, representando uma séria ameaça à saúde humana (Alao; Popoola, 2024).

D'Adamo et al. (2021) destaca que adiar práticas sustentáveis na gestão de resíduos impede o aproveitamento de oportunidades econômicas e mantém a dependência de fontes de energia baseadas em carbono, prejudicando o meio ambiente. Alao; Popoola. (2024) também concluem que o biometano (gás verde) pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa no transporte, mas sua viabilidade econômica depende de subsídios governamentais. Estima-se uma economia anual de US$ 99,4 milhões ao utilizar Bio-GNV de resíduos sólidos urbanos (RSU) em vez de óleo diesel para ônibus de transporte público.

Dahlgren, S. (2020) afirma que o Bio-GNV se destaca como combustível alternativo não apenas por ser renovável, mas também porque a produção de biogás contribui para solucionar problemas sociais. Em especial, ela promove melhorias no tratamento de resíduos e gera efeitos positivos secundários, como o fortalecimento das estruturas do solo e a diminuição do uso de fertilizantes minerais.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE BIOMETANO E GÁS NATURAL VEÍCULAR

4.3.1 TÉCNICOS E AMBIENTAIS

O GNL possui uma densidade cerca de 600 vezes maior que o gás natural em temperatura e pressão ambiente, enquanto o GNV é apenas 200 a 300 vezes mais denso. Com isso, o GNL oferece de 2 a 3 vezes mais energia em tanques de mesma capacidade, o que amplia o alcance dos veículos nessa proporção. No entanto, seu conteúdo energético por volume ainda é inferior ao do diesel, exigindo tanques maiores nos veículos para armazená-lo (Stettler et al., 2023). Langshaw et al. (2020) observam que o gás natural, especialmente em sua forma liquefeita (GNL), é uma das poucas alternativas ao diesel para veículos pesados, sendo preferido para transportes de longa distância devido à maior densidade energética em comparação ao GNV.

Estudos recentes apontam que o uso de GNV em motores de combustão interna pode elevar as emissões de partículas ultrafinas, abaixo de 23 nm. No entanto, como a aplicação dessa tecnologia ainda é restrita, é prematuro tirar conclusões definitivas. A literatura, inclusive, enfatiza a necessidade de pesquisas adicionais, principalmente sobre o uso de GNL em motores de novos modelos (Prussi et al., 2021).

O LBM exige plantas de produção maiores que o Bio-GNV (Dahlgren, S. 2020). O Bio-GNV, que oferece maior rendimento e eficiência em distâncias de até 100 km, requer resfriamento constante para manter o biometano líquido. Assim, o LBM é mais adequado para veículos em operação contínua, onde o líquido não tem chance de evaporar. O LBM avançou tecnologicamente e há uma crescente adoção em transportes rodoviários pesados e navios movidos a metano liquefeito. Além disso, o Bio-GNV pode ser viável economicamente em escalas menores, facilitando a produção, já que a matéria-prima é frequentemente dispersa em áreas amplas (Prussi et al., 2021). O uso de GNL, no entanto, tem aumentado em veículos pesados, impulsionando a produção e o uso de LBM.

4.3.2 POLÍTICOS E ECONÔMICOS

Os resultados mostram que, embora o GNL possa aumentar o impacto das mudanças climáticas em até 10% em relação ao diesel, o LBM reduz significativamente o impacto ambiental em comparação tanto ao GNL quanto ao diesel (Gustaffson et al., 2022). A análise indica que as diferenças entre as tecnologias de aprimoramento do biogás e liquefação do biometano são pequenas, especialmente para transporte de gás a longas distâncias. Contudo, quanto maior a distância, mais vantajoso é o uso de LBM em relação ao Bio-GNV. A liquefação do biometano requer alta energia, mas integrar fontes renováveis ao processo pode reduzir consumo energético e custos, uma solução ainda pouco explorada (Calise et al., 2024).

Zhang et al. (2024) apontam que estudos anteriores sobre o uso de GNL indicam que operadores de frotas de caminhões pesados enfrentam barreiras ao considerar combustíveis alternativos, como limitações de funcionalidade, problemas de confiabilidade e segurança, custos financeiros elevados ou desafios operacionais adicionais devido à infraestrutura de reabastecimento limitada. Já Calise et al. (2024) observam que a viabilidade econômica dessa alternativa só é alcançada com subsídios governamentais para a produção e comercialização de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos. Com tais investimentos, mesmo com custos de capital acima de 200 milhões de euros, a taxa de retorno pode ser obtida em menos de 5 anos.

4.3.3 AMBIENTAIS E ECONÔMICOS

D'Adamo et al. (2021) confirmam que o desenvolvimento do biometano no transporte, sob a ótica da Economia Circular, depende de fatores como infraestrutura, incentivos fiscais e mudanças no comportamento dos consumidores. Também é crucial a coordenação entre os atores de diferentes mercados. Nesse contexto, Calise et al. (2024) mostram que o Bio-GNV

pode reduzir o potencial de aquecimento global em 5 a 15 kgCO_2eq por galão equivalente de gasolina (GGE), representando uma redução de 59% a 174% em comparação ao GNV fóssil.

5 CONCLUSÃO

O estudo revelou que, com maior atenção e empenho de órgãos públicos e privados na adoção de combustíveis renováveis, como o biometano (Bio-GNV e LBM), é possível alcançar benefícios ambientais e financeiros tanto para investidores quanto para a sociedade. A ampliação da disponibilidade de biometano, especialmente em regiões estratégicas, e o fortalecimento de toda a cadeia produtiva e de abastecimento são fundamentais para o sucesso dessa transição.

Além disso, o artigo destaca a relevância das tecnologias aplicadas ao transporte de cargas pesadas, como caminhões, para reduzir as desvantagens atuais e maximizar as vantagens do biometano, seja em veículos novos ou usados. Essas ações promovem uma mobilidade mais sustentável e contribuem para a redução dos impactos ambientais, ao mesmo tempo em que oferecem uma oportunidade estratégica para transformar sistemas de energia e transporte de forma justa e eficiente.

Por se tratar de uma abordagem teórico-conceitual, a pesquisa apresenta limitações na ausência de dados quantitativos mais robustos para subsidiar decisões de políticas públicas e empresariais. Ainda assim, o estudo reforça a necessidade de aprofundar investigações, incluindo análises sobre redução de emissões de gases de efeito estufa, custos tangíveis para empresas e governos, e impactos sociais e de saúde.

A continuidade de pesquisas sobre o tema é essencial para impulsionar a transição energética e fortalecer os benefícios ambientais, econômicos e sociais do uso do biometano nos transportes.

REFERÊNCIAS

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). Resolução ANP n. 886, de 29 de setembro de 2022. Brasília: ANP, 2022a. Disponível em: https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anp-n-886-de-29-de-setembro-de-2022-432620215 Acesso em: 21 abr. 2023.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). Resolução ANP n. 906, de 18 de novembro de 2022. Brasília: ANP, 2022b. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022. Acesso em: 21 abr. 2023.

Atkins, P.; Milton, G.; Atkins, A.; Morgan, R. A Local Ecosystem Assessment of the Potential for Net Negative Heavy-Duty Truck Greenhouse Gas Emissions through Biomethane Upcycling. **Energies** 2021, 14, 806. https://doi.org/10.3390/en14040806

Associação Brasileira de Biogás (ABiogás 2023) https://abiogas.org.br/

Bidart, Christian and Wichert, Martin and Kolb, Gunther and Held, Michael, Biomethane as Fuel for Freight Transport – a Comprehensive Lca Approach for a GHG Emission Reduction Assessment. Available at **SSRN** 2022, https://ssrn.com/abstract=4052266

Biernat, K.; Samson-Bręk, I.; Chłopek, Z.; Owczuk, M.; Matuszewska, A Assessment of the Environmental Impact of Using Methane Fuels to Supply Internal Combustion Engines. **Energies** 2021, 14, 3356. https://doi.org/10.3390/en14113356

Christian Bidart, Martin Wichert, Gunther Kolb, Michael Held, Biogas catalytic methanation for biomethane production as fuel in freight transport - A carbon footprint assessment, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 168, 2022, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112802

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

CIBIOGÁS Energias renováveis. https://cibiogas.org/

Cimmino, Luca & Calise, Francesco & Cappiello, Francesco & Vicidomini, Maria. (2023). Dynamic Analysis of a Power Plant Producing Liquefied Biomethane for Heavy Road Transport. 1735-1746. 10.52202/069564-0157. https://DOI: 10.52202/069564-0157

C.L. Joppert, D. Perecin, M.M. Santos, S.T. Coelho, J.L.P. Camacho, A short-cut model for predicting biomethane availability after biogas upgrading, **Journal of Cleaner Production**, Volume 200, 2018, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.269.

Climate Watch Historical GHG Emissions. 2022. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions

Dahlgren, S. (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

Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources

Ferreira, Samuel Fontenelle, Buller, Luz Selene, Berni, Mauro, Forster-Carneiro, Tânia, Environmental impact assessment of end-uses of biomethane, **Journal of Cleaner Production**, Volume 230, Pages 613 – 621. https://DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.034

Filomena Ardolino, Francesco Parrillo, Umberto Arena, Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste, **Journal of Cleaner Production**, Volume 174, 2018, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.320

Francesco Calise, Francesco Liberato Cappiello, Luca Cimmino, Massimo Dentice d'Accadia, Maria Vicidomini, Single mixed refrigerant biomethane liquefaction plant integrated with solar energy: Dynamic simulation for the decarbonization of the heavy road transport sector, **Journal of Environmental Management**, Volume 361, 2024, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121261.

Francesco Calise, Francesco Liberato Cappiello, Luca Cimmino, Maria Vicidomini, Dynamic Analysis Of A Power Plant Producing Liquefied Biomethane For Heavy Road Transport, 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, **ECOS 2023**, pp. 1735-1746

Herbes, Carsten, Chouvellon, Simon, Lacombe, Joachim, Towards marketing biomethane in France-French consumers' perception of biomethane, **Energy, Sustainability and Society**, Volume 8, 2018. https://DOI: 10.1186/s13705-018-0179-7

Horváth, J., Szemesová, J.,Is a Carbon-Neutral Pathway in Road Transport Possible? A Case Study from Slovakia (2023) **Sustainability** (Switzerland), 15 (16), art. no. 12246, https://doi: 10.3390/su151612246

Idiano D'Adamo, Pasquale Marcello Falcone, Massimo Gastaldi, Piergiuseppe Morone, RES-T trajectories and an integrated SWOT-AHP analysis for biomethane. Policy implications to

support a green revolution in European transport, **Energy Policy**, Volume 138, 2020, https://DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111220

Idiano D'Adamo, Pasquale Marcello Falcone, Donald Huisingh, Piergiuseppe Morone, https://DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.072 A circular economy model based on biomethane: What are the opportunities for the municipality of Rome and beyond? **Renewable Energy**, Volume 163, 2021, https://DOI: 10.1016/j.renene.2020.10.072

Kammuang-lue, Niti, Bhudtiyatanee, Matas, Optimum ratio of compressed biomethane gas as dual fuel in turbocharged common rail diesel engine, **Journal of the Energy Institute**, Volume 91, 2018, Pages 1113 – 1125. https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.06.012

Katreddi, Sasanka, Thiruvengadam, Arvind, Thompson, Gregory J., and Schmid, Natalia A. Mixed Effects Random Forest Model for Maintenance Cost Estimation in Heavy-Duty Vehicles Using Diesel and Alternative Fuels. United States: N. p., 2023. https://DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3290994

Kaying Li, Salvador Acha, Nixon Sunny, Nilay Shah, Strategic transport fleet analysis of heavy goods vehicle technology for net-zero targets, **Energy Policy**, Volume 168, 2022, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112988.

Kavitha. Shanmugam, Mats. Tysklind, Venkata K.K. Upadhyayula, 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**, Volume 69, 2018, Pages 517-522

Kuriyama, Akihisa & Abe, Naoya, 2018. "Ex-post assessment of the Kyoto Protocol – quantification of CO2 mitigation impact in both Annex B and non-Annex B countries-," **Applied Energy**, Elsevier, vol. 220(C), pages 286-295. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.025

Liam Langshaw, Daniel Ainalis, Salvador Acha, Nilay Shah, Marc E.J. Stettler, 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**, Volume 137, 2020, https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111161.

Limpachoti, Tanat, Theinnoi, Kampanart, The Comparative Study on Compressed Natural Gas (CNG) and Compressed Biomethane Gas (CBG) Fueled in a Spark Ignition Engine, E3S Web of Conferences, Volume 302, **Research, Invention, and Innovation Congress**, RI2C 2021.

M. Prussi, A. Julea, L. Lonza, C. Thiel, Biomethane as alternative fuel for the EU road sector: analysis of existing and planned infrastructure, **Energy Strategy Reviews**, Volume 33, 2021, https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100612.

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, 102530.

Marc E.J. Stettler, Mino Woo, Daniel Ainalis, Pablo Achurra-Gonzalez, Jamie Speirs, Jasmin Cooper, Dong-Ha Lim, Nigel Brandon, Adam Hawkes, Review of Well-to-Wheel lifecycle emissions of liquefied natural gas heavy goods vehicles, **Applied Energy**, Volume 333, 2023, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120511

Marcus Gustafsson, Igor Cruz, Niclas Svensson, Magnus Karlsson, Scenarios for upgrading and distribution of compressed and liquefied biogas — Energy, environmental, and economic analysis, **Journal of Cleaner Production**, Volume 256, 2020, https://DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120473

Marcus Gustafsson, Niclas Svensson, Mats Eklund, Björn Fredriksson Möller, Well-to-wheel climate performance of gas and electric vehicles in Europe, Transportation Research Part D: **Transport and Environment**, Volume 97, 2021, https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102911.

Marcus Gustafsson, Niclas Svensson, Cleaner heavy transports – Environmental and economic analysis of liquefied natural gas and biomethane**, Journal of Cleaner Production**, Volume 278, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123535.

Marcus Gustafsson, Stephanie S. Cordova, Niclas Svensson, Mats Eklund, Climate performance of liquefied biomethane with carbon dioxide utilization or storage, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 192, 2024, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114239

Menegheti, Geovana, Utilization of Biogas from Solid Waste in the Production of Biomethane and Its Use as Biofuel in the Transport Sector, Handbook of Solid Waste Management: Sustainability through Circular Economy. Ponta Grossa, 2022, p.(2169 – 2195)

Michel Noussan, Viviana Negro, Matteo Prussi, David Chiaramonti, The potential role of biomethane for the decarbonization of transport: An analysis of 2030 scenarios in Italy, **Applied Energy**, Volume 355, 2024, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122322.

Moshood Akanni Alao, Olawale Muhammed Popoola, Techno-economic assessment of bio-compressed natural gas as a transport fuel for South African Provinces, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 205, 2024, https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114820.

Nathan Gray, Shane McDonagh, Richard O'Shea, Beatrice Smyth, Jerry D Murphy, Decarbonising ships, planes and trucks: An analysis of suitable low-carbon fuels for the

maritime, aviation and haulage sectors, **Advances in Applied Energy**, Volume 1,2021, https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100008

National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). https://www.noaa.gov/

Natural and Renewable Gas: Joint Call to Accelerate the Deployment of Refuelling Infrastructure - European Biogas Association (EBA), Natural and Bio Gas Vehicle Association (NGVA), European Automobile Manufacturers Association (ACEA)

Niamh Keogh, D. Corr, R. O'Shea, R.F.D. Monaghan, The gas grid as a vector for regional decarbonisation - a techno economic case study for biomethane injection and natural gas heavy goods vehicles, **Applied Energy**, Volume 323, 2022, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119590.

Noussan, M. The Use of Biomethane in Internal Combustion Engines for Public Transport Decarbonization: A Case Study. **Energies** 2023, 16, 7995. https://doi.org/10.3390/en16247995

Osman, M.C., Huge-Brodin, M., Ammenberg, J., Karlsson, J., Exploring green logistics practices in freight transport and logistics: a study of biomethane use in Sweden, (2023) **International Journal of Logistics Research and Applications**, 26 (5), pp. 548-567.

Owczuk, Marlena, Matuszewska, Kruczyński, Stanisław, Kamela, Wojciech, Evaluation of using biogas to supply the dual fuel diesel engine of an agricultural tractor, **Energies**, Volume 12, 2019. https://DOI: 10.3390/en12061071

Pääkkönen, A.; Aro, K.; Aalto, P.; Konttinen, J.; Kojo, M. The Potential of Biomethane in Replacing Fossil Fuels in Heavy Transport—A Case Study on Finland. **Sustainability** 2019, 11, 4750. https://doi.org/10.3390/su11174750

Patrizio Tratzi, Marco Torre, Valerio Paolini, Laura Tomassetti, Cassandra Montiroli, Eros Manzo, Francesco Petracchini, Liquefied biomethane for heavy-duty transport in Italy: A well-to-wheels approach, Transportation Research Part D: **Transport and Environment**, Volume 107, 2022, https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103288

Prakash Singh, Ajay S. Kalamdhad, 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**, Volume 26, 2022, https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102330

R.A. Garlet, J.L.S. Fagundez, R.B. Hausen, V.R. Roso, T.D.M. Lanzanova, N.P.G Salau, M.E.S. Martins, Prospects of performance, emissions and cost of methane-based fuels in a spark-ignition engine compared to conventional Brazilian fuels, **Fuel**, Volume 357, Part A, 2024, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129788.

Ramalho, J.C.M., Calmon, J.L., Colvero, D.A., Siman, R.R., Environmental assessment of municipal solid waste collection/transport using biomethane in mid-sized metropolitan areas of developing countries , **International Journal of Environmental Science and Technology**, 19 (10), pp. 9991-10006

Sales Silva, Sara Talita, Barros, Regina Mambeli, Silva dos Santos, Ivan Felipe, Maria de Cassia Crispim, Adriele, Tiago Filho, Geraldo Lúcio, Silva Lora, Electo Eduardo, Technical and economic evaluation of using biomethane from sanitary landfills for supplying vehicles in the Southeastern region of Brazil, **Renewable Energy**, Volume 196, 2022, Pages 1142 – 1157

Savickis J., Zemite L., Zeltins N., Bode I., Jansons L., Natural Gas and Biomethane in the European Road Transport: The Latvian Perspective, **Latvian Journal of Physics and Technical Sciences**, Volume 57, 2020, Pages 57 - 72

Shanmugam K, Baroth A, Nande S, Yacout DMM, Tysklind M, Upadhyayula VKK. Social Cost Benefit Analysis of Operating Compressed Biomethane (CBM) Transit Buses in Cities of Developing Nations: A Case Study. **Sustainability**. 2019; 11(15):4190. https://doi.org/10.3390/su11154190

Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) Observatório do Clima, acessado em [2024] – seeg.eco.br

Speirs, J.; Balcombe, P.; Blomerus, P.; Stettler, M.; Achurra-Gonzalez, P.; Woo, M.; Ainalis, D.; Cooper, J.; Sharafian, A.; Merida, W.; et al. Natural gas fuel and greenhouse gas emissions in trucks and ships. **Prog. Energy** 2020, https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab56af

Tonrangklang, P., Therdyothin, A. & Preechawuttipong, I. The financial feasibility of compressed biomethane gas application in Thailand. **Energ Sustain Soc** 12, 11 (2022). https://doi.org/10.1186/s13705-022-00339-3

Transport, Climate and Sustainability Global Status Report (SLOCAT). https://slocat.net/
Volvo Trucks Global. Environmental Footprint Calculator. Available online: https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/alternative-fuels/environmental-footprint.html (accessed on July 2024).

Volvo Trucks Global. Environmental Footprint Calculator. Available online: https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/ alternative-fuels/environmental-footprint.html (accessed on July 2024).

Xizhao Zhang, Zhenhong Lin, Han Hao, Xu Hao, Zhichao Wang, Shunxi Li, Environment-economic comparison of potential alternative fuel heavy-duty trucks in China, Transportation Research Part D: **Transport and Environment**, Volume 131, 2024, https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104206.

Zlateva, Penka, Terziev, Angel, Study of the possibilities for using methane as a transport fuel through biomass gasification process, Proceedings of the 2021 6th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications, **EFEA 2021**.