



Nota Técnica

Motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil

Contextualização e possíveis trajetórias de inserção

Dezembro 2023

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA

Coordenação Executiva

Angela Oliveira da Costa

Coordenação Técnica

Marcelo Castello Branco Cavalcanti

Equipe Técnica

Bruno Rodamilans Lowe Stukart

Filipe de Pádua Fernandes Silva

Patricia Feitosa Bonfim Stelling

Suporte Administrativo

Sergio Augusto Melo de Castro

MOTORIZAÇÕES ALTERNATIVAS EM CAMINHÕES E ÔNIBUS NO BRASIL: CONTEXTUALIZAÇÃO E POSSÍVEIS TRAJETÓRIAS DE INSERÇÃO

Nota Técnica NT-EPE-DPG-SDB-2023-02

Controle de revisão	Data	Descrição
1.0	12/12/2023	Versão aprovada para divulgação.

Foto da capa: Freepik.

Ficha técnica

(composição dos cargos em 11 de dezembro de 2023)



Ministro de Estado

Alexandre Silveira de Oliveira

Secretário Executivo

Efrain Pereira da Cruz

Secretário de Energia Elétrica

Gentil Nogueira de Sá Junior

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Vitor Eduardo de Almeida Saback

Secretário de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Pietro Adamo Sampaio Mendes

Secretário de Planejamento e Transição Energética

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira

www.mme.gov.br

Presidente

Thiago Guilherme Ferreira Prado

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Reinaldo da Cruz Garcia

Diretora de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloisa Borges Bastos Esteves

Diretora de Gestão Corporativa

Angela Regina Livino de Carvalho

www.epe.gov.br

Rio de Janeiro, 2023

Apresentação

O setor energético está passando por profundas transformações que devem influenciar, nas próximas décadas, a forma como produzimos e consumimos energia. Uma nova era da economia global está emergindo, baseada na sustentabilidade, com fontes de energia e tecnologias de baixo carbono. Essas tendências têm enormes implicações sobre empresas, governos e cidadãos em todo o mundo, orientando progresso tecnológico, decisões de investimento, formulação de políticas públicas, e escolhas e preferências dos consumidores.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), atenta a essas questões, participa de uma série de grupos técnicos e fóruns nacionais e internacionais de alto nível sobre energia sustentável, e realiza diversos estudos para avaliar os possíveis caminhos da transição energética e as suas consequências para o Brasil.

A descarbonização do setor de transportes requer uma atenção ímpar, dado que se trata do principal consumidor de energia do País. Em função das características do nosso desenvolvimento socioeconômico, o Brasil é extremamente dependente do transporte rodoviário para a movimentação de cargas e passageiros. O longo domínio dos derivados de petróleo na propulsão desse modo de transporte, em especial do óleo diesel, vem sendo desafiado na medida em que outras fontes energéticas e outras tecnologias de motorização caminham no sentido de maior competitividade econômica e externalidade ambiental.

Diante desse contexto, esta Nota Técnica fornece uma análise sobre potenciais trajetórias de inserção de tecnologias alternativas de motorização na frota brasileira de caminhões e ônibus. Esse estudo é útil ao explorar distintos caminhos desta penetração, avaliando os potenciais impactos de cada trajetória sobre a demanda energética, as emissões de gases de efeito estufa e o perfil da frota circulante de veículos pesados no Brasil.

Este documento compõe uma série de estudos de demanda de energia do setor de transporte, e espera-se que possa contribuir para melhor compreensão dos caminhos possíveis, bem como para estimular o debate sobre as melhores soluções para tornar o transporte mais eficiente e sustentável no Brasil.

Índice

Sumário Executivo	10
Introdução	14
1. Desenvolvimentos recentes e perspectivas para o mercado brasileiro de caminhões e ônibus	17
Evolução recente das vendas de caminhões e ônibus	17
Perspectivas para o mercado de veículos pesados	23
2. Panorama da difusão do elétrico a bateria e do gás natural em caminhões e ônibus no Brasil	25
Oferta de propulsões alternativas no mercado brasileiro de veículos pesados	25
Direcionadores da inserção do elétrico a bateria e do gás natural	30
3. Trajetórias de inserção de motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil	37
Trajetória de Referência	38
Trajetória EV+: Inserção acelerada da propulsão elétrica a bateria	40
Trajetória GN+: Inserção acelerada da propulsão a gás natural comprimido	42
Análise comparativa das trajetórias	44
4. Impactos potenciais da inserção de motorizações alternativas na frota, na demanda energética e nas emissões de caminhões e ônibus	47
Frota circulante	49
Demanda energética	52
Emissões de gases de efeito estufa	56
5. Considerações finais	59
Referências	61

Lista de Figuras

Figura 1-1 Licenciamento anual de caminhões e ônibus novos no Brasil, por tipo de veículo, 1960 - 2022	18
Figura 1-2 Licenciamento anual de caminhões novos no Brasil, por categoria, 2000 - 2022	20
Figura 1-3 Licenciamento anual de caminhões e ônibus novos no Brasil, por tipo de motorização, 1960 - 2022	22
Figura 1-4 Projeção do licenciamento anual de caminhões e ônibus novos no mercado brasileiro	24
Figura 2-1 Licenciamento anual de novos caminhões e ônibus elétricos e a gás natural no Brasil, 2018 - 2022	25
Figura 3-1 Trajetória de Referência: perfil da inserção de motorizações alternativas no licenciamento de caminhões e ônibus novos no Brasil	38
Figura 3-2 Trajetória EV+: perfil da inserção de motorizações alternativas no licenciamento de caminhões e ônibus novos no Brasil	41
Figura 3-3 Trajetória GN+: perfil da inserção de motorizações alternativas no licenciamento de caminhões e ônibus novos no Brasil	44
Figura 3-4 Quadro síntese dos principais direcionadores e dos perfis de vendas de novos caminhões e ônibus em cada trajetória	45
Figura 3-5 Trajetórias de inserção de motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil	46
Figura 4-1 Perfil de motorização da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil	50
Figura 4-2 Frota circulante de veículos pesados com propulsão elétrica a bateria e com propulsão a gás natural em 2050 no Brasil	51
Figura 4-3 Demanda energética total da frota circulante de veículos pesados no Brasil	53
Figura 4-4 Demanda energética de caminhões e ônibus no Brasil por tipo de motorização	54
Figura 4-5 Demanda brasileira de óleo diesel, energia elétrica e gás natural da frota circulante de caminhões e ônibus	55

Figura 4-6 Emissões de gases de efeito estufa da frota circulante de veículos pesados no Brasil	58
---	----

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 Modelos de caminhões elétricos a bateria disponíveis no mercado brasileiro em novembro de 2023	27
Tabela 2-2 Atuação das principais fabricantes de caminhões e ônibus quanto à inserção de motorizações alternativas no mercado brasileiro	30
Tabela 2-3 Diagrama conceitual de comparação das condições atuais das tecnologias de motorização para caminhões e ônibus	36

Lista de Box

Box 1-1 Classificação de caminhões por categoria	21
Box 4-1 Metodologia da EPE para projeção da demanda energética brasileira do setor de transportes	48
Box 4-2 Metodologia de cálculo da frota circulante de caminhões e ônibus	49
Box 4-3 Metodologia de cálculo da demanda energética de caminhões e ônibus...	52
Box 4-4 Metodologia de cálculo das emissões de gases de efeito estufa de caminhões e ônibus	57

Abreviaturas e siglas

Anfavea	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEV	Battery Electric Vehicle (ou Veículo Elétrico a Bateria, em português)
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BRT	Bus Rapid Transit (ou Ônibus de Trânsito Rápido, em português)
CEPAL	Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe
CMT	Capacidade Máxima de Tração
C-WTVC	China-World Transient Vehicle Cycle (ou Ciclo de Condução Transiente Chinês, em português)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (ou Veículo Elétrico a Célula de Combustível, em português)
Finame	Fundo de Financiamento para Aquisição de Máquinas e Equipamentos Industriais
GNC	Gás Natural Comprimido
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
HEV	Hybrid Electric Vehicle (ou Veículo Híbrido, em português)
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
MaaS	Mobility as a Service (ou Mobilidade como Serviço, em português)
MIT	Modelo Integrado de Transporte
NEDC	New European Driving Cycle (ou Novo Ciclo de Condução Europeu, em português)
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PBT	Peso Bruto Total

PBTC	Peso Bruto Total Combinado
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (ou Veículo Híbrido Plug-in, em português)
PIB	Produto Interno Bruto
pkm	Passageiro-Quilômetro
Proconve	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PSI	Programa de Sustentação do Investimento
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCO	Total Cost of Ownership (ou Custo Total de Propriedade, em português)
tep	Tonelada Equivalente de Petróleo
tkm	Tonelada-Quilômetro Útil
USBEP	United States-Brazil Energy Forum (ou Fórum de Energia Estados Unidos-Brasil, em português)
WLTP	Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (ou Procedimento Mundial Harmonizado de Teste para Veículos Leves, em português)

Sumário Executivo

O Brasil tem registrado nos últimos anos um processo de aceleração da difusão de motorizações alternativas na frota de veículos pesados. As principais tecnologias que integram esse processo são a propulsão elétrica a bateria e a propulsão a gás natural.

A promoção dessas motorizações alternativas tem se intensificado a partir da maior mobilização de empresas em estratégias de sustentabilidade e em compromissos de redução de emissões, assim como pela reorientação de formuladores de políticas públicas e de governos locais em prol de políticas de mobilidade urbana sustentável.

Diante da perspectiva de demanda crescente por essas motorizações alternativas no País, os fabricantes que atuam no mercado nacional têm promovido lançamentos de novos modelos e anunciado planos para o futuro. Com isso, espera-se que a oferta de caminhões e ônibus com propulsão alternativa para os consumidores brasileiros seja cada vez maior ao longo dos próximos anos.

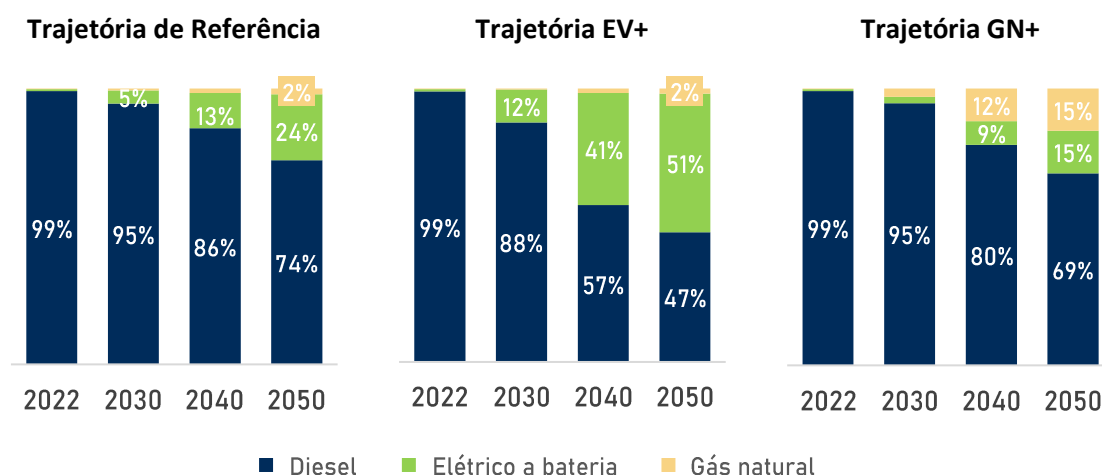
Nesse contexto, este estudo visou identificar possíveis trajetórias de inserção da propulsão elétrica a bateria e da propulsão a gás natural/biometano no mercado brasileiro de caminhões e ônibus até 2050, avaliando os seus impactos sobre a frota circulante, as emissões de gases de efeito estufa e a demanda energética desse segmento. Foram elaboradas três trajetórias, intituladas: (i) Trajetória de Referência; (ii) Trajetória EV+; e (iii) Trajetória GN+.

Trajetória de Referência: baseada em um contexto no qual o progresso tecnológico, investimentos na expansão de infraestrutura e desenvolvimento de políticas públicas em prol de motorizações alternativas progridem em linha com as expectativas atuais. Projeta-se a redução de algumas barreiras à adoção dessas tecnologias, sobretudo para a propulsão elétrica a bateria. Apesar desses avanços, o motor a diesel mantém a sua longa hegemonia.

Trajetória EV+: estabelecida em um contexto de ampla convergência de estratégias de fabricantes, fornecedores e clientes, assim como de esforços de governos locais e nacionais e de organizações multilaterais no sentido de maiores desenvolvimentos tecnológicos em prol de veículos elétricos a bateria. Com isso, há um crescimento acelerado da eletrificação para além de nichos de mercado, com avanços em diversas aplicações e categorias de caminhões e ônibus.

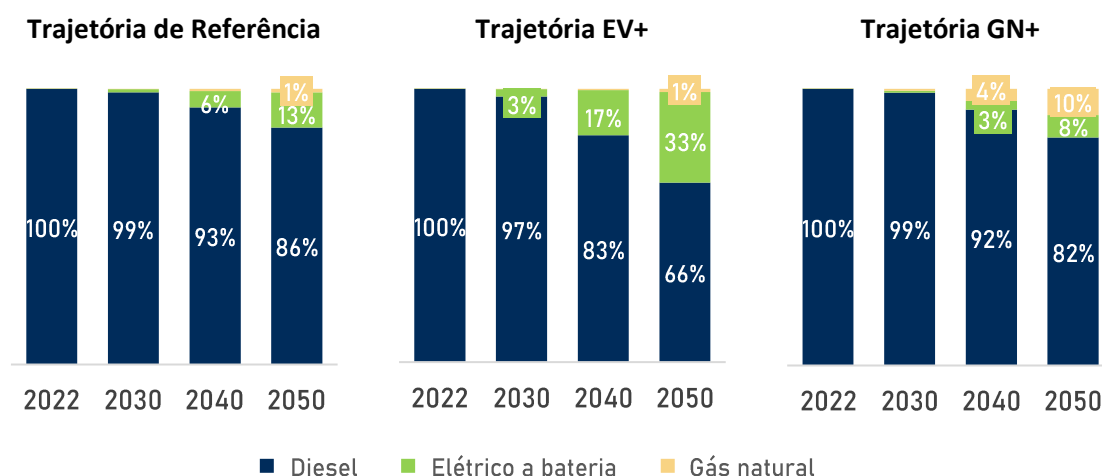
Trajetória GN+: fundamentada em um contexto favorável ao gás natural/biometano como combustível de veículos pesados no Brasil, proporcionando ganhos na competitividade técnica e econômica dessa propulsão em determinados segmentos do mercado brasileiro de caminhões e ônibus.

Perfil de motorização do licenciamento total de caminhões e ônibus novos no Brasil



As motorizações alternativas avançarão gradualmente nas vendas de caminhões e ônibus novos no Brasil ao longo das próximas décadas. O elétrico a bateria apresenta maior potencial de penetração nesse mercado, em comparação à alternativa do gás natural. Na Trajetória EV+, os elétricos alcançam metade do licenciamento total em 2050, com amplo domínio nas vendas de ônibus novos e progresso expressivo em caminhões. Por sua vez, o desenvolvimento da tecnologia a GNC/biometano pouco prospera além de nichos de mercado, atingindo máxima de 15% do mercado em 2050 na Trajetória GN+. Em que pesem esses avanços, as projeções indicam que os veículos pesados a diesel devem manter a sua hegemonia por um longo período.

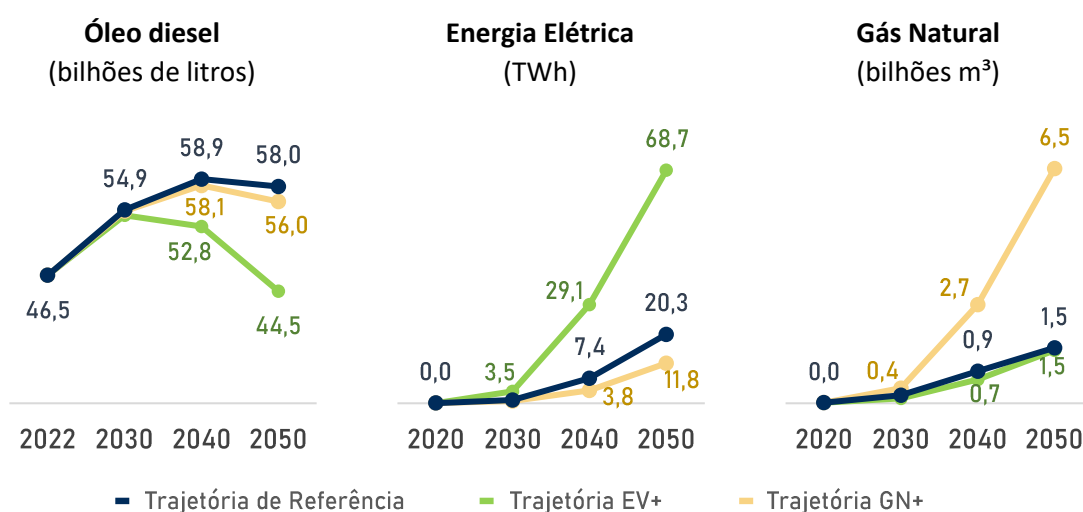
Perfil de motorização da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil



Os avanços do elétrico a bateria e do gás natural na frota circulante acompanham as curvas de penetração dessas tecnologias no licenciamento total, ainda que seus efeitos sejam sentidos de forma muito mais branda.

Na Trajetória de Referência, as motorizações alternativas respondem, em 2050, por 14% da frota circulante de veículos pesados. Grande parte desse avanço é do elétrico a bateria, enquanto a propulsão a gás natural exibe inserção limitada. A frota em 2050 é composta por 479 mil veículos pesados elétricos e 52 mil a gás natural. Na Trajetória EV+, o avanço do elétrico a bateria é mais consistente, alcançando em 2050 mais de 30% da frota circulante de veículos pesados (ultrapassando 1,2 milhão). Por sua vez, na Trajetória GN+, a propulsão a GNC/biometano alcança 10% da frota circulante de veículos pesados em 2050 (360 mil).

Demanda de óleo diesel, energia elétrica e gás natural de veículos pesados no Brasil



Em termos de consumo energético, o motor a diesel segue como a tecnologia majoritária em todas as trajetórias. A sua participação na demanda de energia de veículos pesados varia de 84% na Trajetória EV+ a 94% na Trajetória de Referência. Os elétricos a bateria alcançam participação máxima de 13% em 2050 na Trajetória EV+, enquanto o máximo da propulsão a gás natural é de 11% na Trajetória GN+.

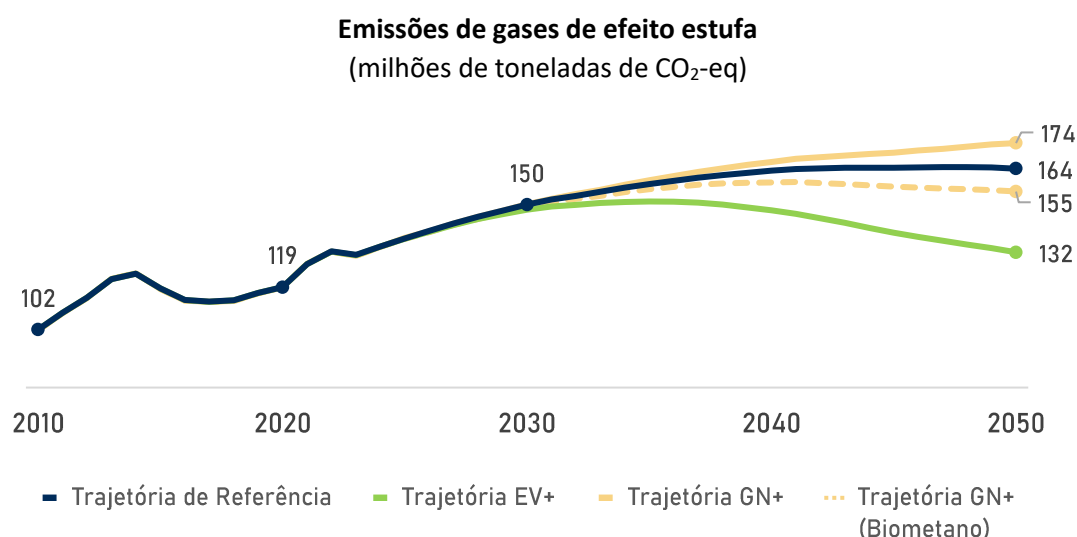
A análise individual das fontes energéticas indica que, a depender do grau de inserção das tecnologias alternativas de motorização na frota brasileira de veículos pesados, a variação do consumo pode ser expressiva.

O consumo de óleo diesel por caminhões e ônibus é 23% menor na Trajetória EV+ do que na Trajetória de Referência, diante da inserção mais acelerada da propulsão elétrica a bateria em detrimento do motor a diesel. Essa redução, de 14 bilhões de litros, é semelhante às importações brutas de diesel realizadas pelo Brasil em 2022, e equivale a cerca de 20% do atual consumo total deste combustível no País.

O consumo de energia elétrica por veículos pesados no Brasil é crescente em todas as três trajetórias e alcança a máxima de 68,7 TWh em 2050 na Trajetória EV+, sendo três vezes maior que o estimado na Trajetória de Referência. Esse montante equivale a 12% do consumo final de eletricidade do Brasil em 2022.

A demanda de gás natural da frota brasileira de caminhões e ônibus também é crescente nas trajetórias avaliadas neste estudo, alcançando 6,5 bilhões m³ em 2050 na Trajetória GN+. Essa quantidade é quatro vezes maior que a estimada na Trajetória de Referência, sendo equivalente a 26% da demanda total de gás natural no País e semelhante ao volume médio importado no Gasbol em 2022.

Emissões de gases de efeito estufa da frota circulante de veículos pesados no Brasil



Na Trajetória de Referência, as emissões de gases de efeito estufa da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil aumentam de 132 milhões de toneladas de CO₂-eq em 2022 para 164 milhões de toneladas de CO₂-eq em 2050, o que representa um crescimento de 0,8% a.a. no período.

A Trajetória EV+ alcança o menor nível de emissões de gases de efeito estufa em 2050 dentre as trajetórias avaliadas – 132 milhões de toneladas de CO₂-eq, sendo a mesma quantidade emitida por veículos pesados no Brasil em 2022. As emissões totais dessa trajetória são 20% menores em 2050 em comparação às da Trajetória de Referência.

Por sua vez, a Trajetória GN+ apresenta incremento de 6% nas emissões de gases de efeito estufa em 2050 em relação à trajetória referencial, uma vez que o gás natural de origem fóssil exibe maior intensidade de carbono que o diesel. Alternativamente, caso todo o consumo de gás natural da frota de caminhões e ônibus no Brasil seja realizado sob a forma de biometano, a emissão de gases de efeito estufa seria 5% menor em 2050 do que na trajetória referencial.

Introdução

O setor de transportes passa por profundas e importantes transformações globais. Essas mudanças envolvem essencialmente a forma com que pessoas e bens se movimentam, na busca por deslocamentos cada vez mais eficientes e sustentáveis.

No caso do transporte rodoviário, essas transformações se refletem, entre outros aspectos, sobre o modelo de negócio de toda a cadeia de valor da indústria automotiva. As montadoras estão migrando de um modelo tradicional, no qual o negócio é focado apenas em produzir e comercializar veículos, para uma estratégia de servitização. Nesse modelo, as montadoras ofertam pacotes combinados de produtos e serviços com foco nos clientes e seus negócios. Isso inclui serviços de compartilhamento de veículos, gestão de frotas e conectividade. É a expansão de soluções de mobilidade como serviço (*MaaS*, *mobility as a service*, em inglês).

Na trilha da transição global para economias de baixo carbono, verifica-se uma efervescência na aplicação de tecnologias alternativas de motorização e de novas fontes de energia em veículos de todos os tipos. Diversas opções têm despontado como promissoras, porém, como o setor automotivo é tradicionalmente vinculado à utilização de combustíveis líquidos derivados de petróleo, a velocidade da mudança é incerta. Além disso, as multinacionais fabricantes de veículos têm adotado distintas estratégias globais, com investimentos em um conjunto de tecnologias alternativas. Assim, a opção tradicional tende a conviver com as motorizações alternativas, em uma evolução gradativa, rumo a soluções mais eficientes e sustentáveis.

A busca pela redução das emissões de gases de efeito estufa e de poluentes locais no setor de transportes, com impactos positivos sobre meio ambiente e saúde pública, tem se colocado como componente fundamental de políticas ambientais e estratégias governamentais de diversos países, além de ser foco de empresas que, zelosas pelo posicionamento de sua imagem corporativa, adotam compromissos de sustentabilidade. Ademais, a expansão de fontes alternativas de energia pode promover uma maior segurança energética – tema em evidência atualmente e que tem ganhado cada vez mais atenção de governos em todo o mundo.

Na linha da mobilidade de baixo carbono, o desenvolvimento de alternativas de motorização para veículos pesados (caminhões e ônibus) representa um dos maiores desafios. Especialmente no caso do transporte de cargas, considerado um segmento de difícil descarbonização (“*hard-to-abate*”).

Essa questão é ainda mais relevante para o Brasil, uma vez que o País, de dimensões continentais, é amplamente dependente de caminhões para o transporte de mercadorias por todo o território nacional. O modo rodoviário responde por cerca de

70% da atividade do transporte de cargas, medida em tonelada-quilômetro útil (tku) (EPE, 2023a).

Por sua vez, os ônibus são a principal alternativa de locomoção para uma parcela expressiva da população brasileira, sendo o meio de transporte coletivo mais utilizado no País. O modo rodoviário coletivo é responsável por aproximadamente 40% da atividade do transporte de passageiros, medida em passageiro-quilômetro (pkm) (EPE, 2023a).

Na perspectiva global, os modelos com propulsão elétrica a bateria (BEV) e com propulsão a gás natural despontam atualmente como duas alternativas promissoras para veículos pesados. A inserção dessas tecnologias de motorização ainda é incipiente no mercado brasileiro de caminhões e ônibus, mas tem crescido de maneira expressiva recentemente.

A cada ano, novos modelos de veículos pesados elétricos e a gás natural têm sido disponibilizados ao consumidor pela indústria automotiva, inclusive no Brasil. Essas tecnologias têm superado barreiras e têm diminuído as diferenças técnicas e econômicas, como em termos de autonomia veicular e de preço de aquisição, para a alternativa tradicional dos motores de combustão interna a diesel. O avanço dessa tendência poderá promover a competitividade necessária para o desenvolvimento dessas alternativas no médio/longo prazo. Contudo, os desafios ainda são expressivos e se impõem em uma realidade na qual os aspectos técnicos e econômicos são fatores determinantes na escolha do consumidor.

Diante desse contexto, esta Nota Técnica tem por objetivo identificar e avaliar trajetórias possíveis de inserção de motorizações alternativas na frota brasileira de caminhões e ônibus no longo prazo. A análise é baseada em exercícios de cenarização, nos quais são avaliados o mercado potencial da propulsão elétrica a bateria e da propulsão a gás natural comprimido (GNC) até 2050.

Três trajetórias distintas de inserção de motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil foram elaboradas a partir de narrativas plausíveis para fundamentar premissas e hipóteses. A primeira trajetória é a de referência, que leva em conta as expectativas atuais para a evolução das tecnologias, dos investimentos necessários e das políticas públicas. As outras duas trajetórias analisadas consideram contextos de ampla convergência tecnológica, econômica e política para a penetração acelerada das motorizações alternativas, sendo uma trajetória para o elétrico a bateria e outra para o gás natural/biometano.

Apesar do progresso tecnológico, do desenvolvimento de protótipos e projetos-piloto nos últimos anos e do início recente da produção comercial em alguns países, a inserção no Brasil de caminhões e ônibus a célula combustível (FCEV), inclusive os movidos a hidrogênio e a etanol, não é objeto deste estudo. Também não foram consideradas outras motorizações alternativas que encontram-se atualmente em estágio menos avançado em pesquisa, desenvolvimento e sinalização do mercado.

Ademais, este estudo não considera a possibilidade de substituição parcial ou integral do óleo diesel por combustíveis renováveis em motores de combustão interna. Assume-se a evolução gradual do teor de biodiesel na mistura para as três trajetórias empregadas.

Em linhas gerais, exercícios de cenarização de longo prazo são extremamente dependentes das premissas e hipóteses assumidas. A evolução e difusão tecnológica, o desenvolvimento de políticas públicas e o comportamento de empresas e consumidores desempenham papéis cruciais no rumo das trajetórias elaboradas.

As trajetórias de penetração de motorizações alternativas não representam expectativas, metas ou compromissos oficiais do governo brasileiro, tampouco refletem orientações ou objetivos estratégicos para políticas públicas no País. Tratam-se, apenas, de exercícios de cenarização para melhor entendimento dos caminhos possíveis e dos seus impactos sobre a demanda energética, bem como para estimular o debate sobre as soluções para tornar o transporte mais eficiente e sustentável no Brasil.

O estudo, nesse sentido, explora diferentes opções de penetração de tecnologias alternativas em caminhões e ônibus no Brasil e fornecer uma análise detalhada dos potenciais impactos de cada trajetória sobre a demanda energética, as emissões de gases de efeito estufa e o perfil da frota circulante de veículos pesados no Brasil.

1. Desenvolvimentos recentes e perspectivas para o mercado brasileiro de caminhões e ônibus

Evolução recente das vendas de caminhões e ônibus

Expansão da indústria automotiva nos anos 2000

O mercado brasileiro de caminhões e ônibus registrou um período de elevado crescimento no início do século XXI. As vendas internas de veículos pesados novos aumentaram gradativamente de um patamar de 70 mil unidades por ano no início dos anos 2000 para um volume anual superior a 160 mil unidades entre 2010 e 2014.

Durante esse período, a atividade econômica brasileira crescia vigorosamente, sendo conduzida sobretudo pela constituição de um amplo mercado interno de consumo de massa (Bielschowsky, 2012). Em conjunto com o aumento da renda das famílias, a retomada do investimento público, o desenvolvimento do mercado de crédito e a implementação de políticas sociais de transferência de renda, as empresas automotivas encontraram no País um mercado consumidor crescente (Salerno, Arbix e Toledo, 2015). Assim, os rumos da política macroeconômica estiveram entre os principais determinantes do crescimento do setor automotivo nos anos 2000 (BNDES, 2018).

No que se refere especificamente ao mercado de caminhões e ônibus, o governo brasileiro implementou à época diversas medidas econômicas, políticas de ampliação de crédito e incentivos tributários¹ que estimularam as vendas desses veículos (EPE, 2021a). Ademais, o cenário externo benéfico, com aumento do comércio mundial, possibilitou a franca expansão das exportações de *commodities* agrícolas e minerais².

¹ Dentre as medidas adotadas, destacam-se: (i) o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), que incluía ações e investimentos em infraestrutura, saneamento, habitação, transporte, energia e recursos hídricos; (ii) os programas de expansão do crédito, com taxas de juros menores e maiores prazos de pagamento, operados pelo BNDES para aquisição de ônibus e caminhões novos, como o Finame, o Programa de Sustentação do Investimento (PSI) e o BNDES Procaminhoneiro; e (iii) sucessivas isenções do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) incidente sobre a aquisição de caminhões e ônibus (EPE, 2021a).

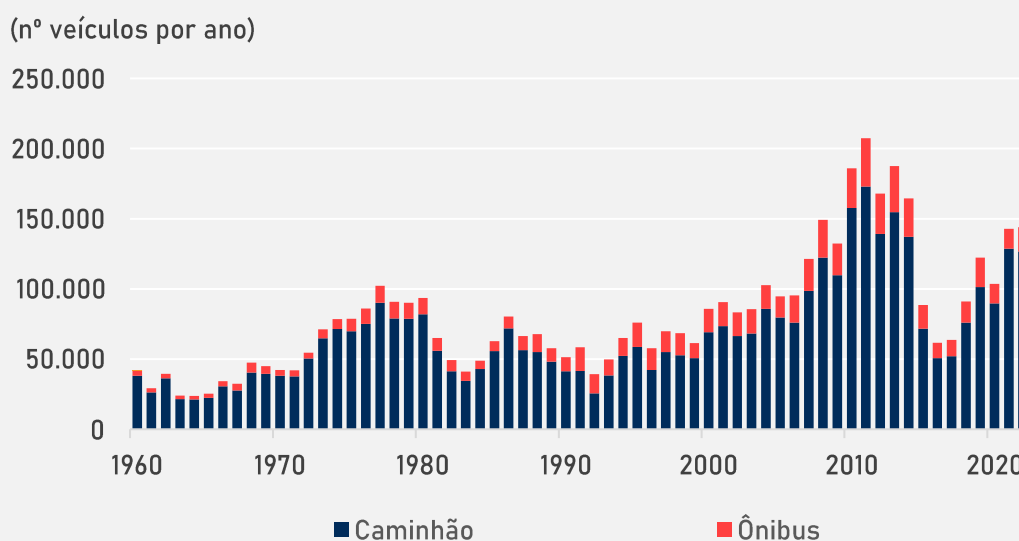
² A produção brasileira de grãos aumentou mais de cinco vezes nos últimos 30 anos, passando de 58 milhões de toneladas na safra 1990/1991 para 321 milhões de toneladas na safra 2022/2023 (CONAB, 2023a; CONAB, 2023b). Esse crescimento da produção agrícola nesse período foi resultado de fatores como: incentivos governamentais, melhorias nas técnicas agrícolas, mercado internacional em alta, desenvolvimento de parque industrial para produção de insumos e processamento dos grãos, melhorias no sistema de transporte, avanços nas pesquisas científicas e substituição das gorduras animais tradicionalmente usadas na alimentação por óleos vegetais (IBGE, 2023).

Como grande parte dessa produção está localizada no interior do País, houve um aumento considerável da demanda por serviços de transporte rodoviário de cargas em trechos de longas distâncias, o que impulsionou as vendas de caminhões novos (EPE, 2021b). Do modo similar, o crescimento expressivo da mobilidade nos grandes centros urbanos exigiu maior quantidade de ônibus em circulação no País para o transporte público coletivo. O recorde histórico do licenciamento total de veículos pesados novos foi alcançado em 2011, quando esse mercado ultrapassou a marca de 200 mil unidades comercializadas.

Nos anos subsequentes, com a forte retração do PIB de aproximadamente 7% no biênio 2015-2016 e seguido de baixo dinamismo da atividade econômica em 2017, a indústria automotiva experimentou um período de contração da demanda interna por veículos (BNDES, 2018). Contribuíram, também, a redução da expansão do crédito ao consumo e a reversão de medidas governamentais que estimulavam o mercado de caminhões e ônibus no País (EPE, 2021a). O licenciamento total de veículos pesados novos atingiu mínimas de aproximadamente 60 mil unidades por ano em 2016 e 2017.

Desde então, a indústria automotiva brasileira tem se recuperado gradativamente, acompanhando o ritmo do crescimento da atividade econômica e de recuperação da renda média das famílias. O volume anual de vendas foi de aproximadamente 140 mil caminhões e ônibus novos em 2021 e 2022 – ainda abaixo do patamar registrado na primeira metade da década de 2010 (Figura 1-1).

Figura 1-1 Licenciamento anual de caminhões e ônibus novos no Brasil, por tipo de veículo, 1960 - 2022



Fonte: Anfavea (2023).



Efeitos da pandemia de Covid-19

A pandemia de Covid-19 afetou duramente o mercado brasileiro de ônibus, em função dos efeitos mais evidentes da crise sanitária sobre o deslocamento de pessoas, em especial sobre o transporte público coletivo. A capacidade financeira de toda a cadeia de valor do segmento de ônibus foi comprometida, incluindo concessionárias de transporte urbano, empresas de viagens rodoviárias e governos locais. Assim, os planos de renovação e ampliação de frota de muitos desses agentes econômicos foram adiados ou cancelados, afetando o desempenho desse mercado (NTU, 2023). Como consequência, houve retração de 33% nas vendas de ônibus novos em 2020 e, desde então, a recuperação vem ocorrendo de maneira gradual, tendo crescido 25% no acumulado até 2022.

O licenciamento total de ônibus novos em 2022 foi impulsionado pelo programa Caminho da Escola, pela retomada de viagens rodoviárias, e por licitações municipais de renovação da frota. Entretanto, a fabricação de ônibus ainda sente os efeitos da escassez global de insumos, especialmente de semicondutores para componentes eletrônicos (AutoData, 2022). Assim, o volume de vendas de ônibus novos em 2022 foi 17% menor que o nível pré-pandemia de 2019, sendo equivalente a apenas metade da máxima histórica, registrada em 2011.

Por sua vez, o mercado interno de caminhões foi o segmento da indústria automotiva menos afetado pela pandemia de Covid-19. Após uma contração de 12% em 2020, os emplacamentos exibiram uma recuperação acelerada em 2021, com incremento de quase 30% no licenciamento em relação ao nível pré-pandemia de 2019. Essa retomada foi alavancada, sobretudo, pelo bom desempenho do setor agropecuário, da mineração, da construção civil e do comércio eletrônico (Estadão, 2022a).

Em 2022, o desempenho do mercado de caminhões foi semelhante ao ano anterior, com recuo de 1,6%. Por um lado, esse mercado foi favorecido pelo aquecimento da atividade econômica e pela antecipação de compras de caminhões – em função da entrada em vigor da Fase Proconve P8 (Euro VI) a partir de 2023³, cujos modelos são em torno de 15% a 20% mais caros. Por outro lado, o desempenho foi prejudicado por dificuldades nas cadeias de suprimentos⁴, diante da falta de semicondutores, assim como pela elevação dos custos de insumos básicos e pelo aumento da taxa básica de juros da economia brasileira (Automotive Business, 2022a; Automotive Business, 2023a).

³ A Fase Proconve P8 estabelece novos limites máximos de emissão de poluentes e de ruído para veículos pesados novos de uso rodoviário vendidos a partir de 1º de janeiro de 2023, sendo equivalente à norma europeia Euro VI.

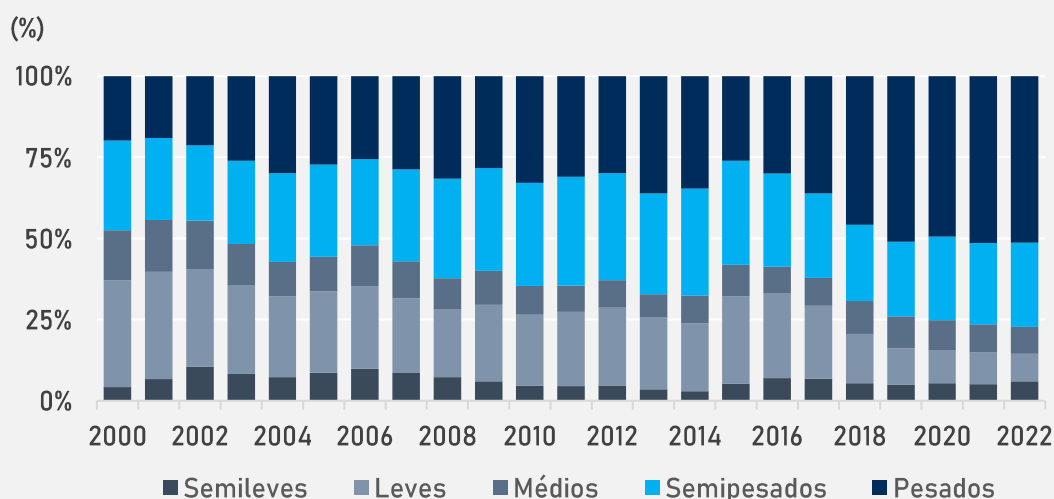
⁴ Cadeias de suprimento globais tiveram de superar diversos desafios no retorno das atividades econômicas após o fim das restrições impostas pela pandemia. Fechamentos de fábricas, gargalos em componentes, congestão de portos, falta de contêineres, indisponibilidade de mão de obra, e migração de gastos com consumo de serviços para bens (Morning Consult, 2021).

Avanço dos caminhões pesados

Nos últimos anos, o perfil do licenciamento total de caminhões novos por categoria tem exibido mudanças significativas. Os caminhões pesados têm ganhado cada vez mais relevância no mercado nacional. Esses veículos possuem elevada capacidade de carga, podendo tracionar mais de um reboque ou semirreboque – como nos casos de rodotrem, bitrem e outros tipos de combinação rodoviária (Box 1-1).

Os caminhões pesados mantiveram uma maior resiliência em comparação às demais categorias nos períodos recentes de crise, tendo ampliado consideravelmente a sua participação nesse mercado. Atualmente, esses veículos são responsáveis por metade das vendas de caminhões novos no Brasil (Figura 1-2).

Figura 1-2 Licenciamento anual de caminhões novos no Brasil, por categoria, 2000 - 2022



Fonte: Anfavea (2023).



Os caminhões pesados foram a única categoria que conseguiu ultrapassar as máximas históricas de licenciamento registradas entre 2010 e 2014. Nesse período, o volume médio de vendas de caminhões pesados foi de cerca de 50 mil unidades, enquanto, em 2022, mais de 65 mil veículos dessa categoria foram emplacados. Como explicitado anteriormente, essa resiliência na venda de caminhões pesados ocorreu, principalmente, devido ao aumento da produção agrícola.

Por sua vez, os caminhões leves e semipesados têm perdido participação de mercado nos últimos anos. Apesar de alguns avanços recentes, o volume de vendas dessas categorias segue muito abaixo das máximas históricas. No caso dos caminhões leves,

o licenciamento registrado em 2022, de 10,8 mil unidades, foi 68% menor do que o volume médio do período entre 2010 e 2014, de 34 mil unidades.

Box 1-1 Classificação de caminhões por categoria

Os caminhões são classificados pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) em cinco categorias: semileves, leves, médios, semipesados e pesados. A categorização é realizada a partir de métricas de capacidade de carga, como PBT – Peso Bruto Total, PBTC – Peso Bruto Total Combinado, e CMT – Capacidade Máxima de Tração.

- **Semileves:** 3,5 t < PBT < 6 t
- **Leves:** 6 t ≤ PBT < 10 t
- **Médios:** 10 t ≤ PBT < 15 t
- **Semipesados:** PBT ≥ 15 t, e CMT ≤ 45 t (para caminhão-chassi), ou PBT ≥ 15 t, e PBTC < 40 t (para caminhão-trator)
- **Pesados:** PBT ≥ 15 t, e CMT > 45 t (para caminhão-chassi), ou PBT ≥ 15 t, e PBTC ≥ 40 t (para caminhão-trator)

Caminhões semileves e leves são utilizados principalmente em aplicações urbanas, conectando os centros de distribuição ao destino final das mercadorias, para entregas comerciais e domiciliares de produtos de menor capacidade de carga e volume.

Caminhões médios são utilizados em aplicações urbanas e em rotas rodoviárias de curta e média distância, na logística entre centros de distribuição e comércio, como na distribuição de bebidas e no transporte para grandes varejistas, como supermercados e lojas de departamento.

Caminhões semipesados são versáteis, sendo empregados em diversas aplicações, como em operações na construção civil, em serviços públicos de coleta de resíduos, na logística entre unidades produtivas e centros de abastecimento, em serviços de apoio em usinas e mineradoras, e como caminhões-tanque de água e combustível em centros urbanos.

Caminhões pesados possuem elevada capacidade de carga, sendo utilizados em serviços de transporte de grandes volumes por longas distâncias, como no frete de produtos agrícolas do interior do País até os portos de exportação ou grandes centros de consumo. Esses veículos são empregados, também, em aplicações fora de estrada (*off-road*, em inglês), como na mineração e no transporte de cana-de-açúcar e madeira.



Predomínio da motorização a diesel

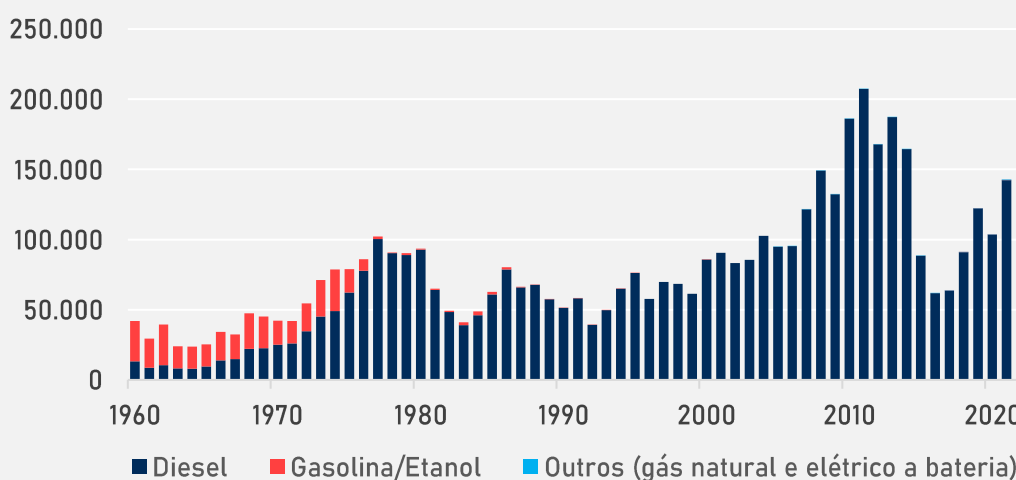
Caminhões e ônibus são veículos pesados que necessitam de elevada força mecânica para se locomoverem, o que se reflete em maiores exigências de torque e de potência. Os motores de combustão interna de ignição por compressão movidos a diesel são mais adequados para realizar esse trabalho do que a alternativa equivalente do motor de combustão interna de ignição por centelha movido a gasolina. Os motores a diesel são robustos e operam com elevadas taxas de compressão, permitindo maior capacidade de torque e potência. Além disso, motores a diesel possuem maior durabilidade e são mais eficientes do que os motores a gasolina.

Na implementação da indústria automobilística brasileira nas décadas de 1960 e 1970, o diesel foi definido como combustível de uso exclusivo para o transporte de cargas e para o transporte público coletivo (ECEN, 1999). Adicionalmente, a formação de preços de combustíveis automotivos no Brasil é desde a década de 1970 favorável ao diesel em comparação à gasolina (Cavalcanti, 2006).

Diante dessas características, a frota brasileira de caminhões e ônibus desenvolveu-se historicamente sob amplo domínio dos motores de combustão interna a diesel. Desde o fim da década de 1970, passando por todos os ciclos de expansão e de contração da indústria automotiva, a motorização a diesel se manteve dominante no mercado brasileiro de veículos pesados, respondendo por quase a totalidade das vendas (Figura 1-3).

Figura 1-3 Licenciamento anual de caminhões e ônibus novos no Brasil, por tipo de motorização, 1960 - 2022

(nº veículos por ano)



Fonte: Anfavea (2023).



Com a consolidação da indústria nacional de caminhões e ônibus em torno do uso do diesel, os agentes econômicos dessa cadeia de valor aperfeiçoaram os seus negócios para extrair a maior eficiência dessa tecnologia. Os veículos pesados novos movidos a diesel possuem alto desempenho, manutenção simples e alta confiabilidade, além de preservar o valor de revenda ao longo de sua vida útil. Assim, o desenvolvimento histórico dessa frota a diesel construiu uma cadeia custo-eficiente no Brasil, o que contribui para inibir a atratividade de motorizações e fontes energéticas alternativas. Contudo, as externalidades ambientais negativas do óleo diesel são significativas, em que pesem a evolução tecnológica, a adição obrigatória do biodiesel e os avanços das regulamentações sobre emissões veiculares (BNDES, 2021).

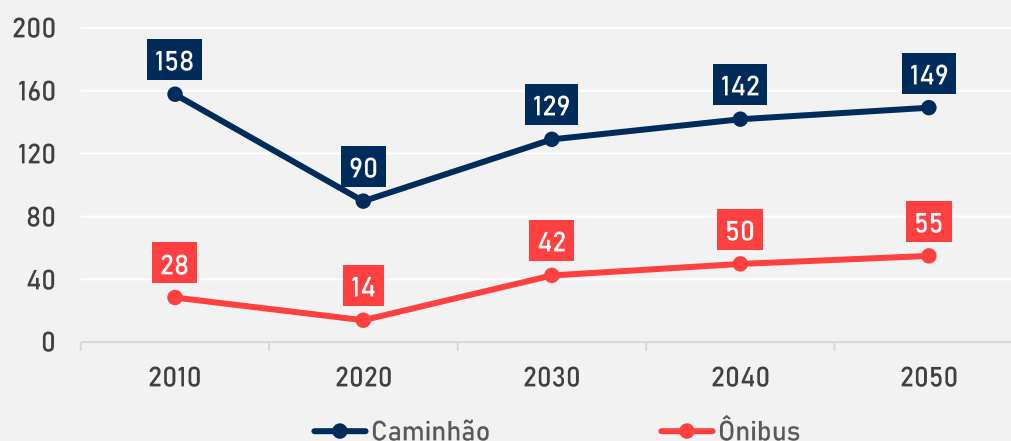
Perspectivas para o mercado de veículos pesados

A partir de um conjunto de premissas gerais, que considera um contexto de maior estabilidade no ambiente macroeconômico, espera-se um ritmo de crescimento mais vigoroso do PIB *per capita* brasileiro nas próximas décadas. Essa conjuntura favorável será orientada pelo aumento da renda média das famílias, expansão do mercado de crédito, melhoria do ambiente de negócios e retomada dos investimentos em infraestrutura. Com o estabelecimento dessas bases, espera-se o fortalecimento do mercado interno de consumo, especialmente em atividades relacionadas à indústria e ao setor de serviços, contribuindo para uma demanda crescente por transporte de cargas e de passageiros (EPE, 2022a).

Nesse contexto, a EPE projeta que o mercado interno de caminhões e ônibus novos crescerá aproximadamente 40% entre 2022 e 2050. O licenciamento total de veículos pesados ampliará de 144 mil em 2022 para mais de 200 mil em 2050, alcançando um volume semelhante à máxima histórica registrada em 2011 ([Figura 1-4](#)).

Figura 1-4 Projeção do licenciamento anual de caminhões e ônibus novos no mercado brasileiro

(mil veículos por ano)



Fonte: EPE, com dados históricos de Anfavea (2023).



Grande parte do crescimento do mercado de veículos pesados no médio/longo prazo virá dos ônibus, em função do aumento da demanda por mobilidade nos centros urbanos. Espera-se que a implementação de novos projetos de corredores de ônibus de alto carregamento – como o Bus Rapid Transit (BRT) e faixas exclusivas, conforme Planos de Mobilidade Urbana, aumentem a importância do uso do transporte rodoviário coletivo nos deslocamentos diários da população. Assim, apesar dos investimentos previstos na expansão da malha metroferroviária, a demanda por mobilidade urbana continuará sendo majoritariamente atendida por ônibus nos municípios brasileiros (EPE, 2023a).

No caso dos caminhões, o mercado interno ainda será orientado no curto prazo pelo desempenho da agricultura e da construção civil, de modo que a demanda por veículos de maior capacidade de carga será mantida em patamar elevado. Espera-se, porém, que a conclusão de importantes projetos ferroviários e aquaviários ao longo das próximas décadas desloque parcialmente a demanda por serviços de frete realizadas atualmente por caminhões pesados (EPE, 2023a). Em contrapartida, as vendas de caminhões leves e semipesados serão impulsionadas por um ambiente econômico mais favorável na indústria, na construção civil e no setor de serviços, contribuindo para sustentar as vendas totais de caminhões novos em níveis próximos às máximas históricas.

2. Panorama da difusão do elétrico a bateria e do gás natural em caminhões e ônibus no Brasil

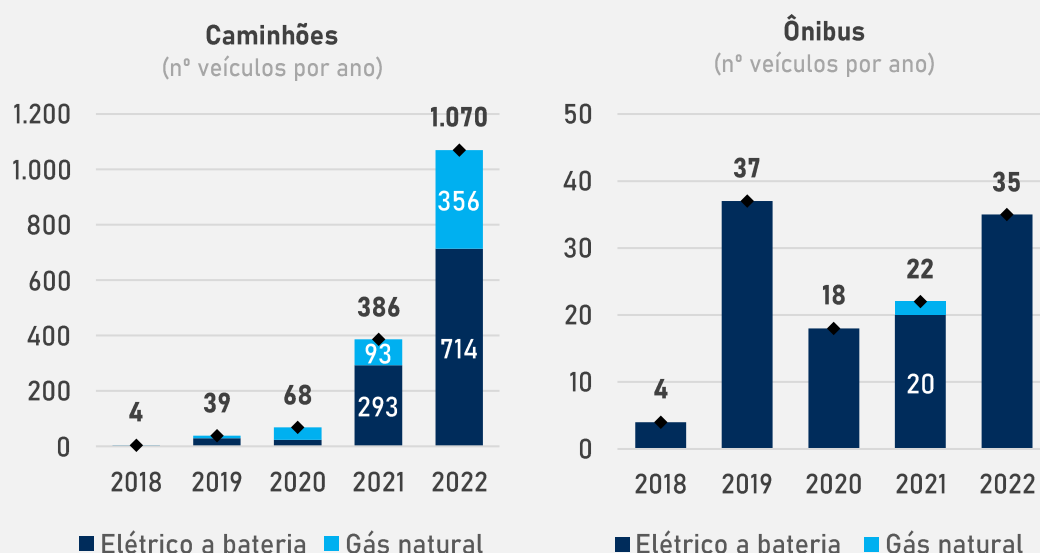
Oferta de propulsões alternativas no mercado brasileiro de veículos pesados

Evolução recente das vendas

O Brasil tem registrado nos últimos anos um processo de aceleração da difusão de motorizações alternativas na frota de veículos pesados. As principais tecnologias que integram esse processo são a propulsão elétrica a bateria e a propulsão a gás natural.

Em 2022, o licenciamento total de caminhões e ônibus novos com essas motorizações alternativas ultrapassou pela primeira vez a marca de mil unidades (Figura 2-1). Esse volume de vendas foi 170% superior ao de 2021 e quase 13 vezes maior que o volume de 2020.

Figura 2-1 Licenciamento anual de novos caminhões e ônibus elétricos e a gás natural no Brasil, 2018 - 2022



Fonte: Anfavea (2023).



Embora as taxas de crescimento recentes sejam significativas, a participação dessas propulsões alternativas é incipiente no mercado brasileiro, respondendo por apenas 0,8% das vendas de caminhões e ônibus novos em 2022 (Anfavea, 2023). Os valores indicam que a difusão dessas motorizações na frota brasileira de veículos pesados encontra-se, ainda, em estágio inicial de desenvolvimento.

Diante da perspectiva de demanda crescente por essas tecnologias no País, as fabricantes de veículos que atuam no mercado nacional têm promovido lançamentos de novos modelos e anunciado planos para o futuro. Com isso, espera-se que a oferta de caminhões e ônibus com propulsão alternativa para os consumidores brasileiros seja maior ao longo dos próximos anos.

Disponibilidade comercial de modelos de caminhões e ônibus elétricos a bateria

Os caminhões elétricos estão na dianteira do desenvolvimento inicial do mercado de propulsão alternativa em veículos pesados no Brasil. O licenciamento mais do que dobrou em 2022, alcançando 714 novas unidades emplacadas. Hoje, doze modelos de caminhões elétricos são disponibilizados comercialmente no mercado brasileiro por quatro fabricantes: BYD, JAC Motors, Volkswagen Caminhões e Ônibus (VWCO) e XCMG (Tabela 2-1).

A JAC Motors tem liderado o licenciamento de caminhões elétricos a bateria no Brasil, sendo responsável por aproximadamente 80% desse mercado em 2022 (Fenabreve, 2023). A fabricante chinesa oferece atualmente cinco modelos de caminhões com essa tecnologia, todos importados da China (JAC Motors, 2023). O caminhão leve iEV1200T / iEV1200T Plus foi o modelo elétrico mais vendido no Brasil nos últimos dois anos (Fenabreve, 2023), sendo utilizado principalmente por empresas de varejo para serviços de entregas urbanas.

A VWCO possui atualmente dois modelos e-Delivery em seu portfólio de caminhões elétricos, cuja produção comercial foi iniciada no Brasil em 2021 (VWCO, 2021). Esses veículos têm sido empregados em entregas urbanas de empresas de varejo e de distribuição de bebidas⁵. A participação da VWCO nas vendas de caminhões elétricos foi de 20% em 2022 (Fenabreve, 2023). Buscando ampliar o seu mercado, a fabricante iniciou testes de um novo modelo elétrico a bateria, um semipesado com maior capacidade de carga (VWCO, 2022).

A XCMG é a mais nova ofertante de caminhões elétricos no mercado brasileiro, tendo iniciado a comercialização em 2023. Além de dois modelos de caminhões rodoviários, a fabricante chinesa também oferece um tipo de caminhão *off-road* com propulsão elétrica (XCMG, 2023).

⁵ A fabricante de bebidas Ambev firmou acordo com a VWCO para aquisição de até 1.600 unidades de modelos da família e-Delivery (VWCO, 2020).

Tabela 2-1 Modelos de caminhões elétricos a bateria disponíveis no mercado brasileiro em novembro de 2023

Fabricante	Modelo	Autonomia	Peso Bruto Total (PBT)	Capacidade da bateria	Categoria
BYD	eT7 12.220	230 km ⁽¹⁾	11.800 kg	174 kWh	Médio
	eT18 21.250	165 km ⁽¹⁾	16.000 kg	229 kWh	Semipesado
JAC	iEV1200T	200 km ⁽²⁾	7.490 kg	97 kWh	Leve
	iEV1200T Plus	200 km ⁽²⁾	8.500 kg	97 kWh	Leve
	E-JT 9,5	150 km ⁽³⁾	9.500 kg	89 kWh	Leve
	E-JT 12,5	150 km ⁽³⁾	12.500 kg	107 kWh	Médio
	E-JT 18,0	350 km ⁽⁴⁾	18.000 kg	282 kWh	Semipesado
VWCO	e-Delivery 11	250 km ⁽⁵⁾	10.700 kg	105 ou 190 kWh	Médio
	e-Delivery 14	250 km ⁽⁵⁾	14.300 kg	105 ou 190 kWh	Médio
XCMG	E7-29R	150 km ⁽⁶⁾	29.000 kg	282 kWh	Semipesado
	E7-49T	150 km ⁽⁶⁾	49.000 kg ⁽⁷⁾	282 kWh	Pesado

Fonte: BYD (2023a), Fenabrave (2023), JAC Motors (2023), VWCO (2023) e XCMG (2023).

Notas: (1) No ciclo C-WTVC (China-World Transient Vehicle Cycle); (2) No ciclo NEDC (New European Driving Cycle); (3) No ciclo NEDC e veículo totalmente carregado (carga útil de 6,2 t para E-JT 9,5 e de 8,6 t para E-JT 12,5); (4) Veículo totalmente carregado (carga útil de 11,5 t), mas sem informação sobre o ciclo de direção; e (5) No ciclo WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure); (6) Não há informação sobre o ciclo de direção; e (7) Peso Bruto Total Combinado (PBTC).



Outros fabricantes também estão atentos ao potencial de crescimento do mercado de caminhões elétricos e têm divulgado planos de lançamento de novos modelos no Brasil. A Iveco anunciou o caminhão leve e-Daily, que será oferecido comercialmente no mercado brasileiro a partir de 2024 (AutoData, 2023). Por sua vez, em junho de 2023, a Volvo iniciou testes do caminhão pesado FM Electric com transportadoras brasileiras (Automotive Business, 2023b).

A inserção do elétrico a bateria no mercado de ônibus encontra-se em um momento crucial, diante da mobilização de governos locais de grandes cidades brasileiras em prol de políticas de eletrificação da frota de transporte público coletivo. Como resposta à oportunidade criada, diversas empresas de ônibus que atuam no mercado nacional têm se mobilizado, anunciado planos, realizado testes e lançamentos de novos modelos com sistema de propulsão elétrica a bateria (Diário do Transporte, 2023a).

A Mercedes-Benz, líder no mercado brasileiro de ônibus, iniciou em 2022 a produção nacional e a comercialização do modelo eO500U, chassi de ônibus com sistema de propulsão elétrico a bateria. A fabricante realizou em 2023 a entrega das 50 primeiras unidades do ônibus elétrico, cujas intenções de compra somente por empresas de transporte da cidade de São Paulo já ultrapassavam 500 unidades em novembro de 2023 (Mercedes-Benz, 2023).

A chinesa BYD é a fabricante que há mais tempo oferta modelos de ônibus elétricos no Brasil. Atualmente, a empresa disponibiliza as famílias D9 (urbano/rodoviário) e D11 (articulado). Em seu novo complexo fabril na Bahia, com previsão de inauguração entre o fim de 2024 e início de 2025, a BYD planeja expandir a sua produção nacional de chassis de ônibus elétricos (BYD, 2023b).

Higer, Iveco, Marcopolo, Scania, Volvo e VWCO são outras fabricantes que também oferecem soluções de chassis de ônibus elétricos no mercado brasileiro.

A brasileira Eletra também comercializa um portfólio de ônibus elétricos no País, mas em modelo de negócio diferenciado. A empresa recebe chassis de outras fabricantes (Mercedes-Benz e Scania) e realiza a instalação do sistema elétrico (motor elétrico, inversor e baterias). A Eletra oferece atualmente cinco modelos da linha e-Bus, em diferentes configurações, e mais o e-Trol, um trólebus articulado com bateria, todos fabricados no Brasil (Eletra, 2023).

Disponibilidade comercial de modelos de caminhões e ônibus a gás natural

Atualmente, a Scania é líder na comercialização de caminhões movidos a gás natural no Brasil. Desde o início das vendas em 2020, mais de 850 unidades foram comercializadas (Bloomberg Línea, 2023) – parte ainda a ser entregue. A fabricante sueca oferece essa alternativa em diferentes modelos de caminhões pesados a GNC. Há, também, um modelo com propulsão a gás natural liquefeito (GNL) (Scania, 2023). Apesar dessa alternativa, quase a totalidade das vendas realizadas foi de versões a GNC (Estadão, 2022b).

Outra fabricante que está entrando nesse mercado no Brasil é a Iveco. A montadora italiana é líder mundial em caminhões a gás natural, com dezenas de milhares de unidades vendidas, principalmente na Europa. A Iveco iniciou a comercialização da alternativa a gás em duas de suas linhas de produtos: o semipesado Tector e o pesado Hi-Way. Além disso, a fabricante anunciou que ofertará a partir de 2024 a versão a gás natural do pesado S-Way (AutoData, 2023; Automotive Business, 2022b; Iveco, 2023). Já a Volvo anunciou planos para testar caminhões movidos a GNL com clientes no Brasil (Estadão, 2023).

Em relação à alternativa dos ônibus a gás natural, as primeiras iniciativas de inserção dessa tecnologia no transporte coletivo no Brasil datam das décadas de 1980 e 1990 (Conceição, 2006). Em particular, a experiência da cidade de São Paulo nesse período

é a mais notável, uma vez que chegou a alcançar uma frota circulante de cerca de 250 ônibus a gás (Diário do Transporte, 2015). Porém, nos anos seguintes, a iniciativa foi descontinuada e, de lá para cá, pouca coisa evoluiu nesse mercado.

Nos últimos anos, impulsionada pela agenda nacional de desenvolvimento de novos mercados para o gás natural, a Scania tem realizado diversos testes com clientes no Brasil, tanto para aplicações no transporte coletivo urbano quanto no transporte rodoviário (Automotive Business, 2021a, Bahiagás, 2020; Curitiba, 2023a; Ribeirão Preto, 2022). As primeiras unidades de ônibus a gás natural foram comercializadas pela fabricante sueca em 2021 (Automotive Business, 2021b). Contudo, ainda não há nenhum modelo sendo produzido em larga escala e disponibilizado comercialmente no mercado brasileiro.

A Iveco, por sua vez, iniciou a produção de ônibus a gás natural na Argentina em 2022, e anunciou que tem planos de importar esses veículos para o mercado brasileiro a partir de 2023 (Automotive Business, 2022d).

Consolidação da atuação das principais fabricantes

As principais fabricantes de caminhões e ônibus têm adotado distintas estratégias de atuação quanto à inserção de motorizações alternativas no mercado brasileiro. A maior parte das empresas está dedicando esforços na eletrificação, enquanto outras estão mais focadas no desenvolvimento da alternativa do gás natural, como exibido na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 Atuação das principais fabricantes de caminhões e ônibus quanto à inserção de motorizações alternativas no mercado brasileiro

Fabricante	Caminhão		Ônibus	
	Elétrico a bateria	Gás natural	Elétrico a bateria	Gás natural
Agrale				
BYD	■		■	
DAF				
Eletra			■	
Higer			■	
Iveco	□	■	□	□
JAC Motors	■			
Marcopolo			■	
Mercedes-Benz			■	
Scania		■	□	□
Volvo	□	□	□	
VWCO	■		□	

Legenda:

- Já oferece comercialmente no mercado brasileiro.
- Em fase de testes ou realizou anúncio de futura comercialização no País.

Fonte: EPE a partir de informações das fabricantes.



Direcionadores da inserção do elétrico a bateria e do gás natural

Embora sejam tecnologias com princípios básicos de funcionamento diferentes e com fontes energéticas distintas, a propulsão a gás natural/biometano e a propulsão elétrica a bateria têm sido recentemente impulsionadas por um mesmo propósito: a sustentabilidade ambiental.

Veículos elétricos a bateria possuem zero emissão de escapamento⁶. Por sua vez, o biometano, por ser significativamente menos intensivo em carbono que o óleo diesel, proporciona redução expressiva das emissões de gases de efeito estufa, além de ter menores níveis de emissão de poluentes atmosféricos locais, como material particulado (EPE, 2022b).

Diante dessas características, a promoção dessas motorizações alternativas tem se intensificado a partir da maior mobilização de empresas em estratégias de sustentabilidade e em compromissos de redução de emissões, assim como pela reorientação de formuladores de políticas públicas e de governos locais em prol de políticas de mobilidade urbana sustentável. Isso ocorre em um contexto global de enfrentamento às mudanças climáticas, de fortalecimento de iniciativas focadas na transição para economias de baixo carbono, com a promoção de fontes renováveis, a implementação de redes inteligentes de energia (*smart grids*) e a busca por maior segurança energética.

Há, ainda, estímulos governamentais de diversas naturezas, como políticas de crédito (como linhas de financiamento específicas do BNDES), incentivos tributários, investimentos, e subsídios diretos à aquisição de veículos novos com propulsão de zero ou baixa emissão. No entanto, as barreiras à ampla adoção das tecnologias alternativas de motorização ainda são substanciais. As principais restrições existentes atualmente para a adoção em massa dessas alternativas são:

- custos elevados de aquisição de novos caminhões e ônibus elétricos a bateria e os com propulsão a gás natural;
- autonomia limitada em comparação aos equivalentes movidos a combustão interna a diesel;
- peso e dimensão de baterias, reduzindo a capacidade de carga útil (no caso dos elétricos);
- baixa disponibilidade de infraestrutura adequada de carregamento, além dos altos custos de investimento necessários para a sua expansão;
- longa duração do abastecimento, o que limita a disponibilidade do veículo;
- limitado mercado de revenda e incertezas sobre seu desenvolvimento futuro; e
- ausência de conjunto comum de padrões e regulamentações.

⁶ Embora tenham zero emissão de escapamento, os elétricos a bateria têm intensidade de carbono positiva sob a ótica de análise de ciclo de vida. A fabricação desses veículos é intensiva em carbono, sobretudo os insumos associados ao processo de produção de baterias. Ademais, a depender dos aspectos da geração da eletricidade consumida nesses veículos, esta pode carregar consigo uma alta intensidade de carbono.

Em grande parte dos casos de estudo, a análise de viabilidade econômica, em termos de custo total de propriedade (TCO, *“Total Cost of Ownership”*, em inglês), se mostra desfavorável aos modelos com propulsão elétrica a bateria e com propulsão a gás natural/biometano, em comparação à combustão interna movido a diesel (EPE, 2020; ICCT, 2022; Jorge *et al.*, 2020). Contudo, a depender do progresso tecnológico, das condições econômicas, do engajamento em torno de questões ambientais e dos esforços de todas as partes interessadas na cadeia de valor dessas motorizações alternativas, a viabilidade pode ser alcançada ao longo dos próximos anos, ainda que de forma em nichos ou de forma mais abrangente.

Caminhões de menor capacidade de carga em aplicações de entregas comerciais e domiciliares de última milha (*“last mile delivery”*) e ônibus urbanos do sistema de transporte público coletivo são os tipos de veículos pesados que possuem as características de uso mais adequadas à eletrificação. Esses veículos geralmente possuem programação previsível, com origem e destino em uma mesma localidade, como centros de distribuição e terminais rodoviários, sendo encaminhados diariamente para uma mesma garagem quando não estão em serviço. No caso dos ônibus urbanos, a maioria das operações possuem rotas fixas. Essa previsibilidade facilita o modelo de negócio que contempla o investimento em sistemas de infraestrutura de recarga de energia, seja do tipo de recarga rápida (*“fast charging”*) ou de recarga noturna (*“overnight depot charging”*), em atendimento à frota própria (CEPAL, 2022; ICCT, 2022).

A estratégia de adoção de propulsão alternativa em caminhões cabe, essencialmente, ao embarcador e seus prestadores de serviços – os transportadores e os operadores logísticos (BNDES, 2021). Neste caso, os aspectos técnicos e econômicos são fatores determinantes nessa tomada de decisão, ainda que a dinâmica inicial desse mercado esteja sendo orientada por contratos específicos de embarcadores, associados a metas de sustentabilidade ambiental na cadeia de valor do transporte rodoviário de cargas.

Em relação aos ônibus urbanos, como os governos locais são responsáveis, direta ou indiretamente, pela prestação do serviço de transporte coletivo urbano, a regulação pode ser executada de acordo com o interesse público. Dessa forma, o gestor pode incentivar a inserção de determinadas motorizações na frota de ônibus urbanos e ônibus escolares sob a justificativa, por exemplo, de benefícios à saúde pública e ao meio ambiente (BNDES, 2021).

Os municípios de Curitiba, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo lideram iniciativas dessa natureza, sendo membros do C40 Cities Climate Leadership Group (*“Grupo C40 de Grandes Cidades para a Liderança Climática”*, em português), uma coalizão de grandes cidades mundiais empenhadas em debater e combater a mudança climática. Por meio desse programa, essas cidades brasileiras assumiram o compromisso de liderar iniciativas para contribuir com as metas do Acordo de Paris de redução de

emissões de gases de efeito estufa, incluindo a inserção de ônibus de zero emissão na frota do transporte público coletivo de passageiros (C40 Cities, 2023).

Em particular, o município de São Paulo tem avançado recentemente na substituição da sua frota de ônibus urbanos em prol de veículos de zero emissão⁷. De acordo com informações da SPTrans, empresa que faz a gestão do sistema de transporte público por ônibus na cidade, mais de 2.000 ônibus elétricos a bateria foram encomendados até fevereiro de 2023 (Diário do Transporte, 2023a). Essa ação está em linha com o Programa de Metas 2021-2024 da Prefeitura de São Paulo que prevê que, ao menos, 20% da frota de ônibus urbanos do transporte público do município seja composta por elétricos até o fim de 2024, o que equivale a cerca de 2.600 veículos (São Paulo, 2021). Até novembro de 2023, São Paulo recebeu 69 veículos do tipo, que, somados com os mais de 200 trólebus em operação, totalizam uma participação incipiente de apenas 2% na frota total de ônibus urbanos (Diário do Transporte, 2023b).

Outras importantes cidades brasileiras também têm se preparado para a promoção da eletromobilidade na frota de ônibus do transporte público coletivo. Campinas⁸, Cascavel⁹, Curitiba¹⁰, Goiânia¹¹, Rio de Janeiro¹², Salvador¹³ e São José dos Campos¹⁴ são exemplos de cidades que têm avançado na inserção da propulsão elétrica na frota

⁷ Iniciativas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes locais da frota de ônibus urbanos da cidade de São Paulo ganharam tração a partir de 2009 com a promulgação da Lei nº 14.933/2009, que instituiu a Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo. A Lei previa a redução mínima de 50% para as referidas emissões totais de gases de efeito estufa até 2019, e de 100% para até 2029 (São Paulo, 2009). No entanto, após pouco avanço nos anos posteriores, a Prefeitura postergou os prazos para 2028 e 2038, respectivamente, por meio da Lei nº 16.802/2018 (São Paulo, 2018).

⁸ O edital da licitação da nova concessão do transporte público coletivo de Campinas prevê a introdução de 200 ônibus elétricos ao longo dos cinco primeiros anos do contrato de concessão (Campinas, 2022).

⁹ Em abril de 2023, a cidade de Cascavel/PR concluiu a primeira licitação pública do Brasil para fornecimento de ônibus elétricos para o transporte coletivo. O certame foi vencido pela fabricante chinesa Higer, que entregará 15 ônibus elétricos com autonomia de 270 km e tempo de recarga de 4 horas (Valor Econômico, 2023).

¹⁰ A Prefeitura Municipal de Curitiba divulgou em 2020 o Plano Municipal de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas, no qual estabelece a meta de que um terço da frota do transporte coletivo do município em 2030 seja eletrificada; alcançando 100% até 2050 (Curitiba, 2020). Em maio de 2023, a Prefeitura Municipal anunciou a aquisição de 70 ônibus elétricos para a Rede Integrada de Transporte de Curitiba, com previsão de entrada em operação em 2024, em um investimento estimado de R\$ 200 milhões (Curitiba, 2023b).

¹¹ Em fevereiro de 2023, o Governo do Estado de Goiás abriu licitação para introduzir 114 ônibus articulados elétricos a bateria na frota de transporte público que conecta Goiânia às cidades vizinhas de Goianira, Senador Canedo e Trindade (Goiás, 2023).

¹² A Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro instituiu em 2019 que “qualquer contrato de concessão/permissão para a delegação de serviço de transporte público coletivo de passageiros realizado por ônibus a partir de 1º de janeiro de 2025, somente poderá ser celebrado sob a previsão contratual de utilização de ônibus de emissão zero”, em redação dada pelo Decreto Rio nº 46.081/2019 (Rio de Janeiro, 2019).

¹³ O Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima em Salvador, divulgado em 2020, define uma meta de alcançar 100% da frota de transporte público movida a veículos mais limpos e eficientes até 2049 (Salvador, 2020).

¹⁴ A cidade de São José dos Campos/SP pretende substituir integralmente a frota convencional de transporte público por elétricos a bateria (São José dos Campos, 2023).

de ônibus do transporte coletivo urbano. No caso de Curitiba, a cidade também está iniciando testes para a inserção de ônibus movido a gás natural (Curitiba, 2023a).

No âmbito federal, o Governo estabeleceu em 2023 o Plano para a Transformação Ecológica, coordenado pelo Ministério da Fazenda, com o objetivo de proporcionar mudanças estruturantes na economia e no meio ambiente do País. O Plano é estruturado em seis eixos: finanças sustentáveis, adensamento tecnológico do setor produtivo, bioeconomia, transição energética, economia circular, e infraestrutura e adaptação à mudança do clima. No eixo de transição energética, o Plano considera a ação estratégica de longo prazo de “eletrificação da frota de ônibus para transporte público e escolar” (Brasil, 2023).

No que tange aos caminhões pesados, como uma parte expressiva da frota desses veículos é utilizada de forma intensiva, movimentando diariamente grandes volumes por longas distâncias, sobretudo no interior do País, há um enorme desafio de se prover elevada autonomia veicular, menor peso de baterias e ampla disponibilidade de infraestrutura de carregamento no território nacional, especialmente de abastecimento rápido.

No caso do gás natural, o Brasil tem trilhado nos últimos anos uma agenda de fomento ao desenvolvimento de um mercado competitivo e dinâmico. Melhorar o aproveitamento e o retorno social e econômico da produção nacional e integrar o gás natural à estratégia nacional de transição energética para contemplar sinergias e investimentos que favoreçam o desenvolvimento de soluções de baixo carbono são dois dos principais objetivos da agenda do atual programa Gás para Empregar (CNPE, 2023). Nesse contexto, o desenvolvimento de um mercado de caminhões e ônibus movidos a gás natural/biometano desponta como uma oportunidade para o País. Embora ainda esteja em estágio embrionário, com uma frota circulante inferior a 1.000 veículos pesados, esse mercado possui vantagens que podem viabilizar a sua ampla adoção no médio/longo prazo.

O papel do gás natural na descarbonização do setor de transporte foi objeto de um mapa estratégico (*roadmap*) para desenvolvimento de mercado de veículos médios e pesados movidos a gás natural e biometano. O trabalho, elaborado no âmbito da cooperação bilateral denominada Fórum de Energia Estados Unidos-Brasil (USBEF, do inglês United States-Brazil Energy Forum), elencou potenciais benefícios para o Brasil no caso de desenvolvimento desse mercado (USBEF, 2021).

A principal vantagem do gás natural comprimido tem sido o seu menor preço final por unidade de energia em comparação ao óleo diesel para um consumidor no Brasil. Dessa forma, as aplicações no transporte rodoviário que proporcionam as melhores condições técnico-econômicas para o gás, em comparação ao diesel, são aquelas de uso intensivo, uma vez que nessas operações o peso do combustível é maior no custo operacional. Caminhões pesados que realizam frete em rotas de média e longa distância despontam como a alternativa mais interessante para a inserção da

motorização a gás no País. No caso de ônibus, os corredores de alto carregamento, como BRT, são boas opções para projetos-piloto. A depender da diferença no custo operacional entre as alternativas, o menor preço do gás natural pode compensar o maior investimento na aquisição de veículos e em infraestrutura de abastecimento (BNDES, 2021).

Adicionalmente, o elevado potencial de produção de biometano, especialmente no interior do País, é outra vantagem comparativa do Brasil para o uso da propulsão a gás em veículos pesados (EPE, 2022c). Recentemente, o governo federal lançou a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, buscando fomentar o uso dessas fontes renováveis de energia no Brasil (Brasil, 2022). Por ser um combustível produzido a partir de matéria-prima renovável, o biometano apresenta baixa emissão de gases de efeito estufa em uma abordagem de ciclo de vida do poço-à-roda (*“well-to-wheel”*) (EPE, 2022b). Com isso, as empresas que tiverem acesso a matérias-primas – como o setor agropecuário e empresas de tratamento de resíduos urbanos – podem obter melhores condições e incentivos para promover a substituição das suas frotas e equipamentos.

Em contrapartida, embora o gás natural seja um combustível disponível em diversas partes do território nacional, já sendo utilizado há anos no setor de transportes, essencialmente em automóveis, a infraestrutura atual de abastecimento é limitada. A malha de gasodutos de distribuição de gás natural é bem desenvolvida em poucas localidades no Brasil (EPE, 2023b). Dos mais de 43 mil postos de revenda de combustíveis autorizados e em operação no território brasileiro, menos de 20% (em torno de 8 mil postos) possuem fornecimento de gás natural veicular (ANP, 2023a). Além disso, grande parte dessas revendas não possui infraestrutura adequada para o abastecimento rápido de caminhões e ônibus a gás. A adaptação para sistemas de alta vazão demandaria investimentos incrementais por parte dos revendedores.

Ainda que a motorização a gás natural seja uma tecnologia madura, comprovada e amplamente disponível para veículos pesados na indústria automotiva global, o Brasil atualmente possui uma capacidade limitada de produção local de componentes para essa tecnologia. Outros limitantes à difusão do gás natural são questões regulatórias, que envolvem ausência de padronização e de certificação relacionadas aos tipos de cilindros de gás natural e de conectores de abastecimento mais adequados para caminhões e ônibus (USBEF, 2021).

A falta de conjunto comum de padrões e regulamentações também afeta os veículos elétricos, pois limita a interoperabilidade entre fabricantes e sistemas de recarga. Isso ocorre porque, na ausência de uniformização para orientar a produção de veículos elétricos e a recarga em eletropostos, os diversos atores podem optar por diferentes tecnologias, tamanhos e capacidades de baterias, bem como por diferentes tipos de conectores.

No segmento automotivo, em algumas cidades e estados, conseguiu-se superar o obstáculo de desenvolvimento do mercado para veículos leves a partir de estímulos diversos (incluindo infraestrutura pré-existente, desoneração parcial do IPVA - Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores, fomento ao investimento em infraestrutura de abastecimento em postos de revenda e ampliação do diferencial tributário local incidente sobre o preço dos combustíveis concorrentes). No segmento de veículos pesados, os investimentos necessários não dispuseram dos mesmos condicionantes, ainda que a retórica de facilidade aparente com a eventual penetração de frotas coletivas e ganhos de escala sempre estivesse presente no argumento de que essa rota consagrar-se-ia (Conceição, 2006). Contudo, onde se desenvolveu estrutura para veículos leves, o investimento incremental é na adequação dos já mencionados equipamentos de abastecimento nos postos de revenda.

A **Tabela 2-3** exibe uma comparação entre tecnologias de motorização para caminhões e ônibus no Brasil em termos de aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

Tabela 2-3 Diagrama conceitual de comparação das condições atuais das tecnologias de motorização para caminhões e ônibus

Aspectos	Diesel	Elétrico a bateria	Gás natural/Biometano
Preço de aquisição do veículo	...	.	..
Autonomia veicular	...	.	..
Disponibilidade comercial de modelos	...	.	.
Custo operacional (inclui energia e manutenção)	.	...	..
Oferta de infraestrutura de carregamento	...	.	.
Mercado de revenda de usados	...	.	.
Emissão de escapamento de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos	.	...	./...
Emissão de ruído	.	...	..

Legenda:

- ... Melhor condição na comparação relativa.
- . Pior condição na comparação relativa.

Fonte: Análise EPE.



3. Trajetórias de inserção de motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil

Esta seção busca identificar e avaliar possíveis trajetórias de inserção da propulsão elétrica a bateria e da propulsão a gás natural comprimido (GNC) na frota brasileira de caminhões e ônibus até 2050.

Para tanto, realizou-se uma análise baseada em exercícios de cenarização, na qual três trajetórias distintas de inserção de motorizações alternativas foram elaboradas a partir de narrativas plausíveis para fundamentar premissas e hipóteses. A primeira trajetória é a de referência, que leva em conta as expectativas atuais para a evolução das tecnologias, dos investimentos necessários e das políticas públicas. As outras duas trajetórias avaliadas consideram contextos de ampla convergência tecnológica, econômica e política para a penetração acelerada das motorizações alternativas, sendo uma trajetória para o elétrico a bateria e outra trajetória para a propulsão a gás natural.

Essa avaliação é desafiadora dado que exercícios de cenarização de longo prazo são extremamente dependentes das premissas e hipóteses assumidas. Nesse sentido, a evolução e a difusão tecnológica, o desenvolvimento de políticas públicas e o comportamento de empresas e consumidores desempenham papéis cruciais no rumo das trajetórias elaboradas. Adicionalmente, as trajetórias refletem somente uma sensibilidade no quesito em análise, a penetração por alternativa de motorização na frota de ônibus e caminhões, com todos os demais fatores componentes do exercício de cenarização, como o licenciamento anual total por exemplo, sendo mantidos constantes.

Cabe ressaltar, por fim, que as trajetórias de penetração de motorizações alternativas não representam expectativas, metas ou compromissos oficiais do governo brasileiro, tampouco refletem orientações ou objetivos estratégicos para políticas públicas no País. Tratam-se, apenas, de exercícios destinados à melhor compreensão dos caminhos possíveis, bem como para estimular o debate sobre as melhores soluções para tornar o transporte de cargas e de passageiros mais eficiente e sustentável no Brasil.

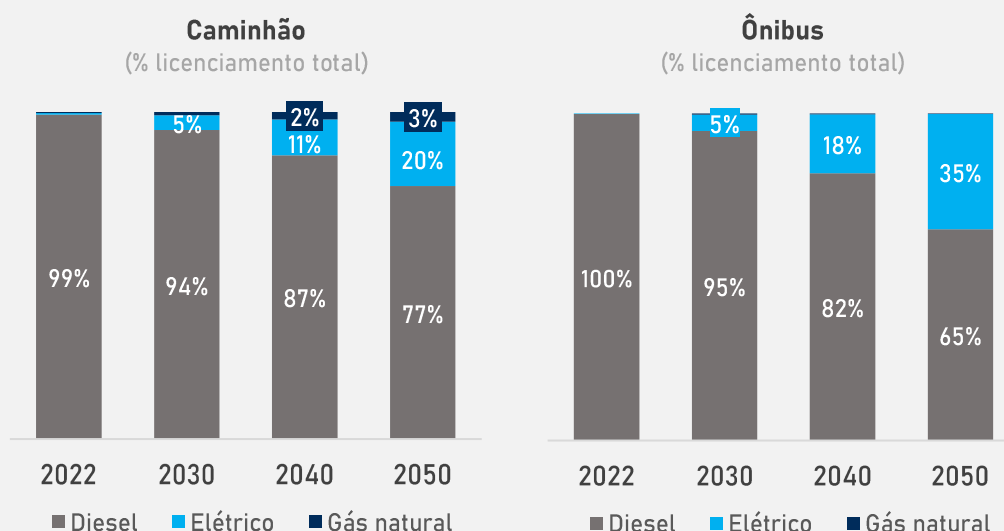
Trajetória de Referência

A Trajetória de Referência está fundamentada em um contexto no qual o progresso tecnológico, os investimentos na expansão da infraestrutura de carregamento e o desenvolvimento de políticas públicas em prol de motorizações alternativas progridem em linha com as expectativas atuais. Com isso, algumas barreiras à adoção dessas tecnologias são reduzidas, sobretudo para a propulsão elétrica a bateria. Isso permite a competitividade para essas alternativas limitada a determinados segmentos do mercado brasileiro de caminhões e ônibus.

Apesar desses avanços, o motor de combustão interna a diesel mantém a sua longa hegemonia nesta trajetória, com mais de 70% do total de emplacamentos de ônibus e caminhões novos no Brasil em 2050; enquanto, os modelos elétricos a bateria e os movidos a gás natural alcançam 26%.

A evolução da participação de mercado dessas tecnologias alternativas é distinta para caminhões e ônibus, visto que esses veículos possuem diferenças em suas estruturas de mercado e distintas aplicações e usos, como abordado previamente. Na Trajetória de Referência, os modelos elétricos e a gás natural alcançam 35% das vendas de ônibus novos e 23% das vendas de caminhões novos em 2050 (Figura 3-1).

Figura 3-1 Trajetória de Referência: perfil da inserção de motorizações alternativas no licenciamento de caminhões e ônibus novos no Brasil



Fonte: EPE.

Nota: Para fins de simplificação, os modelos híbridos (HEV) estão incluídos em “Diesel”, enquanto os híbridos *plug-in* (PHEV) estão incluídos em “Elétrico”.



Projeta-se que, no curto prazo, os modelos com propulsão elétrica a bateria e a gás natural avançarão mais no mercado de caminhões do que no de ônibus. Isso reflete o movimento inicial da indústria automotiva brasileira, com maiores vendas e maior disponibilidade comercial de modelos de caminhões com essas motorizações – como indicado na [Figura 2-1](#).

A partir da segunda metade da década de 2020, o mercado interno de ônibus elétrico a bateria ficará aquecido com a maior mobilização de governos municipais de grandes cidades brasileiras em compromissos de descarbonização e de metas de introdução de veículos de zero emissão no transporte público coletivo urbano.

Com o progresso da maturidade tecnológica e competitividade econômica, projeta-se que a eletrificação no licenciamento de ônibus no Brasil seja acelerada a partir da década de 2030, consolidando-se como uma alternativa eficiente e sustentável nas grandes regiões metropolitanas e avançando em cidades de médio porte. As projeções da Trajetória de Referência consideram que ônibus elétricos serão responsáveis por 18% do licenciamento total da categoria em 2040, avançando para 35% em 2050. O elevado custo de aquisição e a dificuldade de criar um mercado de veículos usados limitam a sua disseminação em cidades menores.

No caso dos caminhões, os motores de combustão interna movidos a diesel deverão manter a liderança nas vendas, ao menos, até o horizonte de 2050. Espera-se que a inserção de caminhões elétricos a bateria ocorra mais intensamente em veículos de menor capacidade de carga, de categorias semileves, leves e médios, associados a aplicações de entregas comerciais e domiciliares em centros urbanos, e em frotas dedicadas de serviço público (como de coleta de lixo). Por outro lado, a eletrificação em caminhões pesados será limitada, devido aos desafios relacionados à autonomia veicular, ao peso e à dimensão da bateria, e à carência de infraestrutura de recarga rápida.

No que tange aos híbridos (HEV), não há nenhum modelo de caminhão ou ônibus atualmente sendo comercializado com essa tecnologia no Brasil. Fabricantes e clientes têm sinalizado maior priorização por veículos elétricos a bateria, de emissão zero no escapamento, de modo a alcançar mais facilmente os compromissos de sustentabilidade ambiental e metas de redução de emissões. Dessa forma, a Trajetória de Referência considera que a introdução de HEVs no mercado brasileiro de caminhões e ônibus ocorrerá em momento posterior, iniciando-se gradativamente a partir da segunda metade da década de 2020. Assume-se que esse tipo de motorização dar-se-á como um avanço tecnológico sobre os motores de combustão interna a diesel, provendo maior eficiência, mas mantendo a necessidade de consumo do óleo diesel (ou biocombustível semelhante). Dessa maneira, os híbridos convencionais não competem necessariamente pelos mesmos mercados de elétricos em veículos pesados.

Por sua vez, caminhões e ônibus movidos a gás natural/biometano ficarão restritos a nichos de mercado, especialmente em aplicações nas quais a propulsão elétrica a bateria ainda requer maiores desenvolvimentos tecnológicos, como em caminhões pesados. No caso dos ônibus e de caminhões leves e médios, espera-se uma inserção reduzida do gás natural diante da maior competição com a alternativa do elétrico a bateria, sobretudo em termos de emissões. Ressalta-se que a disponibilidade de veículos pesados com propulsão a gás será limitada a regiões do País em que haja oferta do combustível e infraestrutura de abastecimento, bem como estímulos à adoção dessa rota tecnológica.

Trajetória EV+: Inserção acelerada da propulsão elétrica a bateria

A Trajetória EV+ é baseada em um contexto de ampla convergência de estratégias de fabricantes, fornecedores e clientes, assim como de esforços de governos locais e nacionais e de organizações multilaterais no sentido de maiores desenvolvimentos tecnológicos em prol de veículos elétricos a bateria. Esse contexto inclui:

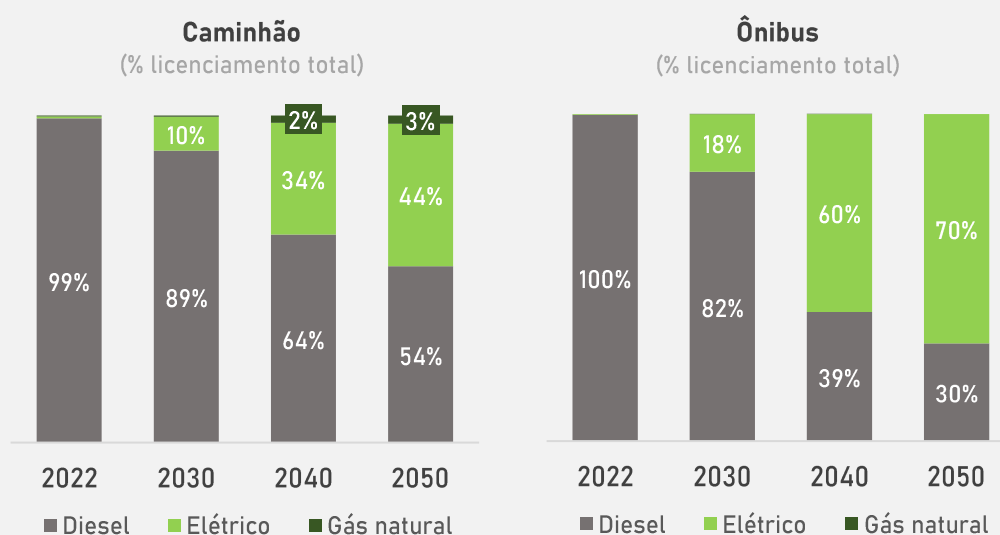
- avanços significativos no desenvolvimento tecnológico de baterias, levando a melhores condições de autonomia veicular, rendimento energético, vida útil e densidade de energia armazenada nas baterias;
- redução substancial dos custos de baterias e, por conseguinte, dos preços de aquisição dos veículos elétricos;
- ausência de restrições significativas e estruturais na cadeia de suprimentos da indústria automotiva, especialmente no que tange à disponibilidade global de minerais críticos para a produção de baterias e demais componentes;
- maiores investimentos de fabricantes e da cadeia de fornecedores do setor automotivo nacional no desenvolvimento de novas linhas de produção e de novos modelos com propulsão elétrica a bateria em todas as categorias de ônibus e caminhões;
- crescimento da disponibilidade de infraestrutura de carregamento pelo País, sobretudo sistemas de recarga rápida;
- desenvolvimento de mercado de revenda para veículos pesados elétricos;
- construção de um conjunto comum de padrões e regulamentações no curto prazo, em particular aspectos relacionados aos tipos de conectores e sistemas de recarga;
- preços de energia elétrica mais acessíveis;

- estímulos governamentais de diversas naturezas, especialmente por meio de políticas públicas (como de restrição de circulação em determinadas zonas urbanas para apenas veículos de zero emissão), incentivos e/ou subsídios para aquisição de veículos elétricos, e isenções ou descontos em tributos;
- engajamento crescente da sociedade brasileira no sentido da mobilidade sustentável, com diversas empresas e instituições assumindo metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos locais em atividades relacionadas ao transporte de cargas e de passageiros; e
- definição de compromissos de descarbonização e de metas de eletrificação na frota do transporte público coletivo em diversas cidades brasileiras.

Nesse contexto de ampla convergência, o TCO de veículos pesados com propulsão elétrica a bateria se torna mais competitivo. Isso permite o crescimento da eletrificação para além de segmentos específicos ou nichos de mercado, com avanços em diversas aplicações e categorias de caminhões e ônibus.

Diante da ampla convergência tecnológica, econômica e política, este cenário projeta que a propulsão elétrica a bateria ultrapasse metade das vendas totais de caminhões e ônibus novos no Brasil em 2050 (Figura 3-2).

Figura 3-2 Trajetória EV+: perfil da inserção de motorizações alternativas no licenciamento de caminhões e ônibus novos no Brasil



Fonte: EPE.

Nota: Para fins de simplificação, os modelos híbridos (HEV) estão incluídos em “Diesel”, enquanto os híbridos *plug-in* (PHEV) estão incluídos em “Elétrico”.



O avanço da eletrificação no mercado de ônibus é mais acelerado nesta trajetória, alcançando a liderança na década de 2030 e atingindo 70% de participação em 2050. A inserção do elétrico a bateria deve ocorrer de forma mais intensa em ônibus urbanos do que em ônibus rodoviários, uma vez que o modelo de negócio e a aplicação dos veículos urbanos são mais adequados para esse tipo de motorização.

A parcela restante de 30% no mercado de ônibus em 2050 é ocupada por híbridos. Assim, motores exclusivamente de combustão interna a diesel serão totalmente substituídos¹⁵ no mercado de ônibus novos no Brasil no horizonte de análise.

No caso dos caminhões, o elétrico a bateria alcança uma participação de mercado de 44% no licenciamento total em 2050. Essa penetração deve ocorrer, sobretudo, em veículos de menor capacidade de carga, em aplicações urbanas e em rotas de menor intensidade de uso.

Por sua vez, os caminhões pesados elétricos avançam nesta trajetória para além de determinados segmentos de mercado, diante de maiores desenvolvimentos tecnológicos das baterias e da consolidação de investimentos em infraestrutura de carregamento, e expandindo a eletrificação para aplicações de longas distâncias e para o interior do País. No entanto, diferentemente dos ônibus, o licenciamento total de caminhões em 2050 ainda permanece com uma fatia de mercado considerável – pouco mais da metade – para veículos movidos a diesel (sendo 24% para os motores convencionais de combustão interna a diesel e 30% para híbridos).

Trajetória GN+: Inserção acelerada da propulsão a gás natural comprimido

A Trajetória GN+ está estabelecida em um contexto favorável ao uso do gás natural como combustível de veículos pesados no Brasil. Esse contexto inclui:

- maior oferta de gás, com estímulos à interiorização, a preços competitivos para o consumidor final;
- desenvolvimento do potencial de produção de biometano, especialmente associado ao setor agropecuário no interior do País;
- maiores investimentos de fabricantes e da cadeia de fornecedores do setor automotivo nacional no desenvolvimento de novas linhas de produção e de novos modelos com propulsão a gás natural em todas as categorias de ônibus e caminhões;

¹⁵ Cabe ressaltar que, como caminhões e ônibus híbridos convencionais consomem óleo diesel (ou biocombustível semelhante), a substituição não implicaria na eliminação completa da demanda de diesel por esses veículos.

- redução dos preços relativos de aquisição de veículos pesados a gás natural em comparação à alternativa tradicional da combustão interna a diesel;
- ampla disponibilidade de infraestruturas de abastecimento de gás natural no território nacional, com conexões e vazões adequadas para veículos pesados;
- desenvolvimento de mercado de revenda para veículos pesados a gás natural;
- estímulos governamentais de diversas naturezas, especialmente por meio de políticas públicas, incentivos e/ou subsídios para aquisição de veículos a gás natural/biometano, melhores condições em linhas de financiamento, e isenções ou descontos em tributos;
- definição regulatória no curto prazo sobre padronização e certificação de tipos de cilindros de gás natural e de conectores de abastecimento adequados ao uso em veículos pesados;
- engajamento crescente da sociedade brasileira no sentido da mobilidade sustentável, com diversas empresas e instituições assumindo metas de redução de emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos locais em atividades relacionadas ao transporte de cargas e de passageiros; e
- limitações no desenvolvimento tecnológico e nos custos relativos de outras motorizações alternativas, como veículos elétricos a bateria.

Em conjunto, esses fatores proporcionam um ganho na competitividade técnica e econômica do gás natural comprimido em determinados segmentos do mercado brasileiro de caminhões e ônibus. No entanto, mesmo nesse contexto favorável, a propulsão a gás mantém um nível médio de TCO mais elevado que o seu equivalente a diesel em grande parte das aplicações.

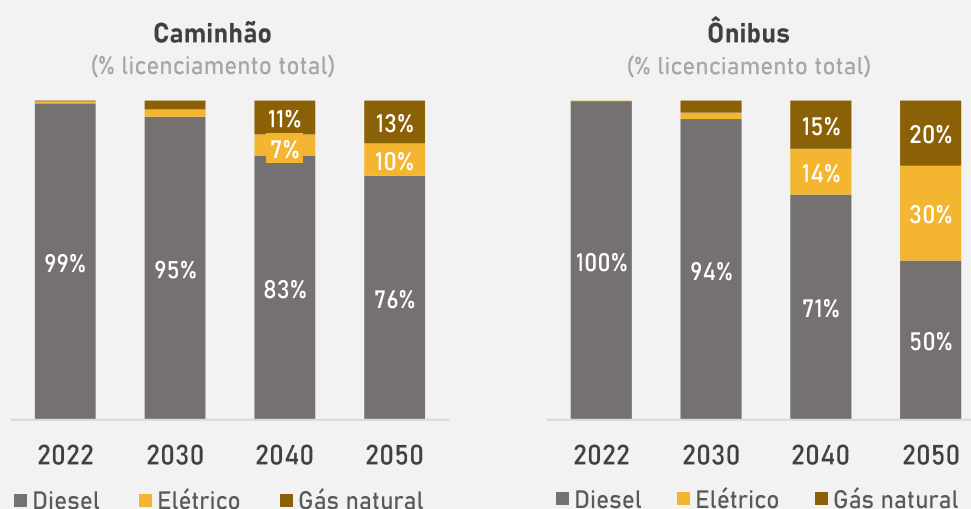
A dificuldade de se interiorizar a oferta de gás natural em um país de dimensões continentais como o Brasil é outro obstáculo relevante. Essa limitação é atenuada nesta trajetória pelo desenvolvimento do potencial brasileiro de produção de biometano. Isso permite a penetração dessa motorização em empresas com acesso à fonte própria do gás (biometano), naquelas que perseguem metas de sustentabilidade ambiental, e em mercados regionais próximos às unidades de produção desse combustível renovável.

O desenvolvimento da propulsão a GNC/biometano ocorre em nichos de mercado, sendo que as maiores inserções nesta trajetória são alcançadas em operações de uso intensivo, nas quais o custo do combustível possui maior peso no TCO, como em corredores de ônibus de alto carregamento em centros urbanos. Além disso, por conta de limitações no desenvolvimento tecnológico do elétrico a bateria, a propulsão a biometano também encontra mercado em setores de difícil descarbonização, como em caminhões pesados. Neste caso, as rotas devem ter

ampla oferta de postos de revenda de gás natural, e as distâncias percorridas diariamente não podem ser tão longas a ponto de a autonomia ser um empecilho.

Nesta trajetória, a participação da motorização a gás natural alcança 15% do licenciamento total de caminhões e ônibus novos no Brasil em 2050 (Figura 3-3) o que indica que o GNC/biometano apresenta potencial de penetração no mercado menor que os elétricos a bateria no médio/longo prazo.

Figura 3-3 Trajetória GN+: perfil da inserção de motorizações alternativas no licenciamento de caminhões e ônibus novos no Brasil



Fonte: EPE.

Nota: Para fins de simplificação, os modelos híbridos (HEV) estão incluídos em “Diesel”, enquanto os híbridos *plug-in* (PHEV) estão incluídos em “Elétrico”.



Entretanto, ressalva-se que esta trajetória não prevê a expansão da tecnologia de motorização a GNL no mercado brasileiro de caminhões e ônibus, assim como não considera a possibilidade de conversão de veículos a diesel para GNC¹⁶.

Análise comparativa das trajetórias

De forma simplificada, a Figura 3-4 e a Figura 3-5 apresentam análise comparativa das trajetórias avaliadas de inserção de motorizações alternativas em caminhões e ônibus, observando principais direcionadores e perfis de vendas de novos veículos.

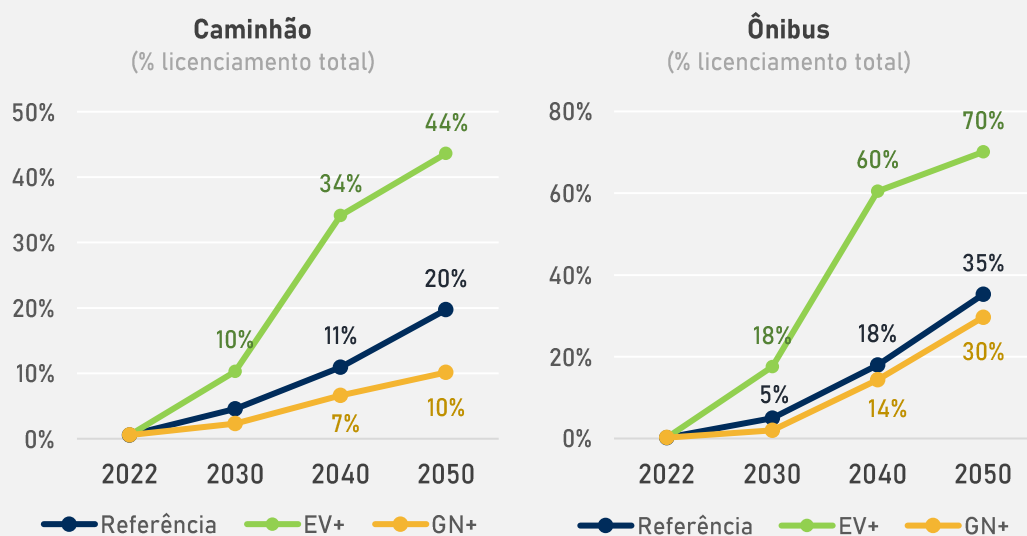
¹⁶ Em particular, essa hipótese simplificadora, diante de um contexto favorável à rota de gás natural, representa que a análise desenvolvida pode estar subestimada na demanda potencial desta fonte energética, uma vez que haveria outra forma de substituição da demanda de diesel não considerada.

Figura 3-4 Quadro síntese dos principais direcionadores e dos perfis de vendas de novos caminhões e ônibus em cada trajetória

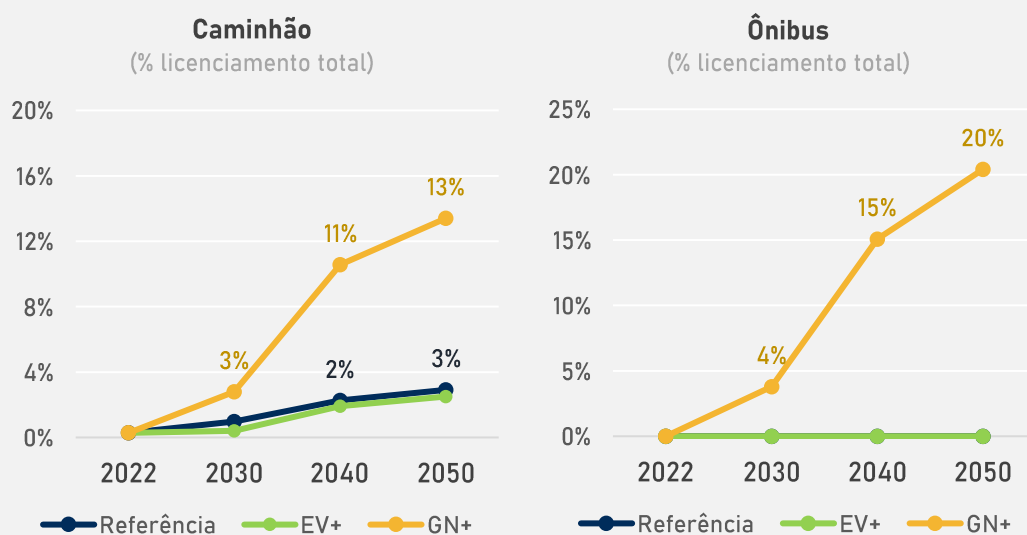
Trajetoárias	Principais direcionadores	Perfil das vendas de novos caminhões e ônibus
 <p>Trajetoária de Referência</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Avanço de propulsões alternativas em função de estratégias de sustentabilidade de empresas e de grandes cidades, não havendo viabilidade econômica em comparação aos motores a diesel. - Maturidade tecnológica e competitividade econômica dos elétricos a bateria a partir da década de 2030, com penetração acelerada no mercado de ônibus. - Gás natural com limitações de oferta e de infraestrutura no território nacional. 	<ul style="list-style-type: none"> - Predomínio dos motores a diesel em caminhões no longo prazo (77% em 2050, incluindo HEV). - Penetração gradual de propulsões alternativas, havendo maior inserção em ônibus (35% em 2050) que em caminhões (23% em 2050). - Gás natural como nicho (apenas 2% do mercado de veículos pesados em 2050), avançando sobretudo em caminhões pesados.
 <p>Trajetoária EV+ Inserção acelerada da propulsão elétrica a bateria</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ampla convergência tecnológica, econômica e política em prol da eletrificação de caminhões e ônibus. - Redução dos custos de baterias e dos preços dos veículos, maior autonomia, e TCO competitivo a partir do fim dos anos 2020 em alguns segmentos do mercado. - Grande oferta de infraestrutura de recarga rápida e preços de energia mais acessíveis. - Estímulos governamentais, como subsídios e políticas públicas. - Diversas cidades brasileiras assumem metas de eletrificação da frota de transporte público coletivo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elétricos a bateria com amplo domínio nas vendas de ônibus novos (70% em 2050) e avanço expressivo em caminhões (44% em 2050). - Ampla penetração de elétricos em ônibus urbanos e caminhões leves/médios (mais de 70% em 2050). - Elétricos em caminhões pesados avançam para além de nichos de mercado (30% em 2050). - Gás natural como nicho (apenas 2% do mercado de veículos pesados em 2050), avançando sobretudo em caminhões pesados.
 <p>Trajetoária GN+ Inserção acelerada da propulsão a gás natural</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Maior oferta de gás a preços competitivos, desenvolvimento da produção de biometano, ampla disponibilidade de infraestrutura de abastecimento de alta vazão. - Novas linhas de produção e novos modelos a gás natural, com redução dos preços relativos de aquisição. - Limitações no desenvolvimento tecnológico de veículos elétricos a bateria. - Estímulos governamentais, como subsídios e políticas públicas. - Diversas cidades brasileiras assumem compromissos de mobilidade sustentável. 	<ul style="list-style-type: none"> - Propulsão a gás natural não tem o mesmo potencial de penetração em caminhões e ônibus do que o elétrico a bateria. - Desenvolvimento da tecnologia a GNC/biometano pouco avança além de nichos de mercado. - Maior potencial em empresas com acesso próprio ao biometano, e em aplicações de difícil descarbonização. - Maior inserção em ônibus urbanos (20% em 2050) e caminhões pesados (10% em 2050).

Figura 3-5 Trajetórias de inserção de motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil

Elétrico a bateria



Gás natural



4. Impactos potenciais da inserção de motorizações alternativas na frota, na demanda energética e nas emissões de caminhões e ônibus

A partir das trajetórias de inserção da propulsão elétrica a bateria e da propulsão a gás natural comprimido (GNC) em caminhões e ônibus no Brasil até 2050, realiza-se uma análise quantitativa dos potenciais impactos no longo prazo de cada alternativa sobre a demanda energética brasileira, as emissões de gases de efeito estufa e o perfil da frota circulante de veículos pesados.

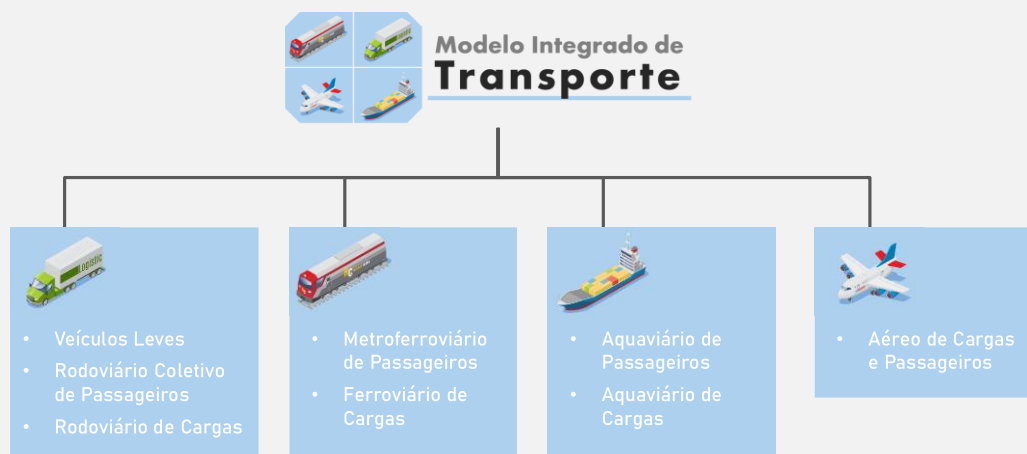
Como cada trajetória está fundamentada em distintas premissas e hipóteses, os resultados obtidos indicam diferentes alternativas a serem percorridas pelo mercado brasileiro de caminhões e ônibus nas próximas décadas.

Os estudos de longo prazo da EPE sobre frota circulante e demanda de energia do setor de transportes são realizados por meio de uma ferramenta de análise integrada, denominada Modelo Integrado de Transporte (MIT). O MIT é composto por um conjunto de módulos semi-independentes que representam o transporte de cargas e de passageiros pelos modos rodoviário, ferroviário, aquaviário e aéreo no Brasil (Box 4-1).

Box 4-1 Metodologia da EPE para projeção da demanda energética brasileira do setor de transportes

A EPE adota uma modelagem de demanda energética a partir de uma abordagem setorial integrada. A modelagem compreende uma visão detalhada dos setores consumidores de energia que compõem a economia nacional: setor de transportes, industrial, residencial e serviços, agropecuário, entre outros.

As projeções de demanda de energia do setor de transportes são realizadas por meio de uma ferramenta de análise integrada desenvolvida pela EPE: o Modelo Integrado de Transporte (MIT). O MIT é composto por um conjunto de módulos semi-independentes que representam o consumo interno de energia em cada modo de transporte: rodoviário, ferroviário, aquaviário e aéreo.



Dessa forma, o MIT fornece projeções de demanda energética de transportes por fonte energética: gasolina, etanol, óleo diesel, querosene de aviação, óleo combustível, gás natural, eletricidade e outros. Adicionalmente, o MIT é capaz de realizar análises sobre atividade do transporte de passageiros (pkm, passageiro-quilômetro) e de cargas (tku, tonelada-quilômetro útil), frota circulante de veículos e penetração de motorizações alternativas, eficiência energética, além de emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos.

Em particular, as análises para caminhões e ônibus são realizadas nos módulos Rodoviário de Cargas e Rodoviário Coletivo de Passageiros. Ambos possuem uma abordagem do tipo *bottom-up*, com análise desagregada por categoria de caminhão (semileve, leve, médio, semipesado e pesado) e de ônibus (urbano e rodoviário), por Fase Proconve e por idade do veículo. Os dois módulos contemplam um conjunto de tecnologias de motorização, incluindo combustão interna a diesel, combustão interna a gasolina/etanol, elétrico a bateria (BEV), híbrido (HEV), híbrido *plug-in* (PHEV), gás natural comprimido (GNC), gás natural liquefeito (GNL), e célula de combustível (FCEV).

Os modelos setoriais da EPE, assim como os módulos semi-independentes do MIT, são constantemente aperfeiçoados e atualizados para melhor representar a realidade da demanda energética brasileira.

Frota circulante

O mercado brasileiro de veículos pesados é amplamente dominado pelos motores de combustão interna a diesel, conforme discutido no Capítulo 1. Estima-se que, em 2022, essa motorização tenha respondido por mais de 99,9% da frota circulante de 1,9 milhão de caminhões e de mais de 300 mil ônibus no País. No entanto, ao longo dos próximos anos, a inserção de propulsões alternativas deverá alterar paulatinamente esse quadro.

Os avanços do elétrico a bateria e do gás natural na frota circulante acompanham as curvas de penetração dessas tecnologias no licenciamento total, ainda que seus efeitos sejam sentidos de forma muito mais branda no perfil da frota. Isso ocorre, pois, a frota circulante é resultado de um balanço de entradas (licenciamento de veículos novos) e saídas (sucateamento de veículos usados) (Box 4-2). Um veículo pesado com motor de combustão interna a diesel possui uma vida útil média de aproximadamente 20 anos no Brasil (MMA, 2014). Logo, mesmo que o licenciamento total de veículos novos seja hipoteticamente dominado por uma nova tecnologia, a substituição de todo o estoque de caminhões e ônibus a diesel é um processo lento.

Box 4-2 Metodologia de cálculo da frota circulante de caminhões e ônibus

A frota circulante de caminhões e ônibus é estimada a partir do licenciamento total de veículos novos e do sucateamento de veículos usados, conforme Equação 1.

$$Frota(Y) = \sum_{c,m} \sum_{y=y_{min}}^{y=Y} Licenciamento(y, c, m) - \sum_{c,m,i} \sum_{y=y_{min}}^{y=Y} Sucateamento(y, c, m, i) \quad (Eq. 1)$$

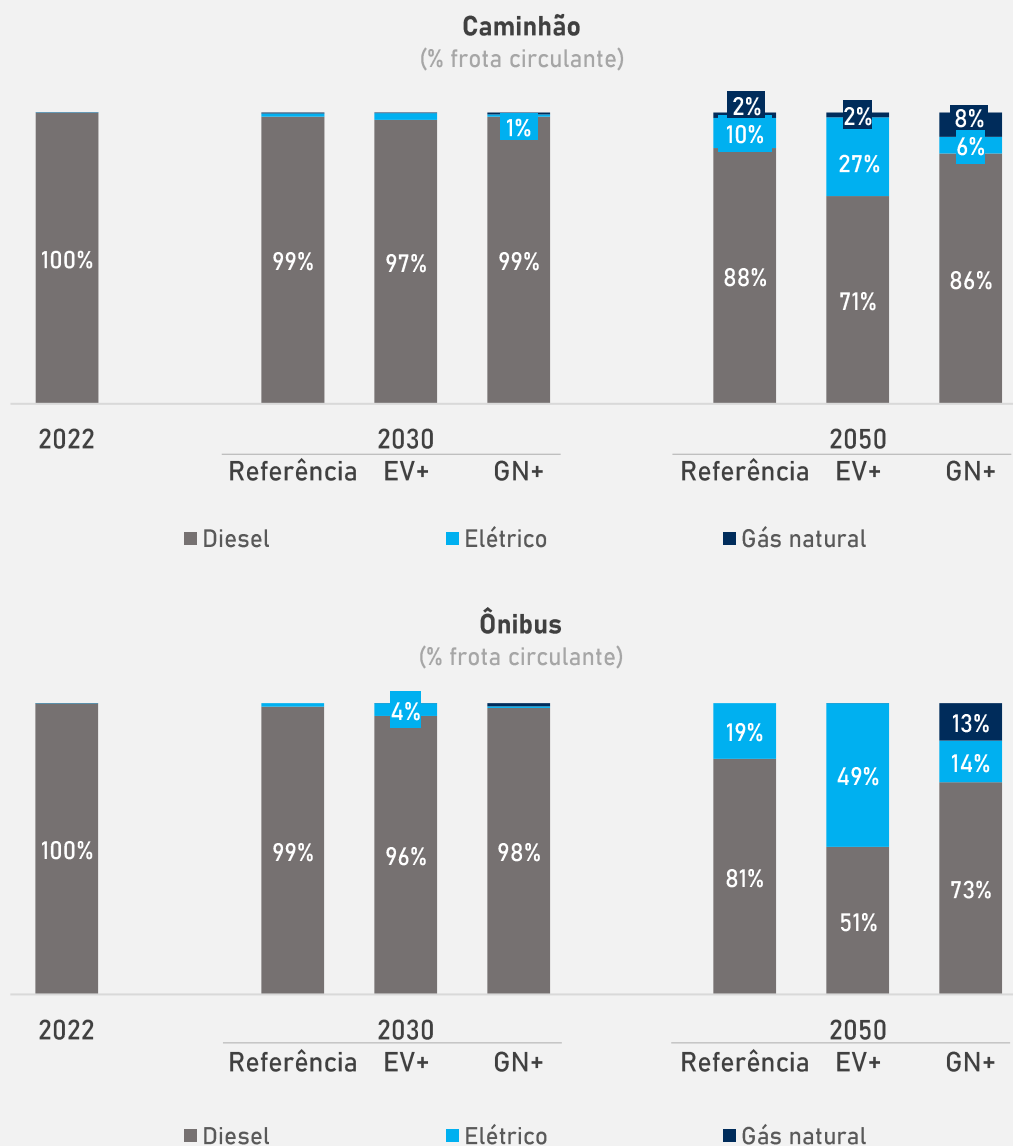
No qual y é o ano, c é a categoria do caminhão/ônibus, m é o tipo de motorização e i é a idade do veículo.

Considera-se a série histórica do licenciamento total de caminhões e ônibus novos disponibilizada por Anfavea (2023) e a curva de sucateamento de veículos usados utilizada em MMA (2014).



Os perfis de motorização da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil de cada trajetória de inserção de tecnologias alternativas são apresentados na Figura 4-1.

Figura 4-1 Perfil de motorização da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil



Fonte: EPE.

Nota: Para fins de simplificação, os veículos pesados com motores de combustão interna a gasolina/etanol e os modelos híbridos (HEV) estão incluídos em "Diesel", enquanto os híbridos *plug-in* (PHEV) estão incluídos em "Elétrico".



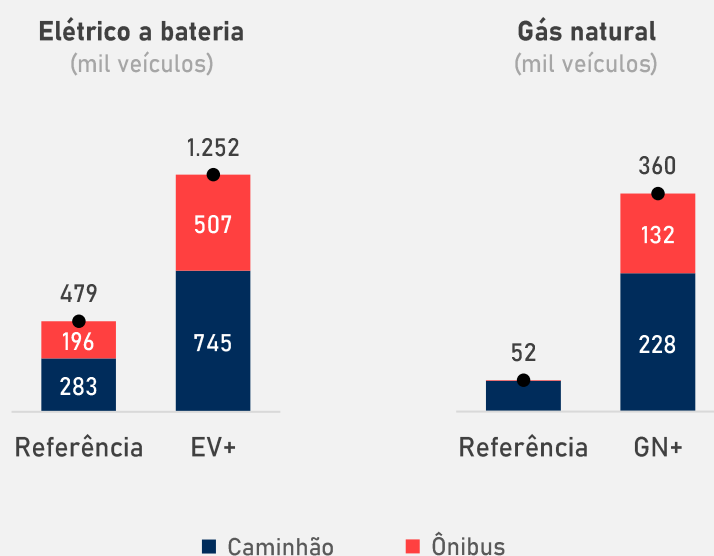
Na Trajetória de Referência, as motorizações alternativas respondem, em 2050, por 12% da frota circulante de caminhões e por 19% da frota circulante de ônibus. Grande parte desse avanço é do elétrico a bateria, enquanto a propulsão a GNC/biometano exibe inserção limitada. Em 2050, a frota de motorizações alternativas seria composta por 479 mil veículos pesados elétricos (sendo 283 mil caminhões e 196 mil ônibus) e 52 mil veículos pesados a gás natural (sendo quase a totalidade de

caminhões). Conforme exposto no Capítulo 3, a eletrificação apresenta maior potencial de penetração em veículos pesados do que o gás natural.

Na Trajetória EV+, na qual se considera um contexto de ampla convergência tecnológica, econômica e política em prol da eletrificação de caminhões e ônibus, o avanço do elétrico a bateria é mais consistente, alcançando em 2050 quase metade da frota circulante de ônibus e pouco mais de um quarto da frota circulante de caminhões. A quantidade de veículos pesados elétricos em circulação no País ultrapassa 1,2 milhão em 2050 nesta trajetória, sendo 745 mil caminhões e 507 mil ônibus.

Por sua vez, na Trajetória GN+, em que se assume um amplo contexto favorável ao uso do gás/biometano como combustível de veículos pesados no Brasil, a propulsão a gás natural alcança 8% da frota circulante de caminhões e 13% da frota circulante de ônibus em 2050. Nessa trajetória, o estoque de veículos pesados a gás natural alcança 360 mil em 2050, sendo 228 mil caminhões e 132 mil ônibus (Figura 4-2).

Figura 4-2 Frota circulante de veículos pesados com propulsão elétrica a bateria e com propulsão a gás natural em 2050 no Brasil



Fonte: EPE.

Nota: Para fins de simplificação, os híbridos *plug-in* (PHEV) estão incluídos em “Elétrico a bateria”.



Demanda energética

A demanda energética de caminhões e ônibus é calculada no MIT a partir da frota circulante, da intensidade de uso (quilometragem anual percorrida) e do rendimento energético médio dos veículos pesados (Box 4-3).

Box 4-3 Metodologia de cálculo da demanda energética de caminhões e ônibus

A demanda energética de caminhões e ônibus é estimada a partir da frota circulante, da intensidade de uso (quilometragem anual percorrida) e do rendimento energético médio, conforme Equação 2.

Demanda Energética (Y) =

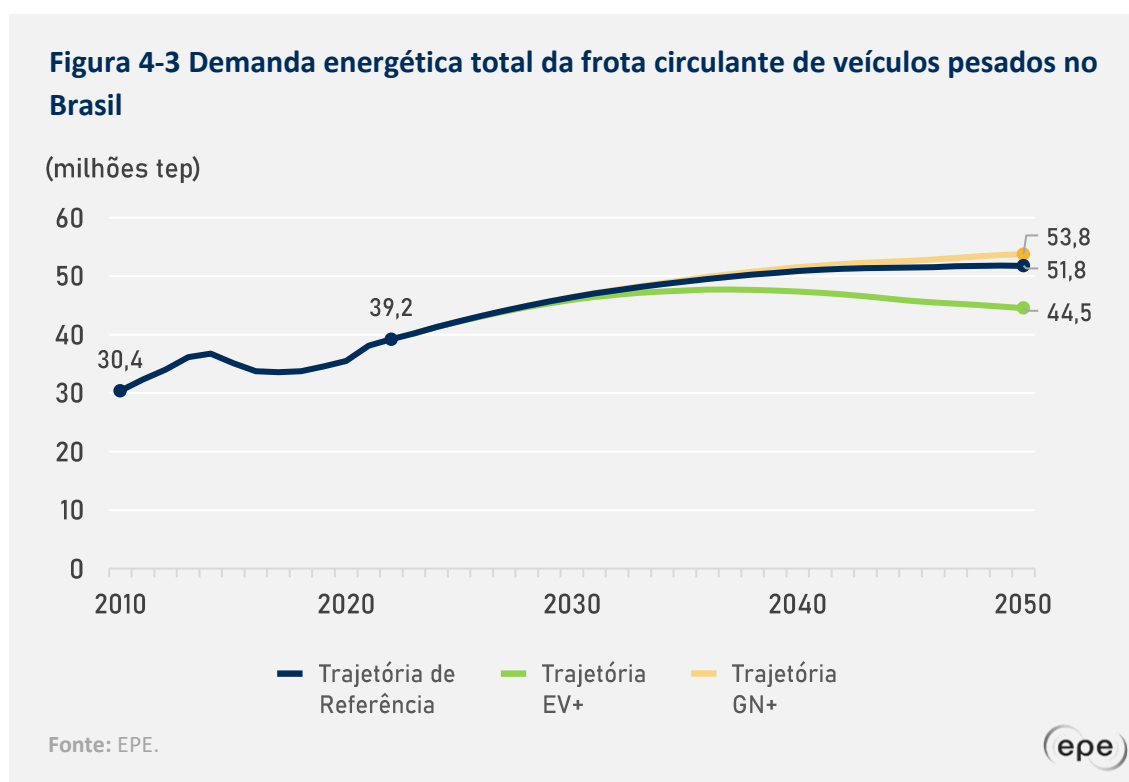
$$\sum_{c,m,i} \sum_{y=y_{min}}^{y=Y} Frota(y, c, m, i) \times Intensidade\ de\ Uso(y, c, m, i) \times Rendimento(y, c, m, i) \quad (Eq. 2)$$

No qual y é o ano, c é a categoria do caminhão/ônibus, m é o tipo de motorização e i é a idade do veículo.

Considera-se a intensidade de uso utilizada em MMA (2014) e dados de rendimento energético divulgados pelos fabricantes.



Como as propulsões (combustão interna a diesel, elétrico a bateria e gás natural) possuem diferentes rendimentos energéticos, a evolução do perfil de motorização da frota circulante observada em cada trajetória gera distintas curvas para a demanda energética total de veículos pesados no País (Figura 4-3).



Na Trajetória de Referência, a demanda energética total da frota de veículos pesados no Brasil aumenta de 39,2 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) em 2022 para 51,8 milhões tep em 2050, o que representa um crescimento de 1,0% a.a. no período.

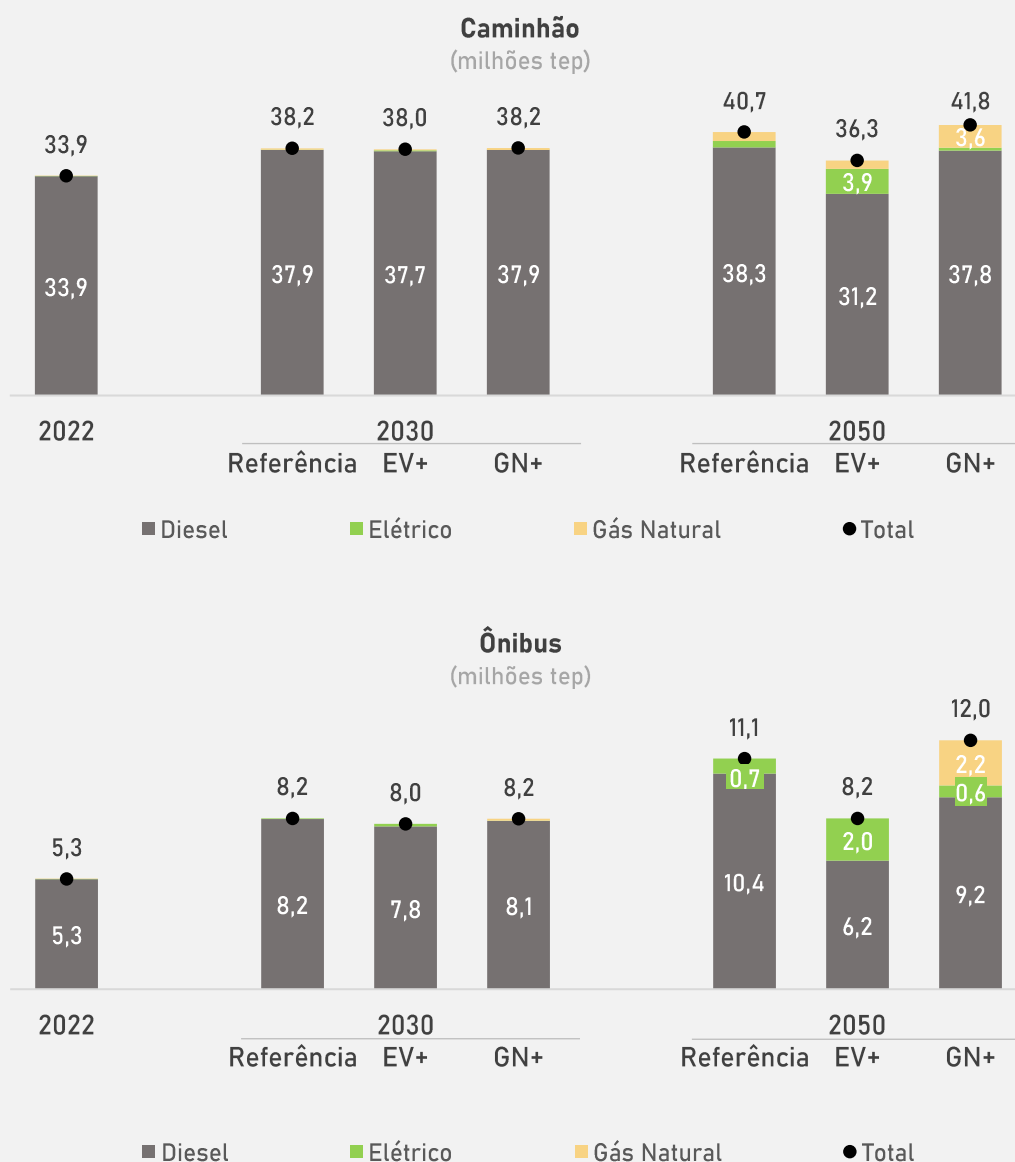
A Trajetória EV+ apresenta menor consumo energético total para atendimento a um nível similar de atividade (em tku e pkm) da Trajetória de Referência. A maior inserção de modelos elétricos a bateria torna a frota circulante mais eficiente em termos energéticos em comparação à alternativa convencional do motor de combustão interna a diesel¹⁷.

Por outro lado, como a propulsão a gás natural é menos eficiente em energia que as outras duas motorizações avaliadas, a Trajetória GN+ exibe incremento da demanda energética total de veículos pesados em relação à Trajetória de Referência.

A [Figura 4-4](#) apresenta a demanda energética de caminhões e ônibus no Brasil por tipo de motorização: combustão interna a diesel, elétrico a bateria e propulsão a gás natural.

¹⁷ O motor elétrico tem menos perdas com calor do que um motor a combustão interna, o que explica a sua maior eficiência.

Figura 4-4 Demanda energética de caminhões e ônibus no Brasil por tipo de motorização



Fonte: EPE.

Nota: Para fins de simplificação, os veículos pesados com motores de combustão interna a gasolina/etanol e os modelos híbridos (HEV) estão incluídos em “Diesel”, enquanto os híbridos *plug-in* (PHEV) estão incluídos em “Elétrico”.

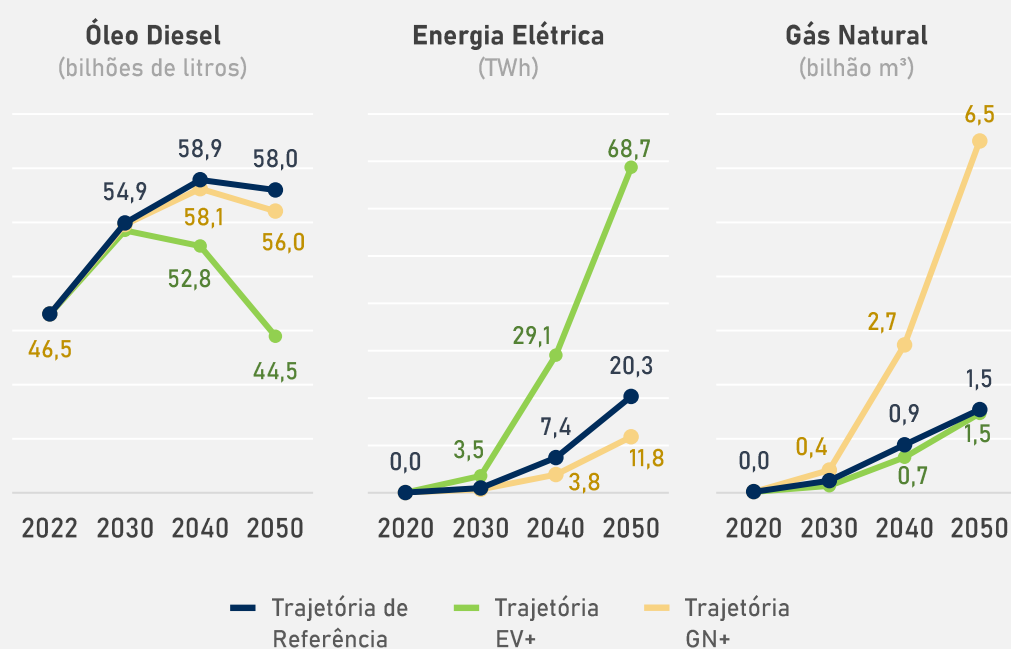


Na Trajetória de Referência, o crescimento da demanda energética de caminhões no País é de 0,7% a.a. entre 2022 e 2050. Por sua vez, a demanda energética de ônibus cresce em ritmo mais acelerado, de 2,7% a.a. no mesmo período¹⁸.

Em termos de consumo energético, o motor de combustão interna a diesel segue como a tecnologia dominante em todas as trajetórias. A sua participação na demanda de energia de veículos pesados varia de 84% na Trajetória EV+ a 94% na Trajetória de Referência. Os elétricos a bateria alcançam participação máxima de 13% em 2050 na Trajetória EV+, enquanto o máximo da propulsão a GNC/biometano é de 11% na Trajetória GN+.

A análise individual das fontes energéticas indica que, a depender do grau de inserção das tecnologias alternativas de motorização na frota brasileira de veículos pesados, a variação do consumo pode ser expressiva (Figura 4-5).

Figura 4-5 Demanda brasileira de óleo diesel, energia elétrica e gás natural da frota circulante de caminhões e ônibus



Fonte: EPE.

Nota: Os valores de óleo diesel incluem a mistura de biocombustível.



¹⁸ Como explicado no Capítulo 1, o mercado brasileiro de ônibus foi duramente afetado pela pandemia, com impactos sobre a capacidade financeira de toda a cadeia de valor do segmento. No ano-base de 2022, o consumo energético de ônibus no Brasil esteve aproximadamente 15% abaixo do nível registrado em 2019, no pré-pandemia. Assim, esse patamar inferior do consumo no ano-base e a recuperação esperada para esse mercado nos próximos anos justificam, em parte, o crescimento mais acelerado de 2,7% a.a. da demanda de energia de ônibus entre 2022 e 2050 no Brasil.

Na Trajetória de Referência, o consumo de diesel por caminhões e ônibus atinge uma máxima ao longo da década de 2040, alcançando 58,0 bilhões de litros em 2050. Na Trajetória EV+, essa demanda é de 44,5 bilhões de litros em 2050, ou seja, 23% menor do que na Trajetória de Referência, diante da inserção mais acelerada da propulsão elétrica a bateria em detrimento do motor de combustão interna a diesel. Essa redução de aproximadamente 14 bilhões de litros é semelhante às importações brutas de 15,9 bilhões de litros de óleo diesel realizadas pelo Brasil em 2022 (ANP, 2023b) e equivale a cerca de 20% do atual consumo total de óleo diesel do País (EPE, 2023c). Além disso, a máxima é alcançada mais cedo na Trajetória EV+, ao longo da década de 2030, e a demanda projetada para este derivado de petróleo em 2050 é marginalmente inferior ao valor de 2022. No caso da Trajetória GN+, a diminuição da demanda de óleo diesel por caminhões e ônibus em comparação à Trajetória de Referência é de 2 bilhões de litros em 2050.

O consumo de energia elétrica por veículos pesados no Brasil é crescente em todas as três trajetórias e alcança a máxima de 68,7 TWh em 2050 na Trajetória EV+, sendo três vezes maior que o estimado na Trajetória de Referência. Esse montante equivale a 12% do consumo final de eletricidade do Brasil em 2022 (EPE, 2023d). Ressalta-se o desafio da expansão da geração e transmissão de energia elétrica relacionado a esse potencial incremento da demanda no País. Associada a esta trajetória, podem ser necessárias mudanças comportamentais do consumidor, tal como reorganização da estratégia de abastecimento/carregamento.

A demanda de gás natural da frota brasileira de caminhões e ônibus também é crescente nas trajetórias avaliadas neste estudo, alcançando 6,5 bilhões m³ em 2050 na Trajetória GN+. Essa quantidade é quatro vezes maior que a estimada na Trajetória de Referência, sendo equivalente a 26% da demanda total de gás natural no País em 2022 e semelhante ao volume médio importado pelo Gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol) em 2022 (MME, 2023).

Emissões de gases de efeito estufa

Para cálculo das emissões de gases de efeito estufa da frota circulante de caminhões e ônibus, considera-se a avaliação de ciclo de vida dos energéticos pelo conceito do poço-à-roda (*well-to-wheel*, em inglês) (Box 4-4).

Box 4-4 Metodologia de cálculo das emissões de gases de efeito estufa de caminhões e ônibus

As emissões de gases de efeito estufa da frota de caminhões e ônibus são estimadas a partir de sua demanda energética e dos fatores de emissão dos energéticos, conforme Equação 3.

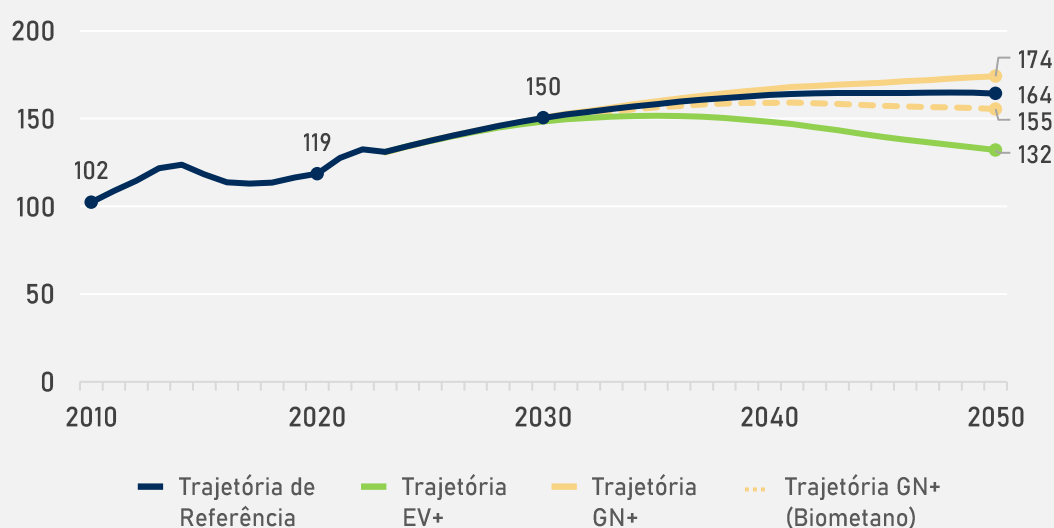
$$Emissão(Y) = \sum_{c,e} \sum_{y=y_{min}}^{y=Y} Demanda\ Energética(y,c,e) \times Fator\ de\ Emissão(e) \quad (Eq. 3)$$

No qual y é o ano, c é a categoria do caminhão/ônibus e e é a fonte energética.

Considera-se os fatores de intensidade de carbono (em gCO₂-eq/MJ) apresentados em EPE (2022b), calculados a partir de avaliação de ciclo de vida dos energéticos pelo conceito do poço-à-roda.



De acordo com EPE (2022b), a intensidade de carbono do óleo diesel B é inferior a 80 gCO₂-eq/MJ, enquanto a do gás natural veicular (GNV) é de 86,7 gCO₂-eq/MJ. Por sua vez, a intensidade de carbono média do biometano (obtida a partir de unidades produtoras certificadas pela ANP no âmbito do RenovaBio) é de 9,32 gCO₂-eq/MJ, sendo inferior inclusive à da eletricidade. Logo, a sustentabilidade ambiental da propulsão a gás natural está conjugada à utilização do biometano como combustível (Figura 4-6).

Figura 4-6 Emissões de gases de efeito estufa da frota circulante de veículos pesados no Brasil(milhões de toneladas de CO₂-eq)

Fonte: EPE.



Na Trajetória de Referência, as emissões de gases de efeito estufa da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil aumentam de 132 milhões de toneladas de CO₂-eq em 2022 para 164 milhões de toneladas de CO₂-eq em 2050, o que representa um crescimento de 0,8% a.a. no período. A emissão total cresce nas décadas de 2020 e 2030 com a retomada da expansão da frota circulante de veículos pesados – ainda dominada pelos motores de combustão interna movidos a diesel. Contudo, a partir da década de 2040, diante da maior inserção de motorizações alternativas de baixa intensidade de carbono, há uma estabilização do total de emissões de caminhões e ônibus.

A Trajetória EV+ alcança o menor nível de emissões de gases de efeito estufa em 2050 dentre as trajetórias avaliadas – 132 milhões de toneladas de CO₂-eq, sendo a mesma quantidade emitida por veículos pesados no Brasil em 2022. Após exibir um pico na década de 2030, as emissões entram em declínio a partir da penetração acelerada da propulsão elétrica a bateria na frota. As emissões totais da Trajetória EV+ são 20% menores em 2050 em comparação às da Trajetória de Referência.

Por sua vez, a Trajetória GN+ apresenta incremento de 6% nas emissões de gases de efeito estufa em 2050 em relação à referencial, uma vez que o gás natural de origem fóssil exibe maior intensidade de carbono que o diesel. Alternativamente, caso todo o consumo de gás natural da frota de caminhões e ônibus no Brasil seja realizado sob a forma de biometano (“Trajetória GN+ Biometano” na Figura 4-6), a emissão de gases de efeito estufa seria 5% menor em 2050 do que na Trajetória de Referência.

5. Considerações finais

Em um contexto global de transição para economias de baixo carbono, de busca por maior segurança energética e de melhor aproveitamento dos recursos, há uma efervescência de tecnologias alternativas de motorização e de novas fontes de energia para o setor de transportes. Seguindo essa tendência, o Brasil tem registrado nos últimos anos um processo de aceleração da difusão de propulsões alternativas na frota de veículos pesados.

Com vistas a contribuir para uma discussão qualificada sobre este tema e subsidiar o planejamento energético nacional, este estudo visou identificar possíveis trajetórias de inserção da propulsão elétrica a bateria e da propulsão a gás natural no mercado brasileiro de caminhões e ônibus até 2050, avaliando os seus impactos sobre a frota circulante, a demanda energética e as emissões de gases de efeito estufa desse segmento. Foram elaboradas três trajetórias, intituladas: (i) Trajetória de Referência; (ii) Trajetória EV+; e (iii) Trajetória GN+.

A trajetória referencial para o Brasil prevê uma inserção comedida de motorizações alternativas nos veículos pesados. Apesar da existência de compromissos nacionais de redução de gases de efeito estufa e de políticas e instrumentos incentivando a adoção de tecnologias de baixo carbono, ainda existem significativas barreiras à entrada para a adoção maciça dessas tecnologias alternativas em um País de renda média, que tem outras prioridades de desenvolvimento socioeconômico. No entanto, na busca por deslocamentos cada vez mais eficientes e sustentáveis, existe a possibilidade de estímulos governamentais de diversas naturezas acelerarem certas rotas de desenvolvimento que promovam a redução das emissões do segmento de caminhões e ônibus no Brasil. Rotas prováveis de serem incentivadas são a eletrificação e a expansão do uso do gás natural/biometano.

Uma maior oferta de gás natural a preços competitivos para o consumidor final, o desenvolvimento do potencial de produção de biometano, especialmente associado ao setor agropecuário no interior do País, e ampla disponibilidade de infraestruturas de abastecimento podem vir a acelerar o consumo desse combustível para veículos pesados. No entanto, a dificuldade de se interiorizar a oferta de gás natural em um país de dimensões continentais como o Brasil é um obstáculo relevante. Em que pese essas limitações, a Trajetória GN+ indica que a propulsão a gás natural possui inserção potencial de 10% da frota circulante de caminhões e ônibus em 2050. Mesmo sendo uma participação não majoritária, essa trajetória permitiria o consumo de 6,5 bilhões m³ de gás natural, o equivalente a 26% da demanda total no País e ao volume médio importado pelo Gasbol em 2022. Os ganhos ambientais são obtidos nessa trajetória para o caso de utilização do biometano, havendo potencial redução

de até 5% das emissões totais de gases de efeito estufa da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil em 2050 em comparação à trajetória referencial.

Por sua vez, a propulsão elétrica a bateria possui maior potencial de penetração na frota de veículos pesados. Essa perspectiva poderá ser acentuada, sobretudo, caso avanços significativos no desenvolvimento tecnológico de baterias sejam alcançados, levando a melhores condições de autonomia veicular, rendimento energético, vida útil e densidade de energia armazenada, promovendo a redução dos custos de baterias e, por conseguinte, dos preços de aquisição dos veículos elétricos. Mesmo nesse contexto certos desafios permanecem, como a expansão do sistema nacional de geração e transmissão de energia elétrica e o desenvolvimento de ampla infraestrutura de carregadores rápidos para caminhões e ônibus no interior de um País com dimensões continentais. Diante desse contexto, a Trajetória EV+ indica que um terço da frota circulante de caminhões e ônibus no Brasil em 2050 poderá ser composta por veículos com propulsão elétrica a bateria. Essa penetração acelerada permitiria uma redução potencial no consumo de óleo diesel em quase 14 bilhões de litros se comparado à Trajetória de Referência, volume semelhante às importações do Brasil em 2022. A demanda de energia elétrica por veículos pesados nesta trajetória seria de quase 70 TWh em 2050, equivalente a 12% do consumo final de eletricidade do Brasil em 2022. Na Trajetória EV+, as emissões de gases de efeito estufa são 20% menores em 2050 do que na trajetória referencial.

Cabe ressaltar, por fim, que as trajetórias de penetração de motorizações alternativas não representam expectativas, metas ou compromissos oficiais do governo brasileiro, tampouco refletem orientações ou objetivos estratégicos para políticas públicas no País. Tratam-se, apenas, de exercícios destinados à melhor compreensão dos caminhos possíveis, bem como para estimular o debate sobre as melhores soluções para tornar o transporte de cargas e de passageiros mais eficiente e sustentável no Brasil.

Referências

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2023). *Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2023*. São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://anfavea.com.br/site/anuarios/>>.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2023a). *Consulta Posto Web*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/distribuicao-e-revenda/revendedor/consulta-posto-web-1>>.

_____ (2023b). *Dados estatísticos*. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>>.

AUTODATA (2022). *Produção de ônibus já supera a do período pré-pandemia*. 7 dez. 2022. Disponível em: <<https://www.autodata.com.br/noticias/2022/12/07/producao-de-onibus-ja-supera-a-do-periodo-pre-pandemia/49473/>>.

_____ (2023). *eDaily e S-Way serão novidades da Iveco rumo à descarbonização*. 24 out. 2023. Disponível em: <<https://www.autodata.com.br/noticias/2023/10/24/edaily-e-s-way-gnv-serao-novidades-da-iveco-rumo-a-descarbonizacao/63703/>>.

AUTOMOTIVE BUSINESS (2021a). *Scania e Grupo JCA vão testar ônibus a gás*. 15 out. 2021. Disponível em: <<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/montadoras/scania-e-grupo-ica-vaio-testar-onibus-a-gas/>>.

_____ (2021b). *Primeiro ônibus rodoviário a gás do País vai entrar em operação*. 5 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.automotivebusiness.com.br/pt/posts/noticias/primeiro-onibus-rodoviario-a-gas-do-pais-vai-entrar-em-operacao/>>.

_____ (2022a). *Caminhões Euro 5 puxarão vendas do setor até março de 2023*. 4 out. 2022. Disponível em: <<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/setor-automotivo/caminhoes-euro-5-puxarao-vendas-do-setor-ate-marco-de-2023/>>.

_____ (2022b). *Iveco lança caminhões a gás e Daily elétrico dentro de programa de descarbonização*. 7 nov. 2022. Disponível em: <<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/setor-automotivo/iveco-lanca-caminhoes-a-gas-e-daily-eletrico-dentro-de-programa-de-descarbonizacao/>>.

_____ (2022d). *Iveco lança ônibus a gás na Argentina com ambição de exportar para o Brasil*. 19 set. 2022. Disponível em:

<<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/mobility-now/iveco-lanca-onibus-gas-natural-biometano/>>.

_____ (2023a). *Produção de caminhões supera 160 mil e fecha 2022 no azul*. 7 nov. 2022. 6 jan. 2023. Disponível em:

<<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/setor-automotivo/producao-de-caminhoes-supera-160-mil-e-fecha-2022-no-azul/>>.

_____ (2023b). *Volvo inicia testes com caminhão elétrico no Brasil*. 9 jun. 2023.

Disponível em: <<https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/mobility-now/volvo-inicia-testes-caminhao-eletrico-brasil/>>.

BAHIAGÁS (2020). *Primeiro ônibus do país movido a GNV e biometano vem a Salvador*. Disponível em: <<https://www.bahiagas.com.br/noticias/item/533-primeiro-onibus-do-pais-movido-a-gnv-e-biometano-vem-a-salvador>>.

BIELSCHOWSKY, R. (2012). *Estratégia de desenvolvimento e as três frentes de expansão no Brasil: um desenho conceitual*. Economia e Sociedade, v. 21, n. especial, 2012.

BLOOMBERG LÍNEA (2023). *Caminhões com motor elétrico? Para a Scania, há outras alternativas melhores*. 18 out. 2023. Disponível em:

<<https://www.bloomberglinea.com.br/negocios/caminhoes-com-motor-eletrico-para-a-scania-ha-outras-alternativas-melhores/>>.

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2018). *Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta*. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em:

<<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/16040>>.

_____ (2021). *Gás para o desenvolvimento: Perspectivas de oferta e demanda no mercado de gás natural no Brasil*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em:

<<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/publicacoes/relatorios/relatorio-gas-2020>>.

BRASIL (2022). *Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022. Institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano*. Diário Oficial da União, edição 55, seção 1, pg.1. Brasília, 2022. Disponível em:

<<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-11.003-de-21-de-marco-de-2022-387357085>>.

_____ (2023). *Plano para a Transformação Ecológica*. Disponível em:

<<https://www.gov.br/fazenda/pt-br/acao-a-informacao/acoes-e-programas/transformacao-ecologica>>.

BYD (2023a). *Caminhões multivocacionais 100% elétricos BYD*. Disponível em: <<https://www.byd.com.br/produtos/caminhoes/>>.

_____ (2023b). BYD chega à Bahia e lança pedra fundamental do complexo industrial de Camaçari. 10 out. 2023. Disponível em: <<https://www.byd.com.br/byd-agora-e-baiana-e-inaugura-o-complexo-fabril-simbolo-da-nova-industria-brasileira/>>.

CAMPINAS. Emdec - Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas (2022). *Administração municipal abre licitação para concessão do transporte público*. 20 dez. 2022. Disponível em: <<http://www.emdec.com.br/eficiente/sites/portalemdec/pt-br/site.php?secao=noticias&pub=21447>>.

CAVALCANTI, M. (2006). *Análise dos tributos incidentes sobre os combustíveis automotivos no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.ppe.ufri.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Marcelo_Castello_Branco_Cavalcanti.pdf>.

CEPAL - Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (2022). *Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono*. Santiago, 2022. Disponível em: <<https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/47833-oferta-onibus-eletrico-brasil-cenario-recuperacao-economica-baixo-carbono>>.

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética (2023). *Resolução nº 1, de 20 de março de 2023*. Diário Oficial da União, edição 93, seção 1, pg. 9. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/despacho-do-presidente-da-republica-483637641>>.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2023a). *Séries Históricas das Safras*. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>.

_____ (2023b). *Boletim da Safra de Grãos – 2º Levantamento – Safra 2023/24*. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>.

CONCEIÇÃO, G. (2006). *A viabilidade técnica, econômica e ambiental da inserção do gás natural veicular em frotas do transporte coletivo urbano de passageiros*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www.ppe.ufri.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Guilherme_Wilson_da_Concei%C3%A7%C3%A3o.pdf>.

CURITIBA. Prefeitura Municipal de Curitiba (2020). *Plano Municipal de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas: PlanClima*. Curitiba, 2020. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2020/00306556.pdf>>.

_____ (2023a). *Ônibus movido a gás natural começa a ser testado em Curitiba na segunda-feira*. 15 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/onibus-movido-a-gas-natural-comeca-a-ser-testado-em-curitiba-na-segunda-feira/68170>>.

_____ (2023b). *Greca anuncia compra de 70 ônibus elétricos para Curitiba em workshop sobre eletromobilidade*. 10 mai. 2023. Disponível em: <<https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/greca-anuncia-compra-de-70-onibus-eletricos-para-curitiba-em-workshop-sobre-eletromobilidade/68493>>.

C40 CITIES (2023). *C40 Cities*. Disponível em: <<https://www.c40.org/>>.

DIÁRIO DO TRANSPORTE (2015). *História: São Paulo já teve lei que obrigava frota de ônibus movidos a gás natural*. 2 nov. 2015. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2015/11/02/historia-sao-paulo-ja-teve-lei-que-obrigava-frota-de-onibus-movidos-a-gas-natural/>>.

_____ (2023a). *Em primeira mão: Empresas de ônibus da cidade de São Paulo encomendaram 2152 coletivos elétricos, diz SPTrans*. 25 fev. 2023. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2023/02/25/em-primeira-mao-empresas-de-onibus-da-cidade-de-sao-paulo-encomendaram-2152-coletivos-eletricos-diz-sptrans/>>.

_____ (2023b). *Documento oficial: Ônibus elétricos vão gerar às viagens subsídio até 32% mais alto que ônibus a diesel em São Paulo, define Nunes em publicação no Diário Oficial*. 4 dez. 2023. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2023/12/04/documento-oficial-onibus-eletricos-va-gerar-as-viaco-es-subsidio-ate-32-mais-alto-que-onibus-a-diesel-em-sao-paulo-define-nunes-em-publicacao-no-diario-oficial/>>.

ECEN - Economia & Energia (1999). *Frota de veículos diesel no transporte rodoviário*. Revista Economia & Energia, Ano III, n. 16, 1999. Disponível em: <<http://ecen.com/eee16/frotabr.htm>>.

ELETRA (2023). *Elétrico*. Disponível em: <<https://www.eletrabus.com.br/eletrico-puro/>>.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2020). *Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil*. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nova-versao-da-Ferramenta-para-Avaliacao-de-Viabilidade-de-Onibus-Eletrico.aspx>>.

_____ (2021a). *Transporte Rodoviário de Cargas: Proposta para o Reequilíbrio*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Transporte-Rodoviario-de-Cargas-Proposta-para-o-Reequilibrio.aspx>>.

_____ (2021b). *Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil - Benchmarking Internacional*. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/transporte-rodoviario-de-cargas-no-brasil-benchmarking-internacional>>.

_____ (2022a). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, Caderno de Premissas Econômicas e Demográficas*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>>.

_____ (2022b). *Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário - Intensidade de carbono das fontes de energia*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-descarbonizacao-do-setor-de-transporte-rodoviario-intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia->>>.

_____ (2022c). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, Caderno de Oferta de Biocombustíveis*. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>>.

_____ (2023a). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2032, Caderno de Demanda Energética do Setor de Transportes*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2032>>.

_____ (2023b). *WEBMAP interativo do sistema energético brasileiro*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/webmap-epe>>.

_____ (2023c). *Perspectivas para o Mercado Brasileiro de Combustíveis no Curto Prazo - Outubro 2023*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/perspectivas-para-o-mercado-brasileiro-de-combustiveis-no-curto-prazo>>.

_____ (2023d). *Balanço Energético Nacional 2023*. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>.

ESTADÃO (2022a). *Caminhões de grande porte mantêm domínio do mercado brasileiro*. 26 out. 2022. Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/meios-de-transporte/caminhoes-de-grande-porte-mantem-dominio-do-mercado-brasileiro/>>.

____ (2022b). *Avaliamos o Scania R 410 GNL, único caminhão do tipo à venda no Brasil*. 21 jun. 2022. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/avaliemos-o-scania-r-410-gnl-unico-caminhao-do-tipo-a-venda-no-brasil/>>.

____ (2023). *Volvo vai testar caminhão a gás líquido no Brasil como alternativa ao diesel*. 17 fev. 2023. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/volvo-vai-testar-caminhao-a-gas-liquido-no-brasil-como-alternativa-ao-diesel/>>.

FENABRAVE - Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (2023). *Emplacamentos. Resumo Mensal Dezembro de 2022*. São Paulo, 2023. Disponível em: <<http://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>>.

GOIÁS. Metrobus (2023). *Confira o edital para contratação de serviço de locação de 114 ônibus novos, articulados, 100% elétricos para o Eixo Anhanguera*. 10 fev. 2023. Disponível em: <<https://goias.gov.br/metrobus/confira-o-edital-para-contratacao-de-servico-de-locacao-de-114-onibus-novos-articulados-100-eletricos-para-o-eixo-anhanguera/>>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023). *LSPA: há 50 anos contando a história da agricultura brasileira*. 13 abr. 2023. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/36661-lspa-ha-50-anos-contando-a-historia-da-agricultura-brasileira>>.

ICCT - International Council on Clean Transportation (2022). *Electrifying Last-Mile Delivery: A Total Cost of Ownership Comparison of Battery-Electric and Diesel Trucks in Europe*. Washington, 2022. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/tco-battery-diesel-delivery-trucks-jun2022/>>.

IVECO (2023). *Iveco na Fenatran 2022: Novos caminhos em direção ao futuro*. Disponível em: <<https://www.blogiveco.com.br/iveco-na-fenatran-2022-novos-caminhos-em-direcao-ao-futuro/>>.

JAC MOTORS (2023). *Veículos comerciais elétricos*. Disponível em: <<https://www.jacmotors.com.br/veiculos/eletricos?comerciais=1>>.

JORGE, G. et al. (2020). *Análise comparativa de viabilidade econômica de caminhões a diesel e a gás natural no Brasil*. Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2020.

MERCEDES-BENZ (2023). *Mercedes-Benz produz ônibus elétricos em série na sua moderna Fábrica 4.0 de São Bernardo do Campo e inicia entregas aos clientes*. 14 nov. 2023. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz-trucks.com.br/institucional/imprensa/releases/onibus/2023/11/25214-mercedes-benz-produz-onibus-eletricos-em-serie-na-sua-moderna-fabrica-4-0-de-sao-bernardo-do-campo-e-inicia-entregas-aos-clientes/>>.

MMA - Ministério do Meio Ambiente (2014). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013 – Ano-base 2012 – Relatório Final*. Brasília, 2014. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/controle-de-emissoes-veiculares/grupo-de-trabalho-invent%C3%A1rio-nacional.html>>.

MME - Ministério de Minas e Energia (2023). *Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural - Dezembro 2022*. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural>>.

MORNING CONSULT (2021). *Supply Chain Disruptions Limit Consumer Spending*. 27 set. 2021. Disponível em: <<https://morningconsult.com/2021/09/27/supply-chain-disruptions-limit-consumer-spending/>>.

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (2023). *Anuário NTU: 2022-2023*. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638272765778419772.pdf>>.

RIBEIRÃO PRETO. Prefeitura da Cidade de Ribeirão Preto (2022). *Ônibus movido a gás inicia teste em Ribeirão Preto*. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/noticia/onibus-movido-a-gas-inicia-teste-em-ribeirao-preto>>.

RIO DE JANEIRO. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2019). *Decreto Rio nº 46.081, de 11 de junho de 2019. Declara a adesão da Cidade do Rio de Janeiro em promover ruas verdes e saudáveis, com ações planejadas para cumprimento de prazos para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) da frota de transporte público do Município do Rio de Janeiro, e dá outras providências*. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/documents/7108891/68ad4741-add6-4d99-9a25-15b10ff1c349>>.

SALERNO, M., ARBIX, G., TOLEDO, D. (2015). *Social development and income distribution: the conditions of the Brazilian auto industry growth*. In: JETIN, B. (ed.) *Global automobile demand: major trends in emerging economies*. V. 2. Palgrave Macmillan, 2015.

SALVADOR. Prefeitura Municipal de Salvador (2020). *Plano de Mitigação e Adaptação às Mudanças do Clima em Salvador*. Salvador, 2020. Disponível em: <<https://sustentabilidade.salvador.ba.gov.br/programas/plano-de-acao-climatica-de-salvador/>>.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Urbam - Urbanizadora Municipal S.A. (2023). *Urbam publica edital para licitação dos ônibus elétricos*. 9 fev. 2023. Disponível em: <<https://www.urbam.com.br/noticia/1028/urbam-publica-edital-para-licitacao-dos-onibus-eletricos/>>.

SÃO PAULO. Prefeitura da Cidade de São Paulo (2009). *Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009. Institui a Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo*. São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-14933-de-05-de-junho-de-2009>>.

_____ (2018). *Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018. Dá nova redação ao art. 50 da Lei nº 14.933/2009, que dispõe sobre o uso de fontes motrizes de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo e dá outras providências*. São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-16802-de-18-de-janeiro-de-2018>>.

_____ (2021). *Programa de metas 2021-2024: versão final participativa*. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/governo/planejamento/programa_de_metas_20212024/#>.

SCANIA (2023). *Caminhão a gás. A energia do amanhã, hoje*. Disponível em: <<https://www.scania.com/br/pt/home/products/trucks/gas-truck.html>>.

USBEF – United States-Brazil Energy Forum (2021). *Brazil Roadmap for Natural Gas and Biomethane Heavy Duty Trucks & Buses*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/mapa-estrategico-para-desenvolvimento-do-mercado-de-veiculos-medios-e-pesados-movidos-a-gas-natural-e-biometano>>.

VALOR ECONÔMICO (2023). *Higer vence primeira licitação de ônibus elétricos do Brasil*. 19 abr. 2023. Disponível em: <<https://valor.globo.com/empresas/noticia/2023/04/19/higer-vence-primeira-licitacao-de-onibus-eletricos-do-brasil.ghtml>>.

VWCO - Volkswagen Caminhões e Ônibus (2020). *100 caminhões elétricos em 2021: Ambev e VW Caminhões fecham parceria para entrega dos primeiros e-Delivery*. Disponível em: <<https://www.vwco.com.br/news/151>>.

_____ (2021). *Um dia histórico: VW Caminhões e Ônibus inicia a produção do e-Delivery*. Disponível em: <<https://www.vwco.com.br/news/234>>.

_____ (2022). *VWCO testa o maior caminhão elétrico fabricado no Brasil*.

Disponível em: <<https://www.vwco.com.br/news/453>>.

_____ (2023). *Família e-Delivery*. Disponível em:

<<https://www.vwco.com.br/caminhoes/e-Delivery?id=27>>.

XCMG (2023). *Caminhões*. Disponível em: <<https://www.xcmg-america.com/tipo-de-maquina/caminhoes/>>.



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

