

DECARBONIZING BUSES: OPPORTUNITIES BEYOND BATTERY-ELECTRIC VEHICLES

Pedro Henrique de Moraes Marques

Filipe de Oliveira Souza

James Patrick Maher Junior

*Luís Inácio Senos Dantas**

Keywords: decarbonization; energy transition; public transportation; hybrid bus; biofuels.

* Respectively, head of the Urban Mobility and Logistics Department of the Infrastructure Division, architect of the Urban Mobility Solutions Department of the City Solutions Division, architect and engineer of the Urban Mobility and Logistics Department of the Infrastructure Division.

Resumo

O transporte público coletivo desempenha papel fundamental na mobilidade urbana, mas constitui uma relevante fonte de emissões de gases de efeito estufa, especialmente em razão da predominância de ônibus movidos a *diesel*. Embora os ônibus elétricos a bateria se destaquem nas estratégias de descarbonização da frota, este artigo examina as tecnologias alternativas de baixa emissão disponíveis, como os veículos híbridos e a biocombustíveis, comparando-as entre si. A análise contempla também experiências internacionais, políticas públicas e impactos sobre o sistema produtivo. Por fim, o estudo defende a relevância de uma estratégia nacional integrada, capaz de combinar diferentes soluções para a transição energética no setor, em alinhamento com a Nova Indústria Brasil (NIB).

Abstract

Public transportation plays a fundamental role in urban mobility but also represents a significant source of greenhouse gas emissions, particularly due to the predominance of diesel-powered buses. While battery-electric buses stand out in fleet decarbonization strategies, this article examines the available low-emission alternative technologies, such as hybrid and biofuel-powered vehicles, comparing their features and performance. The analysis also considers international experiences, public policies, and impacts on the productive system. Finally, the study highlights the importance of an integrated national strategy that combines various solutions for the sector's energy transition, aligned with New Industry Brazil (NIB).

Introdução

O transporte público coletivo tem papel estruturante nas cidades brasileiras, sendo essencial para garantir o direito à mobilidade, diminuir as desigualdades socioespaciais e promover a eficiência urbana. No entanto, o setor também é um dos grandes emissores de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, especialmente pela predominância de ônibus a *diesel*. Nesse contexto, descarbonizar a frota de ônibus é uma estratégia-chave para reduzir impactos ambientais, contribuir para as metas climáticas do Acordo de Paris e melhorar a qualidade do ar nas cidades.

A transição energética no transporte público pode impulsionar a reindustrialização verde, baseada em inovação e fortalecimento das cadeias produtivas nacionais. Essa perspectiva se alinha aos objetivos da Nova Indústria Brasil (NIB), lançada em 2023 pelo Governo Federal, que marca o retorno de uma política industrial ativa e sustentável. A Missão 5 da NIB – Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas – lançada em 2024, estabelece metas para ampliar a participação de biocombustíveis na matriz de transporte (Missão..., 2024).

O artigo reconhece a centralidade dos ônibus elétricos a bateria (OEB) na atual estratégia de transição energética do transporte público. No entanto, propõe uma análise de tecnologias alternativas de propulsão de baixo carbono, como ônibus híbridos e a biocombustíveis, especialmente aplicáveis em locais onde a implantação de OEBs enfrenta limitações técnicas, financeiras ou de infraestrutura. Além das questões técnicas, a análise contempla o mercado nacional, as políticas setoriais, as experiências internacionais e o impacto no sistema produtivo. O objetivo do estudo é apoiar o debate sobre uma transição energética eficaz, justa

e sustentável do setor, conciliando metas ambientais e industriais e promovendo o fortalecimento da indústria nacional, em alinhamento com as diretrizes da NIB.

O mercado de ônibus no Brasil

Em 2024, a frota nacional de ônibus totalizou 773,5 mil unidades (Fenabreve, 2024), das quais cerca de 107 mil são destinadas ao transporte público urbano (NTU, 2024). Nesse mesmo ano, foram produzidos 31,2 mil ônibus de diferentes tipos, com 22,4 mil unidades licenciadas (Anfavea, 2025). O Brasil exportou cerca de 30% da sua produção total de ônibus nos últimos cinco anos. A Tabela 1 oferece a evolução da produção doméstica e sua destinação a partir de 2020.

Tabela 1 | Produção doméstica e exportação de ônibus em geral (unidades)

	Produção	Exportações
2020	20.546	6.260
2021	20.817	6.145
2022	35.155	8.733
2023	24.089	8.406
2024	31.220	8.370

Fonte: Elaboração própria com base em Anfavea (2025).

Entre 2005 e 2024, a produção nacional acumulada totalizou 797 veículos eletrificados e 21 a gás natural veicular (GNV) (Anfavea, 2025). Embora os números ainda sejam modestos, observa-se um crescimento expressivo do uso de ônibus elétricos, enquanto a aplicação das demais tecnologias baseadas em combustíveis alternativos ao *diesel* é historicamente insignificante. O volume de ônibus eletrificados licenciados

em 2024 representa um aumento de 265% em relação ao ano de 2023, e mais de 1.000% em relação à média dos três anos anteriores. A Tabela 2 apresenta os emplacamentos de ônibus no Brasil desde 2020, por origem de fabricação e por tipo.

Tabela 2 | Emplacamentos de ônibus urbanos

Emplacamentos por origem			Emplacamentos por tipo					Total
Nacionais	Importados		Diesel	Gasolina	Etanol	Elétrico	Gás	
2020	13.940	0	13.921	1	0	18	0	13.940
2021	14.060	2	14.040	0	0	20	2	14.062
2022	17.356	1	17.322	0	0	35	0	17.357
2023	20.428	7	20.347	0	0	86	2	20.435
2024	22.402	33	22.118	1	1	314	1	22.435

Fonte: Elaboração própria com base em Anfavea (2025).

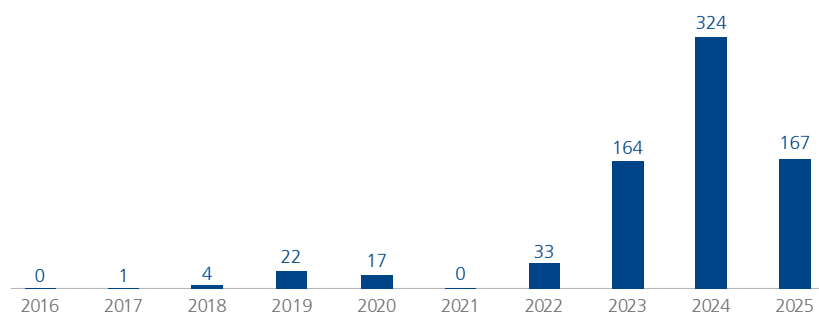
Os números de ônibus elétricos em operação exclusivamente nos sistemas de transporte público são apurados pela aliança Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (ZEBRA)¹ e divulgados na plataforma E-Bus Radar. Os gráficos 1 e 2 ilustram, respectivamente, a evolução do uso e a participação de ônibus elétricos no Brasil por fabricante.

A combinação entre marcos regulatórios, políticas públicas coordenadas, incentivos financeiros e capacidade produtiva nacional confere ao mercado de ônibus elétricos no Brasil um cenário promissor de expansão sustentada, com potencial de diversificação geográfica e aumento da participação de fabricantes nacionais. Apesar dos avanços recentes, o setor ainda enfrenta desafios relevantes, como a instabilidade da demanda, o elevado custo dos veículos e a necessidade de investimentos em infraestrutura de recarga. Tais desafios, por sua vez,

1 Mais informações sobre a aliança ZEBRA estão disponíveis em: <https://www.c40.org/what-we-do/scaling-up-climate-action/transportation/zero-emission-rapid-deployment-accelerator-zebra-partnership/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

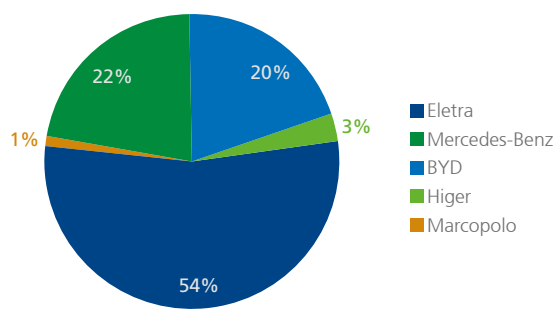
podem abrir espaço para tecnologias alternativas, as quais, embora tenham participação marginal e enfrentem obstáculos de outras naturezas, podem ganhar importância em contextos específicos, diante da busca por soluções mais viáveis e adaptadas às realidades locais, ainda que transitoriamente.

Gráfico 1 | Evolução da quantidade de ônibus elétricos a bateria em operação no Brasil



Fonte: Elaboração própria com base em E-Bus Radar (c2025).
Nota: O período analisado no gráfico compreende 1.1.2016 a 9.6.2025.

Gráfico 2 | Distribuição por fabricante de ônibus novos elétricos a bateria no Brasil



Fonte: Elaboração própria com base em E-Bus Radar (c2025).
Nota: O período analisado no gráfico compreende 1.1.2016 a 9.6.2025.

Tecnologias de propulsão alternativas

Os motores de combustão interna utilizados no transporte coletivo urbano têm evoluído de forma significativa. Tornaram-se mais eficientes no consumo de energia e passaram a emitir menos poluentes, impulsionados pelo maior rigor dos padrões técnico-regulatórios e pela melhoria da qualidade dos combustíveis.²

Quando esses avanços são acompanhados da adoção de eletrificação ou biocombustíveis, permite-se, ainda, maior redução de emissões, assim como ganhos de eficiência. As considerações levantadas nesta seção têm como objetivo contextualizar as diferentes tecnologias de propulsão, apresentando suas principais características, níveis de desenvolvimento e aplicações.

Propulsão elétrica

Atualmente os ônibus elétricos podem ser alimentados por cabos aéreos, baterias e até hidrogênio. O uso comercial de energia elétrica no transporte coletivo urbano, porém, remonta à inauguração da primeira linha de bonde elétrico, em 1881, na Alemanha (A história..., 2020). As razões que, na época, motivaram o uso da eletricidade como alternativa aos sistemas de transporte baseados em combustão ou vapor –

2 Em menos de duas décadas, os limites máximos de emissão de elementos poluentes e particulados no âmbito do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), conforme regulamentado por resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), passaram por importantes reduções. Em comparação à fase P-5 do Proconve (equivalente ao Euro III), vigente desde 2006, a fase P-8 (equivalente ao Euro VI), em vigor desde 2023, apresentou as seguintes reduções nos limites máximos toleráveis de emissões, em g/kWh: de 2,1 de monóxido de carbono (CO) para 1,5; de 0,66 de hidrocarbonetos (HCs) para 0,13; de 5,0 de óxidos de nitrogênio (NOx) para 0,4; e de 0,10 de microparticulados para 0,01. Além disso, a fase P-8 prevê a obrigatoriedade do uso de tecnologias avançadas de controle de emissões, como sistemas de redução catalítica seletiva (*selective catalytic reduction* – SCR) e filtros de partículas (*diesel particulate filter* – DPF), além de sistemas de diagnóstico de bordo (*on-board diagnostics* – OBD). O Proconve não regula especificamente a emissão de GEE.

especialmente no transporte de passageiros – permanecem até hoje: maior eficiência energética e redução de ruídos, vibrações, temperaturas, emissões de fuligem e de gases de combustão.

Ao longo do tempo, tais benefícios foram potencializados pelo desenvolvimento de novos componentes e subsistemas, como baterias e motores-geradores cada vez mais leves e eficientes, além de sistemas auxiliares de recuperação de energia, como o sistema de frenagem regenerativa, a regeneração por desaceleração em rampa e o sistema de recuperação de calor, entre outros, em desenvolvimento.

Outro fator relevante para a aplicação da propulsão elétrica é o potencial de descarbonização associado ao uso da eletricidade, especialmente no Brasil, em razão de sua matriz elétrica de baixa intensidade de carbono. O país mantém, há 20 anos, uma expressiva participação de fontes renováveis na geração de eletricidade, superior a 70%, atingindo pico de 89,2% em 2023 (EPE, 2024).³ É importante, no entanto, contrapor que a eletrificação depende da implantação de infraestrutura adequada, como estações de recarga específicas ou, no caso dos trólebus, redes aéreas de alimentação.

Ônibus elétrico a bateria

A viabilidade do uso de baterias na propulsão veicular só foi alcançada com o uso das baterias de íon de lítio nos anos 1990 (Santos, 2019), que trouxeram densidade energética e leveza inéditas. Inicialmente, esse avanço revolucionou a portabilidade de diversos equipamentos elétricos. Com a evolução química das baterias e o aumento da escala de produção, houve significativa redução de custo, peso e volume, permitindo que

3 O Relatório Energético Nacional 2024 (ano de referência 2023) informa que o setor elétrico brasileiro emitiu em média 55,1 gCO₂eq/KWh de energia elétrica gerada.

fossem aplicadas em veículos pesados, como os ônibus, que passaram a ter mais autonomia no uso regular.

Atualmente, veículos elétricos a bateria são uma tendência global. Em 2024, foram vendidos cerca de 17 milhões de veículos elétricos e híbridos *plug-in*, um aumento de 25% em relação a 2023. Considerando apenas ônibus elétricos novos, foram comercializadas aproximadamente 70 mil unidades em 2024, um aumento de cerca de 30% em relação ao ano anterior. Para ilustrar a atual tendência da demanda global por veículos elétricos, em 2024, foi comercializado 1 TWh de baterias para esse fim, valor que deve triplicar até 2030 (IEA, 2025).

Entre as tecnologias disponíveis, destacam-se as baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP), níquel-manganês-cobalto (NMC) e níquel-cobalto-alumínio (NCA), cada uma com características específicas de custo, desempenho e segurança. Além das melhorias incrementais nas baterias de íon de lítio, cresce o interesse pelas baterias de estado sólido, que oferecem maior densidade energética, mais segurança, menor tempo de recarga e maior autonomia e vida útil. Apesar dos desafios para produção em escala, testes conduzidos por fabricantes globais apresentam resultados promissores (Onstad, 2024; Contemori, 2025), o que poderá representar um novo salto tecnológico para os meios de transporte eletrificados e para inúmeras outras aplicações.

A expansão da eletrificação veicular traz benefícios tecnológicos, energéticos e ambientais, mas também impõe desafios significativos. Além daqueles associados à necessidade de maior investimento e de mitigação de riscos operacionais (como contextos de crise energética), deve-se considerar a necessidade de adoção de práticas responsáveis na cadeia produtiva, especialmente no que se refere a logística reversa, reciclagem e recondicionamento de baterias e componentes críticos. Há ainda o desafio, situado a montante na cadeia produtiva, da crescente

demanda mundial por minerais críticos e terras raras, cuja exploração e processamento são essenciais não apenas para a mobilidade elétrica – como a fabricação de baterias de íon lítio e ímãs permanentes de motores elétricos – mas também para a engenharia de materiais avançados e ligas especiais em geral, de múltiplas aplicações, o que exige atenção estratégica.

Célula de combustível de hidrogênio

A célula de combustível de hidrogênio converte a energia química do hidrogênio em eletricidade, calor e vapor de água. Suas principais vantagens sobre os OEBs são o reabastecimento rápido e a maior densidade de energia, o que amplia a autonomia dos veículos (Soleimani *et al.*, 2024). Desde meados dos anos 2000, os ônibus a hidrogênio operam em sistemas de transporte público na Europa, na Ásia e nos Estados Unidos da América (EUA), com autonomia entre 300 e 500 km. No Brasil, há apenas iniciativas experimentais, sem operações comerciais dessa tecnologia.

O hidrogênio enfrenta barreiras que limitam sua adoção comercial. Por ser um gás de baixíssima densidade e altamente inflamável, o armazenamento e a distribuição seguros elevam significativamente os custos, que se somam ao alto custo de produção. O impacto ambiental varia conforme a fonte de energia usada para a produção do hidrogênio: o hidrogênio cinza, derivado da reforma de gás natural fóssil, pode apresentar um balanço de emissões de CO₂ desfavorável; por outro lado, o hidrogênio verde, produzido a partir de fontes renováveis, é uma alternativa com potencial de emissão praticamente nula ao longo de todo o seu ciclo de vida.

No Brasil, a adoção escalável de ônibus a hidrogênio dependeria da produção centralizada de hidrogênio verde em regiões com alta geração

renovável e forte demanda por transporte coletivo.⁴ Uma alternativa promissora no contexto brasileiro é a produção de hidrogênio a partir do etanol, o que eliminaria os desafios logísticos da distribuição do gás. Nesse caso, o hidrogênio seria produzido por unidades reformadoras instaladas nos próprios postos de abastecimento. Essa tecnologia já conta com iniciativas-piloto e experimentais em andamento no Brasil (Melloni, 2025; Gama, 2025).

Trólebus

Trólebus são ônibus elétricos alimentados continuamente por uma rede de fiação elétrica aérea. Essa solução oferece os benefícios da motorização elétrica, contudo é limitada pelo alto custo da infraestrutura e pela baixa flexibilidade operacional.

O Brasil tem apenas dois sistemas de trólebus de porte significativo operando comercialmente: o da capital paulista, que conta com frota moderna e opera principalmente na Zona Leste da cidade; e o sistema denominado Corredor Metropolitano ABD, que liga a cidade de São Paulo ao Grande ABC empregando ônibus e trólebus (Bazani, 2024).

Embora a infraestrutura de trólebus seja dispendiosa, a demanda por veículos elétricos e a elevada oferta doméstica de energia elétrica renovável podem gerar oportunidades para as indústrias de transporte e de energia no Brasil. Além disso, o avanço das tecnologias de armazenamento de energia podem tornar os trólebus uma inspiração para soluções de transporte coletivo urbano mais atrativas.

4 Não sem razão, o Nordeste brasileiro concentra os principais anúncios de iniciativas de produção de hidrogênio verde do país, entre os quais destacam-se o projeto Base One, da Enegix, em Pecém (CE), o Green Energy Park na Zona de Processamento de Exportação de Parnaíba (PI), o projeto da Qair, em Suape (PE), a planta industrial da Unigel em Camaçari (BA), e o Complexo Alto dos Ventos (RN), todos impulsionados pelo alto potencial em energia renovável e infraestrutura portuária para exportação.

Um exemplo é o sistema que combina alimentação por rede aérea e uso de baterias, permitindo que o veículo opere conectado à rede, quando disponível, e utilize as baterias em trechos sem cabeamento. Essa solução será aplicada no sistema de transporte rápido por ônibus do ABC paulista (BRT-ABC), que ligará São Paulo a municípios vizinhos em um trajeto de 17,3 km. O início da operação está previsto para o segundo semestre de 2026, com 92 veículos articulados e rede aérea instalada em apenas um dos sentidos.

Ônibus a biocombustíveis

Os biocombustíveis permitem reduzir as emissões de GEE, pois o carbono liberado na queima foi previamente capturado da atmosfera pelas plantas durante seu crescimento, por meio da fotossíntese, ou reaproveitado a partir de resíduos orgânicos, o que neutraliza grande parte do ciclo do carbono.

Motores a *diesel* ainda predominam nas frotas de ônibus urbanos e devem continuar presentes no transporte coletivo urbano por prazo ainda indefinido. Mesmo sendo fontes de ruído, calor, vibrações e poluentes, esses motores permanecem como a principal escolha para veículos pesados, em razão de seu alto torque, eficiência e durabilidade – características valorizadas nas operações de transporte.

Nesse contexto, o uso de combustíveis renováveis é uma solução viável, sobretudo porque certos biocombustíveis podem ser adicionados às misturas de *diesel* já utilizadas ou até mesmo substituí-lo integralmente. Isso permite reduzir as emissões sem a necessidade de substituir a frota existente. Paralelamente, o desenvolvimento de ônibus projetados para operar exclusivamente com combustíveis de origem renovável avança, ampliando possibilidades de transição para um transporte mais sustentável.

Biodiesel

O *biodiesel* é um biocombustível produzido a partir de óleos vegetais ou gorduras de origem animal. Cerca de 70% da produção do *biodiesel* brasileiro tem como matéria-prima a soja, seguida por gorduras animais, algodão, milho e óleo de cozinha reciclado (Cotta, 2023). Em 2024, o Brasil registrou a produção recorde de mais de 9 milhões de m³ de *biodiesel*, contra cerca de 7,5 milhões de m³ produzidos em 2023 (Produção..., 2025).

O *biodiesel* tem o objetivo de substituir o *diesel* ou ser adicionado como mistura. No entanto, em razão de algumas características físico-químicas, como menores densidades volumétrica e energética, maiores viscosidade, higroscopicidade e poder solvente, misturas acima de 20% podem requerer adaptações no motor a *diesel* (ANP, 2018). No Brasil, o percentual de *biodiesel* adicionado ao *diesel* comercial é de 15% (ou B15), em razão de decisão do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) havida em 1º de agosto de 2025.

Óleo vegetal hidrotratado

O *hydrotreated vegetable oil* (HVO) é um biocombustível avançado, produzido a partir dos mesmos insumos biológicos do *biodiesel*. No entanto, sua obtenção se dá por meio de hidrogenação, processo mais custoso do que a transesterificação usada na produção do *biodiesel*. O resultado é um produto quimicamente semelhante ao *diesel*, e que, diferentemente do *biodiesel*, pode ser utilizado sem adaptações nos motores, independentemente do percentual de adição.

Por se adaptar imediatamente à frota existente, o HVO teria ampla aceitação entre operadores de transportes públicos. No Brasil, o uso do HVO ainda está restrito a poucas iniciativas de caráter experimental e

voluntário, em razão de disponibilidade e custo. A Tabela 3 compara os custos do *biodiesel* puro (B100), do HVO e do *diesel* (S10).

Tabela 3 | Comparativo de custos energéticos do *biodiesel*, do HVO e do *diesel*

Combustível	Preço por litro (R\$)	Poder calorífico inferior (kWh/litro)	Custo por kWh (R\$)
<i>Biodiesel</i> (B100)	5,41	9,0	0,60
HVO (estimado)	8,92 a 9,81	9,8	0,91 a 1,00
<i>Diesel</i> fóssil (S10)	3,27	9,9	0,33

Fonte: Elaboração própria com base em Fecombustíveis (HVO..., 2021) e ANP (2020).

Etanol

Apesar de a indústria brasileira estar apta a oferecer ônibus urbanos movidos a etanol e de o país ser um grande produtor desse insumo, o uso desses veículos é insignificante no Brasil, com operação comercial limitada a algumas poucas linhas na cidade de São Paulo. Mesmo com a facilidade logística, por estar localizada em um estado produtor de etanol (ANP, 2024), essas iniciativas não lograram sucesso.

A utilização do etanol em veículos pesados enfrenta desafios técnicos, a começar pela expressiva diferença entre os poderes caloríficos do etanol e do *diesel*, da qual resultam aumentos substanciais de volume e peso, o que dificulta especialmente a cobertura de longas distâncias. Outras variáveis passam a ser consideradas na equação de viabilidade, como estabilidade e custo de oportunidade dos preços do etanol, custos de manutenção mais elevados, uso intensivo de aditivos para uso em motores de ciclo *diesel* (Lascala, 2011).

Por se tratar de um combustível com alta disponibilidade e contar com uma rede de distribuição já consolidada, o etanol pode encontrar nichos de aplicação viáveis. Um exemplo é o seu uso em sistemas híbrido-elétricos, havendo modelo recentemente lançado no Brasil.

Biometano

O biometano, nome dado ao gás metano de origem renovável, é derivado da purificação do biogás gerado pela decomposição de resíduos orgânicos. Suas principais fontes no Brasil são oriundas da atividade sucroalcooleira, de processos de saneamento e de outras atividades agropecuárias.

O biometano pode ser utilizado sem prejuízo nos veículos movidos a GNV, cuja tecnologia é madura e consolidada, apesar de uso incipiente no Brasil. Atualmente tem potencial estimado em 84,6 bilhões de Nm^3/ano , o maior do mundo até o momento (Lemos; Cardoso; Costa, 2024). A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) calcula que um terço do consumo total de *diesel* e gasolina no Brasil, correspondente a 150% de suas importações, apresenta potencial para ser substituído por biometano economicamente viável (ao preço de R\$ 2,90/ m^3), a partir somente do aproveitamento de resíduos da indústria agropecuária (EPE, 2025a).

O Brasil possui capacidade instalada de 4,7 bilhões de Nm^3/ano de biogás em 1.587 plantas. Apenas 54 produzem biometano (1,7 bilhão de Nm^3/ano), enquanto a maior parte é destinada à geração elétrica em 1.349 unidades (2,8 bilhões de Nm^3/ano) (CIBiogás, 2024).

Duas abordagens de uso do biometano contribuem para a descarbonização do transporte público, ambas aplicadas a sistemas de ônibus urbanos a GNV. A primeira é a implantação de sistemas que utilizam exclusivamente biometano envasado, adquirido diretamente dos produtores. A segunda é a descarbonização progressiva do setor de gás natural como um todo, prevista na Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024). Essa lei determina a adição obrigatória de 1% de biometano ao gás natural fóssil produzido ou importado a partir de 2026, com possibilidade de aumento gradual até 10% em 2034, conforme decisão do CNPE, com comprovação por meio do Certificado de Garantia de Origem de Biometano (CJOB).

Apesar do grande potencial de oferta local e de uma indústria capaz de produzir comercialmente novos ônibus coletivos urbanos a GNV (Plattek; Villarim; Cavalcanti, 2025), há importantes desafios para a implementação em escala de ônibus a biometano no Brasil, começando pela distribuição. Em locais já atendidos por rede de gás natural, a injeção de biometano demandaria investimentos na ligação aos produtores e na adaptação de estações de abastecimento dos ônibus urbanos. Assinala-se, ainda, que mesmo os postos de abastecimento de GNV existentes nas cidades dotadas de rede são equipados para alimentar apenas veículos leves (BNDES, 2020).

Não obstante, além de movimentos orientados ao uso em escala de biometano em ônibus urbanos, como o que recentemente vem sendo patrocinado pela Prefeitura Municipal de São Paulo (Especialistas..., 2025), observa-se no Brasil o surgimento de outros projetos-piloto, com uso exclusivo de biometano. Isso demonstra um crescente interesse no uso desse insumo, a fim de reduzir as emissões e a dependência de combustíveis fósseis.

Ônibus híbridos

O conceito de veículo híbrido inclui uso de diferentes combinações energéticas, formas de recarga e estratégias de gerenciamento de energia. Os veículos híbridos mais comuns no segmento de transporte coletivo urbano combinam motores a combustão interna (geralmente *diesel* ou gás) e motores elétricos, em três arranjos básicos mais comuns: o *hybrid electric vehicle* (HEV), o *plug-in hybrid electric vehicle* (PHEV) e o *mild hybrid electric vehicle* (MHEV). Do ponto de vista industrial, a cadeia produtiva dos híbridos compartilha diversos componentes com a dos OEBs (Plattek; Villarim; Cavalcanti, 2025), o que demonstra sinergia entre as diferentes plataformas tecnológicas.

Quadro 1 | Resumo das principais características de ônibus urbanos híbridos

Tipo	Características
HEV	<ul style="list-style-type: none"> • Não requer infraestrutura de recarga, uma vez que a bateria é recarregada por regeneração de energia e pelo motor a combustão. • Apresenta consumo e emissões moderadamente reduzidos, com uso preferencial em tráfego urbano, com frenagens frequentes. Emissões globais podem ser reduzidas pelo uso de combustíveis renováveis. • Autonomia elétrica muito limitada, com acionamento do motor elétrico restrito a velocidades e torques mais baixos, e dependente do estado de carga da bateria. • Eficiência ambiental e econômica dependem consideravelmente do perfil de uso, com maior vantagem em tráfego urbano e menor vantagem em trajetos longos ou de alta velocidade.
PHEV	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de infraestrutura de recarga e emprego de dois sistemas de tração veicular – motor elétrico e a combustão – com desempenho próximos tornam a solução mais cara. • Maior autonomia em modo 100% elétrico, o que reduz significativamente as emissões, sem prejuízo de reduções adicionais em termos globais se: (i) recarregado com energia elétrica externa de fontes renováveis; e (ii) utilizado combustível de origem renovável. • Flexibilidade moderada: utiliza eletricidade em rotinas curtas e combustível em viagens longas.
MHEV	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema simples e de menor custo da frota, em que um motor elétrico de baixa potência auxilia o motor a combustão durante as acelerações e recupera energia nas frenagens. • Maior flexibilidade operacional e baixo custo de investimento no sistema, dado que não requer infraestrutura de recarga. • Não opera em modo totalmente elétrico, apresentando benefícios ambientais bem mais limitados, que são mitigáveis pela adoção de combustíveis renováveis. • Diferentemente dos demais tipos, os ônibus híbridos MHEV ainda não são empregados no Brasil ou amplamente usados no mundo em sistemas de transporte urbano coletivo.

Fonte: Elaboração própria.

Os híbridos aliam as vantagens dos motores elétricos, como eficiência e durabilidade, com a flexibilidade dos combustíveis. No contexto da descarbonização, podem representar soluções intermediárias ou transitórias, e, quando associados a biocombustíveis, uma alternativa permanente rumo à neutralidade de carbono. O Quadro 1 sintetiza as principais características de cada arranjo híbrido para ônibus urbanos.

Comparativo sintético das tecnologias do transporte por ônibus

Esta seção apresenta um comparativo entre as principais opções tecnológicas e operacionais do transporte por ônibus. Os quadros 2 a 4 sintetizam as características das diferentes tecnologias e os respectivos insumos energéticos utilizados.⁵

Observa-se que o ônibus a *diesel* é o mais poluente, com altos níveis de emissões em todos os critérios. Os elétricos são a tecnologia com menor impacto ambiental, eliminando emissões locais de CO₂, óxido de nitrogênio (Nox) e material particulado (MP). As tecnologias híbridas apresentam reduções intermediárias, principalmente nas emissões locais, e podem ser soluções de transição. Os biocombustíveis (biometano, *biodiesel*, HVO e etanol hidratado) se destacam por reduzir significativamente as emissões no ciclo completo (poço à roda), mesmo mantendo emissões locais.

5 Com o objetivo de simplificar a comparação entre tecnologias, o estudo não analisa combinações específicas de veículos, misturas de combustíveis ou condições operacionais, mas considera apenas configurações comerciais típicas. As análises refletem um recorte intencionalmente generalista, diante da rápida evolução tecnológica e da complexidade das possíveis variações.

Quadro 2 | Comparativo de emissões por tecnologia e combustível

Tecnologia		Emissão de CO ₂ por unidade de trabalho		Óxido de nitrogênio (NOx) e material particulado (MP)
		Física local (escapamento)	Poço à roda (líquida)	
Combustão interna	Diesel (B15)	●●●	●●●	●●●
	GNV	●●●	●●●	●
	Biometano	●●●	●	●
	Biodiesel	●●●	●	●●
	HVO	●●●	●	●
	Etanol hidratado	●●●	●	●●●
Híbrida	MHEV	●●●	●●●	●●●
	HEV	●●	●●	●●
	PHEV	●●	●●	●●
Elétrica	Ônibus a bateria	—	●	—
	Trólebus	—	●	—
	Hidrogênio verde	—	—	—

— Zero ou *net zero* ● até 30 gCO₂ eq/MJ ●● entre 31 e 60 gCO₂ eq/MJ ●●● mais que 60 gCO₂ eq/MJ

Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2025b); Liu *et al.* (2023); Vourliotakis e Platsakis (2023) e Ognissanto e Jones (2023).

Quadro 3 | Comparativo de maturidade de mercado e principais barreiras

Tecnologia		Maturidade de mercado		Principais barreiras
		Brasil	Mundo	
Combustão interna	<i>Diesel</i>	Consolidada	Consolidada	Metas ambientais.
	GNV	Incipiente	Consolidada	Rede de distribuição.
	Biometano	Incipiente	Consolidada	Rede de distribuição e injeção.
	<i>Biodiesel</i>	Consolidada	Em expansão	Custo e oferta do combustível. Limite técnico de adição ao <i>diesel</i> .
	HVO	Incipiente	Incipiente	Custo e oferta do combustível.
	Etanol hidratado	Pouco significativa	Irrelevante	Técnico-operacionais.
Híbrida	MHEV	Inexistente	Irrelevante	Equivalente ao <i>diesel</i> .
	HEV	Em expansão	Em expansão	Maior investimento.
	PHEV	Em expansão	Em expansão	Maior investimento.
Elétrica	Ônibus a bateria	Em expansão	Em expansão	Maior investimento.
	Trólebus	Em desuso	Em desuso	Capex e opex altos. Inflexibilidade de rotas.
	Hidrogênio verde	Inexistente	Incipiente	Segurança e oferta de equipamentos. Custo do H ₂ . Rede de abastecimento.

Fonte: Elaboração própria.

Como se observa no Quadro 3, o *diesel* domina o mercado, principalmente em razão do baixo custo e da alta eficiência. Entre os combustíveis alternativos, o *biodiesel* é a opção mais consolidada no Brasil; biometano e HVO ainda são incipientes e enfrentam barreiras como infraestrutura e custo, enquanto o etanol hidratado é limitado por questões técnico-operacionais. Os híbridos estão em expansão, mas também exigem maior investimento. Já os ônibus a bateria avançam, embora também se deparem com alto custo inicial. O trólebus enfrenta questões com a rede aérea. E o hidrogênio verde, incipiente, lida com obstáculos como o preço e segurança.

Quadro 4 | Comparativo dos principais fatores de custo

Tecnologia		Principais fatores de custo de capital	Principais fatores de custo operacional
Combustão interna	<i>Diesel</i>	Baixo custo do equipamento.	Manutenção simples.
	GNV	Maior custo do equipamento.	Manutenção mais cara e frequente.
	Biometano	Maior custo do equipamento.	Manutenção mais cara e frequente.
	<i>Biodiesel</i>	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Preço maior do combustível.
	HVO	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Preço maior do combustível.
	Etanol hidratado	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Manutenção mais cara e frequente. Maior peso para a mesma distância.

(Continua)

(Continuação)

Tecnologia		Principais fatores de custo de capital	Principais fatores de custo operacional
Híbrida	MHEV	Equivalente ao <i>diesel</i> .	Equivalente ao <i>diesel</i> .
	HEV	Maior custo do equipamento.	Maior autonomia.
	PHEV	Maior custo do equipamento. Infraestrutura de recarga.	Tempo de recarga.
Elétrica	Ônibus a bateria	Maior custo do equipamento. Infraestrutura de recarga.	Menor autonomia. Tempo de recarga. O&M mais barata.
	Trólebus	Rede elétrica aérea.	Manutenção da rede aérea. Autonomia ilimitada.
	Hidrogênio verde	Maior custo do equipamento. Postos de hidrogênio.	Preço maior do combustível. Maior autonomia.

Fonte: Elaboração própria.

O *diesel* é a tecnologia com o menor custo de capital. Comparativamente, o biometano apresenta custos mais elevados e necessidade de manutenção mais frequente. O *biodiesel*, o HVO e o etanol apresentam um custo de capital semelhante ao do *diesel*, porém os custos operacionais são maiores, principalmente devido ao preço do combustível e, no caso do etanol, às condições operacionais relacionadas à autonomia para a mesma quantidade de combustível. As tecnologias híbridas podem oferecer autonomia, mas o PHEV enfrenta a mesma dependência da infraestrutura de recarga dos OEBs.

Estes últimos ainda apresentam alto custo de aquisição e autonomia limitada, no entanto sua operação tende a ser mais econômica. Finalmente, o hidrogênio verde, embora combine um custo elevado dos equipamentos com desafios operacionais, como o preço do combustível e a necessidade de postos de abastecimento, destaca-se por proporcionar maior autonomia.

No caso brasileiro, os biocombustíveis são boas opções para cidades com disponibilidade regional desses insumos e infraestrutura elétrica limitada, podendo ser utilizados em operações que precisam de grande autonomia e uso contínuo. Os OEBs são particularmente recomendáveis em grandes centros urbanos com infraestrutura elétrica robusta e capacidade de investimento, onde se prioriza a qualidade do ar e a redução do ruído, e para uso em corredores de alta demanda. Já os modelos híbridos, especialmente com biocombustíveis, são indicados para localidades dispostas a investir em aplicações que buscam reduzir emissões antes de investir pesadamente em infraestrutura elétrica e sem perder flexibilidade operacional.

Experiências internacionais

A seguir são apresentadas algumas experiências internacionais de descarbonização do segmento de ônibus urbanos por meio de rotas tecnológicas alternativas aos OEBs. De maneira geral, observa-se que os entraves à consolidação dos OEBs no Brasil também são encontrados – e são, por vezes, mais acentuados – em outras rotas alternativas no cenário internacional. Por isso, o crescimento dos OEBs desponta como tendência mesmo nessas localidades onde houve experiências alternativas.

Limites à consolidação do biometano como alternativa na Suécia

A Suécia é uma das pioneiras na integração do biometano ao transporte coletivo urbano. Desde 2005, o país investe na produção do biocombustível a partir de resíduos agrícolas e orgânicos, inicialmente com preponderância de investimentos públicos e, mais recentemente, com a liderança de investimentos privados na expansão do uso de resíduos agroindustriais.

O país estabeleceu como meta a substituição progressiva do GNV pelo biometano até 2030, alcançando, em 2022, um nível de 96% de biometano no transporte a gás, em comparação aos 60% registrados em 2012. Durante esse período, o consumo total de gás no transporte manteve-se estável em torno de 1.500 GWh. Esse avanço foi impulsionado por uma combinação de fatores: altos impostos sobre combustíveis fósseis, isenções fiscais para fontes renováveis, subsídios à produção e apoio a investimentos e valorização dos créditos de carbono (Klackenberg, 2024).⁶

Apesar desse progresso, a frota de ônibus a gás na Suécia começou a cair de 2.837 veículos (21% da frota total) em 2019 para 2.433 em 2024 (17%), enquanto a frota de ônibus elétricos cresceu de 268 veículos (3%) para 1.453 (10%) no mesmo período. A tendência de eletrificação vem se fortalecendo graças à maior percepção de previsibilidade de custos e confiabilidade operacional dos OEBs, se comparados às alternativas como o HVO ou o biometano, conforme entrevistas realizadas com gestores públicos e operadores (Åslund; Pettersson-Löfstedt, 2023; Ottosson; Danell, 2024).

6 Klackenberg (2024) lista três ações/programas vigentes na Suécia de incentivo econômico para a adoção do biometano: isenção do imposto sobre CO₂ e energia para viabilizar o biometano como combustível para transportes até o fim de 2030; apoio financeiro subsidiado à produção de biogás a partir de esterco, biogás transformado em biometano e biometano liquefeito para LBG7; e apoio financeiro (até aproximadamente 45-65%) para todos os tipos de investimentos ou medidas que levem a altas reduções de emissões de GEE.

Célula de combustível de hidrogênio como aposta industrial na Coreia do Sul

A Coreia do Sul tem investido em políticas públicas para incentivar o uso de ônibus movidos a célula de combustível de hidrogênio, com foco em dominar uma das tecnologias destinadas à redução de emissões e transição energética. Até 2019, os esforços estavam concentrados em pesquisa e desenvolvimento em parceria com a indústria (Cho; Kim; Park, 2024). O impulso decisivo veio com o lançamento do *hydrogen economy roadmap* (HER) pelo governo sul-coreano, que estabeleceu metas ambiciosas, como a produção de quarenta mil ônibus a hidrogênio e a instalação de 1.200 estações de abastecimento até 2040.

O plano previa, entre outras ações, projetos-piloto, substituição de ônibus a *diesel* da frota policial, subsídios para aquisição e operação de veículos, ampliação da infraestrutura e estímulo à pesquisa e desenvolvimento (P&D) para melhorar eficiência e segurança (Government of Korea, 2019). No entanto, a meta de dois mil ônibus a hidrogênio para 2022 não foi alcançada – em 2024, a frota era de apenas mil veículos (10% da frota global de ônibus a combustível), todos produzidos pela sul-coreana Hyundai. Das 310 estações de abastecimento previstas para 2022, trezentas foram instaladas. Em contraposição, foram fabricados, em 2024, 2.800 ônibus elétricos, produção oito vezes maior do que a de ônibus a célula de combustível, o que demonstra que o hidrogênio ainda é uma alternativa complementar na Coreia do Sul (IEA, 2025).

Entre os desafios estão a baixa aceitação pública da tecnologia, especialmente por preocupações com segurança, e o fato de que a maior parte do hidrogênio produzido no país ainda tem origem fóssil, o que limita seu potencial real de descarbonização. Apesar disso, o hidrogênio segue como uma aposta estratégica para o país, dadas as restrições geográficas,

a escassez de fontes renováveis e a busca pela liderança tecnológica no setor (Cho; Kim; Park, 2024; Park; Kim, 2025).

Diversificação de alternativas na descarbonização das frotas nos EUA

Os EUA adotam uma postura relativamente neutra na descarbonização dos transportes, favorecendo veículos com diferentes fontes energéticas, ao contrário da China, que prioriza a eletrificação, ou do Brasil, que foca em biocombustíveis.⁷ Destacam-se instrumentos como créditos tributários e metas de eficiência que incentivam a redução de emissões no setor.

O governo americano também concede subsídios diretos para a compra de ônibus urbanos com baixa ou zero emissão, incluindo apoio para infraestrutura de recarga. Estados como Califórnia e Nova York lideram essas iniciativas e planejam adquirir apenas ônibus com emissão zero a partir de 2029. A Bloomberg New Energy Finance (BNEF, 2024) projeta que, em 2027, mais de 40% dos ônibus vendidos no país serão elétricos, a bateria ou a célula de combustível. No entanto, cabe observar que tais políticas estão sujeitas a alterações, nas administrações federal e local, que poderão afetar as metas indicadas (Allan; Turner; Eisenberg, 2022; BNEF, 2024; Hynes; Lemons, 2025).

A Califórnia concentra cerca de um terço da frota nacional de ônibus com emissão zero (2.285 veículos) e conta com diversas iniciativas estaduais para descarbonizar sua frota até 2040. O estado mantém uma rede consolidada de programas de apoio financeiro para aquisição de

7 Conforme BNEF (2024), a produção de veículos movidos à bateria elétrica na China tem direito a seis vezes mais pontos de crédito do que veículos híbridos, no âmbito do New Energy Vehicle Credit Mandate. Já no Brasil, tal incentivo se manifesta, por exemplo, por meio dos percentuais mínimos de etanol e *biodiesel* exigidos na gasolina e no *diesel*.

ônibus de baixa ou zero emissão (BNEF, 2024; Hynes; Lemons, 2025; Jeffers *et al.*, 2022).

Desde 2019, os subsídios estaduais passaram a focar exclusivamente em ônibus elétricos a bateria e ônibus a célula de combustível. Entre 2010 e maio de 2025, foram concedidos mais de 2.700 incentivos financeiros, totalizando US\$ 323,2 milhões, dos quais 87,5% foram destinados a ônibus elétricos e 8,1% a ônibus a célula de combustível. As vendas desses últimos cresceram 55% entre 2023 e 2024. Em 2024, foram anunciados US\$ 14,8 bilhões em investimentos públicos e privados na cadeia do hidrogênio, incluindo a produção local de mil ônibus a célula de combustível, considerados estratégicos para diversificar o transporte limpo (Hynes; Lemons, 2025).

O diesel renovável como alternativa para a descarbonização na Finlândia

Entre 2007 e 2010, a Autoridade de Transportes de Helsinque (Helsingin Seudun Liikenne – HSL) participou do projeto Optibio, que avaliou, com cerca de trezentos ônibus, o desempenho do HVO em condições reais, no maior teste com esse combustível até então. Foram testadas misturas com 30% de HVO e HVO 100%, comprovando que o HVO pode substituir integralmente o *diesel* fóssil sem adaptações nos veículos ou nos sistemas de abastecimento, além de reduzir significativamente as emissões de poluentes (Nylund *et al.*, 2011; 2020).⁸

A partir dessa experiência, a HSL passou a incentivar o uso de bio-combustíveis no transporte coletivo, oferecendo subsídios anuais de

8 Em comparação com o *diesel*, o HVO 100% reduziu, em média, as emissões de NOx em cerca de 10%; as emissões de material particulado e monóxido de carbono em cerca de 30%; e as emissões de hidrocarbonetos totais (THC) em 40%. Entretanto, as emissões de CO₂ foram reduzidas em apenas 5% (Nylund *et al.*, 2011).

€1,7 milhão a operadores que utilizassem combustíveis renováveis. Em 2019, cerca de 50% da frota contratada pela HSL já operava com biocombustíveis, evidenciando o impacto positivo da política na transição energética (Nylund *et al.*, 2020).

Apesar desse avanço, entre 2019 e 2024, a frota de ônibus a *diesel* (fóssil e/ou renovável) na Finlândia diminuiu 18% e sua participação caiu de 98% para 90% da frota total. No mesmo período, a frota de ônibus elétricos cresceu quase 15 vezes, alcançando 9% do total em 2024, o que confirma a avaliação de Nylund *et al.* (2020) sobre as dificuldades de mercado – como oferta, distribuição e preços – para consolidar os biocombustíveis como única rota de descarbonização.

Políticas nacionais de descarbonização do transporte

Desde o final do século XX, uma crescente mobilização global tem se debruçado sobre a transição para uma economia de baixo carbono. No entanto, tais iniciativas não têm se articulado com as políticas de transporte – setor altamente dependente de combustíveis fósseis e responsável por cerca de 25% das emissões globais de CO₂, e que permanece sendo, em escala global, o mais resistente a esforços de descarbonização (Milanez *et al.*, 2018). No Brasil, o setor de transporte respondeu por cerca de 10% (ou 223,8 milhões tCO₂) das emissões brutas nacionais totais de CO₂ (2,3 bilhões tCO₂) em 2023, correspondendo a mais da metade das emissões brutas de CO₂ do setor de energia (420 milhões tCO₂), de acordo com dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, c2025).

Tais questões de articulação também estão presentes na trajetória das políticas nacionais de energia e transporte. Entretanto, conforme será apresentado ao longo desta seção, o Governo Federal vem buscando, nos últimos dez anos, promover maior convergência e articulação entre essas políticas setoriais. Destaca-se, ainda, que tais programas têm sido aplicados na indústria automotiva sem distinção entre os tipos de veículos (leves, caminhões, ônibus etc.), o que faz com que os efeitos e resultados sejam atingidos de forma bastante heterogênea.

Políticas de estímulo aos biocombustíveis

As primeiras iniciativas públicas brasileiras para promover alternativas aos combustíveis fósseis surgiram há cerca de cinquenta anos, com o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) e o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos (Pró-Óleo), incluindo o Programa de Substituição do Óleo Diesel (Prodiesel). Essas políticas, no entanto, estavam mais voltadas a enfrentar os impactos do choque do petróleo na década de 1970 do que a promover a descarbonização, e perderam força com a estabilização dos preços internacionais do petróleo (Milanez *et al.*, 2022).

Nos anos 2000, a promoção de biocombustíveis foi retomada com o Programa Brasileiro de Desenvolvimento Tecnológico do Biodiesel (Probiodiesel). Esse esforço evoluiu e resultou, em 2005, na criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), que estruturou o marco institucional, legal e regulatório para o *biodiesel* no país. O PNPB também buscou descentralizar a produção regionalmente e diversificar as matérias-primas para aumentar a segurança dos investimentos (Costa; Bacellar, 2022; Milanez *et al.*, 2021; 2022).

A criação da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), por meio da Lei 13.576, de 26 de dezembro de 2017, marcou a primeira tentativa de integrar produção, comercialização e consumo sustentável de biocombustíveis a metas de redução de emissões de GEE, alinhando-se ao Acordo de Paris. Diferentemente do PNPB, o RenovaBio inclui outros biocombustíveis, como etanol, biometano e bioquerosene (BNDES; CGEE, 2024; Costa; Bacellar, 2022).

Para ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz energética, o RenovaBio estabeleceu metas de redução de emissões, certificação da produção e criação do crédito de descarbonização (CBIO). Entre 2020 e 2023, o programa evitou a emissão de 100 milhões de toneladas de CO₂ e gerou cerca de US\$ 2 bilhões em receitas para o setor de biocombustíveis (BNDES; CGEE, 2024; Milanez *et al.*, 2018; 2022).

A Lei do Combustível do Futuro (Lei 14.993/2024) instituiu um arcabouço abrangente para a aceleração da transição energética no Brasil ao promover o uso de combustíveis renováveis e de baixa emissão nos segmentos de transporte terrestre, aéreo e de gás natural, combinando exigências de mistura, incentivos à produção, certificação e regulamentação ambiental. Em síntese, a lei estabelece metas anuais crescentes para misturas de *biodiesel* no *diesel* veicular, podendo atingir ao menos 20% até 2030. Com relação ao biometano, a lei cria o CGOB, título comercializável, emitido pelos produtores ou importadores desse insumo, que torna a sua origem comprovável e o seu uso demonstrável.

A descarbonização nos regimes automotivos brasileiros recentes

A indústria automobilística brasileira foi amplamente protegida desde sua instalação no país até o início dos anos 1990. A abertura econômica em 1990-1991 encerrou os regimes discricionários de proteção, e em 1995, com o aumento das importações e a preocupação com a fuga de investimentos, o Governo Federal retomou políticas industriais voltadas ao setor, conhecidas como “regime automotivo brasileiro”, para atrair montadoras, modernizar a produção e fortalecer a cadeia de fornecedores (De Negri, 1999).

O Programa Inovar-Auto (2013-2017) introduziu metas de emissões de CO₂ para veículos leves e condicionou benefícios tributários, como crédito presumido de imposto sobre produtos industrializados (IPI) de até 30%, ao cumprimento de metas de eficiência energética, abrangendo inclusive veículos a biocombustíveis, híbridos e elétricos (Vaz; Barros; Castro, 2015). O programa seguinte, Rota 2030 (2018-2023), avançou ao incluir explicitamente a promoção de biocombustíveis e tecnologias alternativas. Durante o Inovar-Auto, a redução de emissões de CO₂ foi de 15,46%, enquanto o Rota 2030 estabeleceu metas de redução de 11% até 2022 e de 18% até 2030.

Com a criação do Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover), vigente entre 2024 e 2028, a descarbonização passou a ocupar posição central. O programa visa contribuir para a meta nacional de redução de 50% das emissões de carbono até 2030 (tendo como referência o ano de 2011), e ampliou seu escopo para incluir também máquinas agrícolas e rodoviárias. Entre as novidades estão exigências mínimas de reciclabilidade de veículos leves a partir de 2027 e de veículos pesados a partir de 2028.

O Mover modernizou o sistema de incentivos fiscais ao introduzir penalidades e recompensas no IPI com base em critérios como fonte de energia, consumo, potência, reciclabilidade e tecnologias assistivas, superando o foco restrito à eficiência energética e ao desempenho estrutural do Rota 2030. O novo modelo também busca reduzir a renúncia fiscal elevada dos programas anteriores (Presidente..., 2024).

Uma inovação importante foi a mudança da metodologia de cálculo das emissões: o Mover substituiu a abordagem “do tanque à roda” (considerando apenas o uso do veículo) pela metodologia “do poço à roda”, que contabiliza todo o ciclo da fonte energética, da extração ao consumo. A partir de 2027, será adotada a metodologia “do berço ao túmulo”, que avaliará a pegada de carbono de todos os componentes e etapas do ciclo de vida dos veículos (Mover, 2023; Entendendo..., 2023).

O Novo PAC e o estímulo à demanda por transporte público coletivo descarbonizado

Em 2023, o Governo Federal lançou o Programa de Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano (Refrota), incluído no Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC) e voltado à renovação de frotas de ônibus. O Refrota foi impulsionado pela crise proveniente da pandemia e pela necessidade de modernização dos sistemas de transporte. Diferentemente das políticas citadas anteriormente, que atuam transversalmente à indústria automotiva ou à produção de energia, o Refrota aplica-se apenas aos veículos de transporte público. Inicialmente focado em veículos a *diesel*, o programa passou a priorizar OEBs⁹ devido à crescente preocupação com a redução de emissões de GEE.

9 Conforme item 3.1. do anexo da Portaria MCid 1.273, de 6 de outubro de 2023, a priorização de propostas com incremento de ônibus elétricos na frota constou entre os critérios de seleção.

Por meio da Portaria MCid 445, de 7 de maio de 2024, foram selecionados projetos que preveem a aquisição de 2.296 ônibus elétricos e seus sistemas de recarga, com investimento estimado em R\$ 7,3 bilhões, financiado por recursos do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS) e Fundo Clima. A iniciativa atenderá 49 municípios e sete estados, representando um avanço significativo no número de cidades interessadas na eletrificação de sua frota de ônibus urbanos, bem como na escala de eletrificação da frota nacional (Villen *et al.*, 2024). Além dessa, novas seleções estão previstas.

Oportunidades para a indústria brasileira

A indústria brasileira, com tradição nos setores energético, agrícola, automotivo e de serviços, tem historicamente respondido agilmente às demandas do transporte urbano, consolidando um mercado interno de ônibus e destacando-se nas exportações. No contexto da agenda de descarbonização do segmento de transportes públicos urbanos, o ingresso de novos fabricantes tende a reforçar esse padrão de resposta. Para tanto, é fundamental que políticas públicas eficazes e incentivos adequados sejam estabelecidos nos níveis federal, estadual e municipal, alinhando os interesses industriais às metas de sustentabilidade para a mobilidade urbana de forma estável e previsível.

O mercado doméstico de ônibus elétricos e híbridos com baterias apresenta importantes oportunidades e desafios. No que se refere às baterias, principal componente desses veículos, a indústria nacional atualmente se concentra na montagem de *battery packs* a partir de células

importadas. Embora haja iniciativas, como o projeto pré-industrial liderado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) para produção doméstica de células de íon de lítio (Neves, 2024), não há previsão de domínio integral desse processo no curto prazo. O Brasil, no entanto, conta com uma diversidade geológica que o posiciona como um ator na produção de minerais para baterias. Para aproveitar essas oportunidades, é fundamental aumentar a cooperação entre agentes de mercado, identificar barreiras para investimentos e desenvolver políticas que reduzam desigualdades regulatórias e de acesso a capital. Os esforços governamentais que financiam a inovação e transição climática podem impulsionar ainda mais esses avanços (Dias; Silva, 2025).

Nesse sentido, o Serviço Geológico do Brasil (SGB) realiza estudos para atrair investimentos em minerais estratégicos (Brasil..., 2024). O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Vale S.A., em parceria com o Ministério de Minas e Energia (MME), também estruturaram o Fundo de Investimento em Participações (FIP) Minerais Estratégicos para fomentar a produção de insumos essenciais, como lítio, terras raras, níquel e grafite¹⁰ (BNDES e Vale..., 2024). Adicionalmente, o BNDES flexibilizou sua política de conteúdo nacional para produtos vinculados à descarbonização, como ônibus eletrificados, baterias de íon de lítio e unidades de recarga, adotando índices menores de nacionalização, mas com metas crescentes para fortalecer as cadeias locais. Nesse contexto, constam atualmente cadastrados para serem adquiridos, por meio de financiamento do BNDES, 18 modelos de ônibus elétricos, envolvendo seis fabricantes instalados no Brasil.¹¹

10 O fundo reserva até R\$ 1 bilhão para investimentos em até vinte empresas de pequeno e médio porte que atuem na cadeia produtiva de minerais estratégicos. Desse montante, BNDES e Vale deverão aportar até R\$ 250 milhões cada, sendo o restante proveniente de investidores nacionais e internacionais.

11 Consulta ao menu “Credenciamento FINAME” da página do Portal do Cliente do BNDES. Disponível em: https://web.bnDES.net/cfi_spa/item-financiavel-busca. Acesso em: 8 jul. 2025.

A introdução de ônibus urbanos movidos a células de combustível de hidrogênio, por sua vez, representa uma oportunidade industrial, apesar dos desafios tecnológicos e da dependência de incentivos. O desenvolvimento de uma demanda local consistente por hidrogênio verde poderia reposicionar o Brasil como fornecedor relevante e impulsionar a criação de infraestrutura de abastecimento. Destaca-se o potencial da região Nordeste, que reúne condições favoráveis como ampla geração de energia renovável e polos industriais e logísticos preparados (BNDES, 2022).

Contudo, soluções tecnológicas disruptivas nem sempre são as mais adequadas isoladamente, conforme já visto. Tecnologias consolidadas, ou até mesmo aquelas em desuso, podem inspirar adaptações mais eficientes para o contexto local. O projeto do BRT-ABC, apoiado pelo BNDES com recursos do Fundo Clima, é um bom exemplo disso, além de ilustrar a capacidade da indústria nacional de responder a investimentos em mobilidade urbana sustentável.

Os biocombustíveis também seguem como importante vetor de descarbonização. A adoção de metas graduais de aumento da participação de combustíveis renováveis no *diesel* é uma estratégia compatível com os meios atualmente utilizados. Em razão do seu custo mais elevado em relação ao *biodiesel*, bem como da limitação técnica do uso deste último na mistura com o *diesel* fóssil, o avanço do uso do HVO no Brasil parece ainda depender da adoção de percentuais mais expressivos de combustíveis renováveis no *diesel* comercial do que os atuais. Esse cenário demandaria o desenvolvimento de uma cadeia de produção e distribuição de HVO, bem como a instituição de política pública para avaliar os impactos econômicos e sociais dessas transições. Tal como a indústria de *biodiesel*, o HVO pode fortalecer a indústria nacional, aproveitando tanto a capacidade brasileira de produzir matérias-primas,

como óleos vegetais e resíduos agrícolas, quanto a disponibilidade diferenciada de energia renovável.

A indústria automotiva nacional dispõe de grandes empresas com capacidade de investimento e exportação, boa gestão financeira, elevado faturamento, além de práticas modernas de produção (Plattek; Villarim; Cavalcanti, 2025). Está, portanto, preparada para acompanhar essas metas, com capacidade de produção de chassis e carrocerias eficientes, com plataformas elétricas, híbridas ou em conformidade com o padrão Euro VI, e já adaptadas para biometano e biocombustíveis líquidos.

Considerações finais

A transição para um transporte público de baixa emissão requer uma abordagem pragmática aliada a uma visão estratégica. Entre as várias rotas tecnológicas analisadas, os OEBs despontam como a solução com maior potencial de se consolidar, no longo prazo, como padrão dominante. Essa expectativa é reforçada pelo movimento da própria indústria automotiva, que tem direcionado crescentemente seus investimentos e inovações para a eletromobilidade.

Entretanto, tecnologias baseadas em biocombustíveis, como etanol, HVO e biometano, embora mais limitadas em seu potencial de transformação estrutural, podem desempenhar papel imediato, horizontal e, sobretudo, em nichos regionais ou como soluções de transição em locais onde a eletrificação completa seja inviável no curto prazo. Da mesma forma, veículos híbridos com fontes renováveis oferecem flexibilidade operacional e podem acelerar a substituição de frotas mais antigas.

Nesse cenário, é razoável que o país desenvolva e persiga uma estratégia nacional clara para a descarbonização do transporte público, assentada em aspectos como a sua posição destacada na produção de ônibus, a sua competência agrícola e de produção de insumos energéticos de base biológica e a sua matriz de geração elétrica relativamente limpa. Essa estratégia pode reconhecer a centralidade dos OEBs como principal agente de descarbonização no longo prazo, mas também identificar onde, como e quando outras tecnologias devem ser preferencialmente aplicadas.

A indústria brasileira, apoiada em sua tradição nos setores energético, agrícola e automotivo, tem capacidade para liderar a descarbonização do transporte público em qualquer das plataformas tecnológicas. O país detém riqueza mineral estratégica para fabricação de baterias e componentes elétricos, além de potencial para produção de biocombustíveis como *biodiesel* e HVO. Com políticas públicas de incentivo e financiamento, a indústria pode expandir a produção, inovar e ganhar competitividade global. O desenvolvimento de tecnologias emergentes, como hidrogênio verde, oferece oportunidades adicionais para diversificar e fortalecer a cadeia produtiva.

A adoção planejada e integrada das múltiplas soluções de descarbonização acelera a transição energética no transporte público urbano brasileiro, respeitando as especificidades locais. Além disso, conforme defendido pela NIB, essa abordagem também gera oportunidades para o desenvolvimento de competências tecnológicas diversificadas e para o adensamento de múltiplas cadeias produtivas, impulsionando a reindustrialização verde no país.

Referências

A HISTÓRIA de Werner von Siemens e suas principais invenções. *Blog com Ciência – Museu WEG de Ciência e Tecnologia*, Santa Catarina, 13 dez. 2020. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/a-historia-de-werner-von-siemens-e-suas-principais-invencoes/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

ALLAN, M.; TURNER, S.; EISENBERG, T. *De Santiago a Shenzhen: como os ônibus elétricos estão movendo as cidades*. Nova York: ITDP, 2022. Disponível em: https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2022/05/De-Santiago-a-Shenzhen-como-os-onibus-eletricos-estao-movendo-as-cidades_Completo.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário Anfavea 2025: Indústria Automobilística Brasileira*. Brasília, DF: Anfavea, 2025. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuarios/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Nota Técnica 43/2018/SBQ/RJ*. Alteração da Resolução ANP nº 30, de 23 de junho de 2016 [...]. Rio de Janeiro: ANP, 2018. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cp-2-2018/nota_tec-43_2018-consol_sugest.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Informações sobre o levantamento de preços de combustíveis*. Rio de Janeiro: ANP, 21 out. 2020. Atualizado em: fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/informacoes-levantamento-de-precos-de-combustiveis>. Acesso em: 21 mai. 2025.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2024*. Rio de Janeiro: ANP, 30 jul. 2024. Seção 4: biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/anuario/anuario-estatistico-2024-dados-abertos#Secao4>. Acesso em: 6 jun. 2025.

ÅSLUND, V.; PETTERSSON-LÖFSTEDT, F. Rationales for transitioning to electric buses in Swedish public transport. *Research in Transportation Economics*, Berlin, v. 100, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885923000483?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mai. 2025.

BAZANI, A. Trólebus completa 75 anos no Brasil com risco de acabar na capital paulista, mas com estimativas no ABC. *Diário do Transporte*, 21 abr. 2024. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2024/04/21/trolebus-completa-75-anos-nobrasil-com-risco-de-acabar-na-capital-paulista-mas-com-estimativas-no-abc/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Gás para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: BNDES, 2020. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19681>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Hidrogênio de baixo carbono: oportunidades para o protagonismo brasileiro na produção de energia limpa*. Rio de Janeiro: BNDES, 2022. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/22665/1/PRLiv_Hidrog%C3%AAnio%20de%20baixo%20carbono_215712.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL; CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (coord.). *Bioethanol: fast track to mobility decarbonization: summary for policy makers*. Rio de Janeiro: BNDES, 2024. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/25507>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BNDES E VALE anunciam vencedor que vai gerir o fundo de minerais estratégicos. *Agência BNDES de Notícias*, Rio de Janeiro, 2 out. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/detalhe/noticia/BNDES-e-Vale-anunciam-vencedor-que-vai-gerir-o-fundo-de-minerais-estrategicos/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

BNEF – BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. *Electric Vehicle Outlook 2024*. New York: BNEF, 2024.

BRASIL tem potencial para ampliar produção de lítio e 2% para 25%. *Agência Gov*, Rio de Janeiro, 4 jul. 2024. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202407/brasil-tem-potencial-para-ampliar-producao-de-litio-de-2-para-25-sgb>. Acesso em: 22 mai. 2025.

CIBIOGÁS – CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS. *Panorama do biogás 2024*. Foz do Iguaçu: CIBiogás, 2024. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2025/06/PANORAMA-DO-BIOGAS-2024.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.

CONTEMORI, L. Stellantis validates Factorial Energy solid-state battery cells. *Reuters*, London, 24 abr. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/stellantis-validates-factorial-energy-solid-state-battery-cells-2025-04-24/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

COSTA, R. C.; BACELLAR, R. M. H. Descarbonização da matriz energética da Amazônia: análise de barreiras e oportunidades para biogás e biodiesel. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 58, p. 359-422, 2022. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/23088>. Acesso em: 31 jul. 2025.

COTTA, E. Com aumento da mistura no diesel, mais soja no tanque e menos nos navios em 2024. *AgFeed*, 28 dez. 2023. Disponível em: <https://agfeed.com.br/caminhos-do-agro/com-aumento-da-mistura-no-diesel-mais-soja-no-tanque-e-menos-nos-navios-em-2024>. Acesso em: 21 mai. 2025.

CHO, A.; KIM, H.; PARK, S. Resurgence of the hydrogen energy in South Korea's government strategies from 2005 to 2019. *International Journal of Hydrogen Energy*, Oxford, v. 65, p. 844-854, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319924013053?via%3Dihub>. Acesso em: 31 jul. 2025.

DE NEGRI, J. A. O custo de bem-estar do regime automotivo brasileiro. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 215-242, 1999. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/5032>. Acesso em: 31 jul. 2025.

DIAS, P. P.; SILVA, J. P. C. Oportunidades na cadeia de materiais minerais para baterias de veículos elétricos. In: MIGUEZ, T. (coord.). *Descarbonização dos transportes: perspectivas diante da transição energética*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2025. p. 69-91.

E-BUS RADAR. Ônibus elétricos América Latina. *E-bus Radar*, c2025. Disponível em: <https://www.ebusradar.org/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ENTENDENDO o conceito “do Poço à Roda” no setor automotivo. *ABGI – Empresa do Grupo SNEF*, 17 jul. 2023. Disponível em: <https://abgi-brasil.com/o-conceito-do-poco-a-roda-e-a-importancia-na-nova-etapa-do-rota-2030/>. Acesso em: 14 mai. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese 2024*. Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_Síntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Resíduos rurais e o consumo de combustíveis: quanto é possível substituir de forma competitiva? Rio de Janeiro: EPE, jun. 2025a. (Fact Sheet SI Energia – Biometano). Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-372/topico-679/SEE_2025_FactSheet_SI Energia_Biometano.pdf. Acesso em: 1 set. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Intensidade de carbono no transporte rodoviário*. Rio de Janeiro: EPE, jun. 2025b. Nota Técnica EPE-DPG-SDB-2025/03. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-770/NT-EPE-DPG-SDB-2025-03_Intensidade_de_Carbono_Transporte_Rodoviário.pdf. Acesso em: 30 jun. 2025.

ESPECIALISTAS debatem o uso do biometano como alternativa ao diesel no transporte público. *Portal da Prefeitura de São Paulo*, São Paulo, 25 mar. 2025. Disponível em: <https://capital.sp.gov.br/w/especialistas-debatem-o-uso-do-biometano-como-alternativa-ao-diesel-no-transporte-público>. Acesso em: 9 jun. 2025.

FENABRAVE – FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário 2024 Fenabrave: o desempenho da distribuição automotiva no Brasil*. São Paulo: Fenabrave, 2024. Disponível em: <https://www.fenabrave.org.br/anuarios/Anuário2024.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2025.

GAMA, M. USP testa hidrogênio de etanol em ônibus e carros. *Poder360*, Brasília, DF, 10 mar. 2025. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/opiniaio/usp-testa-hidrogenio-de-etanol-em-onibus-e-carros/>. Acesso em: 22 mai. 2025.

GOVERNMENT OF KOREA. *Hydrogen Economy Roadmap*. Seoul: Government of Korea, 2019. Disponível em: https://h2council.com.au/wp-content/uploads/2022/10/KOR-Hydrogen-Economy-Roadmap-of-Korea_REV-Jan19.pdf. Acesso em: 20 mai. 2025.

HVO custa mais de R\$ 9 por litro. *Fecombustíveis – Federação Nacional do Comércio de Combustíveis e de Lubrificantes*, Rio de Janeiro, 29 jul. 2021. Disponível em: <https://www.fecombustiveis.org.br/noticia/hvo-custa-mais-de-r-9-por-litro/247175>. Acesso em: 21 mai. 2025.

HYNES, M.; LEMONS, K. *Zeroing in on Zero-Emission Buses: The U.S. Advanced Technology Transit Bus Index*. Pasadena: CALSTART, 2025. Disponível em: https://calstart.org/wp-content/uploads/2025/03/20250305-ZIO-ZEB-March-2025_Final.pdf. Acesso em: 21 mai. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2025: Trends and developments in electric vehicle markets*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/0aa4762f-c1cb-4495-987a-25945d6de5e8/GlobalEVO Outlook2025.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

JEFFERS, M. *et al.* Comprehensive Review of California's Innovative Clean Transit Regulation: Phase I Summary Report. *National Renewable Energy Laboratory*, Golden, 2022. Disponível em: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/comprehensive-review-of-californiaaposs-innovative-clean-transit->. Acesso em: 21 mai. 2025.

KLACKENBERG, L. *Biomethane in Sweden – Market overview and policies*. Stockholm: Energigas Sverige, 2024. Disponível em: <https://www.energigas.se/Media/1ernoznh/biomethane-in-sweden-240327.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2025.

LASCALA, T. L. S. *Externalidades da substituição do diesel pelo etanol no transporte público urbano da Região Metropolitana de São Paulo*. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-10082011-113457/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

LEMO, G. L.; CARDOSO, M. F. O.; COSTA, H. K. M. Biogás e biometano no Brasil: panorama e perspectivas. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, Curitiba, v. 63, p. 464-485, jan./jun. 2024. Disponível em: https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2025/03/andriguettofilhoLemos_PT_RAEL.pdf. Acesso em: 1 set. 2025.

LIU, X. *et al.* Life cycle greenhouse gas emissions of Brazilian sugar cane ethanol evaluated with the GREET model using data submitted to RenovaBio. *Environmental Science & Technology*, Washington, DC, v. 57, n. 32, p. 11814-11822, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10433513/>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MISSÃO 5 da Nova Indústria Brasil destina R\$ 468,38 bi, entre recursos públicos e privados, para bioeconomia e descarbonização. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 12 dez. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/dezembro/missao-5-da-nova-industria-brasil-destina-r-468-38-bi-entre-recursos-publicos-e-privados-para-bioeconomia-e-descarbonizacao/>. Acesso em: 5 jun. 2025.

MELLONI, E. O etanol ganha status global para a mobilidade elétrica net zero. *Brasil Energia*, Rio de Janeiro, 26 fev. 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/acoes-em-transicao-energetica/o-etanol-ganha-status-global-para-a-mobilidade-eletrica-net-zero>. Acesso em: 22 mai. 2025.

MILANEZ, A. Y. *et al.* Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 47, p. 221-275, mar. 2018. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15384>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MILANEZ, A. Y. *et al.* Biocombustíveis de aviação no Brasil: uma agenda de sustentabilidade. *Revista do BNDES*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 361-398, dez. 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22048?&locale=pt_BR. Acesso em: 31 jul. 2025.

MILANEZ, A. Y. *et al.* Biodiesel e diesel verde no Brasil: panorama recente e perspectivas. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 28, n. 56, p. 41-71, set. 2022. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/22585>. Acesso em: 31 jul. 2025.

MOVER: Programa de Mobilidade Verde é lançado. *Casa Civil*, Brasília, DF, 30 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>. Acesso em: 14 mai. 2025.

NEVES, L. Fabricação de baterias de lítio no Brasil pode ser incentivada com nova política. *pv magazine*, 23 fev. 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2024/02/23/fabricacao-de-baterias-de-litio-no-brasil-pode-ser-incentivada-com-nova-politica/>. Acesso em: 21 mai. 2025.

NTU – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. *Anuário NTU 2023-2024*. Brasília, DF: NTU, 2024. Disponível em: <https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638573500081945042.pdf>.

NYLUND, N. *et al.* *Optimized usage of NExBTL renewable diesel fuel OPTIBIO*. Espoo: VTT Tiedotteita, 2011. Disponível em: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2011/T2604.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2025

NYLUND, N. *et al.* On route to clean bus services. In: TRANSPORT RESEARCH ARENA (TRA2020), 8, 2020. *Proceedings* [...]. Helsinki: Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2020. Disponível em: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/33906793/On_route_to_clean.pdf. Acesso em: 31 jul. 2025.

OGNISSANTO, F.; JONES, M. *Low Emission Bus Scheme Monitoring Programme: Final report*. London: TRL, 2023. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/646f304c24315700136f4228/lebs-monitoring-report.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ONSTAD, E. Battery maker Blue Solutions plans 2-billion-euro gigafactory in France. *Reuters*, London, 28 mai. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/battery-maker-blue-solutions-plans-2-billion-euro-gigafactory-france-2024-05-28/>. Acesso em: 27 mai. 2025.

OTTOSSON, M.; DANELL, J. Categorization, identification, and analysis of barriers to market growth in biogas solutions – The case of Sweden. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 476, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624032086?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mai. 2025.

PARK, J.; KIM, C. Current challenges to achieving mass-market hydrogen mobility from the perspective of early adopters in South Korea. *Sustainability*, Basel, v. 17, n. 6, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/3221914>. Acesso em: 31 jul. 2025.

PLATTEK, B.; VILLARIM, P. R.; CAVALCANTI, C. E. S. A descarbonização do setor automotivo como uma oportunidade para a engenharia automotiva brasileira. In: MIGUEZ, T. (coord.). *Descarbonização dos transportes: perspectivas diante da transição energética*. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2025. p. 41-68. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/27347>. Acesso em: 31 jul. 2025

PRESIDENTE sanciona lei do Programa Mover. *Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços*, Brasília, DF, 27 jun. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/junho/presidente-sanciona-lei-do-programa-mover>. Acesso em: 14 mai. 2025.

PRODUÇÃO brasileira superou marca dos 9 milhões de m³ em 2024. *BiodieselBR*, 28 jan. 2025. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/producao/producao-brasileira-superou-marca-dos-9-milhoes-de-m-em-2024-280125>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SANTOS, C. A. L. Baterias de íons lítio para veículos elétricos. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, São Paulo, v. 5, n. 17, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/71/81>. Acesso em: 21 mai. 2025.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. *SEEG*, c2025. Disponível em: <https://seeg.eco.br/>. Acesso em 2 set. 2025.

SOLEIMANI, A. *et al.* Progress in hydrogen fuel cell vehicles and up-and-coming technologies for eco-friendly transportation: an international assessment. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, v. 7, p. 3153-3172, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41939-024-00482-8>. Acesso em: 1 jul. 2025.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 41, p. 295-344, mar. 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4284>. Acesso em: 31 jul. 2025.

VILLEN, F. B. *et al.* Impulso à adoção de ônibus elétricos no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. 57-96, set. 2024. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/26107>. Acesso em: 31 jul. 2025.

VOURLIOTAKIS, G.; PLATSAKIS, O. *Greenhouse gas intensities of transport fuels in the EU in 2021*. Copenhagen: European Environment Agency, 2023. ETC-CM Report 2023/03. Disponível em: https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/greenhouse-gas-intensities-of-transport-fuels-in-the-eu-in-2021/%40%40download/file/2023-03_3.pdf. Acesso em: 11 jun. 2025.