



ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO₂ PELA INTRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NA FROTA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE BELO HORIZONTE

Maria L. S. Gonçalves¹, Antonella L. Costa¹, Carlos E. Velasquez¹, Douglas S. Oliveira¹, Gustavo N. P. Moura²

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Nuclear, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Bloco 4- Pampulha, CEP 31270-901 Belo Horizonte, MG - Brasil;

² Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Produção Campus Universitário Morro do Cruzeiro, s/n, CEP 35400-000 Ouro Preto, MG - Brasil
maria.lu.goncalvess@gmail.com, antonella@nuclear.ufmg.br, carlosvelcab@nuclear.ufmg.br, douglasilva.olv@gmail.com, gustavo.moura@ufop.edu.br

Palavras-Chave: Hidrogênio Verde, Transporte Público, Emissões de CO₂, Descarbonização, Sustentabilidade Urbana

RESUMO

A introdução do hidrogênio no sistema de transporte público oferece uma perspectiva promissora para a redução significativa das emissões de poluentes atmosféricos na cidade. Nesse sentido, conforme apresentado nesse trabalho, foi delineada a proposta de substituir gradativamente 10% da frota por ônibus móveis a hidrogênio da cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais, até 2040, em consonância com as metas globais de proteção ambiental e o Plano Local de Ação Climática (PLAC) desenvolvido pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH). Em um cenário projetado de 2026-2040, Belo Horizonte poderia evitar a emissão de 10.170 toneladas de CO₂, evidenciando os benefícios dessa transição, conforme mostram os resultados apresentados neste trabalho. Além de contribuir para a redução das emissões de CO₂, essa transformação impulsiona a tecnologia e consolida a infraestrutura urbana de Belo Horizonte, colocando a capital mineira como um modelo de sustentabilidade no setor de transporte público.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais questões no âmbito do desenvolvimento sustentável é o fornecimento de energia. As crises do petróleo de 1973 e 1979 provocaram um impacto global, afetando a economia e a segurança energética de diversos países [1]. No Brasil, tais eventos evidenciaram a necessidade de diversificação da matriz energética, conduzindo o país a intensificar pesquisas e a incorporar fontes alternativas de energia [1]. Apesar desses avanços, os combustíveis fósseis, como gasolina e diesel, continuam sendo amplamente utilizados, suscitando debates intensos acerca de seus impactos ambientais. O consumo de energia em 2023 no setor de transportes apresentou um aumento de 4,4% em relação ao ano anterior, com destaque para o crescimento no uso de biodiesel (+19,2%), gasolina (+6,9%) e etanol (+6,3%) [2]. O óleo diesel, no entanto, permanece como a principal fonte de energia, representando 43,4% do consumo, seguido da gasolina (27,8%) [2]. O uso crescente desses combustíveis fósseis nas últimas décadas resultou em consequências graves, como o aquecimento global, a chuva ácida e a destruição da camada de ozônio [3].

Essa problemática é corroborada pelos dados globais de emissões. Em 2022, verificou-se um aumento de 3% nas emissões globais de CO₂ provenientes do setor de transporte em comparação ao ano anterior [4]. Historicamente, as emissões desse setor cresceram a uma taxa média anual de 1,7% entre 1990 e 2022, superando o crescimento de todos os outros setores de uso final, com



exceção da indústria, que apresentou um aumento similar de 1,7% [4]. Para alinhar-se com o objetivo de Emissões Líquidas Zero (NZE) até 2050, é essencial reduzir as emissões de CO₂ do setor de transporte em mais de 3% ao ano até 2030 [4]. A realização dessas metas exigirá, além da implementação de regulamentações rigorosas e incentivos fiscais, investimentos substanciais em infraestrutura que permitam a operação de veículos de baixa e zero emissão.

Nesse sentido, o uso do hidrogênio verde tem ganhado notoriedade como vetor energético no cenário de transportes públicos urbanos, enquanto alternativa mais limpa e agregadora de qualidade ambiental e social [5]. O hidrogênio verde é produzido por eletrólise da água usando eletricidade proveniente de fontes renováveis, como solar e eólica, não tendo emissões diretas de CO₂ durante sua produção. Sendo assim, é caracterizado por sua baixa densidade e elevada capacidade de armazenamento de energia, atributos que o tornam um combustível adequado para sistemas de transporte sustentáveis, especialmente quando utilizado em células a combustível (FCEVs) [6]. Esses dispositivos convertem a energia química do hidrogênio em eletricidade e calor por meio de uma reação eletroquímica, sem a necessidade de combustão. Operam de maneira análoga à descarga de uma bateria, com um ânodo onde ocorre a oxidação do combustível, um cátodo onde se reduz o agente oxidante (tipicamente oxigênio do ar), separados por um eletrólito condutor [6]. A implementação desses veículos é de suma importância para reduzir as emissões de CO₂, mesmo diante do crescimento projetado da frota de veículos nos próximos anos, uma vez que os únicos subprodutos da reação química nas células a combustível são água e calor [7].

À vista disso, a China tem se destacado na implementação de tecnologias de transporte sustentáveis, com cidades como Foshan e Yunfu à frente no uso de ônibus movidos a células de combustível de hidrogênio. A construção de infraestrutura de reabastecimento de hidrogênio nessas cidades permitiu a operação de ônibus que percorrem entre 120 e 150 km por dia sem emissões de poluentes [8]. Em 2022, a China registrou a venda de cerca de 6.000 veículos elétricos com célula de combustível, refletindo um aumento anual de 72% [9]. Esses avanços não apenas contribuem para a redução das emissões, mas também servem como um modelo para outras cidades em busca de soluções de transporte sustentável, especialmente considerando que a China é a maior emissora de CO₂ do mundo [10].

A cidade de Belo Horizonte, uma das principais metrópoles do Brasil com uma população estimada de cerca de 2,3 milhões de habitantes [11], também enfrenta desafios similares e pode se beneficiar de estratégias inovadoras para melhorar seu sistema de transporte público. A cidade possui uma extensa rede de transporte público, na qual o modal rodoviário representa a maior parte dos deslocamentos [12]. Diariamente, aproximadamente 750 mil pessoas utilizam essa infraestrutura, predominantemente composta por ônibus movidos a diesel, que contribuem significativamente para as emissões de gases poluentes [13].

Diante da necessidade urgente de mitigar as emissões de gases de efeito estufa, a Prefeitura de Belo Horizonte implementou o Plano Local de Ação Climática (PLAC) [14]. Este plano visa estruturar ações e serviços mais sustentáveis. Entre seus objetivos estão a redução das emissões em 40% até 2040 e a conquista de emissões líquidas zero até 2050, além da implementação de medidas de adaptação para mitigar os impactos das emissões não mitigadas. Dessa forma, a adoção de tecnologias sustentáveis, como os ônibus movidos a células de combustível de hidrogênio, surge como uma solução estratégica para Belo Horizonte, alinhando-se aos objetivos do PLAC e contribuindo para a construção de um sistema de transporte mais ecológico e eficiente. Para que essas metas sejam alcançadas o monitoramento contínuo das emissões é fundamental. Apesar de não haver, atualmente, uma exigência formal em Belo Horizonte para a elaboração e envio de inventários de emissões de gases de efeito estufa, a cidade de São Paulo já estabeleceu essa obrigatoriedade. O inventário de emissões é um procedimento que envolve a coleta e sistematização de dados sobre as emissões de gases de efeito estufa gerados por atividades específicas, como o transporte. Em São Paulo, essa obrigatoriedade abrange atividades como o transporte de cargas e passageiros, aplicando-se a frotas de veículos a diesel que excedam 300



unidades [15]. A implementação de um inventário de emissões é de grande importância para a gestão ambiental, pois permite a quantificação detalhada das emissões, viabiliza o monitoramento contínuo das fontes de poluição e facilita a avaliação da eficácia das estratégias de mitigação adotadas. Além disso, o inventário contribui para a transparência e responsabilidade ambiental, fornecendo informações essenciais para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes, voltadas para a redução das emissões e promoção da sustentabilidade. Em Belo Horizonte, o último inventário foi realizado no ano de 2021 [16].

2. METODOLOGIA

Para evidenciar os benefícios do hidrogênio verde, este estudo analisou dados de rendimento quilométrico e emissões de CO₂ de ônibus. Comparativamente, veículos movidos a diesel apresentam maior emissão de CO₂ por unidade de volume ou peso de combustível em relação a outros modais motorizados. Dessa forma, utilizou-se um fator de emissão médio de 2,6 kg de CO₂ para cada litro de diesel queimado na combustão, somado ao valor médio de 0,6 kg de CO₂ emitidos durante a produção e distribuição do combustível, resultando em uma taxa final de emissão em torno de 3,2 kg de CO₂ por litro de diesel [17].

Os ônibus a diesel em Belo Horizonte apresentam um rendimento energético de aproximadamente 1,93 km/l [18] e uma eficiência média de 40%, embora essa eficiência possa variar com as condições operacionais [19], resultando em emissões de cerca de 1,66 kg de CO₂ por quilômetro, considerando um fator de emissão de 3,2 kg de CO₂ por litro de diesel consumido. Em contraste, os ônibus movidos a hidrogênio verde consomem cerca de 7 kg de hidrogênio para cada 100 km percorridos, oferecendo uma eficiência média de 70% com emissões quase nulas de CO₂ [20, 21]. Esses dados apresentados na Tab.1. ressaltam a viabilidade e o impacto positivo da adoção do hidrogênio verde como combustível alternativo, evidenciando seu potencial significativo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade urbana. Dessa forma, a cidade de Belo Horizonte, com sua extensa e fundamental rede de transporte público, poderia se beneficiar da integração do hidrogênio.

Tab.1. Comparação de Rendimento Energético, Eficiência e Emissões de Ônibus a Diesel e Ônibus a Hidrogênio

Tipo de Veículo	Rendimento energético	Eficiência Média	Emissões CO₂
Ônibus a Diesel	1,93km/l	40%	3,2kg/l
Ônibus a Hidrogênio	100km/7kg	70%	0,1kg/kgH

O sistema de *Bus Rapid Transit* (BRT), conhecido como MOVE, foi introduzido na cidade no início de 2014, marcando a maior intervenção na história do transporte público local [22]. O MOVE foi projetado para melhorar a qualidade, a rapidez e a segurança do transporte coletivo urbano belo-horizontino, consolidando-se como uma inovação no setor de transporte da cidade [22]. Embora o sistema tenha trazido benefícios significativos para a mobilidade urbana, sua dependência do diesel continua a ser um desafio importante na redução das emissões de gases de efeito estufa.

A frota do BRT MOVE de Belo Horizonte é composta por 425 veículos movidos a combustível óleo diesel, a qual percorre em média 20.949.414 quilômetros por ano [23], resultando em uma emissão média de 34.776 toneladas de CO₂. Para ilustrar o impacto ambiental, considere que uma árvore adulta pode absorver aproximadamente 22 kg de CO₂ por ano, o que equivaleria a aproximadamente 1.580.727 árvores necessárias para absorver essa quantidade de CO₂ em um ano [24]. Esses números destacam a magnitude das emissões atuais e a urgência em buscar alternativas mais sustentáveis para o transporte urbano.



Em alinhamento com a necessidade de gestão detalhada das emissões no setor de transporte, é fundamental considerar a vida útil média dos ônibus do sistema MOVE para avaliar o impacto futuro das emissões de CO₂ na cidade de Belo Horizonte. Com uma vida útil projetada de 12 anos, cada ônibus é planejado para operar de forma eficiente durante esse período antes de ser substituído [25]. Dado que o sistema MOVE foi inaugurado em 2014, a primeira substituição da frota está programada para ocorrer em 2026, seguida por uma nova substituição em 2038. Esta programação oferece uma ocasião estratégica para incorporar ônibus que utilizem fontes de energia mais limpas e eficientes, contribuindo para uma redução significativa das emissões de CO₂ e promovendo a sustentabilidade ambiental no transporte urbano.

Nesse contexto, o Plano de Ação Climática (PLAC) prevê uma redução de 40% das emissões de CO₂ até 2040 [14]. Entretanto, essa meta se aplica ao setor como um todo, e não exclusivamente ao transporte público por ônibus. Considerando que a tecnologia de veículos movidos a hidrogênio ainda é emergente e enfrenta desafios como altos custos, necessidade de infraestrutura adequada e incertezas tecnológicas, propõe-se um cenário de substituição de 10% da frota MOVE. Essa abordagem controlada permite o desenvolvimento gradual da infraestrutura necessária, garantindo uma transição eficiente para fontes de energia mais limpas sem comprometer a qualidade do serviço de transporte público.

Dessa forma, foram elaborados dois cenários de emissão de CO₂. O primeiro cenário (Tab. 2) considera a manutenção da frota de ônibus totalmente a diesel de 2026 até 2040, com os mesmos 425 veículos, a fim de garantir a consistência da análise. A decisão de manter a frota estável reflete a intenção de avaliar o impacto das emissões sem introduzir variáveis adicionais relacionadas à expansão da frota. O aumento de 1% na quilometragem anual foi definido com base em projeções realistas de crescimento populacional e na demanda por transporte público, levando em consideração a necessidade de cobertura de novas áreas urbanas sem sobrecarregar excessivamente a infraestrutura existente.

Esses valores são relevantes porque permitem uma modelagem precisa do impacto ambiental e operacional da frota a diesel, proporcionando uma base sólida e garantindo que as projeções sejam tratadas de maneira equilibrada e realista. É importante observar que este cenário não leva em consideração possíveis substituições adicionais que possam ocorrer antes do término do período estimado de operação, nem eventuais reparos realizados nos ônibus durante sua vida útil.

Tab. 2. Projeção da frota de transporte público em Belo Horizonte (2026-2040)

Ano	Frota (nº de veículos)	Percorso Médio (km/ano)	Emissão (tCO ₂ /ano)
2026	425	21.548.141	35.769
2028	425	21.981.259	36.488
2030	425	22.423.082	37.222
2032	425	22.873.786	37.970
2034	425	23.333.549	38.733
2036	425	23.802.554	39.512
2038	425	24.280.985	40.306
2040	425	24.769.033	41.116

O segundo cenário (Tab. 3) tem como objetivo avaliar o impacto das emissões de CO₂ por meio de uma abordagem de substituição gradual de 10% da frota atual por ônibus a hidrogênio, destacando as trocas programadas para 2026 e 2038. Neste cenário, a substituição dos ônibus ocorrerá de acordo com o ciclo de vida projetado dos veículos. Em 2026, 1% da frota será substituída por ônibus a hidrogênio, permitindo uma adaptação inicial. Em 2038, ocorrerá a substituição de 10%, beneficiando-se das experiências adquiridas na fase anterior. Vale destacar



que os parâmetros de frota e quilometragem utilizados foram os mesmos da Tab. 2, assegurando consistência na análise.

Tab. 3. Projeção de substituição gradual de 10% da frota total por veículos a hidrogênio em Belo Horizonte (2026-2040)

Ano	Frota Diesel (nº de veículos)	Frota Hidrogênio (nº de veículos)	Percurso Médio (km/ano)	Emissão de (tCO ₂ /ano)
2026	421	4	21.548.141	35.433
2028	421	4	21.981.259	36.145
2030	421	4	22.423.082	36.871
2032	421	4	22.873.786	37.613
2034	421	4	23.333.549	38.369
2036	421	4	23.802.554	39.140
2038	383	42	24.280.985	36.323
2040	383	42	24.769.033	37.053

Para garantir uma transição gradual e eficaz para a utilização de ônibus a hidrogênio na frota de transporte público de Belo Horizonte, foi adotado um plano de substituição escalonado, dividido em duas fases distintas. A primeira fase, prevista para 2026, permitirá a adaptação inicial das infraestruturas e operações ao novo sistema de transporte. Esta fase inicial funcionará como um piloto, possibilitando a identificação e resolução de possíveis desafios técnicos e logísticos, além de permitir a capacitação dos operadores e a familiarização da população com a nova tecnologia. A segunda fase, programada para 2038, será mais abrangente, fundamentando-se nas avaliações realizadas durante a primeira fase, para garantir uma transição mais suave e eficiente. Com essa abordagem escalonada, espera-se minimizar os impactos financeiros e operacionais, ao mesmo tempo em que se maximiza a eficácia na redução das emissões de CO₂, contribuindo para as metas globais de sustentabilidade.

O custo de aquisição de um ônibus elétrico a célula de combustível movido a hidrogênio atualmente gira em torno de USD 1.300.000, um valor significativamente mais elevado em comparação aos ônibus convencionais a diesel, cujo custo médio é de aproximadamente USD 480.000, devido à complexidade tecnológica e aos materiais necessários para sua fabricação [26]. No entanto, projeta-se que o custo dos *FCEVs* diminuirá ao longo do tempo, à medida que a tecnologia amadureça e as economias de escala sejam alcançadas. A meta da indústria para 2029 é reduzir o preço dos ônibus *FCEVs* para cerca de USD 600.000, o que permitiria uma concorrência direta com os ônibus a diesel no mercado [26]. Para ilustrar essa tendência, foi realizada uma estimativa dos custos dos veículos a hidrogênio, com base no cenário de substituição gradual da frota de Belo Horizonte (Tab. 3). Nesse cenário (Tab.4), em 2026, serão adquiridos 4 ônibus a hidrogênio pelo valor atual de USD 1.300.000 por unidade. Em 2038, a frota deverá contar com 42 veículos, considerando o valor reduzido de USD 600.000 por unidade. É importante ressaltar que essa projeção não inclui os custos adicionais com tecnologia e infraestrutura, focando apenas no investimento unitário em ônibus movidos a hidrogênio.

Tab. 4. Projeção do custo total de aquisição de ônibus a hidrogênio em 2026 e 2038



Ano	Frota Hidrogênio (n° de veículos)	Preço Total Ônibus a Hidrogênio (USD)
2026	4	5.200.000
2038	42	25.200.000

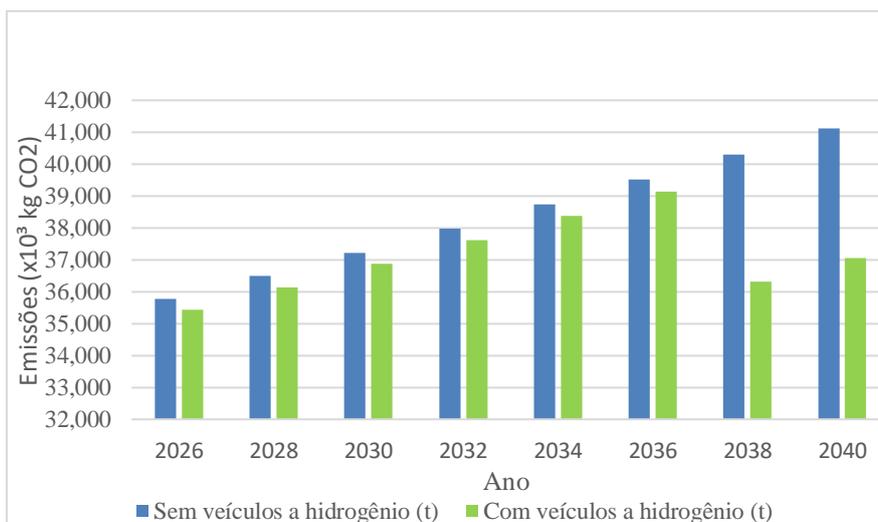
3. RESULTADOS

Os resultados revelam um crescimento significativo nas emissões de CO₂ da frota de transporte público de Belo Horizonte ao longo dos anos analisados sem substituição de ônibus a hidrogênio. Na Tab.1., observa-se que as emissões de CO₂ seguem essa tendência ascendente, começando em 35.769 toneladas por ano em 2026 e atingindo 41.116 toneladas por ano em 2040 com um percentual de crescimento de 14,95%. Este cenário reflete a continuidade do uso de combustíveis fósseis, implicando um aumento consistente nas emissões de gases de efeito estufa ao longo do período projetado.

Em contraste, a Tab. 2. ilustra o impacto da substituição gradual de 10% da frota por veículos a hidrogênio entre 2026 e 2040. Inicialmente, em 2026, a frota contará com 4 ônibus movidos a hidrogênio, aumentando para 42 veículos em 2038. A quilometragem anual permanece consistente com o cenário anterior; no entanto, as emissões de CO₂ são significativamente reduzidas devido à incorporação desses ônibus a hidrogênio. As emissões de CO₂ no cenário com a substituição gradual para ônibus a hidrogênio em 2040 são de 37.053 toneladas, um valor comparável ao que seria emitido no ano de 2030 sem essa substituição. Esse dado revela que, ao adotar uma estratégia de substituição parcial da frota, é possível retroceder uma década nas emissões de CO₂, aproximando-se de um cenário de emissões significativamente mais baixo. Com a substituição gradual de 1% da frota em 2026 e de 10% em 2038, estima-se que a emissão evitada até 2040 seja de aproximadamente 10.170 toneladas de CO₂.

A Fig. 1. ilustra uma comparação clara das emissões de CO₂ nos cenários com e sem a introdução de veículos a hidrogênio na frota de transporte público de Belo Horizonte. Dessa forma, é possível observar as diferenças na trajetória das emissões ao longo dos anos analisados.

Fig. 1. Comparação de emissões de CO₂: Cenário com vs. sem veículos a hidrogênio





No cenário sem veículos a hidrogênio, as emissões mostram uma tendência ascendente, refletindo a contínua dependência de combustíveis fósseis e o consequente aumento dos gases de efeito estufa. Em contraste, o cenário que incorpora ônibus a hidrogênio revela uma trajetória de redução nas emissões, evidenciando o impacto positivo dessa tecnologia sustentável na mitigação das emissões de CO₂. Essa comparação visual destaca a eficácia do hidrogênio como alternativa viável e necessária para a transição energética e a promoção de um sistema de transporte mais sustentável e ambientalmente responsável.

A análise dos custos de aquisição dos ônibus a hidrogênio (Tab. 3) revela que, embora o investimento inicial estimado para 2026, com a compra de 4 veículos, seja de USD 5.200.000 — com cada unidade avaliada em USD 1.300.000 —, é importante considerar esse valor sob uma perspectiva econômica de longo prazo. Em 2038, espera-se que a frota aumente para 42 ônibus, totalizando um investimento de USD 25.200.000, refletindo uma redução significativa no preço unitário, projetado em USD 600.000 por veículo. Essa diminuição de custos é atribuída ao amadurecimento tecnológico e às economias de escala resultantes do aumento da produção em massa, tornando o investimento progressivamente mais acessível e competitivo. A redução do custo por unidade favorece a viabilidade financeira do projeto, impactando positivamente a estrutura econômica das operações de transporte público. Com a diminuição dos custos de aquisição, espera-se um efeito cascata sobre os custos operacionais, incluindo manutenção e abastecimento, contribuindo para uma maior eficiência econômica a médio e longo prazo.

Além disso, a combinação da redução nos custos de capital com a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e os incentivos governamentais para tecnologias limpas pode acelerar o retorno sobre o investimento (ROI). Portanto, a análise sugere que, apesar do elevado investimento inicial, a transição para ônibus a hidrogênio se torna economicamente viável à medida que os custos unitários diminuem e a infraestrutura tecnológica amadurece, permitindo que o setor de transporte público obtenha benefícios econômicos e ambientais significativos a longo prazo. Assim, a transição tecnológica em Belo Horizonte representa uma medida ambiental e uma estratégia econômica sólida para a modernização e sustentabilidade do transporte urbano.

4. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a viabilidade da introdução de hidrogênio como fonte de energia para a frota de transporte público de Belo Horizonte, considerando sua eficácia na mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Com base nos dados e projeções apresentados, constatou-se que a transição para o hidrogênio verde pode representar uma solução significativa e viável para a descarbonização do setor de transporte urbano na cidade. Os resultados demonstraram que a substituição gradual de veículos movidos a diesel por ônibus a hidrogênio verde tem o potencial de reduzir consideravelmente as emissões de CO₂, contribuindo para uma diminuição de 10.170 toneladas de CO₂ até 2040. É importante notar que essa projeção se baseia em pressupostos favoráveis em relação ao desenvolvimento da infraestrutura e à adoção de tecnologias necessárias. A análise também revelou que a implementação do hidrogênio verde pode impulsionar a inovação tecnológica no setor de transporte. Contudo, é imprescindível considerar os desafios relacionados à infraestrutura necessária para a produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio, além dos custos econômicos associados e o desenvolvimento tecnológico que ainda requer avanços significativos. Em conclusão, a adoção do hidrogênio verde como combustível para o transporte público em Belo Horizonte representa uma estratégia importante para alcançar as metas de sustentabilidade e reduzir a emissão de dióxido de carbono na cidade. O estudo reforça a importância de políticas públicas que incentivem a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias limpas, além de investimentos em infraestrutura para viabilizar essa transição. A promoção de um transporte público sustentável contribui para a mitigação das mudanças climáticas e melhora a qualidade de vida dos cidadãos, tornando Belo Horizonte um modelo de cidade comprometida com a sustentabilidade ambiental e a inovação no transporte urbano.



AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) pelo apoio financeiro direto ao desenvolvimento dessa pesquisa. À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio indireto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. B. C. Pinheiro. **Previsão da produção de fontes renováveis e não renováveis selecionadas da matriz energética brasileira**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Economia Rural, Fortaleza (2020).
- [2] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Transporte e indústria representaram 64,8% do consumo de energia do país em 2023**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transporte-e-industria-representaram-64-8-do-consumo-de-energia-do-pais-em-2023>. Acesso em: 25 set. 2024.
- [3] D. Das e N. Veziroglu, *Hydrogen production by biological processes: a survey of literature*, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 26, pp. 13-28 (2001).
- [4] **AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IAE)**. Transporte (2023). Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/transport>>. Acesso em: 25 set. 2024.
- [5] G. L. Postiço. **O papel do hidrogênio na descarbonização do transporte público Tarifa Zero em Maricá**. Disponível em: <<https://files.antp.org.br/2023/9/28/o-papel-do-hidrogenio-na-descarbonizacao-do-transporte-publico-tarifa-zero-em-marica.pdf>>. Acesso em: 7 ago. 2024.
- [6] N. Castro et al., **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2023. 336 p.
- [7] S. C. S. Santos, **O Papel do Hidrogênio na Descarbonização do Transporte Coletivo Público do Distrito Federal**. Universidade de Brasília (2022).
- [8] **CASE STUDY Fuel Cell Zero-Emission Buses for Foshan and Yunfu, China**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.ballard.com/docs/default-source/motive-modules-documents/china-bus-case-study-website.pdf?sfvrsn=6451c280_6>.
- [9] HYDROGEN FUEL NEWS. **China sees rise in hydrogen fuel cell car sales in 2022**. Disponível em: <https://www.hydrogenfuelnews.com/china-hydrogen-fuel-cars-sales/8562676/>. Acesso em: 26 set. 2024.
- [10] **Greenhouse Gas (GHG) Emissions Climate Watch**. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=countries&end_year=2022&gases=co2&source=PIK&start_year=1850>. Acesso em: 7 ago. 2024.
- [11] **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**, Panorama - Belo Horizonte, MG, disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-horizonte/panorama>. Acesso em: 12 ago. 2024
- [12] **PREFEITURA DE BELO HORIZONTE** (2021), 6º Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Município de Belo Horizonte 2021, disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/meio-ambiente/inventario-de-emissao-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 12 ago. 2024
- [13] **PREFEITURA DE BELO HORIZONTE** (2024), Relatório de Janeiro de 2024. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transparencia/transparencia-no-transportecoletivo/numeros-transporte-coletivo>. Acesso em: 10 ago. 2024



- [14] **Plano Local de Ação Climática (PLAC)**. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2022/12/plac-belo-horizonte-compressed.pdf>. Acesso em: 12 de julho de 2024.
- [15] **Inventário GEE Empreendimentos**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-empreendimentos/envio-de-inventario-de-gases-de-efeito-estufa/perguntas-erespostas/#:~:text=O%20envio%20do%20invent%C3%A1rio%20de>. Acesso em: 7 ago. 2024.
- [16] **PREFEITURA DE BELO HORIZONTE**. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/meio-ambiente/inventario-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa>. Acesso em: 12 ago. 2024.
- [17] **INSTITUTO DE PESQUISA ECONOMICA APLICADA**, Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros, 1. ed Brasília, 2023. 42 p.
- [18] BHTrans. (2019). **Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTrans)**. Disponível em: <https://bit.ly/3jqbCKw>. Acesso em: 7 ago. 2024.
- [19] F. Rosero et al., *Real-world fuel efficiency and emissions from an urban diesel bus engine under transient operating conditions*, *Applied Energy*, Vol. 261, 114442, 10.1016/j.apenergy.2019.114442 (2020).
- [20] R. Caponi et al., *Hydrogen refueling stations and fuel cell buses four year operational analysis under real-world conditions*, *International Journal of Hydrogen Energy*. (2022)
- [21] **TRANSFINDER-Efficiency Comparison 2023**. Disponível em: <https://www.transfinder.com/resources/battery-electric-vs-hydrogen-fuelcellbuses#:~:text=In%20contrast%2C%20the%20hydrogen%20fuel>. Acesso em: 14 jul. 2024.
- [22] B. Daniel. **Inaugurado para a Copa do Mundo, Move completa 10 anos; veja história e fotos**. Disponível em: <https://www.otempo.com.br/cidades/inaugurado-para-a-copa-do-mundo-move-completa-10-anos-veja-historia-e-fotos-1.3344998>. Acesso em: 7 ago. 2024.
- [23] PBH (2023), **Relatório de Dezembro de 2023**. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transparencia/transparencia-no-transporte-coletivo/numeros-transporte-coletivo>. Acesso em: 06 jul. 2024
- [24] Carbon Pirates, *How Much Carbon Do Trees Absorb?* Disponível em: <https://www.carbonpirates.com/blog/how-much-carbon-do-trees-absorb/>. Acesso em: 5 jun. 2024.
- [25] Diário do Comercio. **Expansão do MOVE em Belo Horizonte**. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/economia/expansao-do-move-em-belo-horizonte/#gref>. Acesso em: 26 set. 2024.
- [26] Z. Chen et.al., *Total cost of ownership analysis of fuel cell electric bus with different hydrogen supply alternatives*. *Sustainability, Basel*, v. 16, p. 259, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16010259>.