

APLICAÇÃO DO BIOMETANO COMO SUBSTITUTO DO GÁS NATURAL EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA NO BRASIL SOB A PERSPECTIVA DA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Luis Almeida-Roque¹, Roberto Berlini-Costa², Luis Vieira-Vidigal³, Tulio Zucareli-Souza⁴, Gustavo Vieira-Frez⁵, Davi Souza-Ferreira⁶, Paulo Melo-Santos⁷, Nelly Pérez-Rangel⁸, Vitor Andrade-Cardinali⁹, Gabriel Marques-Pinto¹⁰, Christian Rodriguez-Coronado¹¹

GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil.

filipe_roque@unifei.edu.br¹, robertoberlini@unifei.edu.br², luis.vidigal@engenharia.ufjf.br³,
tulio_zucareli@unifei.edu.br⁴, gustavo.frez@cefet-rj.br⁵, davijosouzaf@gmail.com⁶,
paulohsantos@unifei.edu.br⁷, d2021100182@unifei.edu.br⁸, vitorcardinali@unifei.edu.br⁹,
gabrielmarquespinto@unifei.edu.br¹⁰, christian@unifei.edu.br¹¹

Resumo

O potencial do biometano como combustível no Brasil no setor de veículos de transporte leves foi avaliado por meio da avaliação do ciclo de vida. A partir de uma avaliação experimental de um motor de ignição por centelha usando GNV, foi desenvolvido e validado um modelo numérico no *software* GT Suite, elaborados mapas numéricos de funcionamento do motor com biometano, simulação de ciclos de condução em um veículo e avaliação do ciclo de vida do poço à roda para ambos os combustíveis. Os resultados indicaram a possibilidade de substituição direta do biometano no motor mantendo-se as características de potência e torque. A simulação do veículo mostrou reduções nas emissões de CO₂ por km em até 11%, apesar do aumento no consumo de combustível de até 18% utilizando-se biometano. A avaliação do ciclo de vida revelou um potencial máximo de 68% de redução do potencial aquecimento global utilizando-se o biometano.

Palavras-chave: Biocombustíveis, Biometano, Motores, ACV, Aquecimento Global

Abstract

The potential of biomethane as a fuel in Brazil for the light duty vehicle sector was evaluated through a life cycle assessment. Starting with an experimental evaluation of a spark-ignition engine using natural gas (NG), a numerical model was developed and validated in GT Suite software. Numerical operation maps for the engine with biomethane were developed, driving cycle simulations in a vehicle were conducted and a well-to-wheel life cycle assessment for both fuels was performed. The results indicated the possibility of directly substituting biomethane in the engine while maintaining power and torque characteristics. The vehicle simulation showed reductions in CO₂ emissions per kilometer by up to 11%, despite an increase in fuel consumption of up to 18% when using biomethane. The life cycle assessment revealed a maximum potential reduction of 68% in global warming potential when using biomethane.

Keywords: Biofuels, Biomethane, Engines, LCA, Global Warming

1. Introdução

A utilização de fontes limpas e renováveis é uma prática que ganha cada vez mais espaço e visibilidade tratando-se do setor de geração de energia. Diariamente, recursos são despendidos em busca de novas tecnologias e novos combustíveis que se adequem às exigências de redução de emissão de poluentes, emissão de gás carbônico e uma política de desenvolvimento sustentável, como foram o Protocolo de Kyoto e o Rio+20. A maior parte da energia consumida, tanto no Brasil quanto no mundo, vem

principalmente de fontes não renováveis de energia, como o petróleo e gás natural [1]. Apesar de o Brasil possuir uma base energética renovável, os recursos não renováveis também são cruciais ao atendimento da demanda de energia.

Devido ao grande potencial de emissões de gases de efeito estufa e emissões de gases considerados poluentes [2], a busca por fontes renováveis para a produção de combustíveis é essencial para o desenvolvimento sustentável. Biocombustíveis são derivados de biomassa renovável que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados de

petróleo e gás natural em aplicações de geração de energia.

Ao se analisar a matriz de transportes brasileira, nota-se a grande dependência na matriz não renovável de combustíveis, onde somente cerca de 25% da energia advém de fontes renováveis, sendo essa majoritariamente o etanol [3]. Assim, faz-se necessária a busca por outras fontes renováveis de energia para o suprimento da demanda do setor de transporte rodoviário brasileiro, sendo o biometano um promissor combustível para o setor.

O biometano é um combustível a base de metano, sendo este obtido a partir do processo de purificação do biogás, onde aumenta-se a concentração de metano no combustível [4,5]. Assim, do ponto de vista ambiental por meio da avaliação do ciclo de vida (ACV), a substituição dos combustíveis gasosos, principalmente o GNV, acarreta na redução de emissões de gases de efeito estufa [6].

Esses combustíveis gasosos possuem grande interesse comercial e tecnologias estão sendo desenvolvidas para sua aplicação em grande escala, porém, ainda existem desafios a serem enfrentados, como a baixa produção de ambos combustíveis no cenário atual [7,8], pouca infraestrutura para distribuição [9].

Como esperado, o impacto causado ao meio ambiente pelos combustíveis renováveis deve ser menor em comparação aos danos causados pelos combustíveis fósseis, como o gás natural. Uma característica importante do uso de combustíveis renováveis está na consideração do ciclo biogênico de emissão de dióxido de carbono. Ao longo do ciclo de vida de um biocombustível parte do dióxido de carbono emitido diretamente do processamento de matéria-prima renovável é absorvido de volta à natureza [10]. Assim, considera-se que em etapas de utilização do biocombustível, como em sua combustão, parte do carbono liberado será reabsorvido durante a fase de produção, resultando assim na redução de emissão de carbono. Atrelado a isso, também são levados em consideração aspectos da produção dos combustíveis como a utilização de recursos fósseis. Como exemplo, a descarbonização de etapas de transporte e utilização de energia elétrica renovável nas etapas de produção de um combustível também irão colaborar para a redução da pegada de carbono.

Dentre as demandas energéticas brasileiras, em 2022, o setor de transporte rodoviário é responsável pelo consumo de 29,5% do fluxo energético [1], sendo que aproximadamente 75% dessa energia é obtida a partir de fontes não renováveis. Assim, existe a necessidade e, principalmente, a possibilidade da renovação dessa matriz, no que tange à utilização de combustíveis renováveis. Segundo dados de [11], o setor de transporte registrou o licenciamento entre 2021 e 2022, 255 mil novos caminhões e 800 mil veículos comerciais leves foram licenciados no Brasil, correspondendo a cerca de 25% dos licenciamentos totais de veículos no país. Assim, devido à grande frota

comercial, a aplicação de novas tecnologias e novos combustíveis no setor terá grande efeito no combate à descarbonização.

Segundo o Código Brasileiro de Trânsito, é definido como veículo comercial leve o veículo utilizado no transporte de pessoas ou cargas, com peso máximo de até 3856 kg. Sendo assim, automóveis como a Fiat Ducato, Hyundai HR e VW Delivery são veículos do cenário brasileiro que se enquadram nessa categoria.

A avaliação do potencial de descarbonização da introdução de combustíveis limpos, como o biometano, pode ser realizado pela ACV. A partir desta metodologia, com a utilização de inventários de dados que relacionam os processos de produção com suas respectivas emissões e utilização de recursos, é possível fazer o mapeamento de emissões de poluentes ao longo da cadeia de utilização de um combustível, bem como o mapeamento do ciclo de vida dos veículos utilizados [12]. Assim, além da pegada de carbono, outras categorias de impacto ambiental também podem ser utilizadas, como consumo de recursos minerais e fósseis, utilização de água, potencial de acidificação terrestre, potencial de eutrofização de meios aquáticos e outros [13].

Entretanto, concomitante à avaliação ambiental, a introdução do biometano e hidrogênio como combustíveis na matriz de transporte brasileira também deve vir acompanhada de uma avaliação de desempenho deste combustível no motor. Estudos realizados por [14,15] mostraram o potencial de utilização do biometano em um motor de ignição por compressão para a aplicação de geração de energia. O estudo foi conduzido utilizando a tecnologia de combustão dual-fuel, onde ambos os combustíveis gasosos foram utilizados em conjunto com diesel e HVO. Os resultados se mostraram promissores principalmente no que tange a emissão de NO_x e CO_2 . Como mencionado anteriormente, o setor de transporte leve corresponde há uma parcela considerável da matriz de transporte brasileira.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a introdução do biometano como combustível em um motor FIC-CNG da fabricante FPT Industrial. Trata-se de um motor de ignição por centelha, com volume total de 3l, 4 cilindros, sobrealimentado e que opera originalmente com GNV.

A avaliação de desempenho e emissões passou por três etapas: 1ª – avaliação experimental do motor FIC-CNG com a utilização do GNV como combustível, onde foram avaliados parâmetros de desempenho e emissões. 2ª – Modelagem e validação do modelo do motor utilizando o *software* GT Suite para a utilização do GNV como combustível. 3ª – Utilização do modelo do motor em GT Suite para a substituição do combustível para o biometano. Também foi realizada a simulação de condições de condução de um veículo comercial leve, modelo Iveco Dayli 35-160 em ciclos de condução padronizados (WLTC e WHVC) utilizando o motor FIC-CNG com GNV e biometano

como combustíveis. Por fim, foi realizada a avaliação do ciclo de vida para ambos os combustíveis selecionados, considerando uma avaliação do tipo do poço à roda e com unidade funcional definida em km rodados pelo veículo.

2. Metodologia

2.1. Avaliação de Desempenho e Emissões

2.1.1. Motor e Instalações

O motor modelo F1C-CNG, da fabricante FPT Industrial, equipa veículos de transporte leve europeus, como a FIAT Ducato e Iveco Daily (Figura 1a). Este motor foi disponibilizado pela empresa fabricante e parceira da UNIFEI no projeto de pesquisa Rota2030 [16], tendo sido instalado na bancada experimental e instrumentado para a realização dos ensaios, disponível no Laboratório de Máquinas Térmicas da UNIFEI.

O F1C-CNG é um motor de ignição por centelha de quatro tempos, com potência nominal de 100 kW e 350 Nm de torque operando com CNG, com certificação Euro VI. O motor é composto por quatro cilindros dispostos em linha, equipado com injeção eletrônica e com um turbocompressor de fabricante WG. O resfriamento do ar na saída do turbocompressor é feito por um intercooler. O cabeçote possui duas válvulas de admissão e duas válvulas de exaustão em cada cilindro e a relação volumétrica de compressão do motor é de 12,5:1. O motor possui sistema de tratamento dos gases de escape com catalisador de 3 vias e opera com combustão estequiométrica. A Tabela 1 apresenta as especificações detalhadas do motor F1C-CNG.

A bancada de ensaios possui um dinamômetro hidráulico de 300 hp (Figura 1b), com rotação máxima de 6000 rpm e torque máximo de 1200 Nm, e um sistema de automação para testes de potência e desenvolvimento de motores. Este sistema automatizado permite a aquisição em tempo real de

dados de temperaturas, pressões, torque e rotação, além de ajustar limites de segurança e executar ações de emergência automaticamente. Para o estudo das emissões de poluentes, utiliza-se um analisador de gases PCMultigás da NAPRO Eletrônica Industrial, certificado pelo Inmetro, que mede CO, CO₂, HC e NO_x. O CO, CO₂ e HC são medidos por absorção de raios infravermelhos não dispersivos (NDIR) e o NO_x por quimiluminescência. A bancada também conta com oito termopares tipo K, manômetros digitais, um medidor de vazão coriolis para consumo de combustível gasoso e um medidor térmico de vazão mássica para a admissão de ar.

Tabela 1. Especificações técnicas do motor F1C-CNG

Fabricante	FPT Industrial
Modelo	F1C CNG
Ciclo	Ciclo Otto – 4 tempos
Número de cilindros	4
Volume deslocado – cilindrada	2998 cm ³
Diâmetro do cilindro	95,8 mm
Curso do pistão	104 mm
Relação volumétrica de compressão	12,5:1
Número de válvulas	2 de exaustão e 2 de admissão
Aspiração	Turboalimentado (WG)
Sistema de injeção de gás	Injeção Indireta (10 bar)
Potência nominal	100 kW @ 3500 rpm
Torque máximo	350 Nm @ 2200 rpm

Fonte: FPT Industrial

Para a alimentação de Combustível Gasoso foi utilizado um cesto de cilindros com capacidade nominal de 100 m³ de GNV à 150 bar, modelo 2764.MC.01 da fabricante Exergy. Para a descompressão do gás foi utilizado um módulo de descompressão de um estágio, com saídas de 30 bar no primeiro estágio e saída entre 7 e 12 bar com capacidade de 50 Nm³/h, modelo 2764.MC.01 e fabricante Exergy. A composição dos combustíveis considerados são, em %vol:

- GNV: 88,5% CH₄, 6,2% C₂H₆, 2,2% C₃H₈, 0,8% C₄H₁₀, 1,8% CO₂, 0,5% N₂

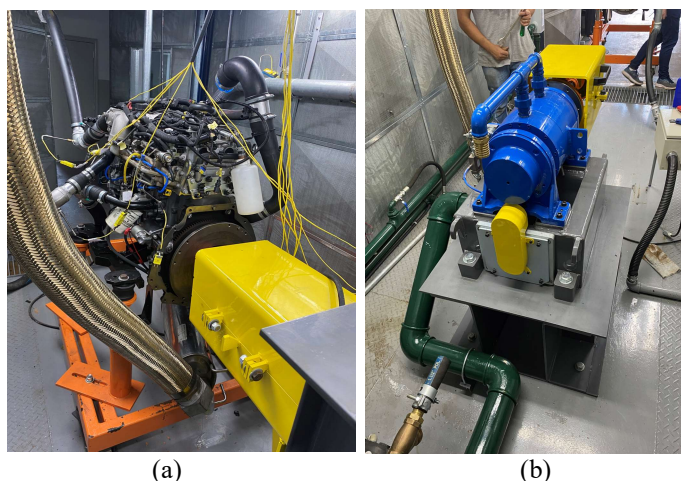


Figura 1. (a) Motor F1C-CNG e (b) dinamômetro hidráulico. Fonte: autoria própria

- Biometano: 95,67% CH₄, 0,48% O₂, 3,85% N₂

A potência de eixo, BP_{eixo} , em [kW], foi calculada por:

$$BP_{eixo} = \frac{2\pi N\tau}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

onde τ é o torque no eixo em [Nm] medido pelo dinamômetro. A eficiência térmica do motor η_{motor} , em [%], é calculada por:

$$\eta_{motor} = \frac{3,6 \cdot P_{eixo}}{\dot{m}_{comb} \cdot PCI_{comb}} \cdot 100 \quad (2)$$

onde PCI_{comb} é o poder calorífico inferior do combustível utilizado.

A concentração de cada gás componente na exaustão do motor foi medida pelo analisador de gases da marca NAPRO, em base seca. As medições foram convertidas em emissões específicas de gases de escape usando a metodologia descrita por [17]. Emissões específicas de eixo de CO₂ e NO_x não queimados, em g/kWh, foram calculados usando as Equações (3) e (4).

$$BSNO_x = \frac{u_{NO_x}[NO_x]\dot{m}_{ex}k_{w,r}k_{h,P}}{P_{eixo}} \quad (3)$$

$$BSCO_2 = \frac{u_{CO_2}[CO_2]\dot{m}_{ex}k_{w,r}}{P_{eixo}} \quad (4)$$

2.1.2. Modelo Computacional

O motor de ignição por centelha originalmente alimentado com gás natural foi modelado usando o software GT Suite [18] baseado em um modelo 1D, por meio da licença disponível na UNIFEI. O *software* GT Suite é uma ferramenta importante para o desenvolvimento de máquinas térmicas, no qual é possível o desenvolvimento de modelos computacionais que auxiliam tanto na previsão de características de operação do motor quanto na otimização de parâmetros de interesse. Como é um modelo 1D, o limite as condições devem ser inseridas corretamente para reduzir erros da modelagem simplificada [19]. O motor foi modelado com a presença do turbocompressor, intercooler e EGR. Para o cálculo das emissões de NO_x foi utilizado o modelo estendido de Zeldovich, capaz de representar bem o processo de formação de NO_x a partir das seguintes reações ($O + N_2 = NO + N$, $N + O_2 = NO + O$, $N + OH = NO + H$). Para reproduzir dados como como pressão do cilindro, detonação e emissões, o modelo SITurb do GT-SUITE para a combustão turbulenta foi empregada por ser um modelo confiável para uso em misturas homogêneas.

2.2. Aplicação Veicular

A etapa de utilização de ambos combustíveis se deu então no motor F1C-CNG aplicado a um veículo

comercial leve Iveco Dayli 35-160. Este veículo é um veículo configurado para transporte de carga, com peso em ordem de marcha de 2.050 kg, entre eixos de 3.520 mm, com somente um eixo traseiro e utiliza pneus com medidas 225/75 R16,0. É equipado com uma transmissão manual de 6 velocidades e tração traseira com eixo cardã com relação de redução de 3,73:1[20]. Outras características do veículo, como área frontal e coeficiente de arrasto foram estimadas conforme metodologia de [21]. Assim, por meio do *software* GT Suite, foi feita a simulação do veículo equipado com o motor F1C-CNG em um ciclo de condução padrão WLTC (do Inglês – Ciclo de testes globalmente harmonizados para veículos leves) e um ciclo WHVC. Os procedimentos de testes WLTC e WHVC definem um padrão global para determinar a emissão de poluentes e emissões de CO₂ e visam minimizar a discrepância entre o consumo de combustível observado em condições reais condições de homologação de veículos mundialmente [22]. Assim, os parâmetros de consumo de combustível e emissões de CO₂ e NO_x foram avaliados para o veículo considerando os seguintes cenários: utilização de GNV e biometano como combustível e adotando a carga transportada pelo veículo em 0, e 1500kg. Assim, são considerados 8 casos de estudo, conforme disposto na Tabela 2.

Tabela 2. Casos selecionados para os ciclos de condução do veículo

Cenário	Combustível	Carga Transportada [kg]	Ciclo de Condução
Caso 1	GNV	0	WLTC
Caso 2	Biometano	0	WLTC
Caso 3	GNV	1500	WLTC
Caso 4	Biometano	1500	WLTC
Caso 5	GNV	0	WHVC
Caso 6	Biometano	0	WHVC
Caso 7	GNV	1500	WHVC
Caso 8	Biometano	1500	WHVC

Fonte: autoria própria

Para a simulação das condições de operação do motor, após realizada a validação do modelo computacional do motor, foi feito o *EngMap* do motor utilizando o biometano por meio do GT Suite. Para a utilização do GNV utilizou-se o *EngMap* experimental. As emissões para a atmosfera foram calculadas considerando-se as emissões após o catalisador de três vias que equipa o motor real e considerada a eficiência de conversão de 90% de NO_x para o catalisador.

2.3. Avaliação do Ciclo de Vida do GNV e Biometano

O estudo foi dividido em dois cenários, sendo eles a utilização de GNV ou biometano como combustíveis para o setor de transporte leve. Para ambos os cenários foram considerados os equipamentos utilizados no

processo de produção de cada combustível, levando em conta as emissões associadas e utilização de recursos e energia, etapas de transporte e armazenamento de cada combustível, considerando as limitações geográficas do estudo e utilização de energia e matérias primas e por fim, a aplicação do combustível no setor de transporte comercial leve brasileiro, onde considerou-se veículos equipados com o motor F1C-CNG da fabricante de motores FPT Industrial.

Os dados de inventário para a ACV foram obtidos a partir de estudos publicados anteriormente, base de dados disponíveis e validadas – como a Ecoinvent e Agrofootprint. Os fatores de emissão para a utilização dos combustíveis no motor e por fim, na aplicação do veículo foram obtidos por meio de estudos experimentais e simulação por meio do software GT-Suite. Os cálculos da ACV foram realizados com o auxílio do software Simapro, que é uma importante ferramenta para a realização de ACVs, onde foram avaliadas as categorias de impacto ambiental Potencial de Aquecimento Global e Formação de Ozônio, por meio da metodologia ReCiPe Midpoint (H). A unidade funcional deste estudo é adotada em 1 km rodado pelo veículo.

2.3.1. Produção de Biometano

A produção de biometano considerou o estudo de caso onde avaliou-se a produção de biometano a partir de dejetos suínos em uma fazenda em Minas Gerais, sudeste brasileiro [23]. O escopo do estudo cobre o armazenamento dos dejetos, estabilização da matéria orgânica, produção do biogás e posterior produção do biometano. O processo de produção do biometano passa pelas seguintes etapas: digestão anaeróbica dos dejetos em um biodigestor de tipo lagoa coberta. Após a biodigestão anaeróbia, o efluente é submetido a uma separação de líquido-sólido por meio de peneiramento. Então, é dividido em duas frações, onde a líquida é estocada em um tanque aberto por 60 dias e então utilizada como fertilizante e a sólida é compostada e aplicada ao solo. A fração gasosa (biogás) é então purificada ao nível de biometano, que é então comprimida à 200 bar e armazenado em cilindros para a aplicação final no veículo [24]. A etapa de purificação do biogás é responsável pela eliminação do

CO₂ presente na composição do biogás e no presente estudo foi liberado para a atmosfera [24]. Considerou-se uma etapa de transporte entre o produtor de biometano e o consumidor final de 300 km, sendo o transporte dos cilindros realizado em caminhões tipo *heavy duty* com capacidade de carga de 32 toneladas operando sob regime de emissões Euro VI. A Figura 2 mostra a fronteira do sistema para a produção e utilização do biometano. Os dados de inventário estão disponíveis em [23], [24] e [25].

2.3.2. Produção do GNV

O gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol) é uma parte importante para o fornecimento de gás natural para o Brasil [26]. Atualmente, de acordo com o consórcio entre ambos os países, o Brasil contratou a entrada de 20,5 m³ por dia de Gás Natural, assim, tornando o acordo um dos maiores fornecedores de gás natural para o país [27].

O gasoduto tem seu início na cidade de Santa Cruz de La Sierra e tem seu fim na cidade de Porto Alegre no Brasil e possui comprimento total de 3150 km, sendo 557 km em território boliviano e 2593 em território brasileiro.

A produção e importação de GNV da Bolívia pode ser resumida em três etapas principais:

- extração e operações *upstream*
- distribuição via gasodutos
- distribuição em trecho rodoviário, via cilindros, com pressão de armazenamento à 200 bar, em uma distância de 250 km, em caminhões tipo *heavy duty* com capacidade de carga de 32 toneladas operando sob regime de emissões Euro VI

Os dados de inventário foram obtidos da biblioteca Ecoinvent, disponível como base de dados no *software* SimaPro 9.

3. Resultados e Discussão

3.1. Avaliação de desempenho e calibração do modelo computacional

A partir dos ensaios realizados em laboratório foram feitas as análises referentes à utilização do GNV no motor F1C-CNG. Os dados experimentais foram utilizados para a validação do modelo computacional

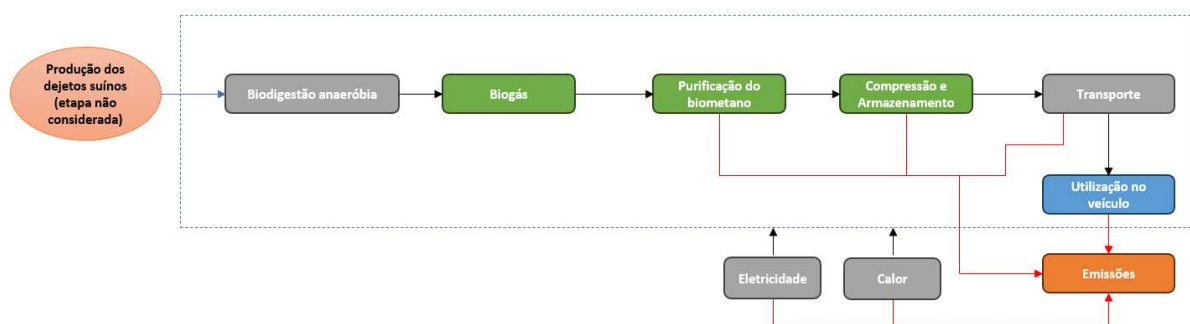


Figura 2. Fronteira do sistema de produção e utilização do biometano. Fonte: adaptado de [23] e [24].

desenvolvido em GT Suite. Os dados numéricos e experimentais do motor foram comparados com o acelerador totalmente aberto, $\lambda=1$, e em uma faixa de velocidades de 1000 rpm a 4000 rpm.

A Figura 3 ilustra a comparação do ensaio experimental com os resultados obtidos via GT-SUITE comparando o torque e a potência de freio. Como pode ser observado pela figura 2, os resultados foram consistentes e apresentam erros inferiores a 5%

As emissões de CO_2 e NO_x foram medidas experimentalmente e comparadas com a simulação desenvolvida em GT-SUITE. Ambas as medidas de gases de escape referem-se à medição anterior ao escapamento, também chamada de *EngOut*. O resultado é apresentado na Figura 2. Assim como os resultados obtidos para torque e potência, as emissões de CO_2 obtidas no modelo numérico são aceitáveis, pois apresentam uma diferença relativa com os testes experimentais, inferiores a 6,0%.

A potência de eixo, apresentada na Figura 2, apresenta um comportamento crescente com o aumento da velocidade do motor até atingir o patamar de aproximadamente 100kW entre 2500 e 3500 rpm. Após 3500 rpm experimenta-se uma redução da potência de freio, uma vez que observa-se o aumento da potência de atrito do motor, conforme discutido por [28]. A curva de torque do motor apresenta um patamar máximo de torque na faixa de 350 Nm em rotações 1500 e 2500 rpm e a eficiência térmica máxima atingida pelo motor é de 38% para a rotação de 1750 rpm que é o ponto de menor consumo específico de combustível (BSFC).

Tratando-se das emissões de CO_2 , para o caso experimental, um comportamento aproximadamente

linear até as rotações de 3000 rpm e a partir desta rotação ocorre o aumento das emissões de CO_2 . Como o motor opera com a mistura estequiométrica, a emissão de CO_2 está intimamente ligada a eficiência térmica do motor, uma vez que ela corresponde à quantidade de combustível utilizado e por consequência a quantidade de carbono disponível para a combustão. [29].

Por outro lado, as emissões de NO_x apresentam comportamento decrescente com o incremento da rotação do motor. É importante salientar que, embora ocorra aumento na concentração volumétrica de NO_x para algumas condições de operação, quando se converte para a base específica, o comportamento da emissão do gás analisado pode variar, uma vez que fatores como a eficiência térmica do motor e a potência desenvolvida passam a ser relevantes para o resultado. Após a validação do modelo computacional, foi feita então a aquisição de resultados para o combustível Biometano, avaliando-o com uma aplicação do tipo *drop in*, ou seja, nenhuma alteração do mapa de operação do motor foi feita, buscando avaliar as características de operação do motor com biometano com uma substituição direta do combustível. Os resultados também estão apresentados na Figura 3. Tratando-se das características de potência e torque, observa-se pouca variação entre os dados experimentais para o GNV e biometano simulado. Entretanto, pode-se notar o maior consumo específico do biometano em relação ao GNV em algumas faixas de rotação, que está ligado ao maior consumo de combustível para faixas de rotação mais baixas do motor. Tratando-se das emissões de CO_2 , observou-se redução nas emissões de CO_2 para o biometano em em

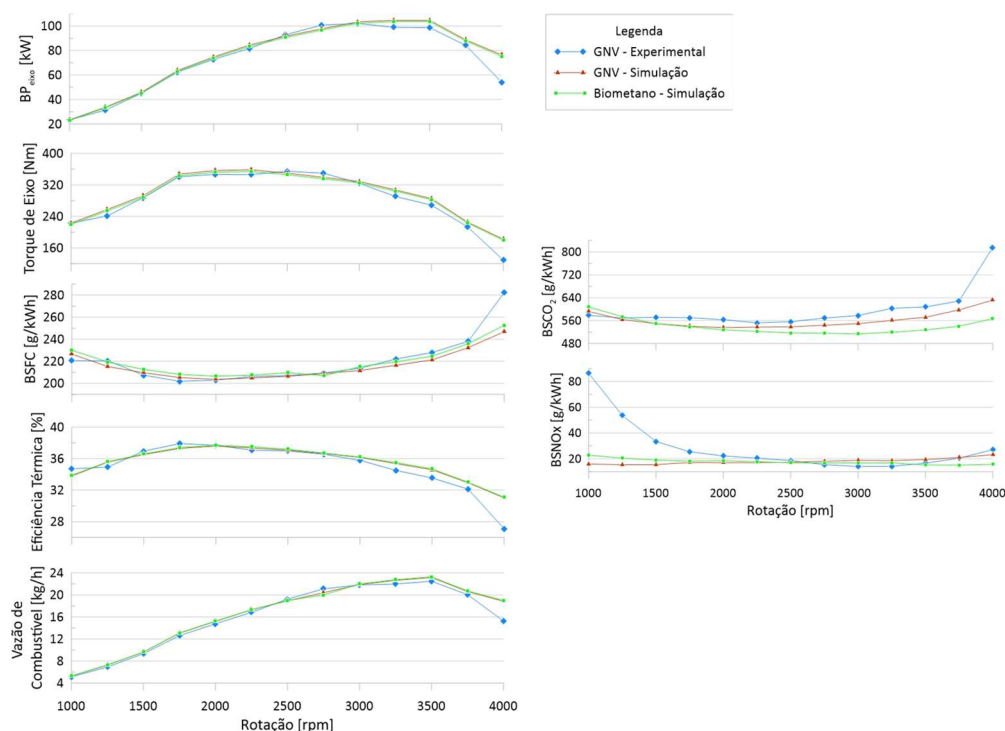


Figura 3. Resultados Experimentais e resultados numéricos para a avaliação de desempenho do motor FIC-CNG. Fonte: autoria própria.

algumas das rotações avaliadas. Esta redução está relacionada com a composição do biometano que possui menos moléculas de carbono disponíveis. Isso pode ser verificado a partir da composição do combustível, onde observa-se a ausência de CO_2 na composição do biometano e a presença de dióxido de carbono na composição do GNV. Tratando de emissões de NO_x , pode-se notar que ocorre redução das emissões desse gás para algumas condições de operação, mesmo com a substituição direta do combustível no motor, o que vai de acordo com outros resultados encontrados na literatura [30].

Assim, observa-se que a substituição do biometano é uma prática que se torna viável, tanto do ponto de vista de desempenho do motor, uma vez que não são notadas reduções significativas de desempenho e ainda é possível obter-se reduções das emissões de CO_2 e NO_x . Ainda, com otimizações no mapa de ignição do motor, como de avanço de ignição é possível obter melhores resultados de potência e emissões [31].

3.2. Aplicação dos combustíveis no veículo

Após realizados os procedimentos de calibração do modelo computacional em GT Suite, foi realizada a simulação da aplicação veicular dos combustíveis estudados, em um veículo modelo Iveco Dayli 35-160. Os combustíveis selecionados foram o GNV e biometano, considerando o veículo sem nenhuma carga transportada e com uma carga de 1500 kg. Os ciclos de condução adotados foram o WLTP e WHVC. A Tabela 3 apresenta os resultados de consumo de combustível, emissão de NO_x e CO_2 para os casos avaliados.

Pode-se observar uma diferença para todas as grandezas avaliadas quando se compara os dois ciclos de condução. Tomando como base os casos 1 e 5, onde utiliza-se o GNV e o veículo não transporta nenhuma

carga, observa-se que o ciclo de condução WHVC apresenta menor consumo de combustível e emissão de gases de escape que quando comparado ao WLTC. Tratando-se da variação da carga transportada pelo veículo, observa-se o aumento do consumo de combustível e emissões de gases de escape com a passagem da condição de veículo vazio para a condição de transporte de 1500 kg. Isso pode ser explicado pela maior necessidade de desenvolvimento de potência pelo motor para atingir as velocidades estabelecidas pelo ciclo padrão de condução. Por fim, para todas condições avaliadas, nota-se a redução das emissões de CO_2 e NO_x quando se utiliza o biometano. Conforme discutido anteriormente, o biometano é capaz de reduzir as emissões de ambos os gases em determinadas situações de carga e rotação do motor. Assim, os ciclos de condução selecionados são favoráveis à utilização do biometano do ponto de vista de emissões. Entretanto, é possível notar que ocorre o aumento do consumo de combustível ao se utilizar o combustível renovável. Os resultados mostraram redução da emissão de CO_2 em até 11% e aumento do consumo de combustível de até 18% quando se faz a substituição do GNV por biometano.

3.3. Avaliação de Ciclo de Vida

A Figura 4 apresenta os resultados para a avaliação do ciclo de vida nos 8 casos estudados, que foi conduzida do poço à roda (WTW, do Inglês, well-to-wheel). Inicialmente, é possível notar que, para as quatro categorias avaliadas, potencial de Aquecimento Global (Figura 4a) e Formação de Ozônio (Figura 4b) a aplicação do GNV como combustível no veículo possui maior potencial geral do que o biometano.

Tratando das emissões totais de carbono equivalente para os cenários de utilização do GNV, nota-se que as

Tabela 3. Resultados de consumo de combustível, emissão de CO_2 e NO_x para a utilização de GNV e biometano em um veículo em ciclo de condução WLTC e WHVC.

Variável	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5	CASO 6	CASO 7	CASO 8
Ciclo De Condução	WLTC	WLTC	WLTC	WLTC	WHVC	WHVC	WHVC	WHVC
Combustível	GNV	Biomet	GNV	Biomet	GNV	Biomet	GNV	Biomet
Carga Transportada [kg]	0	0	1500	1500	0	0	1500	1500
Distância Percorrida [m]	23077	23050	23092	23077	19949	19887	19984	19964
Volume de combustível Consumido [m³]	2,94	3,31	3,23	3,54	2,66	3,02	2,86	3,36
Emissão Total de CO_2 [g]	6135	5463	6804	6053	5547	4995	6026	5643
Emissão Total de NO_x [g]	17	1,6	17,2	1,8	17,6	1,5	18,1	1,7
Consumo Médio de Combustível [m³/km]	0,128	0,144	0,140	0,154	0,133	0,152	0,143	0,168
Emissão de CO_2 Média [g/km]	265,85	237,01	294,65	262,30	278,06	251,17	301,54	282,66
Emissão de NO_x Média [g/km]	0,737	0,069	0,745	0,078	0,882	0,075	0,906	0,085

Fonte: autoria própria

etapas de distribuição via gasodutos, transporte terrestre e utilização final no veículo apresentam as maiores parcelas de contribuição. A etapa de distribuição do GNV apresenta parcela significativa de impacto uma vez que considera as emissões associadas ao processo de produção do gasoduto e compressão do GNV para injeção na rede de distribuição, que utiliza energia elétrica enraizada na matriz energética brasileira, que, embora fortemente renovável, ainda depende da utilização de recursos fósseis. Além disso, durante os processos de transporte, extração e armazenamento do combustível são sujeitos a vazamentos para a atmosfera e, como o GNV, assim como o biometano possuem principalmente CH_4 em sua composição, que é um gás com poder de aquecimento global maior que o CO_2 , fazendo com que essas etapas tenham um grande peso na categoria de impacto avaliada. As etapas de transporte e aplicação final no veículo estão fortemente atreladas à utilização do recurso fóssil como combustível. Como o transporte terrestre é feito por meio de caminhões, faz-se necessária a utilização de diesel como combustível. Por fim, a aplicação do GNV como combustível no veículo está associada à emissão de CO_2 e outros gases com potencial de aquecimento global para a atmosfera. Avaliando o cenário de potencial de aquecimento global para o biometano, nota-se que as fases do produto com maior contribuição são as etapas de digestão anaeróbia da matéria prima suína, a compressão do biometano e a etapa de transporte do biometano para o consumidor final. A etapa de digestão anaeróbia necessita de energia e calor para o controle do processo. A geração de calor está atrelada à utilização de gás natural como combustível. Assim, ocorre emissão de carbono atrelada à geração de energia. Além disso, conforme discutido anteriormente, esta etapa está sujeita à emissão de metano para a atmosfera, impactando negativamente esta categoria de impacto [23]. Semelhante ao GNV, a compressão do biometano está atrelada à matriz energética e, portanto, às emissões associadas a ela. Por

fim, o transporte final do biometano é feito por meio de caminhões que utilizam diesel como combustível, acarretando assim na emissão de CO_2 pelo processo de combustão. Neste estudo considerou-se a emissão de CO_2 no motor como sendo do tipo biogênica [7]. Comparando os resultados totais de emissão de CO_2 eq, pode-se atingir uma redução máxima de até 68% do impacto de aquecimento global substituindo-se o GNV por biometano, o que representa uma redução absoluta de 0,33 kg de CO_2 eq por km rodado por um veículo. Atualmente, o GNV constitui 2,2% da energia total utilizada no país [32], apresentando um consumo total de 210 Mm^3 de GNV por ano [33]. Segundo dados de [34], atualmente o Brasil produz cerca de 400 mil m^3 de biometano por dia. Assim, do ponto de vista ambiental, é possível atingir-se grandes reduções das emissões de carbono substituindo-se o GNV por biometano.

A Figura 4b apresenta a categoria de impacto de Formação de Ozônio prejudicial à saúde humana. Conforme discutido por [13], a formação de ozônio está atrelada principalmente à processos que envolvem a emissão de óxidos de nitrogênio para a atmosfera. Assim, nota-se grande impacto em fases do produto que envolvem principalmente à utilização de combustíveis para a combustão, como é o caso das etapas de transporte, que utilizam diesel nos caminhões de transporte, e a aplicação final dos combustíveis no veículo estudado. Vale notar que a utilização do GNV no motor F1C-CNG nos ciclos de condução estudados apresenta grande impacto devido ao comportamento de emissões para o motor. Como foi observado na figura 3, para baixas rotações, ocorre o aumento da emissão de NO_x no motor, o que não foi observado no modelo computacional. Assim, após a submissão do veículo ao ciclo de condução, nota-se baixos valores de emissão de NO_x para o biometano. Além disso, nota-se grande impacto também por parte da distribuição do GNV, contribuição essa advinda da utilização de energia elétrica para a compressão do GNV e injeção na rede de gasodutos.

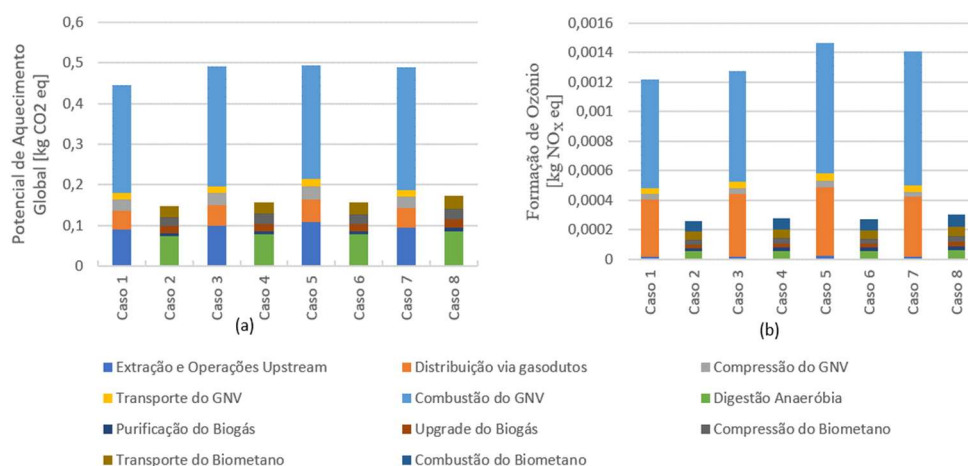


Figura 4. Impactos ambientais associados (a) Potencial de Aquecimento Global e (b) Formação de Ozônio

4. Conclusões

O presente estudo avaliou o potencial da utilização do biometano produzido a partir de resíduos suínos no Brasil como substituto do GNV em veículos comerciais leves do setor de transporte brasileiro. O estudo foi composto de uma avaliação experimental da aplicação do GNV como combustível em um motor de combustão interna de ignição por centelha, sobrealimentado e equipado com um catalisador de três vias, modelo F1C-CNG, da fabricante FPT Industrial. Foi desenvolvido um modelo numérico do motor em ambiente GT Suite para o GNV que foi validado com base nos resultados experimentais na bancada de ensaios disponível na UNIFEI. Após a validação dos dados, por meio da simulação numérica, foi elaborado o mapa de operação do motor utilizando o biometano por meio da substituição direta, sem alterações na condição de operação do motor. Com os mapas de operação do motor foram feitas simulações de ciclos de condução de um veículo Iveco Dayli 35-160 sob as normas WLTC e WHVC. Os resultados de consumo de combustível e emissões de CO₂ e NO_x foram utilizados para compor a avaliação do ciclo de vida do poço à roda de ambos os combustíveis.

Os resultados deste estudo apontaram que:

- A substituição direta do GNV por biometano é possível, sem a realização de adaptações no motor, pois é possível manter os mesmos níveis de torque e potência para o motor. Observou-se um aumento do consumo específico de combustível do motor utilizando-se o biometano.
- A utilização do biometano é capaz de promover a redução da emissão de CO₂ e NO_x em algumas condições de operação do motor.
- A simulação numérica do biometano apresentou consumo de combustível levemente maior para quase todas as rotações avaliadas no modelo para a curva de potência do motor.
- Tratando-se casos de aplicação do combustível em condições de rodagem do veículo, observou-se a redução das emissões totais de CO₂ e NO_x com a utilização de biometano em todos casos avaliados, quando comparado com o GNV. A redução da emissão de CO₂ nos ciclos de condução podem chegar até 11%. Entretanto, houve aumento no consumo de combustível de até 18%.
- A avaliação do ciclo de vida mostrou promissora redução do potencial de aquecimento global do biometano, ocasionando redução das emissões de CO₂ eq em até 68% quando comparado ao GNV.

Conforme discutido previamente, o Brasil possui grande potencial para o desenvolvimento do biometano como combustível no setor de transportes. Atualmente, o país se encontra em uma situação de subutilização deste recurso, produzindo somente cerca de 10% da capacidade total de biometano disponível [34]. Assim, é possível com o fortalecimento da produção,

distribuição e incentivo ao uso deste combustível renovável, que metas de descarbonização sejam atingidas, ocorra a geração de novos empregos neste setor e que também ocorra melhoria geral na qualidade de vida da população brasileira e mundial.

4.1. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – FUNDEP pelo apoio à pesquisa por meio do projeto de pesquisa Rota2030/Linha V (27192*62). Também à FAPEMIG (Projetos: Proc. APQ-01763-23 e RED-00090-21) e CNPq: Proc. N° 308567/2023-4) e Processo CNPq: 442662/2023-8.

5. Referências

- [1] EPE. Balanço Energético Nacional. 2023.
- [2] Ghesti G. Preparação e caracterização de catalisadores para produção de biocombustíveis 2011.
- [3] Empresa de Pesquisa Energética. Demanda Energética do Setor de Transportes 2022:1–37.
- [4] Zang JW, Martins KF, Da Fonseca-Zang WA. Life Cycle inventory for biomethane as a diesel substitute for the Brazilian ethanol industry - Case study. *Energy Procedia* 2018;153:444–9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.048>.
- [5] Owczuk M, Matuszewska A, Kruczyński S, Kamela W. Evaluation of using biogas to supply the dual fuel diesel engine of an agricultural tractor. *Energies* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/en12061071>.
- [6] Van Mierlo J, Messagie M, Rangaraju S. Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment. *Transp Res Procedia* 2017;25:3435–45. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244>.
- [7] Madhusudhanan AK, Na X, Boies A, Cebon D. Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost. *Transp Res Part D Transp Environ* 2020;87:102530. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102530>.
- [8] Lo Faro M, Cantane DA, Naro F. In the path for creating Research-to-business new opportunities on green hydrogen between Italy and Brazil. *Int J Hydrogen Energy* 2022;48:11876–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.089>.
- [9] Ishaq H, Dincer I, Crawford C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *Int J Hydrogen Energy* 2022;47:26238–64. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>.
- [10] Head M, Magnan M, Kurz WA, Levasseur A, Beauregard R, Margni M. Temporally-differentiated biogenic carbon accounting of wood building product life cycles. *SN Appl Sci* 2021;3:1–17. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03979-2>.
- [11] CNT. Painel CNT de Transporte Rodoviário 2023. <https://www.cnt.org.br/painel-cnt-transporte-rodoviario>.

- [12] Roque LF de A. Modelagem E Análise Do Ciclo De Vida Da Produção E Comercialização De Diesel Verde (Hvo) E Sua Aplicação No Modo Dual-Fuel Com Etanol Em Motores De Ignição Por Compressão. Universidade Federal de Itajubá, 2022.
- [13] Roque LFA, da Costa RBR, de Souza TAZ, Coronado CJR, Pinto GM, Cintra AJA, et al. Experimental analysis and life cycle assessment of green diesel (HVO) in dual-fuel operation with bioethanol. *J Clean Prod* 2023;389:135989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135989>.
- [14] Pinto GM, de Souza TAZ, da Costa RBR, Roque LFA, Frez GV, Coronado CJR. Combustion, performance and emission analyses of a CI engine operating with renewable diesel fuels (HVO/FARNESANE) under dual-fuel mode through hydrogen port injection. *Int J Hydrogen Energy* 2023;48:19713–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.020>.
- [15] da Costa RBR, Roque LFA, de Souza TAZ, Coronado CJR, Pinto GM, Cintra AJA, et al. Experimental assessment of renewable diesel fuels (HVO/Farnesane) and bioethanol on dual-fuel mode. *Energy Convers Manag* 2022;258:115554. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115554>.
- [16] GETEC. Um Segundo Projeto da UNIFEI é selecionado no Programa Rota 2030 e permitirá investimentos em infraestrutura e formação de estudantes 2022. <https://getec.unifei.edu.br/um-segundo-projeto-da-unifei-e-selecionado-no-programa-rota-2030-e-permitira-investimentos-em-infraestrutura-e-formacao-de-estudantes/> (accessed June 24, 2024).
- [17] ABNT AB de NT. NBR ISO 8178-1 : Motores alternativos de combustão interna - Medição da emissão de gases de exaustão. Parte 1: Medição das emissões de gases e material particulado em banco de ensaio. 2012.
- [18] Technologies G. Manual GT-SUITE v2023 2023.
- [19] Sun X, Liu H, Duan X, Guo H, Li Y, Qiao J, et al. Effect of hydrogen enrichment on the flame propagation, emissions formation and energy balance of the natural gas spark ignition engine. *Fuel* 2022;307:121843. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121843>.
- [20] Iveco Group. Daily 35-160 n.d.:2. https://www.iveco.com/Brasil/Produtos/Documents/I-V-L129_Lamina Daily 35-160 Euro VI.pdf (accessed June 24, 2024).
- [21] Ben-Chaim M, Shmerling E, Kuperman A. Analytic modeling of vehicle fuel consumption. *Energies* 2013;6:117–27. <https://doi.org/10.3390/en6010117>.
- [22] Tekin M, Karamangil Mİ. Comparative analysis of equivalent circuit battery models for electric vehicle battery management systems. *J Energy Storage* 2024;86:111327. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111327>.
- [23] Hollas CE, do Amaral KGC, Lange MV, Higarashi MM, Radis Steinmetz RL, Barros EC, et al. Life cycle assessment of waste management from the Brazilian pig chain residues in two perspectives: Electricity and biomethane production. *J Clean Prod* 2022;354:131654. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131654>.
- [24] Amato A, Tsigkou K, Becci A, Beolchini F, Ippolito NM, Ferella F. Life Cycle Assessment of Biomethane vs. Fossil Methane Production and Supply. *Energies* 2023;16:4555. <https://doi.org/10.3390/en16124555>.
- [25] Tagliaferri C, Clift R, Lettieri P, Chapman C. Liquefied natural gas for the UK: a life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 2017;22:1944–56. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1285-z>.
- [26] Chávez-Rodríguez MF, Garaffa R, Andrade G, Cárdenas G, Szklo A, Lucena AFP. Can Bolivia keep its role as a major natural gas exporter in South America? *J Nat Gas Sci Eng* 2016;33:717–30. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.008>.
- [27] Epbr. Petrobras reduz volumes e novata entra em contratação firme do gasbol para 2024 2024. <https://epbr.com.br/petrobras-reduz-volumes-e-novata-entra-em-contratacao-firme-do-gasbol-para-2024/> (accessed June 24, 2024).
- [28] Nascimento HC. MODELO PARA PREVISÃO DO TRABALHO DE ATRITO NUM MOTOR DE COMBUSTÃO. INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO, 2017.
- [29] da Costa RBR. Estudo Experimental da Tecnologia Dual-Fuel em Motor de Combustão Interna Utilizando Biogás, GNV e Etanol 2017:158.
- [30] Lim C, Kim D, Song C, Kim J, Han J, Cha J-S. Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases. *Appl Energy* 2015;139:17–29. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.084>.
- [31] da Costa RBR, Valle RM, Hernández JJ, Malaquias ACT, Coronado CJR, Pujatti FJP. Experimental investigation on the potential of biogas/ethanol dual-fuel spark-ignition engine for power generation: Combustion, performance and pollutant emission analysis. *Appl Energy* 2020;261:114438. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114438>.
- [32] Velasquez CE, M.Chaves G, M.Motta D, Bitencourt G. L. e Estanislau F. Carbon dioxide life cycle assessment for Brazilian passenger cars fleet towards 2050. *Renew Sustain Energy Rev* 2024;189:113952. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113952>.
- [33] EPE E de PE. BEN Relatório Síntese 2023. 2023. <https://doi.org/10.5040/bci-0002.0016>.
- [34] EPBR. Brasil tem 27 novas plantas de biometano previstas para os próximos anos 2022. <https://epbr.com.br/brasil-tem-27-novas-plantas-de-biometano-previstas-para-os-proximos-anos/> (accessed June 26, 2024).