

2

A descarbonização do
setor automotivo como
uma oportunidade
para a engenharia
automotiva brasileira

Bruno Plattek
Paulo Renato Villarim
Carlos Eduardo Cavalcanti*

* Engenheiros do Departamento de Bens de Capital e Consumo, Comércio e Serviços da Área de Desenvolvimento Produtivo e Inovação do BNDES.

INTRODUÇÃO

A mudança climática demanda políticas públicas que viabilizem a transição para uma economia de baixo carbono em diversos setores. Optar pelo uso de energias de menor nível de emissão é essencial para atingir os objetivos de zerar as emissões líquidas de carbono em 2050 e cumprir as metas do Acordo de Paris (2015).

Diferentes países têm articulado suas políticas energéticas, industriais e tecnológicas a fim de acelerar o processo de transição para uma economia de baixo carbono. Ademais, pretendem garantir a segurança energética; impulsionar a geração de emprego e renda; e promover o desenvolvimento industrial e a autonomia tecnológica nacional. Assim, o volume de investimentos em tecnologias que contribuam para a redução de emissões deve se expandir de forma significativa nas próximas décadas.

O setor de transportes é um importante emissor de gases de efeito estufa (GEE), com uma participação de aproximadamente 27% das emissões globais (IPCC, 2022). No Brasil, o uso da terra e a agropecuária são os dois principais responsáveis pelas emissões de GEE (44% e 28%, respectivamente), enquanto o setor de transportes é o principal emissor no segmento de energia (Seeg, 2020), tendo sido responsável por 9% do total das emissões brasileiras em 2019 (com a maior parcela proveniente do transporte rodoviário).

A descarbonização da mobilidade deve, assim, ser um dos focos das políticas públicas voltadas para a redução das emissões no mundo e no Brasil. No setor automotivo, essa perspectiva vem impulsionando relevantes investimentos em novas rotas tecnológicas, que reduzem o uso de combustíveis fósseis, com destaque para a eletrificação veicular. No entanto, rotas alternativas como a dos biocombustíveis e a do hidrogênio também representam uma oportunidade de acelerar a transição para a mobilidade de baixo carbono, a depender da região e da realidade local de alguns países.

Importante ressaltar que o Brasil é, ainda hoje, um eminente polo mundial da engenharia automotiva. Nosso parque industrial tem competências destacadas em engenharia veicular. Além disso, o ecossistema brasileiro de inovação apresenta uma relevante capacidade de pesquisa, desenvolvimento, testes e

certificação no setor automotivo, contando com grande experiência no uso de biocombustíveis. A cadeia de fornecedores, embora bastante heterogênea no perfil e no porte das empresas, também tem capacidades locais significativas.

A existência de um setor robusto de biocombustíveis e de uma infraestrutura de abastecimento já instalada no território nacional dão alternativas para a alavancagem do processo de transição energética no país, representando uma oportunidade para o desenvolvimento da indústria local.

Adicionalmente, serão necessários investimentos relevantes para mitigar as emissões associadas não apenas ao uso dos veículos, mas também ao processo produtivo ao longo da cadeia de fornecedores de componentes e insumos e da cadeia produtiva dos energéticos (combustíveis e, no caso dos veículos elétricos, geração de energia).

Diante disso, a questão que se coloca para análise é a viabilidade da estruturação de uma estratégia nacional de descarbonização do setor automotivo que utilize as capacidades locais da engenharia automotiva e dos biocombustíveis. Tal recurso deve impulsionar a agenda de inovação e industrialização no país, sendo capaz de combiná-la com as mudanças significativas que vêm ocorrendo no setor automotivo mundial no contexto das novas rotas tecnológicas da eletrificação veicular. Explora-se a ideia da bioeletrificação como uma possível rota para o desenvolvimento da indústria brasileira e para a transição para um novo paradigma da descarbonização da mobilidade na indústria automotiva.

Este artigo apresenta cinco seções além desta introdução. A segunda seção mostra um panorama do setor automotivo no Brasil e sua importância para a economia brasileira. Na terceira seção, aborda-se a eletrificação veicular e se discute o ritmo de sua difusão no mundo. A quarta seção expõe como a indústria automotiva brasileira está posicionada em relação ao desenvolvimento e à disponibilidade no país das diferentes plataformas veiculares (elétrica, biocombustíveis, híbridas etc.). A quinta seção discute como poderia se dar o processo de estruturação das políticas industriais e tecnológicas voltadas para o desenvolvimento das novas tecnologias de descarbonização da mobilidade. Por fim, são apresentadas as conclusões.

PANORAMA ATUAL DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA BRASILEIRA

Desde o início de seu desenvolvimento no Brasil, a indústria automotiva assumiu um papel relevante para a economia do país. Segundo a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores – Anfavea (Anuário..., 2023), o setor representa cerca de 2,5% do produto interno bruto (PIB) brasileiro e responde por mais de 20% do PIB da indústria de transformação. Há no país 26 empresas fabricantes de veículos e 498 fabricantes de autopeças. O setor emprega aproximadamente quinhentas mil pessoas – direta e indiretamente, são cerca de 1,2 milhão de profissionais – e tem uma capacidade instalada de 4,5 milhões de veículos.

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores – Sindipeças (2023), a frota brasileira de veículos fechou o ano de 2022 atingindo o patamar de 46,9 milhões de unidades. Desse total, 44,3 milhões são automóveis e comerciais leves, 2,1 milhões são caminhões e 387 mil veículos compõem a frota de ônibus.

Atualmente, uma dúzia de montadoras multinacionais de grande porte produz veículos no país.¹ Dos cinco maiores fabricantes mundiais (Toyota, Volkswagen, Ford, Hyundai e Honda), apenas a Ford não mantém fabricação no Brasil, embora tenha um importante centro de engenharia localizado na Bahia. Ademais, alguns fabricantes locais atuam sob o regime de licenciamento (como a HPE, que produz veículos das marcas Mitsubishi e Suzuki) ou de *joint-ventures* (como a Caoa Chery).

No que se refere à competência técnica, as montadoras multinacionais presentes no país apresentam níveis variáveis de capacidade de engenharia, podendo atrair junto às suas matrizes desde projetos de desenvolvimento de novos veículos até reestilizações/adaptações dos produtos existentes. É importante notar, entretanto, que, na ausência de estímulos específicos, as

¹ Os fabricantes atualmente instalados no Brasil são: Stellantis, Hyundai, Honda, Volkswagen, Toyota, GM, Renault, Nissan, Caoa Chery, HPE, BMW e Land Rover.

etapas mais nobres de concepção, projeto e desenho são feitas nas matrizes dessas empresas.

O primeiro elo de fornecimento para as montadoras de veículos é composto por sistemistas. Costuma-se denominar esse elo da cadeia produtiva como *tier 1*. São fornecedores de subconjuntos, módulos e sistemas. Os principais sistemistas no Brasil são grandes grupos industriais de origem europeia, asiática e estadunidense. Entre eles, estão: Bosch, ZF, Magna, Continental, Denso, Aisin Seiki, Hyundai Mobis e Faurecia. Cabe mencionar, também, empresas de origem brasileira com alcance global, tais quais a Iochpe-Maxion e a Tupy-MWM. Os fornecedores *tier 1* costumam ter uma relação de parceria com as matrizes das grandes montadoras e fazem a localização de subsidiárias do tipo *follow-sourcing*, ou seja, trabalhando com a mesma montadora em unidades produtivas ao redor do mundo.

São principalmente esses dois conjuntos de empresas, montadoras e sistemistas que detêm o poder de comando sobre a cadeia produtiva. Em ambos os casos, trata-se de grandes empresas com capacidade de investimento e exportação, boa gestão financeira, elevado faturamento, além de práticas modernas de produção.

Os elos inferiores da cadeia de autopeças – os *tiers 2 e 3* – são compostos de fabricantes de conjuntos, partes, peças e componentes. Essas empresas atuam em diferentes segmentos, como os de componentes metálicos (forjados, fundidos, estampados e usinados), não metálicos (como os de plástico e borracha) e, ainda, os elétricos e eletrônicos. Esses elos da cadeia são bastante heterogêneos quanto ao porte das empresas. Diferentemente dos elos superiores, há neles uma importante presença de firmas de menor porte em termos de faturamento e de número de empregados. Essas, em geral, são primordialmente de capital nacional, com acesso mais restrito a crédito e a fontes de financiamento ao investimento.

As informações atualizadas de produção, licenciamento e exportação de veículos estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1. Brasil: produção, licenciamento e exportação de veículos – 2023 (milhares de unidades)

	PRODUÇÃO	LICENCIAMENTO	EXPORTAÇÃO
Automóveis	1.781,6	1.721,4	308,2
Comerciais leves	422,1	458,8	73,8
Caminhões	100,5	108,0	16,9
Ônibus	20,6	20,4	5,0
Total	2.325	2.309	404

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de Carta... (2024).

O AVANÇO DA ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

Os veículos elétricos (VE), impulsionados por avanços tecnológicos em baterias e eficiência energética, emergem como a principal tendência de desenvolvimento do setor automotivo global.²

Todavia, há incertezas relevantes quanto ao ritmo de adoção da eletrificação veicular por meio dos veículos elétricos puros, decorrentes, principalmente, do elevado investimento necessário para instalação da infraestrutura de recarga, do ritmo de queda dos custos das baterias e dos desafios tecnológicos para o aumento da autonomia dessas baterias. Tais incertezas têm levado à adoção gradual da eletrificação, coexistindo diferentes tipos de VEs, resumidos no Quadro 1.

2 Governos ao redor do mundo estão estimulando a transição para a mobilidade elétrica por meio de fortes incentivos fiscais à produção, subsídios à aquisição e regulações ambientais para redução de emissões, como o *Inflation Reduction Act* (IRA), nos Estados Unidos da América, e o *Green Deal Industrial Policy*, na União Europeia. Já a China tem um plano de longo prazo dedicado à indústria automotiva, o *New Energy Vehicle Industry Development Plan* (2021-2035). Como consequência, segundo a Agência Internacional de Energia (em inglês: International Energy Agency – IEA), em 2022, mais de 90% das vendas de veículos elétricos no mundo contaram com algum tipo de incentivo (IEA, 2023).

Quadro 1. Plataformas para eletrificação veicular

PLATAFORMA VEICULAR	DESCRIÇÃO
Veículos elétricos a bateria (VEB)	A tração motriz é completamente provida por um ou mais motores elétricos, que, por sua vez, obtêm a energia de baterias recarregáveis. A carga das baterias provém de uma fonte externa (<i>plug-in</i>). As baterias recarregáveis (cuja tecnologia dominante é hoje a de íons de lítio) são um componente crítico no conjunto, respondendo por uma parcela relevante (até 50%) do custo do veículo.
Veículos híbridos (VH) e veículos híbridos <i>plug-in</i> (VHP)	Combinam um motor a combustão interna com um motor elétrico para o fornecimento de tração motriz, seja em conjunto, seja separadamente. O motor elétrico é alimentado por uma bateria que pode ser carregada por meio de fonte externa ou da regeneração da energia dissipada em desacelerações e frenagens. No caso de a bateria ser carregada com ajuda de fonte externa, o veículo é denominado “híbrido <i>plug-in</i> ” (VHP).
Veículos a célula de combustível (VCC)	As células de combustível são dispositivos eletroquímicos que produzem uma reação de eletrólise reversa da água. Nessa reação, o hidrogênio armazenado no veículo combina-se com o oxigênio atmosférico, gerando uma corrente que alimenta um motor elétrico de tração. Utiliza-se também uma bateria recarregável, de menor porte, para estabilizar a corrente gerada pela célula.

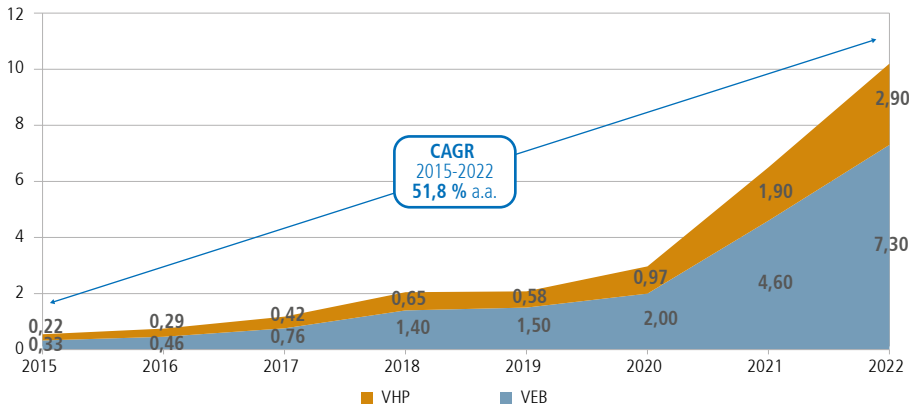
Fonte: Elaboração própria.

Os sucessivos avanços tecnológicos na mobilidade elétrica, principalmente ligados ao desenvolvimento de baterias, levaram ao lançamento de novos modelos de carros elétricos e híbridos ao longo da primeira década do século XXI. A expansão da eletrificação veicular tem ocorrido, sobretudo, por meio dos veículos de passeio leves *plug-in*, ou seja, quando o carregamento da bateria se dá por uma fonte externa (podendo ser do tipo VEB ou VHP).

Na última década, as vendas foram bastante alavancadas pelo estabelecimento de políticas governamentais de estímulo à aquisição e produção desses veículos, por meio de subsídios e incentivos fiscais, uma vez que eles apresentam custos superiores a seus equivalentes movidos a combustão.³ O Gráfico 1 mostra que as vendas de veículos *plug-in* cresceram a uma taxa média de 51,8 % ao ano (a.a.) no período de 2015 a 2022, passando de cerca de 550 mil para 10,2 milhões anuais.

3 Os veículos elétricos são, atualmente, cerca de 50% a 80% mais caros que os veículos a combustão da mesma categoria.

Gráfico 1. Evolução das vendas globais de veículos leves eletrificados *plug-in* (milhões de unidades)



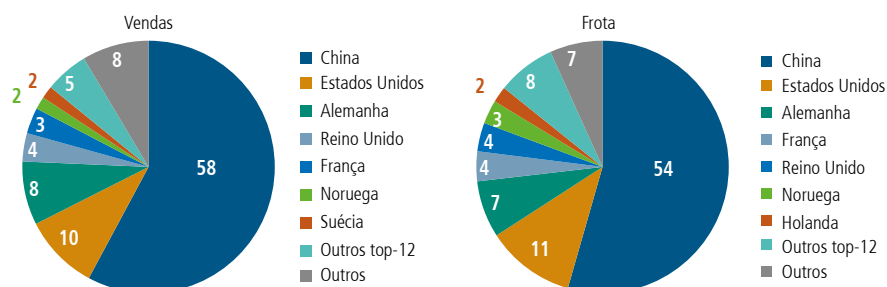
Fonte: Elaboração própria, com base em dados da IEA (2023).

Nota: CAGR = *compound annual growth rate* (taxa de crescimento anual composta).

Os Estados Unidos da América (EUA), os países da União Europeia, a China, a Coreia do Sul e o Japão são os maiores investidores na eletrificação e visam manter a competitividade de suas montadoras. Foi principalmente nesse conjunto de países que se verificou um crescimento acelerado da produção e da venda de veículos eletrificados *plug-in*, assim como a consequente expansão da parcela dessa categoria na frota de veículos em uso.

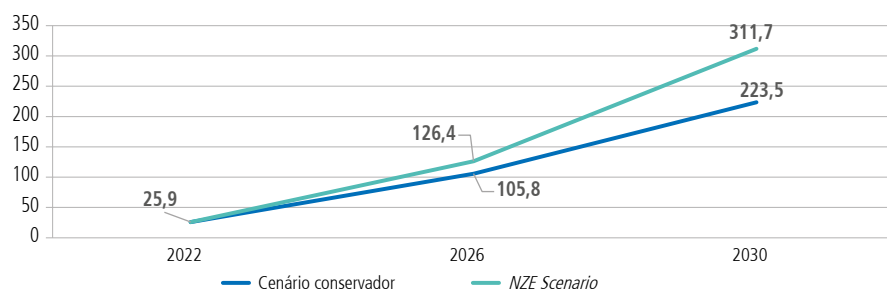
Apenas entre os anos de 2020 e 2022, a participação dos veículos elétricos *plug-in* nas vendas totais de carros passou de 5% para 14%, em termos globais. O crescimento de vendas levou a frota global de veículos leves *plug-in* a 26 milhões de unidades em 2022, dos quais cerca de 18 milhões são veículos elétricos a bateria (VEB).

Tal volume de veículos *plug-in* representa 2,1 % da frota mundial de veículos leves. Adiciona-se que apenas 12 países representaram 92% das vendas e 93% da frota global em 2022, a saber, China, EUA, Alemanha, Reino Unido, França, Noruega, Suécia, Holanda, Coreia do Sul, Canadá, Itália e Japão. E, como é possível ver no Gráfico 2, China, EUA e Alemanha representam mais de dois terços desse total.

Gráfico 2. Participação nas vendas e na frota de veículos leves *plug-in* em 2022 (%)

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da IEA (2023).

A expectativa é que esse mercado continue a se expandir fortemente na próxima década. O Gráfico 3 apresenta as projeções da IEA (2023) para o ano de 2030, que apontam para uma frota total entre 223 milhões no cenário mais conservador, que considera as políticas e os objetivos oficialmente estabelecidos por governos, e 312 milhões no cenário mais otimista, que considera os objetivos de emissões líquidas zero (*Net Zero Emissions by 2050 Scenario – NZE Scenario*). Assim, as projeções indicam um crescimento de oito a doze vezes em relação ao tamanho da frota atual em menos de uma década.

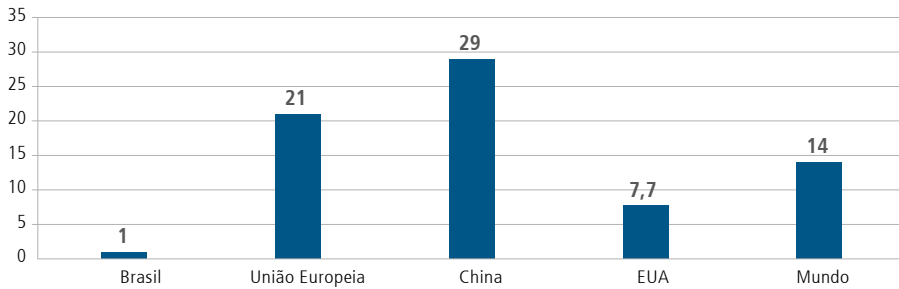
Gráfico 3. Projeção da evolução da frota global de veículos leves eletrificados *plug-in* (milhões de unidades)

Fonte: Elaboração própria, com base em dados de IEA (2023).

O avanço das vendas dos veículos leves *plug-in* é heterogêneo a depender da região e do país, como pode ser observado no Gráfico 4. Em mercados emergentes, o avanço da eletrificação da frota ocorre de forma mais gradual. No mercado brasileiro, as vendas de veículos leves eletrificados *plug-in* em 2022 se aproximaram do patamar de vinte mil unidades, o que corresponde a 1,1%

das vendas totais de veículos leves no país. Mesmo somando a esse número as pouco mais de trinta mil unidades de híbridos não *plug-in*, a participação dos eletrificados representaria 3,1% das vendas.

Gráfico 4. Participação dos veículos eletrificados *plug-in* nas vendas totais de veículos leves em 2022 (% total)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados de IEA (2023) e ABVE (2023).

Além dos veículos de passeio, o segmento de veículos comerciais leves elétricos *plug-in* também vem apresentando um crescimento nas vendas globais. Em 2022, cerca de 310 mil unidades foram comercializadas, quase um terço da frota, que atingiu 930 mil unidades, metade das quais se encontra na China (IEA, 2023).

Em relação aos veículos pesados *plug-in*, por sua vez, observa-se que o pico das vendas globais foi em 2017 para os caminhões (81 mil unidades) e em 2015 para os ônibus (123 mil unidades) (IEA, 2023). Após esse pico, seguiram-se anos de vendas decrescentes, seguidos pela pandemia de Covid-19 em 2020 e 2021, com uma recuperação das vendas em 2022 para ambas as categorias (respectivamente 60 mil e 65 mil unidades, ante 41 mil e 57 mil em 2021). As vendas na China representaram 85% do volume global para os caminhões e 80% para os ônibus.

É importante mencionar que a expansão dos veículos elétricos requer enormes investimentos em infraestrutura de recarga. Apenas para ter a dimensão do volume de recursos necessários, estima-se que seja preciso investir cerca de US\$ 1,7 trilhão na Índia, China e Europa (J.P. Morgan, 2018) e entre US\$ 210 bilhões e US\$ 300 bilhões no Brasil (EPE, 2018). Em conjunto com esses investimentos, os ganhos de escala na produção e o desenvolvimento das baterias devem viabilizar uma queda dos custos desses veículos.

Deve-se destacar a relação direta que se observa entre o avanço em termos globais dos veículos *plug-in* e as políticas governamentais de subsídios a aquisições de veículos e de incentivos fiscais voltados aos massivos investimentos em infraestrutura de recarga.

A aplicação de tais ferramentas teria um espaço restrito no contexto brasileiro dada a escala de recursos e incentivos que seriam demandados para os investimentos em infraestrutura e para a redução dos elevados custos desses veículos para o mercado consumidor local.

A formulação de uma estratégia para a descarbonização nacional da mobilidade deve considerar essas restrições ao processo de transição para o paradigma da eletrificação. Um caminho para equacionar essas relevantes restrições passa pela utilização das capacidades já estabelecidas no país para o desenvolvimento das soluções mais adaptadas, de menor custo e maior retorno ambiental, econômico e social para a sociedade brasileira.

AS PLATAFORMAS DE DESCARBONIZAÇÃO NO BRASIL

Esta seção apresentará como a indústria automotiva brasileira está posicionada em relação ao desenvolvimento e à disponibilidade no país das diferentes plataformas veiculares. A indústria automotiva no Brasil, como no mundo, é caracterizada por uma cadeia produtiva madura voltada para a produção e comercialização dos veículos movidos a motores de combustão interna.

A base industrial automotiva brasileira conta com um diferencial relevante no panorama mundial no que se refere aos processos de descarbonização. Foi no Brasil que se estabeleceu o maior *case* mundial de uso em larga escala de biocombustíveis para movimentar a frota de veículos. O uso do etanol para essa finalidade é uma realidade há quase cinquenta anos, desde a implantação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975, passando pelo desenvolvimento, no início dos anos 2000, dos motores *flex-fuel*, que usam indistintamente etanol ou gasolina. Essas foram duas grandes realizações

da engenharia automotiva brasileira, que se aproveitaram das capacidades constituídas no setor automotivo nas décadas anteriores.

Fomentado com o objetivo de ser uma alternativa à forte restrição à importação de combustíveis por conta das crises do petróleo da década de 1970, o uso em larga escala desse biocombustível colocou o Brasil historicamente em posição de destaque entre os diferentes países quanto à descarbonização da mobilidade, mesmo antes de o tema ser uma preocupação global e uma realidade no setor automotivo.

Um simples exercício ilustrativo pode ser feito para dimensionar o impacto do uso desse biocombustível na frota veicular brasileira. A gasolina comercializada no Brasil contém um volume de 27% de etanol anidro em sua composição, podendo atingir até 35%, segundo as regras definidas no programa Combustível do Futuro – Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024 (Brasil, 2024). Conforme já mencionado, a frota de veículos leves no Brasil soma cerca de 44,3 milhões de veículos, dos quais 40 milhões são *flex-fuel*. Supondo, conservadoramente, que todos sejam abastecidos exclusivamente com a gasolina vendida nos postos, teríamos uma frota fictícia equivalente a 12,2 milhões de veículos usando somente o etanol anidro.

Adicionalmente, estima-se que a cana-de-açúcar, em seu ciclo de desenvolvimento vegetal, absorve de 70% a 80% do dióxido de carbono (CO_2) liberado na produção e queima do álcool combustível (Stellantis, 2023). Admitindo-se, também de forma conservadora, que essa absorção seja de 70%, a frota de 12,2 milhões de veículos a etanol equivaleria a uma frota teórica de 8,5 milhões de veículos “emissão-zero”, ou seja, cujas emissões de CO_2 são inteiramente absorvidas pelas plantações de cana-de-açúcar, o que colocaria o Brasil na segunda posição entre as maiores frotas de veículos de baixa emissão, atrás apenas da China.⁴ Esse simples exercício ilustrativo considera apenas o volume de etanol anidro já contido na gasolina no Brasil e desconsidera o uso recorrente no país do etanol como um substituto da gasolina.

Ainda no âmbito da plataforma de veículos com motores a combustão, uma outra modalidade seriam os veículos a gás natural veicular (GNV).

4 Em 2022, a frota de veículos a bateria era de 11,5 milhões na China e de 2,1 milhões nos EUA (IEA, 2023).

Trata-se de uma alternativa viável para a redução de emissões em veículos pesados. As emissões de CO₂ em caminhões a GNV podem ser até 20% inferiores às de um caminhão equivalente a *diesel*. As reduções são ainda maiores para os óxidos de nitrogênio (até 90%) e material particulado (até 85%) (Machado, 2023).

Essas emissões seriam ainda inferiores se fosse usado, em veículos dessa plataforma, o biometano no lugar do gás natural. O biometano pode ser intercambiável com o GNV⁵ e pode ser obtido a partir de resíduos de atividades agropecuárias, de estações de tratamento de esgoto e de aterros sanitários. Há empresas no Brasil com capacidade produtiva de caminhões pesados e chassis de ônibus com motorização a GNV/biometano desde 2020.

Em relação à plataforma de veículos elétricos a bateria, o Brasil não apresenta, até o momento, produção local de veículos leves. No segmento de pesados (caminhões e ônibus urbanos), por outro lado, já há algum avanço em termos de produção local de veículos e de alguns dos componentes do trem de força elétrico, com destaque para os inversores⁶ e motores elétricos, bem como de algumas etapas de fabricação de baterias. Existem plantas para a montagem final de baterias de íons de lítio produzidas com células importadas, casos da WEG Equipamentos Elétricos, BorgWarner Brasil e BYD do Brasil. A WEG produz também os elementos do sistema de tração, inversor e motor, que são usados na produção local de caminhões e ônibus elétricos.

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) teve um papel importante na instalação dessas capacidades produtivas por meio do credenciamento de máquinas e equipamentos no BNDES Finame, produto do Banco voltado para o financiamento de sua produção e comercialização. As plantas de montagem de baterias de íons de lítio foram introduzidas no país

5 As resoluções ANP 886, de 29 de setembro de 2022 (Brasil, 2022a) e 906, de 18 de novembro de 2022 (Brasil, 2022b) dispõem sobre as especificações de produção de biometano, que garantem sua intercambiabilidade com o GNV.

6 O inversor em veículos elétricos faz a conversão da corrente contínua (CC) armazenada nas baterias em corrente alternada (CA), necessária para acionar o motor elétrico. Ele é o componente-chave do sistema de controle de energia, ajustando tensão, frequência e fase da corrente elétrica para controlar a rotação e o torque do motor de maneira precisa.

a partir da formulação de uma metodologia lançada em 2019 para o credenciamento de veículos elétricos e seus componentes.

Além da montagem de baterias, já são produzidos no país caminhões de porte médio para distribuição de mercadorias, principalmente em ambiente urbano, pela Volkswagen Caminhões; e chassis de ônibus elétricos, pela BYD, Eletra Industrial, Marcopolo e Mercedes-Benz.

Em relação aos veículos híbridos, que mesclam motores a combustão com baterias recarregáveis, o mercado brasileiro já dispõe de algumas opções de fabricação local, que se enquadram nas arquiteturas de híbridos puros e híbridos leves. Com o anúncio de novos lançamentos e o crescimento do mercado é possível que o aumento de escala possibilite a fabricação de componentes dos sistemas híbridos no país. Todos os modelos de híbridos em produção nacional e planejados utilizam a tecnologia *flex* nos motores a combustão. O sistema híbrido, que ainda é importado, poderá vir a ser fabricado no país, caso o aumento de escala dessa tecnologia se concretize.

Finalmente, em relação à plataforma veicular de células a combustível, rota tecnológica menos madura que as anteriores, destacam-se alguns projetos de pesquisa e desenvolvimento no país com foco no uso dos biocombustíveis como fonte de hidrogênio.

Essa pode representar uma importante alternativa em médio-longo prazo para a combinação dos biocombustíveis com a eletrificação veicular, uma vez que o etanol é uma fonte relevante de hidrogênio e que já conta com uma infraestrutura de distribuição constituída no país. Além disso, a topologia dos veículos a célula de combustível, como no caso dos veículos elétricos a bateria, também utiliza baterias, inversores e motores elétricos acrescidos da célula propriamente dita.

Sendo assim, a estratégia nacional de descarbonização da mobilidade deveria impulsionar essas diferentes plataformas veiculares, usando o potencial que algumas delas têm, como no caso dos veículos híbridos e de célula combustível, para alavancar a constituição de novas capacidades na indústria automotiva relacionadas à eletrificação veicular.

CONSIDERAÇÕES PARA UMA ESTRATÉGIA NACIONAL DE DESCARBONIZAÇÃO DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Movimentos de transição tecnológica, como o que ocorre atualmente na indústria automotiva mundial, de migração para plataformas veiculares de baixo carbono, são janelas de oportunidade para que os países estabeleçam políticas industriais e tecnológicas. O desafio de descarbonização da mobilidade representa uma oportunidade para a indústria automotiva brasileira combinar inovação e sustentabilidade.

Conforme já apresentado, existem diferentes plataformas veiculares que representam alternativas para que se atinja o objetivo de descarbonização da mobilidade. Considerando o processo de adoção da eletrificação no mundo, seus desafios e potencialidades já citados, é possível antever a convivência de diferentes plataformas veiculares nos próximos anos e uma eletrificação em ritmo heterogêneo entre os diferentes países. O ritmo e a intensidade do processo em cada região dependerão, principalmente, de fatores como disponibilidade de infraestrutura, perfil econômico dos consumidores e características das matrizes energéticas.

Diante do cenário acima descrito e das características de nossas matrizes industrial e energética, esta seção aborda algumas considerações para o estabelecimento de uma estratégia brasileira para a descarbonização da indústria automotiva. A seguir, são apresentados alguns princípios que deveriam nortear a construção dessa estratégia:

- i) Estabelecer a descarbonização da mobilidade e da indústria automotiva como desafio nacional orientador de políticas energética, industrial e tecnológica.
- ii) Reduzir emissões mais rapidamente, com menor custo e maior impacto para a sociedade.

- iii) Considerar as emissões associadas aos veículos segundo as metodologias de ciclo de vida (“poço à roda”, “campo à roda”, “berço ao túmulo”).
- iv) Garantir segurança energética e autonomia tecnológica, fortalecendo as cadeias produtivas locais e alavancando o sistema de inovação.
- v) Impulsionar as plataformas tecnológicas que se provem como as mais adequadas aos diferentes usos dos veículos (segmentos de leves *versus* pesados, urbano *versus* rodoviário).
- vi) Adotar uma abordagem sistêmica capaz de articular diferentes dimensões de políticas (energética, industrial e tecnológica; de financiamento; de educação; de ciência, tecnologia e inovação – CT&I – etc).

O primeiro aspecto – **estabelecer a descarbonização da mobilidade e da indústria automotiva como desafio nacional orientador de políticas energética, industrial e tecnológica** – incorpora a ideia de estruturação de políticas nacionais orientadas por missões (Mazzucato, 2018) e desafios nacionais (Gadelha, 2016).

Políticas públicas orientadas por missões e desafios nacionais referem-se a uma abordagem estratégica na qual governos e instituições públicas estabelecem metas específicas e ambiciosas para abordar desafios significativos da sociedade. Essas políticas são elaboradas para lidar com questões complexas e urgentes, como mudanças climáticas, cuidados de saúde, redução da desigualdade e inclusão social. As missões buscam incentivar e definir o processo de desenvolvimento econômico.

Políticas orientadas por missões têm uma perspectiva em longo prazo e visam impulsionar mudanças transformadoras, alinhando recursos e esforços a uma visão compartilhada de progresso e desenvolvimento. Essa orientação permite também que a política seja estruturada nas diversas dimensões que precisam estar inseridas na construção de qualquer política pública, como as sociais, ambientais, políticas, econômicas, de criação de demanda por novas soluções, de padrões de financiamento ao investimento, de educação e formação profissional, de ciência e tecnologia, de geração de emprego, entre outras.

O segundo aspecto – **reduzir emissões mais rapidamente, com menor custo e maior impacto para a sociedade** – é o vetor orientador de iniciativas de políticas pelo qual o desafio selecionado se torna realidade. A partir desse

objetivo, elas devem se nortear pela busca de soluções que sejam capazes de reduzir mais rapidamente as emissões, o que passa por considerar as particularidades de determinada região e país.

Assim, permite-se um olhar para as capacidades locais e para a estrutura produtiva existente como alavancas de iniciativas de políticas. Essa abordagem impõe a necessidade de colocar em questão o processo de transição tecnológica para o paradigma da eletrificação a bateria como um fenômeno geral e desconectado das realidades locais. No caso brasileiro, o potencial dos biocombustíveis em viabilizar uma transição energética mais célere não pode ser desconsiderado.

Esse segundo aspecto se conecta fortemente com a terceira abordagem: **considerar as emissões associadas aos veículos segundo as metodologias de ciclo de vida**. O debate sobre emissões no setor de transporte tem enfatizado a importância de se contabilizar as emissões em todo o ciclo de vida⁷ dos veículos e dos combustíveis/eletricidade. Isso passa, no caso específico da indústria automotiva, por considerar as emissões não apenas nos escapamentos dos veículos, mas também nas diferentes etapas de produção dos veículos, seus componentes e insumos, e na produção dos chamados vetores energéticos (combustíveis e/ou energia consumida no uso desses veículos).

Esse conceito, na verdade, deve combinar dois ciclos de vida completos, distintos e interligados. O ciclo de vida da produção dos veículos, seus insumos e componentes; e o ciclo de vida dos vetores energéticos utilizados por eles. Esses dois ciclos de vida se encontram no uso dos veículos (Figura 1).

Isso implica a definição de normas e parâmetros que sejam consistentes do ponto de vista técnico e que sejam aceitos internacionalmente, uma vez que podem impactar o posicionamento brasileiro na definição dos acordos climáticos globais. O Brasil tem feito avanços importantes nesse sentido. Além disso, tem adotado o conceito de ciclo de vida nas políticas relacionadas ao setor automotivo, por exemplo no programa Combustível

7 Os diversos ciclos de emissões associadas aos veículos recebem nomenclaturas particulares na literatura técnica: as emissões associadas ao uso dos veículos, mediante o consumo do vetor energético, formam o ciclo “do tanque à roda”. Somando essas emissões àquelas geradas por todo o processo de produção dos vetores energéticos se obtém o ciclo “do poço à roda”. Finalmente, as emissões associadas aos processos produtivos dos veículos, seus componentes e insumos formam o ciclo “do berço ao portão”.

do Futuro⁸ e na nova fase do regime automotivo, implementada em junho de 2024, também conhecida como Programa Mover.⁹

Figura 1. Ciclos de vida dos veículos e dos vetores energéticos



Fonte: Adaptado de Abreu (2023, p.2).

Nesse ponto, surge outro aspecto relevante para a estruturação de uma política de descarbonização da indústria automotiva brasileira, qual seja, a combinação dos processos de eletrificação veicular com os biocombustíveis, que podem impulsionar, em escalas crescentes, a redução das emissões. Diferentes estudos baseados na abordagem do ciclo de vida indicam que a combinação dessas variadas plataformas tecnológicas (biocombustíveis, eletrificação, hidrogênio) e veiculares (veículos a baterias, híbridos com biocombustíveis, células combustíveis) apresentam um maior potencial

8 O programa Combustível do Futuro se refere a uma série de medidas incorporadas ao texto da Lei 14.993/2024 (Brasil, 2024), que trata de programas nacionais de *diesel* verde, de combustível sustentável para aviação e de biometano, além do aumento das proporções de mistura de etanol na gasolina e de *biodiesel* no *diesel*.

9 O Programa Mover é a política industrial para o setor automotivo, sancionada em junho de 2024, que sucede o Programa Rota 2030. O objetivo é promover a adoção de meios de mobilidade mais sustentáveis, por meio da concessão de incentivos fiscais às empresas do setor que desenvolvam veículos e componentes que incorporem tecnologias de baixa emissão.

de redução das emissões (Boureima *et al.*, 2012; Gauto *et al.*, 2023; Meier *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2018; Tessum; Hill; Marshall, 2014).¹⁰

Ao integrar os biocombustíveis e a eletrificação veicular, busca-se o objetivo de **garantir segurança energética e autonomia tecnológica, fortalecendo as cadeias produtivas locais e alavancando o sistema de inovação** e estabelece-se uma rota de inserção da indústria automotiva brasileira na direção da eletrificação.

Nesse aspecto, é importante que o Brasil não deixe de realizar o fomento e o adensamento produtivo de etapas relevantes da rota tecnológica dos veículos elétricos a bateria, por exemplo, a partir da agregação de valor dos minerais críticos disponíveis no país que são utilizados na fabricação das baterias, devendo também buscar saltos tecnológicos por meio do desenvolvimento das tecnologias de células combustíveis com reforma do etanol.

A política deve ser capaz de **impulsionar as plataformas tecnológicas mais adequadas aos diferentes usos dos veículos (segmentos de leves *versus* pesados, urbano *versus* rodoviário)**. Para ilustrar esse ponto, pode-se tomar como exemplo o segmento de veículos pesados, cujas condições operacionais são diferentes dependendo do uso. No caso de rotas de média e longa distância (transporte de carga por caminhões ou de passageiros em ônibus interestaduais), o uso de veículos elétricos a bateria ainda se confronta com o desafio da autonomia. Para essas aplicações, a melhor estratégia pode ser incentivar a substituição dos motores a *diesel* por motores a GNV e estruturar uma estratégia focada na viabilização do *diesel* verde e no biometano. Já para as aplicações urbanas com rotas mais curtas (transporte de passageiros em ônibus municipais), há condições para uma adoção mais rápida da plataforma de veículos elétricos a bateria.¹¹ No que concerne aos veículos leves, por outro lado, a plataforma baseada em veículos híbridos a etanol pode ser alternativa para acelerar a

10 Esses estudos destacam, por exemplo, que veículos híbridos a biocombustíveis e/ou a biometano teriam a vantagem de prescindir da constituição de uma infraestrutura de recarga e possuem, no presente, emissões comparáveis ou inferiores àquelas encontradas no uso dos veículos elétricos a bateria quando utilizados na Europa, EUA ou China. Esses veículos seriam, portanto, alternativa relevante para a descarbonização da mobilidade no Brasil para o curto e médio prazo.

11 Muitas cidades têm incentivado essa adoção buscando ganhos também em questões relacionadas à saúde pública, visto que as emissões de particulados dos motores a combustíveis fósseis estão associadas a vários tipos de doenças respiratórias e cardíacas.

redução das emissões em curto prazo, por prescindir de infraestrutura de recarga de larga escala e por apresentar balanço de emissões favorável. Diferentes estimativas indicam esse potencial de veículos híbridos na redução de emissões. Gauto e outros (2023), por exemplo, sugerem que os veículos híbridos no Brasil apresentam um melhor desempenho em termos de emissões do que os veículos elétricos a bateria usados na Europa, quando se considera a metodologia de ciclo de vida para mensuração das emissões.

O Quadro 2 ilustra essas considerações, ao combinar os diferentes veículos aos tipos de usos e às plataformas de transição tecnológica para um novo paradigma da mobilidade de baixo carbono.

Quadro 2. Estratégia multiplataformas para descarbonização da mobilidade

VEÍCULOS	USOS	PLATAFORMAS DE TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA
Leves	Todos	Veículos híbridos (elétrico + etanol) em curto prazo e eletrificação a bateria e célula a combustível em médio-longo prazo.
Pesados	Urbanos	Veículos elétricos a bateria e biogás em curto-médio prazo e hidrogênio em longo prazo.
	Rodoviário	Veículos a combustão com baixa emissão em curto-médio prazo (GNV e biogás) e <i>diesel</i> verde em médio-longo prazo.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, é importante **adotar uma abordagem sistêmica capaz de articular diferentes dimensões de políticas (energética, industrial e tecnológica; de demanda; de financiamento e fomento; de educação; de CT&I etc.)**. Aqui, trata-se de, a partir das considerações anteriores, refletir acerca da implementação da política em suas diversas dimensões, o que inclui o alinhamento entre as políticas explícitas e implícitas¹² e a necessidade de se estabelecer uma governança capaz de articular diferentes iniciativas e

12 As políticas explícitas são aquelas que influenciam diretamente no objeto de uma política industrial e tecnológica a fim de atingir determinados objetivos. O fomento à pesquisa e desenvolvimento ou políticas de formação e qualificação profissional para determinada atividade-fim são exemplos de políticas explícitas. As políticas implícitas, por sua vez, são aquelas que não têm uma atuação direta no objeto da política. Não enunciam determinado objetivo, ou mesmo não definem um instrumento de atuação e fomento para esse fim. Ainda assim, influenciam o processo de desenvolvimento, reforçando-o – ou indo em direção contrária –, podendo até anular os efeitos da política explícita. A política macroeconômica de um país é um exemplo de política implícita.

organizações executoras da política. Adiciona-se a isso a importância de se ter um olhar sobre as competências e habilidades das organizações públicas que executam essas políticas.

Na visão sistêmica das políticas públicas, as próprias ações de formulação e execução devem ser continuamente acompanhadas, com ajustes e reformulações ao longo do tempo, no intuito de prevenir consequências sociais indesejáveis e de promover o desenvolvimento coeso, inclusivo e sustentável (Cassiolato e Lastres, 2005). O acúmulo de capacidades dinâmicas nas organizações executoras de políticas industriais e de inovação é um aspecto importante para o aprimoramento e o desenvolvimento de novas abordagens para a execução dessas políticas.

CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um panorama sobre as mudanças que vêm ocorrendo na indústria automotiva global e no Brasil, com destaque para a transição tecnológica em direção a um novo paradigma de mobilidade de baixo carbono e da indústria automotiva, baseado em diferentes rotas tecnológicas de eletrificação veicular. Há enormes incertezas envolvidas nesse processo, não apenas tecnológicas, mas também aquelas relacionadas à geopolítica da energia, que devem definir o ritmo dessa transição nos próximos anos.

Movimentos de transição como o que ocorre atualmente na indústria automotiva são janelas de oportunidade para que os países estabeleçam políticas industriais e tecnológicas focadas na superação dos seus desafios nacionais e promovam novos ciclos de desenvolvimento. O desafio de descarbonização da mobilidade representa uma oportunidade única para que a indústria automotiva brasileira estabeleça um novo ciclo de desenvolvimento que combine inovação, engenharia e sustentabilidade.

Argumentou-se que as políticas devem se orientar pela busca de soluções que acelerem a transição para a mobilidade de baixo carbono com menor custo e maior retorno ambiental, econômico e social para a sociedade brasileira. Esse processo deve ser trilhado considerando as realidades locais e as restrições que certamente terão que ser enfrentadas para a estruturação de políticas

amplas, orientadoras, abrangentes e eficazes. Nesse sentido, a abordagem das missões e dos desafios nacionais pode contribuir para o processo de elaboração dessas políticas.

O Brasil, por ter disponível uma matriz energética com participação relevante de energias renováveis e uma indústria automotiva madura que utiliza em larga escala os biocombustíveis, se posiciona em situação muito particular em relação aos demais países. É possível construir uma estratégia nacional de descarbonização da indústria automotiva que considere as capacidades locais no processo de transição para o paradigma da eletrificação veicular.

Essa estratégia deve levar em consideração as diferentes plataformas veiculares e impulsioná-las, para construir um novo paradigma de bioeletrificação, estimulando a localização de componentes comuns nas diferentes plataformas a exemplo dos motores elétricos, inversores e geradores. Em paralelo, é necessário explorar o desenvolvimento e a produção local de baterias, avançando na cadeia de minerais críticos já existente.

A estratégia também deve considerar as oportunidades para que o Brasil tome a dianteira no desenvolvimento de motores de combustão interna dedicados à hibridização para o uso dos combustíveis de baixo carbono que já estão disponíveis, como o etanol e o biometano, e para aqueles que virão a partir da produção de hidrogênio verde e outros combustíveis sintéticos.

Importante notar que o Brasil já conta com um arcabouço completo de programas e políticas públicas. São políticas como o Programa Mover, que sucedeu o Programa Rota 2030, atualizando o regime automotivo no país, com regras e contrapartidas de investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação; o programa Combustível do Futuro, que orienta as ações direcionadas para o segmento de combustíveis; o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve),¹³ focado na regulação das emissões veiculares; a Política Nacional de Biocombustíveis

13 O Proconve é uma iniciativa do governo brasileiro, conduzida pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, para reduzir a emissão de poluentes por veículos automotores. Implementado por etapas desde 1986, o programa estabelece limites de emissão e incentiva o desenvolvimento de tecnologias mais limpas, visando reduzir a emissão de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do ar e a saúde pública.

(Renovabio),¹⁴ direcionada especificamente ao segmento de biocombustíveis; além de iniciativas como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), que, por meio de etiquetas que indicam a eficiência energética de um produto, viabiliza uma solução eficaz e de fácil comunicação à sociedade.

Essas políticas devem incorporar a dimensão do financiamento, em que o BNDES tem papel fundamental, especialmente no fomento à infraestrutura e à indústria. Nesse contexto, o Banco vem se articulando com outras instituições, com destaque para a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), gestora do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), que dispõe de recursos relevantes para o fomento à inovação; a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação e Industrial (Embrapii); e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai). Destaca-se ainda o lançamento recente do Programa BNDES Mais Inovação, que apoia projetos de investimentos voltados para inovação, aquisição de bens inovadores e difusão tecnológica. O programa é orientado pelas missões de descarbonização e transição energética priorizadas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Industrial (CNDI), que estabelece a governança para a coordenação das diferentes ações de política industrial e tecnológica.

Todos esses elementos podem contribuir para a estruturação da nova estratégia nacional de descarbonização da indústria automotiva. O caminho do desenvolvimento brasileiro passa pelo aproveitamento das competências já constituídas no país e pela execução de políticas que impulsionem a indústria, a inovação e a engenharia automotiva brasileira.

14 O Renovabio é um programa coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, que visa promover a expansão de biocombustíveis na matriz energética nacional. Estruturado com metas de descarbonização, o programa incentiva a produção sustentável de biocombustíveis por meio da redução das emissões de gases de efeito estufa no processo produtivo.

REFERÊNCIAS

ABREU, R. Mobilidade sustentável do poço a roda: descarbonização como política integrada. 2023. In: SEMINÁRIO INDÚSTRIA, TECNOLOGIA E ENGENHARIA AUTOMOTIVA PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA MOBILIDADE, 2023, Rio de Janeiro. *Apresentação* [...]. Rio de Janeiro: BNDES, 2023. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/seminarios/seminario-industria-tecnologia-e-engenharia-automotiva-para-a-descarbonizacao-da-mobilidade/>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ABVE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. Em ano de recordes, veículos plug-in avançam. *ABVE*, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://abve.org.br/em-ano-de-recordes-veiculos-plug-in-ganham-mercado/>. Acesso em: 24 jan. 2024.

ANUÁRIO da Indústria Automobilística Brasileira 2023: reindustrialização. São Paulo: Anfavea, fev. 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2023/04/ANUARIO-ANFAVEA-2023.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2024.

BOUREIMA, F. *et al.* Environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. *WIT Transactions on the Built Environment*, [s. l.], v. 128, p. 15-26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2495/UT120021>.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022*. Estabelece a especificação e as regras para aprovação do controle da qualidade do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais, a ser comercializado no território nacional. [S. l.]: ANP, 2022a. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-886-2022-estabelece-a-especificacao-e-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-no-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 24 jan. 2024.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022*. Dispõe sobre as especificações do biometano oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais destinado ao uso veicular e às instalações residenciais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. [S.l.]: ANP, 2022b. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-906-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-biometano-oriundo-de-produtos-e-residuos-organicos-agrossilvopastoris-e-comerciais-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 24 jan. 2024.

BRASIL. *Lei 14.993, de 8 de outubro de 2024*. Dispõe sobre a promoção da mobilidade sustentável de baixo carbono e a captura e a estocagem geológica de dióxido de carbono; institui o Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV), o Programa Nacional de Diesel Verde (PNDV) e o Programa Nacional de Descarbonização do Produtor e Importador de Gás Natural e de Incentivo ao Biometano; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999, 8.723, de 28 de outubro de 1993, e 13.033, de 24 de setembro de 2014; e revoga dispositivo da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-14993-8-outubro-2024-796443-publicacaooriginal-173317-pl.html>. Acesso em: 5 dez. 2024.

CARTA da Anfavea: resultados de dezembro e janeiro a dezembro de 2023. São Paulo: Anfavea, n. 452, jan. 2024. Disponível em: <https://www.anfavea.com.br/cartas/carta452.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2024.

CASSIOLATO, J. E.; LASTRES, H. M. M. Sistemas de inovação e desenvolvimento: as implicações de política. *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, v. 19, p. 34-45, 2005.

EPE – EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. *Eletromobilidade e biocombustíveis*. Documento de apoio ao PNE 2050. EPE, Rio de Janeiro, 2018.

GADELHA, C. A. G. Política industrial, desenvolvimento e os grandes desafios nacionais. In: LASTRES H. M. M.; CASSIOLATO J. E.; LAPLANE G.; SARTI F. (org.). *O futuro do desenvolvimento*. Campinas: Editora Unicamp, 2016. p. 215-351.

GAUTO, M. A. et al. Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. *Energy for Sustainable Development*, Amsterdam, n. 76, v. 76, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101261>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 18 mar. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genebra: IPCC, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.

J.P. MORGAN. *Eye on the market. Energy Outlook 2018: Pascal's wager*. Nova York: JP Morgan, 2018.

MACHADO, Nayara. Caminhões a gás disputam com elétricos o espaço do diesel. *Agência Epbr (Eixos)*, [s. l.], 19 abr. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/caminhoes-a-gas-em-alta-e-nas-rotas-do-biometano/#:~:text=Na>. Acesso em: 7 dez. 2023.

MAZZUCATO, M. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, Oxford, v. 27, n. 5, p. 803-815, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dty034>.

MEIER, P. J. *et al.* Potential for electrified vehicles to contribute to U.S. petroleum and climate goals and implications for advanced biofuels. *Environmental Science and Technology*, [s. l.], v. 49, n. 14, p. 8277-8286, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01691>.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas de clima no Brasil 1970-2019 (base de dados)*, 2020. Seeg, 2020. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-net-emissions-by-sector-nci>. Acesso em: 18 mar. 2024.

SINDIPEÇAS – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Relatório da Frota Circulante*: Edição de 2023. Sindipeças: São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2023/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

SOUZA, L. L. P. *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 203, p. 444-468, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.08.236>.

STELLANTIS. Comparativo de emissões de CO2 confirma vantagens do etanol para uma mobilidade mais sustentável (*press release*). *Stellantis*, [s. l.], 31 mar. 2023. Disponível em: <https://www.media.stellantis.com/br-pt/corporate-communications/press/comparativo-de-emissoes-de-co2-confirma-vantagens-do-etanol-para-uma-mobilidade-mais-sustentavel>. Acesso em: 7 dez. 2023.

TESSUM, C. W.; HILL, J. D.; MARSHALL, J. D. Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Washington, DC, v. 111, n. 52, p. 18490-18495, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1406853111>.