



IMPACTO NAS EMISSÕES DE POLUENTES DEVIDO À SUBSTITUIÇÃO DE DIESEL POR HIDROGÊNIO VERDE EM UMA FROTA DE ÔNIBUS – ESTUDO DE CASO

IMPACT ON POLLUTANTS EMISSIONS DUE TO THE REPLACEMENT OF DIESEL WITH GREEN HYDROGEN IN A BUS FLEET – CASE STUDY

Maria Luiza Silvia Gonçalves, Antonella Lombardi Costa, Ana Clara Vilar Pires

Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Engenharia Nuclear – Escola de Engenharia

maria.lu.goncalvess@gmail.com; antonella@nuclear.ufmg.br; anavilarufmg@gmail.com

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos do setor de transporte representam desafios significativos para a mitigação das mudanças climáticas, mesmo em sistemas de pequena escala. Este estudo estimou as emissões da frota de ônibus do transporte interno da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), atualmente operada a diesel, utilizando o método bottom-up com base nos limites do PROCONVE para poluentes regulados. Os resultados mostraram emissões de 16,36 kg/ano de CO, 7,15 kg/ano de HC, 1,50 kg/ano de CH₄, 40,15 kg/ano de NO_x, 0,87 kg/ano de material particulado (MP) e 4,94 kg/ano de N₂O. As emissões de dióxido de carbono (CO₂), não reguladas pelo PROCONVE, foram calculadas separadamente, totalizando aproximadamente 210,7 toneladas anuais. Simulações realizadas com o software HOMER Pro para uma possível substituição da frota por veículos movidos a hidrogênio verde mostraram que não ocorreriam emissões diretas de CO₂, evidenciando o potencial de mitigação ambiental dessa alternativa. Os resultados reforçam a importância de políticas institucionais de descarbonização do transporte universitário e destacam o papel estratégico da UFMG na implementação de soluções energéticas de baixo carbono.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Emissões atmosféricas; Transporte Sustentável; Homer Pro.

ABSTRACT

Greenhouse gas and atmospheric pollutant emissions from the transport sector pose significant challenges for climate change mitigation, even in small-scale systems. This study estimated the emissions of the bus fleet operating within the Federal University of Minas Gerais (UFMG), currently powered by diesel, using a bottom-up approach based on PROCONVE limits for regulated pollutants. The results indicated emissions of 16.36 kg/year of CO, 7.15 kg/year of HC, 1.50 kg/year of CH₄, 40.15 kg/year of NO_x, 0.87 kg/year of particulate matter (PM), and 4.94 kg/year of N₂O. Carbon dioxide (CO₂) emissions, not regulated by PROCONVE, were calculated separately, totaling approximately 210.7 tons per year. Simulations performed with HOMER Pro, considering a possible replacement of the fleet with green hydrogen-powered vehicles, showed that no direct CO₂ emissions would occur, highlighting the environmental mitigation potential of this alternative. The findings reinforce the importance of institutional policies for the decarbonization of university transport and emphasize UFMG's strategic role in implementing low-carbon energy solutions.

Keywords: Green Hydrogen; Atmospheric Emissions; Sustainable Transport; HOMER Pro



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

1 INTRODUÇÃO

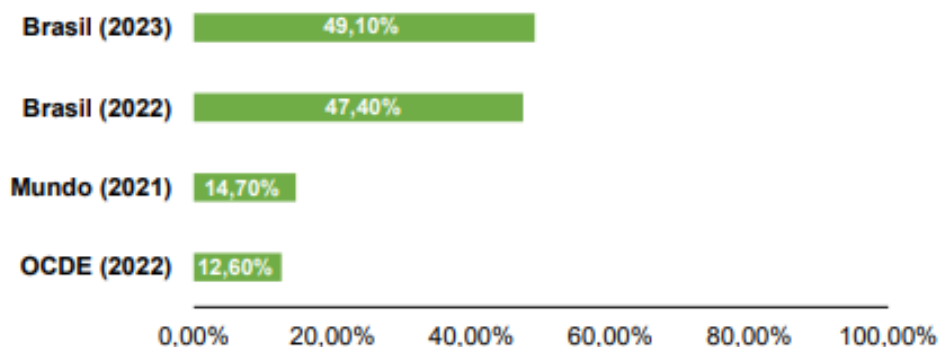
As emissões de gases de efeito estufa têm provocado alterações climáticas perceptíveis em escala global, com impactos desproporcionais sobre os países em desenvolvimento, que geralmente dispõem de menos recursos técnicos, institucionais e financeiros para lidar com tais desafios (ABC, 2013). Essas mudanças se manifestam por meio do aumento da frequência e da intensidade de eventos extremos, como secas prolongadas, inundações, ondas de calor e variações anômalas nos padrões de precipitação. O aumento contínuo da temperatura média do planeta intensifica esses fenômenos, muitos dos quais apresentam efeitos irreversíveis (IPCC, 2023).

Para mitigar esses impactos, países têm firmado compromissos multilaterais visando à redução de emissões e à estabilização climática. As conferências globais refletem esse esforço conjunto, reconhecendo, porém, as diferentes responsabilidades históricas e capacidades econômicas (DGAP, 2023). Nesse cenário, a transição energética tornou-se central, sobretudo em setores altamente dependentes de combustíveis fósseis, como transporte e geração elétrica (EPE, 2023).

Nas principais economias mundiais, a matriz energética ainda é predominantemente baseada em fontes não renováveis, com significativa dependência de combustíveis fósseis, como carvão mineral, gás natural e derivados do petróleo (EPE, 2024a). Em contraste, o Brasil apresenta uma configuração diferenciada, com elevada participação de fontes renováveis em sua matriz energética. Essa característica se deve, sobretudo, à predominância da energia hidráulica na geração de eletricidade, além do crescimento expressivo das fontes eólica e solar nos últimos anos (EPE, 2024b).

Conforme ilustrado na Figura 1, em 2023 as renováveis representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE) do Brasil, contra 12,6% nos países da OCDE em 2022 e 14,7% na média global em 2021. A OIE corresponde ao total de energia primária disponível para consumo, incluindo produção, importações e variações de estoque, e reflete a trajetória consistente de transição energética brasileira (EPE, 2024b).

Figura 1 - Participação das renováveis na OIE. (EPE, 2024b)



Apesar desses avanços, os dados da Figura 2 revelam que as fontes não renováveis ainda correspondem à maioria da matriz energética nacional, com 50,9% da OIE. Dentre essas, o petróleo e seus derivados representam 35,1%, seguido pelo gás natural



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

(9,6%) e o carvão mineral (4,4%). Essa composição indica que, embora o país esteja avançando na incorporação de fontes limpas, ainda há significativa dependência de combustíveis fósseis, o que impõe desafios à transição energética e à consecução das metas climáticas de longo prazo (EPE, 2024b).

Figura 2 -. Repartição da oferta Interna de energia, 2023 (EPE, 2024b)



Nesse contexto, a diversificação da matriz energética com fontes de baixa emissão revela-se imprescindível, emergindo o hidrogênio verde como uma das soluções mais promissoras, particularmente para setores de alta intensidade em carbono, como transporte e geração de eletricidade. Produzido por eletrólise da água com eletricidade renovável, o hidrogênio verde possibilita o atendimento da demanda energética sem emissões diretas de gases de efeito estufa (Gonçalves, 2025).

2 METODOLOGIA

Neste estudo, as emissões atmosféricas da frota de ônibus do transporte interno da UFMG, atualmente operada a diesel, foram estimadas com base nos limites e diretrizes estabelecidos pelo PROCONVE, considerando os principais poluentes atmosféricos e a intensidade de uso dos veículos. A análise incluiu uma comparação com simulações do software HOMER Pro, avaliando a viabilidade de uma possível substituição da frota por veículos movidos a hidrogênio verde. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) foram tratadas separadamente, dada sua relevância como principal componente do balanço de carbono da frota e como indicador central da contribuição do transporte interno para as emissões de gases de efeito estufa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As emissões atmosféricas da frota de ônibus do transporte interno da UFMG foram estimadas pelo método bottom-up, utilizando dados de atividade, como a quilometragem anual percorrida por cada veículo (Tabela 1), para maior precisão operacional. Adotou os valores-limite da fase P-8 do PROCONVE (Resolução CONAMA nº 490/2018), alinhados às normas



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Euro VI, correspondentes aos máximos admissíveis de emissão para ônibus urbanos. Embora esses limites não representem necessariamente as emissões reais em operação, sua utilização é justificada pela ausência de medições diretas e pela compatibilidade com o modelo veicular empregado (Apache Vip V) (Gonçalves, 2025).

Tabela 1 - Quilometragem diária das linhas internas UFMG (Gonçalves, 2025).

Linha	Quilometragem diária
1	165
2	280
3	230
4	148
Total	823

Com base nos parâmetros do PROCONVE P-8 e nas emissões máximas permitidas por poluente, estimaram-se os impactos associados a cada substância emitida pela frota a diesel, conforme Tabela 2. Para este estudo, consideraram-se os poluentes regulados: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HC), metano (CH₄), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP) e óxido nitroso (N₂O). As emissões de CH₄ e N₂O foram convertidas para dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) por meio de fatores de Potencial de Aquecimento Global (GWP) recomendados pelo IPCC [1]. Na simulação da substituição da frota por veículos movidos a hidrogênio verde, realizada no software HOMER Pro, as emissões diretas desses poluentes foram zeradas, refletindo a ausência de emissões atmosféricas durante a operação do sistema proposto, que utiliza energia renovável sem combustão de combustíveis fósseis (Gonçalves, 2025).

Tabela 2 - Emissões atmosféricas de poluentes locais UFMG (Gonçalves, 2025).

Fase	Linha	km/ano	CO (kg/ano)	HC (kg/ano)	CH ₄ (kg/ano)	NO _x (kg/ano)	MP (kg/ano)	N ₂ O (kg/ano)
P8	1; 2; 3 e 4	164.600	16,36	7,15	1,50	40,15	0,87	4,94

As emissões totais de NO_x foram estimadas em 40,15 kg/ano, enquanto as de monóxido de carbono (CO) alcançaram 16,36 kg/ano. Os hidrocarbonetos totais (HC) e o metano (CH₄) também foram quantificados, sendo o CH₄ responsável por 1,50 kg/ano, equivalente a 37,5 kg de CO₂-eq devido ao seu potencial de aquecimento global 25 vezes superior ao do CO₂. A emissão anual de óxido nitroso (N₂O), estimada em 4,94 kg/ano, corresponde a 1.472,12 kg de CO₂-eq, totalizando uma contribuição conjunta desses gases de 1.509,62 kg de CO₂-eq [74]. No caso do material particulado (MP), a frota apresentou emissão anual de 0,87 kg, valor relativamente baixo em massa, mas de alta relevância para a saúde humana. Partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}) podem penetrar nos alvéolos pulmonares, promovendo inflamação sistêmica, aumento da morbimortalidade por doenças respiratórias e potencial efeito carcinogênico (Gonçalves, 2025).



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Em relação às emissões de dióxido de carbono (CO₂) da frota de ônibus a diesel, estas foram estimadas separadamente, dada sua relevância como principal gás de efeito estufa proveniente da queima de combustíveis fósseis, utilizando fatores de emissão específicos por quilômetro ou litro percorrido, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 - Fator médio de emissão de CO₂ para ônibus urbanos (Gonçalves, 2025).

Categoria	Emissões
Ônibus	1,28 kg de CO ₂ /km
	3,2 kg de CO ₂ /L

As emissões de CO₂ da frota de ônibus do transporte interno da UFMG foram estimadas em 210,7 toneladas, valor significativo mesmo para um sistema de transporte de pequena escala. Esse montante equivale a aproximadamente 1.204 km percorridos por um veículo leve a gasolina e exigiria o plantio de cerca de 10.033 árvores para compensação anual, ocupando cerca de 1,03% da área total da universidade. Em simulações realizadas com o software HOMER Pro, considerando a substituição da frota por veículos movidos a hidrogênio verde, não foram contabilizadas emissões diretas de CO₂. Considerando um mercado de carbono com preço médio de US\$ 4 por tonelada de CO₂, essas emissões representariam um passivo ambiental de aproximadamente US\$ 843 (R\$ 4.467 em setembro/2025), evidenciando tanto o impacto ambiental quanto o econômico da frota e reforçando a relevância de políticas institucionais de mitigação e descarbonização (Gonçalves, 2025).

4 CONCLUSÕES

As estimativas de emissões de poluentes atmosféricos e de CO₂ da frota de ônibus do transporte interno da UFMG evidenciam impactos ambientais relevantes mesmo em um sistema de pequena escala, destacando a necessidade de monitoramento contínuo e de medidas de mitigação. O estudo ressalta o papel estratégico da universidade como espaço para implementação de soluções energéticas de baixo carbono, mostrando que a substituição por veículos movidos a hidrogênio verde poderia reduzir significativamente as emissões atmosféricas, contribuir para a descarbonização do transporte interno e fortalecer políticas institucionais de sustentabilidade, promovendo práticas ambientalmente responsáveis no âmbito acadêmico.

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio direto e indireto ao projeto.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

REFERÊNCIAS

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS- ABC. *As mudanças climáticas e os países em desenvolvimento.* 2013. Disponível em: <https://www.abc.org.br/2013/11/22/as-mudancas-climaticas-e-os-paises-em-desenvolvimento/>. Acesso em: 26 set. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report.* 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/?utm_source. Acesso em: 26 set. 2025.

GERMAN COUNCIL ON FOREIGN RELATIONS- DGAP. *Common But Differentiated Responsibilities (CBDR).* 2023. Disponível em: <https://dgap.org/en/research/glossary/climate-foreign-policy/common-differentiated-responsibilities-cbdr>. Acesso em: 26 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE 2023. *Mudanças climáticas e transição energética.* Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdnenergia/clima-e-energia>. Acesso em: 26 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE 2024a. *Matriz energética e elétrica.* Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdnenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 26 set. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE 2024b. *Relatório Síntese do Balanço Energético.* Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 26 set. 2025.

GONÇALVES, M. L. S. *Aplicabilidade do hidrogênio verde gerado por energia solar fotovoltaica para o transporte público: modelagem e estudo de caso.* 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.