



TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS MAIS EFICIENTES PARA A DESCARBONIZAÇÃO DA MOBILIDADE

Estudo elaborado por LCA Consultores e MTempo Capital

Abril 2024



1. Introdução	8
2. Metas socioambientais	11
3. Cadeia automotiva	16
3.1 Veículos Leves	25
3.2 Veículos Pesados e máquinas agrícolas	28
4. Rotas tecnológicas	33
4.1 Etanol e biodiesel	46
4.2 Biogás, Biometano, Diesel Verde/HVO	61
4.3 Hidrogênio de baixo carbono	68
4.4 Veículos elétricos: condicionantes	71
5. Políticas Públicas: neutralidade tecnológica	78
5.1 Avanços dos programas de incentivo e novos desafios	78
5.2 MOVER – Mobilidade Verde	80
5.3 Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)	82
5.4 Programa Combustível do Futuro	85
5.5 Nova Lei do Gás	89
5.6 Programa Temporário de Carros Populares	90
5.7 Imposto de Importação sobre veículos eletrificados	91
5.8 Aspectos geopolíticos	93
6. Cenários de eletrificação e os impactos ambientais e econômicos	95
6.1 Cenários para a evolução da demanda	95
6.2 Descarbonização	102
6.3 Impacto dos cenários de eletrificação sobre a economia conforme a Matriz Insumo-Produto (MIP)	128
7. Recomendações de políticas públicas	140

8. Conclusões e considerações finais	147
9. Referências	151
Ficha técnica	157
Anexo I	158
Anexo I.A	158
Anexo I.B	163
Anexo I.C	164
Anexo II – Agradecimentos	169

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Comparação Global de Emissões de CO ₂ – 2018 (MtCO _{2e})	17
Gráfico 2 – Demanda de combustível para veículos do ciclo otto (Bilhões de litros)..	18
Gráfico 3 – Atividade do setor de transportes de cargas, por modal – 2021	19
Gráfico 4 – Valor adicionado do setor automobilístico (% PIB)	20
Gráfico 5 – Faturamento nominal do setor de autopeças a partir da PIA/IBGE (R\$ Bilhões)	21
Gráfico 6 – Total das ocupações do setor automobilístico (Mil unidades)	22
Gráfico 7 – Arrecadação tributária do setor automobilístico (R\$ Bilhões)	23
Gráfico 8 – Valor adicionado da fabricação de biocombustíveis (% PIB)	24
Gráfico 9 – Ocupação do setor de fabricação biocombustíveis (Mil unidades)	25
Gráfico 10 – Licenciamentos de veículos leves (em Mil unidades)	26
Gráfico 11 – Composição dos licenciamentos de veículos leves 2021 a 2023 (%)..	27
Gráfico 12 – Licenciamentos de veículos pesados (em Mil unidades)	29
Gráfico 13 – Licenciamentos de veículos pesados desde 2021 a 2023 (%)	30
Gráfico 14 – Composição das vendas de maquinário agrícola - 2013 a 2020 (Unidades)	31
Gráfico 15 – Composição da frota de máquinas agrícolas (Unidades)	32
Gráfico 16 – China – Matriz elétrica (2022)	35
Gráfico 17 – Estados Unidos – Matriz elétrica (2022)	36
Gráfico 18 – Europa – Matriz elétrica (2022)	36
Gráfico 19 – Estimativas de emissões evitadas pelo uso de etanol anidro e hidratado (em MtCO _{2EQ})	49
Gráfico 20 – Demanda dos combustíveis do ciclo Otto (em bilhões de litros).....	50
Gráfico 21 – Participação brasileira na produção mundial de etanol (em %)	51
Gráfico 22 – Produção de Etanol (cana-de-açúcar e milho) – Brasil (em bilhões de litros)	52
Gráfico 23 – Consumo total de etanol anidro e hidratado no Brasil (em bilhões de litros)	53
Gráfico 24 – Consumo total de etanol anidro e hidratado em motores do Ciclo Otto (em bilhões de litros)	53
Gráfico 25 – Consumo de diesel e biodiesel – Transportes rodoviários no Brasil (em bilhões de litros)	54
Gráfico 26 – Consumo de combustíveis do setor de transportes rodoviários no Brasil (em %).	55
Gráfico 27 – Pilares CTC para aumento de produtividade	58
Gráfico 28 - Produção de Biodiesel – Brasil (em bilhões de litros).	61
Gráfico 29 - Produção acumulada de biogás e nº de plantas em operação - Brasil	62
Gráfico 30 - Potencial de produção de biogás por setor – Brasil (bilhões de Nm ³ /ano)	63
Gráfico 31 - Potencial de produção de biogás no Brasil (bilhões de Nm ³ /ano)	63
Gráfico 32 - Número de plantas de biogás em operação de acordo com o seu principal uso.....	65
Gráfico 33 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos automóveis leves aos dados efetivos (em milhares de unidades).	97

Gráfico 34 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos comerciais leves aos dados efetivos (em milhares de unidades).....	97
Gráfico 35 – Licenciamentos de veículos leves: comparação de cenários (Mil unidades)	98
Gráfico 36 – Frota de veículos leves: comparação de cenários (Mil unidades).....	99
Gráfico 37 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos caminhões aos dados efetivos (em milhares de unidades)	100
Gráfico 38 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos ônibus aos dados efetivos (em milhares de unidades).....	101
Gráfico 39 – Licenciamentos de veículos pesados: comparação de cenários (Mil unidades)	101
Gráfico 40 – Frota de veículos pesados comparação de cenários (Mil unidades). 102	
Gráfico 41 – Composição de frota de veículos leves – Cenário Status Quo, poço à roda.....	108
Gráfico 42 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Status Quo, poço à roda (CO ₂ /ano Milhões).....	109
Gráfico 43 – Emissões por veículo: Cenário Status Quo, poço à roda (Kg CO ₂ /ano).....	110
Gráfico 44 – Composição de frota de veículos leves – Cenário Convergência Híbridos, poço à roda	111
Gráfico 45 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Convergência Híbridos, poço à roda (CO ₂ /ano Milhões)	112
Gráfico 46 – Emissões por veículo: Cenário Convergência Global Híbridos, poço à roda (Kg CO ₂ /ano).....	112
Gráfico 47 – Composição de frota de veículos leves – Cenário Convergência BEV, poço à roda.	113
Gráfico 48 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Convergência BEV, poço à roda (CO ₂ /ano Milhões).....	113
Gráfico 49 – Emissões por veículo: Cenário Convergência Global BEV, poço à roda (Kg CO ₂ /ano).....	114
Gráfico 50 – Emissão da frota de veículo leves Cenário Status Quo e Convergência Global Híbridos - Biocombustíveis (CO ₂ /ano Milhões)	116
Gráfico 51 – Emissões por veículo: Cenário Status Quo e Convergência Global Híbridos - Biocombustíveis (Kg CO ₂ /ano)	116
Gráfico 52 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Status Quo, berço à roda (MMton de CO ₂ /ano).....	118
Gráfico 53 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Convergência Global Híbridos, berço à roda (MMton de CO ₂ /ano).....	119
Gráfico 54 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Convergência Global BEV, berço à roda (MMton de CO ₂ /ano).....	119
Gráfico 55 – Emissão de CO ₂ da frota de veículos leves: Berço à Roda x Poço à Roda (em MMton de CO ₂ /ano)	120
Gráfico 56 – Emissão de CO ₂ por veículo: Berço à Roda x Poço à Roda (T CO ₂ /ano)	121
Gráfico 57 – Intensidade de carbono de alguns energéticos (CO ₂ /MJ)	127
Gráfico 58 – Intensidade de carbono de alguns energéticos (CO ₂ /MJ)	127
Gráfico 59 - Produção Total (R\$ Bilhões)	134
Gráfico 60 - Valor Adicionado – PIB (R\$ Bilhões)	134
Gráfico 61 - Impostos (R\$ Bilhões)	135

Gráfico 62 - Emprego (Milhões de Trabalhadores)	135
---	-----

Lista de tabelas

Tabela 1 – Licenciamentos de veículos pesados 2021 a 2023 (Unidades)	30
Tabela 2 – Políticas por categorias em diferentes países	41
Tabela 3 - Emissões gCO ₂ /km – “Poço à roda”	45
Tabela 4 - Emissões gCO ₂ /km – “Berço à roda”	46
Tabela 5 - Estrutura produtiva brasileira de biogás até 2022	64
Tabela 6 - Intensidade de Carbono dos Energéticos (CO ₂ /MJ)	105
Tabela 7 - Fator de uso.....	106
Tabela 8 – Emissões anuais (em kgCO ₂ eq) veículos leves - por motorização, critério do poço à roda (todos os cenários)	109
Tabela 9 - Emissões por km (gCO ₂ eq) de veículos leves - por motorização.....	115
Tabela 10 - Emissões anuais (KgCO ₂ eq) de veículos leves - por motorização.....	115
Tabela 11 - Emissões anuais (em kgCO ₂ eq) veículos leves - por motorização – berço à roda	118
Tabela 12 – Modelos de caminhões regulado pelo VECTO (período 2020)	125
Tabela 13 – Emissões caminhões certificados em 2019 e 2020 (em gCO ₂ /tkm) ...	126
Tabela 14 - Síntese dos Impactos Econômicos Acumulados (2020 a 2050)	136
Tabela 15 - Produção Total (R\$ Bilhões)	138
Tabela 16 - Valor Adicionado – PIB (R\$ Bilhões)	138
Tabela 17 - Impostos (R\$ Bilhões)	138
Tabela 18 - Empregos (Trabalhadores Acumulados)	139
Tabela 19 - Preço Médio: Veículos Leves e Pesados.....	160
Tabela 20 - Preço Médio: Motocicletas.....	160
Tabela 21 - Produção Nacional: Veículos Leves e Pesados.....	161
Tabela 22 - Produção Nacional: Motocicletas.....	161
Tabela 23 – Conteúdo Local: Veículos Leves e Pesados.....	162
Tabela 24 – Conteúdo Local: Motocicletas.....	163
Tabela 25 – Produção Total – impacto acumulado desde 2020.....	165
Tabela 26 – Valor Adicionado: PIB – impacto acumulado desde 2020.....	166
Tabela 27 – Impostos – impacto acumulado desde 2020.....	167
Tabela 28 – Empregos (Trabalhadores acumulados desde 2020)	168

Lista de imagens

Imagem 1 – Phase out Europa de veículos a combustão interna	38
Imagem 2 – Cartilha Poço à Roda (AEA)	43
Imagem 3 - Alíquotas do Imposto de Importação (%).....	92
Imagem 4 - Cotas para importação sob isenção (US\$ MM)	92
Imagem 5 – Impactos econômicos acumulados de 2020 a 2050 (R\$ Bilhões) – Calculados pela metodologia da Matriz de Insumo Produto.....	136

1. Introdução

A LCA foi contratada pelo Acordo de Cooperação MBCBrasil – Mobilidade de Baixo Carbono para o Brasil – para avaliar as trajetórias tecnológicas disponíveis para veículos automotores tendo em vista dois objetivos: quais as trajetórias mais eficientes para descarbonizar o setor de transportes sob condições locais e quais tendem a gerar os maiores impulsos socioeconômicos, considerando o horizonte previsível e as tendências prevaletentes no cenário internacional.

O enfrentamento da emergência climática por meio da implementação das metas ambientais de descarbonização constitui o desafio contemporâneo mais crítico para a humanidade. Ao se tornar signatário do acordo de Paris, o Brasil adotou compromissos ambiciosos de redução das suas emissões de gases de efeito estufa (GEEs): 37% em 2025 e redução adicional de 43% em 2030, ambas relativamente aos valores estimados para 2005. Posteriormente, estes compromissos foram ampliados para 48% em 2025 e 53% em 2030, sempre com relação aos níveis vigentes em 2005.

O Brasil, país de renda-média cuja trajetória de desenvolvimento foi interrompida na última década, precisa urgentemente retomar sua agenda de desenvolvimento simultaneamente ao enfrentamento dos grandes desafios ambientais. Felizmente, nosso país reúne condições especiais e únicas para dar respostas efetivas a tais desafios, dada a diversidade de seus biomas, a abundância de recursos naturais e seu enorme potencial para energias renováveis.

Por isso, pode ser protagonista e exemplo pioneiro de descarbonização de sua economia. Para tanto, terá que capturar e desenvolver competitivamente as novas oportunidades emergentes em energias renováveis e em bioeconomia. A rápida descarbonização da mobilidade automotiva, como veremos, se empreendida com equilíbrio e sabedoria, pode harmonizar o avanço de novas rotas tecnológicas com sustentação e criação de empregos e renda – conciliando os objetivos sociais, ambientais, econômicos e tecnológicos.

Dentre os diversos setores intensivos em carbono, o setor de transportes representa uma fração relevante das emissões de CO₂: no caso brasileiro, o setor contribuiu com 13% do total das emissões de CO₂ em 2018, em contraposição à média de 17% observada para o conjunto dos países com maiores emissões totais (Estados Unidos, China, União Europeia e Índia).

O objetivo global de zerar as emissões líquidas de CO₂ até 2050 tem motivado a adoção de medidas e ações de política pública por parte dos principais governos nacionais com o objetivo de incentivar rotas tecnológicas sustentáveis e de baixo carbono. O redirecionamento do atual modelo centrado nos motores à combustão em direção à eletrificação vem mobilizando recursos públicos e subsídios substanciais por parte dos principais países desenvolvidos, e irá demandar uma longa jornada para alcançar o objetivo almejado. A opção pela eletrificação, principalmente no caso do Estados Unidos, Europa e China, somente será bem-sucedida caso haja também uma transição simultânea das suas respectivas matrizes energéticas e elétricas.

Por este enfoque, o Brasil possui vantagens comparativas extraordinárias. As matrizes energética e elétrica brasileiras são, majoritariamente, limpas, compostas em grande parte por energia renovável. Além disso, já desenvolvemos, há décadas, alternativas efetivas de descarbonização veicular por meio dos biocombustíveis, destacadamente do etanol. A principal razão para as emissões brasileiras do setor de transporte serem proporcionalmente mais baixas decorre do fato da frota de veículos leves deter alta proporção de motor flexfuel, que opera com a utilização de gasolina e etanol. Os veículos leves flex representam o maior percentual de vendas do mercado nacional, com mais de 83% dos licenciamentos no período 2021-23. Adicionalmente, o desenvolvimento dessa cadeia permitiu a criação de setores industriais e agrícolas sólidos e sofisticados, detentores de tecnologia própria, indutora de valor adicionado e empregos locais.

Por outro lado, a utilização de biocombustíveis em veículos pesados tem sido bem menos relevante, restrita à mistura de biodiesel ao diesel e ainda em proporções relativamente limitadas. Dado que o transporte de cargas no Brasil é majoritariamente dominado pelo modal rodoviário (70% do transporte de cargas em 2021) e que cerca

de 95% deste transporte é com base no diesel, torna-se urgente priorizar e acelerar a descarbonização deste segmento.

O Brasil já conta com uma ampla gama de políticas públicas orientadas para incentivar o aprofundamento deste percurso bem-sucedido no segmento de transportes, mas é necessário que haja harmonização destas políticas para que o caminho da descarbonização seja inequívoco sem descuidar dos aspectos socioeconômicos. É o que veremos nas seções dedicadas às recomendações e diretrizes de política pública para estes objetivos.

2. Metas socioambientais

Desde a década de 1990, países e organizações multilaterais globais vêm firmando uma série de acordos, protocolos e agendas como parte dos esforços de combate às mudanças climáticas. O Brasil é um dos pioneiros nessas iniciativas, sendo signatário de todos os acordos climáticos mundiais e assumindo uma série de compromissos e metas de controle, mitigação e combate às mudanças climáticas e preservação do meio ambiente.

Realizada em 1992 no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (“Eco-92”, “Rio92” ou “Cúpula da Terra”) foi o primeiro acordo climático mundial. Nela, a Organização das Nações Unidas (ONU) reconheceu as mudanças climáticas como uma preocupação global e fundou a Convenção das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (UNCCC, na sigla em inglês). O acordo resultante¹, chamado de Agenda21, estabeleceu compromissos socioambientais tais como: diretrizes para o desenvolvimento sustentável; conservação e gestão dos recursos naturais; cuidado com as mudanças climáticas; e combate à pobreza. Reconheceu-se ainda a importância da participação e cooperação da sociedade civil para estes temas.

Cinco anos após a Rio92, o Protocolo de Kyoto foi assinado em 1997, contendo as primeiras metas quantitativas de redução da emissão de gases do efeito estufa (GEEs). Pelo Protocolo de Kyoto, os países industrializados teriam metas definidas de prazo e volume de redução das emissões de GEEs (não foram estabelecidos compromissos para os países em desenvolvimento). O objetivo geral era reduzir a emissão dos GEEs em no mínimo 5% entre 2008 e 2012, em relação aos níveis de 1990. Também foi estimulada a criação de formas de desenvolvimento ambientalmente sustentável e de mecanismos de flexibilidade, como o comércio de

¹ A ratificação foi voluntária e, dos 175 países participantes da Conferência, 172 aderiram à Agenda21. O Brasil foi signatário do acordo.

emissões e o mecanismo de desenvolvimento limpo, que permitissem aos países atingirem suas metas de forma econômica e eficiente. Posteriormente, em 2001, os Estados Unidos abandonaram o Protocolo de Kyoto sob a alegação de que o cumprimento dessas metas comprometeria seu desenvolvimento econômico.

O Acordo de Paris, por sua vez, foi realizado em dezembro de 2015 durante a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP21). Cada um dos 195 países signatários comprometeu-se a estabelecer suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), isto é, planos e metas nacionais para a redução das emissões de gases do efeito estufa, sujeitos ao que fosse viável segundo a realidade econômica e social de cada nação.

O Brasil estabeleceu como sua NDC o compromisso de reduzir suas emissões de gases do efeito estufa em 37% até 2025, em relação aos níveis de 2005, além da meta indicativa de redução dos GEEs em 43% até 2030. “Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030”². Posteriormente, o país ampliou seu compromisso para reduções das emissões de GEEs de 48% em 2025 e 53% em 2030, também em relação aos níveis vigentes em 2005.

O Brasil também assumiu o compromisso de reduzir o desmatamento da Amazônia em 80% em 2020 relativamente aos níveis de 2005. Para viabilizar os programas das nações em desenvolvimento, o Acordo de Paris encaminhou propostas de mobilização de recursos financeiros em apoio à implementação de ações de mitigação e adaptação, determinando que os países desenvolvidos deveriam disponibilizar US\$ 100 bilhões por ano para viabilizar investimentos sustentáveis nos países em desenvolvimento.

² BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Acordo de Paris. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 15 set. 2023.

A COP26 ocorreu em Glasgow, Escócia, em 2021 e teve como principal medida estabelecer compromissos para reduzir as emissões de GEEs e limitar o aquecimento global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Também houve foco na transição para a economia verde e na neutralidade de carbono. Além disso, os países participantes foram instados a definir metas mais ambiciosas para reduzir as emissões até 2030. A COP26 também buscou mobilizar fundos para apoiar os países em desenvolvimento na implementação de medidas de combate, mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

O Brasil se comprometeu a eliminar o desmatamento ilegal até 2030, envolvendo ações de fiscalização, combate ao desmatamento e promoção de práticas sustentáveis na Amazônia e no Cerrado, além de promover a conservação e a recuperação de ecossistemas florestais, como a Amazônia, incluindo a implementação de políticas de promoção ao reflorestamento. Ademais, o país novamente se comprometeu a aumentar a participação das energias renováveis na sua matriz energética, em especial as energias eólica e solar, e reafirmou seu compromisso (assumido no Acordo de Paris) de reduzir a emissão de gases de efeito estufa em 53% até 2030.

Àquele momento, o Brasil já fazia notar, em seu comunicado oficial para consecução de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), que as ações adotadas em anos anteriores para enfrentar as mudanças climáticas representavam um dos maiores esforços de um único país em todos os tempos, cujos resultados levaram à redução de suas emissões totais em 41% na comparação entre 2005 e 2012. A redução fora ainda mais expressiva em termos per capita – de 14,4 tCO_{2eq} em 2004 para aproximadamente 6,5 tCO_{2eq} em 2012³ –, período em que tanto a população quanto o PIB aumentaram significativamente no mesmo período.

Os esforços aos quais se refere o documento brasileiro estiveram concentrados em três frentes que são explicitadas na decomposição das metas de descarbonização:

³ A emissão per capita do Brasil foi estimada em 6,9 tCO_{2e} em 2019, segundo o World Resources Institute (WRI; vide www.wri.org). O Brasil aparecia como o 9º maior emissor per capita. Vide “9 gráficos para entender as emissões per capita de gases de efeito estufa dos países”, de 03/maio/2023.

uso crescente de biocombustíveis na matriz de transporte, aumento da participação de fontes renováveis na matriz elétrica e melhorias no uso da terra, com redução de desmatamentos e recuperação de áreas e biomas degradados. Os dois primeiros fatores seguiram contribuindo de forma relevante nos anos posteriores ao Acordo até recentemente, e o terceiro (florestas) apresentou resultados mais variados.

De acordo com a publicação mais recente das estimativas oficiais de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil, referentes ao ano de 2020, as emissões brasileiras foram da ordem de **1,676 bilhão de toneladas de CO₂Eq**⁴. Este volume é **46,2% abaixo** das emissões projetadas pelo Decreto 7.390/2010, e contou com um recuo relevante das emissões oriundas do Uso da Terra, Mudanças do Uso da Terra e Florestas (LULUCF) de 2005 em diante, até 2017-18.

O subsetor de **Energia** também contribuiu para uma redução importante frente ao projetado para 2020 pelo Decreto – cerca de **37% abaixo das emissões projetadas**. Neste subsetor destacam-se as atividades de **queima de combustíveis fósseis** (23% do total de emissão de CO₂Eq em 2020) e, dentro desta atividade, a subatividade de **transportes** (cerca de 50% da atividade *queima de combustíveis* em 2020). Este documento indica que a atividade de **queima de combustíveis fósseis no subsetor de transportes** responde por cerca de **13% das emissões totais**⁵.

Realizada em 2023 em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, a **COP28 foi o primeiro acordo climático mundial a prever o abandono gradual do uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural)**, superando as resistências iniciais de países como Arábia Saudita e Rússia. Ademais, os mais de 200 signatários do Acordo concordaram em triplicar a produção de energia renovável até 2030 e reduzir as emissões de metano e monóxido de carbono na atmosfera.

⁴ Vide Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil, publicação do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-aneais.pdf>.

⁵ Vide seção 2.1.2 (Emissões em Energia) e Figura 2.1.2 (queima de combustível por categoria). Em Estimativas Anuais da Emissão de Gases de Efeito Estufa no Brasil (EAEGEE), 6ª. atualização.

Por fim, a COP30 deverá ser realizada entre os dias 10 e 21 de novembro de 2025 em Belém do Pará, marcando a primeira reunião climática mundial realizada em uma cidade amazônica, quando se espera que os compromissos de ações de combate às mudanças climáticas sejam aprofundados.

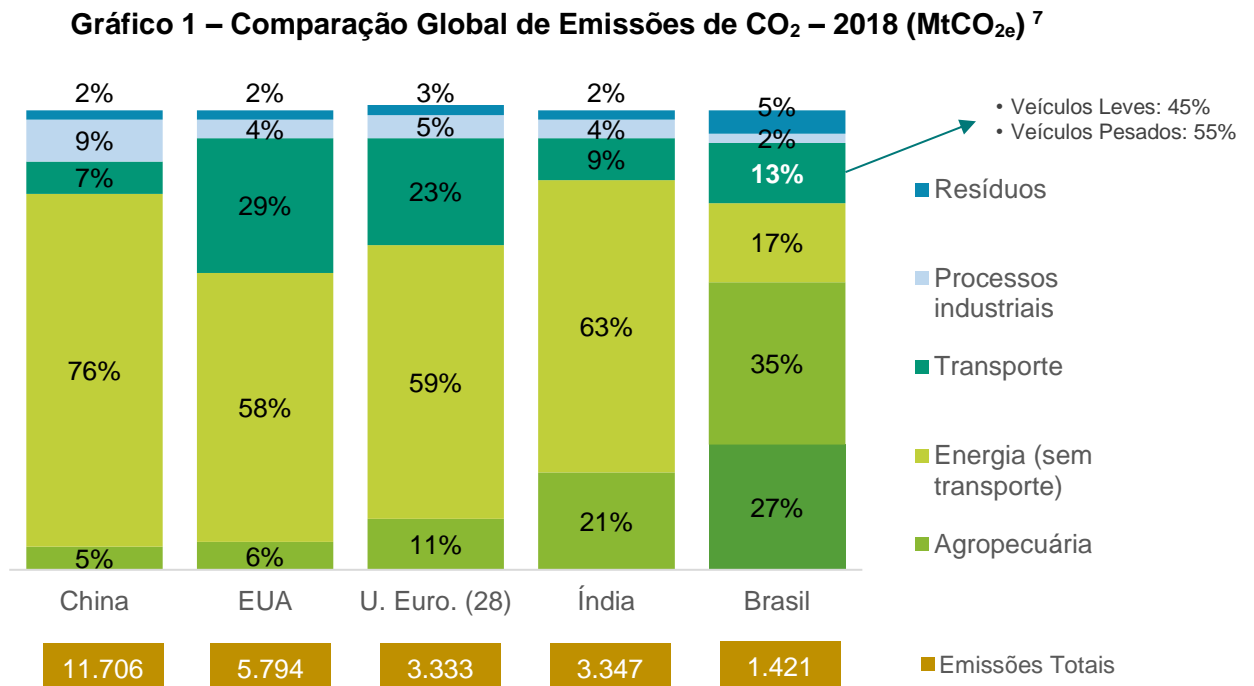
Os capítulos seguintes abordarão em mais detalhes informações relativas à **queima de combustíveis**, com ênfase na **queima associada à cadeia de transporte**.

3. Cadeia automotiva

Por simplificação, consideraremos que toda queima de combustíveis no setor de transporte (que, como vimos, corresponde a 13% das emissões totais brasileiras em 2020) decorrem do uso de veículos automotivos, somando-se leves (passeios e comerciais leves) e pesados (caminhões, ônibus, máquinas). Deste total, 44% das emissões advêm dos veículos leves, enquanto os veículos pesados (caminhões, ônibus e) respondem por 56% das emissões do setor automotivo⁶.

O gráfico a seguir traz comparações entre o padrão de emissões brasileiras e o de outros países e regiões, e uma estimativa das emissões da cadeia automotiva pelos principais segmentos. Medidas e estimativas de emissão e suas respectivas metodologias serão apresentadas neste trabalho mais adiante, no Capítulo 6.

⁶ Fonte: <https://plataforma.seeg.eco.br/> Emissões em unidade de toneladas de CO_{2e} GWP-AR5.



Fonte: BCG, Anfavea. Elaboração: LCA Consultores.

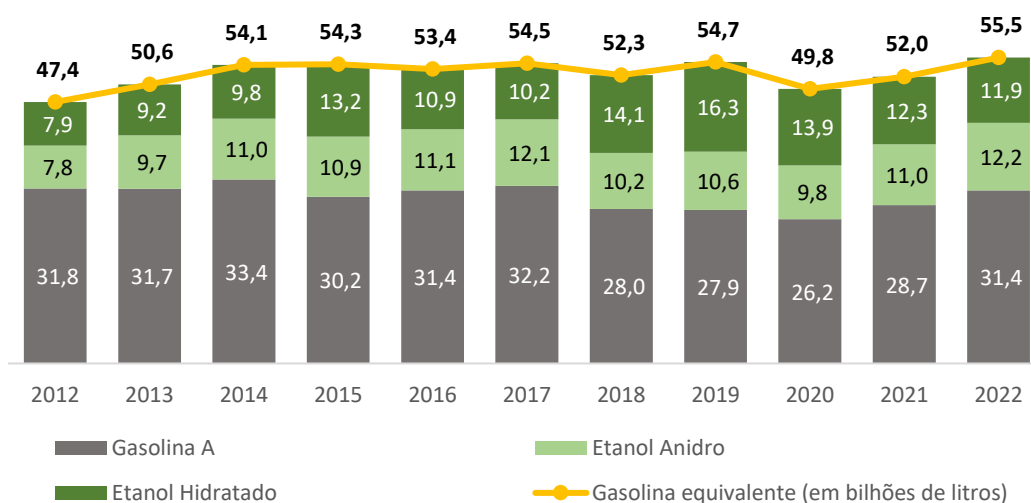
O gráfico acima revela que as emissões brasileiras estão relacionadas a mudanças no uso da terra e ao setor agropecuário, sendo relativamente menores as proporções associadas aos setores de energia e transporte – segmentos nos quais o Brasil se destaca por ter vantagens competitivas relevantes.

Voltando nossa atenção para o setor de transportes, nosso foco neste estudo, uma das principais razões para as emissões deste setor serem proporcionalmente baixas é o fato de a frota de veículos leves brasileira apresentar participação relevante de **motores flexfuel** com uso intensivo de biocombustível em seu mix a partir da generalização deste motor, contribuindo assim para uma menor emissão de GEE relativamente a outros países.

⁷ Anfavea e BCG – O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil – agosto/2021. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/estudos-e-apresentacoes/>.

De acordo com dados da EPE⁸, o consumo de combustível para veículos leves do ciclo Otto em 2022 foi de 55,5 bilhões de m³ de gasolina equivalente; deste montante, 43% foram de etanol (anidro e hidratado)⁹. O gráfico abaixo demonstra a evolução do consumo de combustíveis por veículos leves nos últimos anos.

Gráfico 2 – Demanda de combustível para veículos do ciclo otto (Bilhões de litros)



Fonte: EPE – Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis. Elaboração: LCA Consultores.

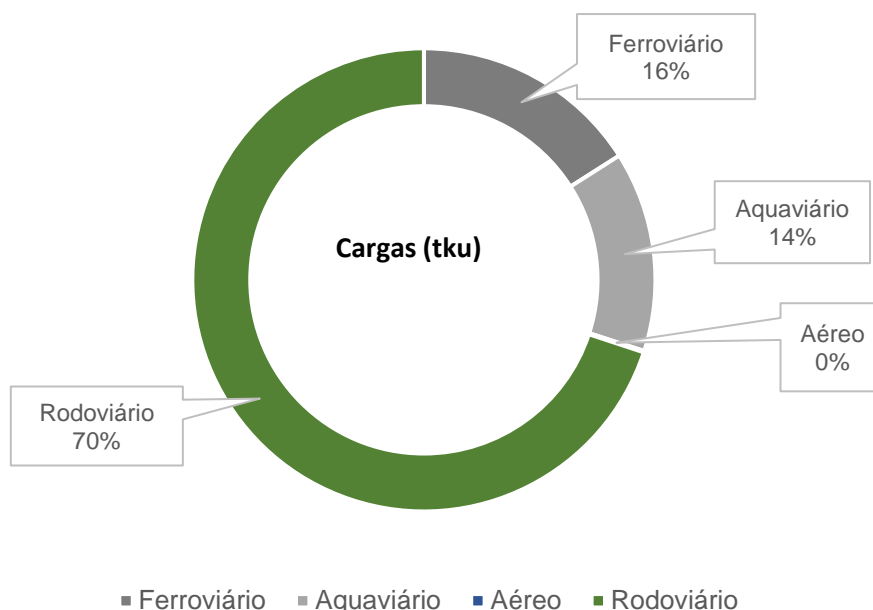
Já a utilização de biocombustíveis em veículos pesados, baseada na mistura de biodiesel ao diesel convencional, tem sido menos significativa, o que faz com que este segmento seja bastante relevante nas emissões totais do setor. A massiva

⁸ EPE, (2023) Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis Ano Base 2022, disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2022#:~:text=%E2%80%8BA%20d%C3%A9cima%20quarta%20edi%C3%A7%C3%A3o,do%20etanol%20oriundo%20do%20milho. Acesso em:20.set.2023.>

⁹ Segundo EPE (2023, op. cit.), a intensidade de carbono do etanol é da ordem 27-28 gCO₂/MJ contra 86-87 gCO₂/MJ da gasolina e do diesel, adotando-se o conceito do poço-à-roda. Mais adiante, veremos com mais detalhes a comparação entre intensidade de carbono em diferentes combustíveis e diferentes métricas.

participação do transporte rodoviário no setor de cargas brasileiro, conforme ilustrado no gráfico abaixo, evidencia a urgência de acelerar as medidas voltadas à descarbonização deste segmento.

Gráfico 3 – Atividade do setor de transportes de cargas, por modal ¹⁰ – 2021 (%)



Fonte: EPE - Estudos Plano Decenal de Expansão Energia 2032 – Demanda Energética do Setor de Transportes. Elaboração: LCA Consultores.

No campo econômico, de acordo com o Sistema de Contas Nacionais do IBGE, a **cadeia automobilística** (representada pelos códigos 2991, 2992, 4500¹¹, respectivamente fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças, fabricação de peças e acessórios para veículos automotores, comércio e reparação

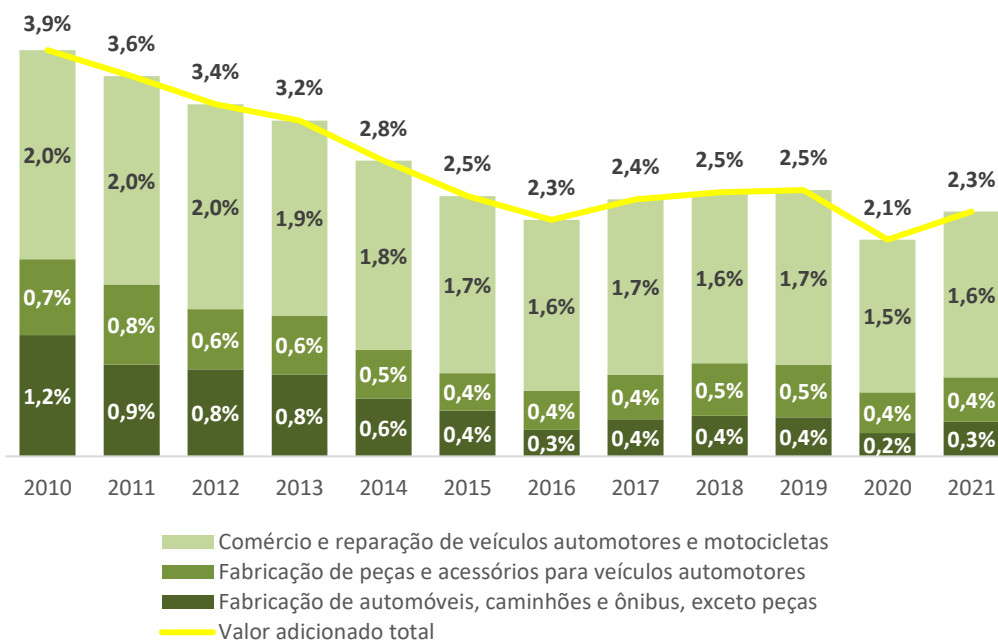
¹⁰ Fonte: [Apresentação do PowerPoint \(epe.gov.br\)](https://www.epe.gov.br/) / Acesso em: 05/10/2023.

¹¹ Código de atividade do Sistema de Contas Nacionais nível 68. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html>.

de veículos automotores e motocicletas) **representa, em média, 2,8% do valor adicionado total da economia**, líquido de impostos e subsídios e a preços correntes, desde 2010.

Nota-se que a atividade comércio e reparação de veículos automotores e motocicletas, na maioria dos anos observados, representou mais da metade do valor adicionado do setor. Os dois outros itens, em média, contribuem com cerca de 1% do valor adicionado total da economia. O gráfico a seguir demonstra a evolução da participação dessas atividades de 2010 a 2021, ano referente ao último dado divulgado oficialmente.

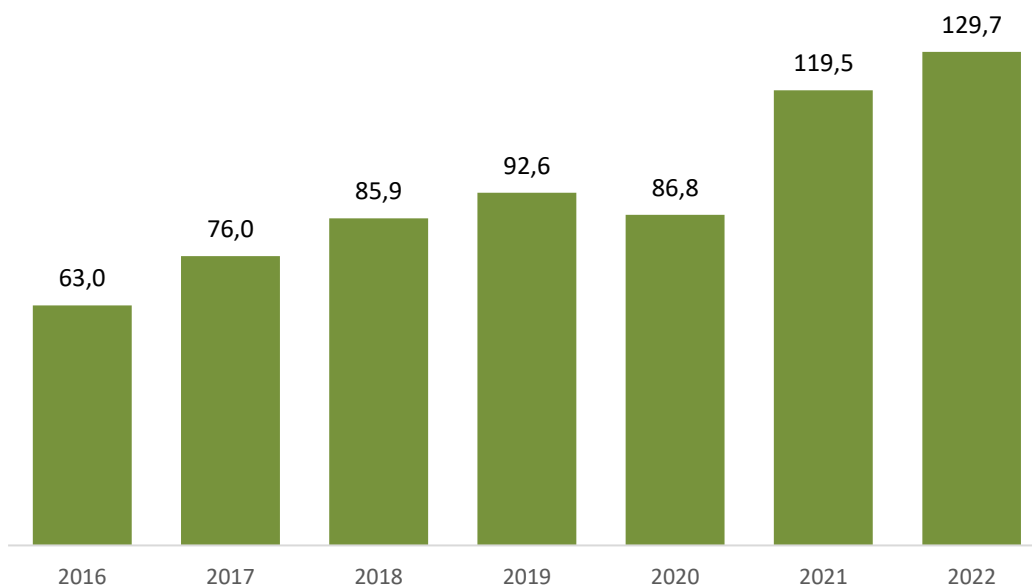
Gráfico 4 – Valor adicionado do setor automobilístico (% PIB)



Fonte: Sistema de Contas Nacionais IBGE. Elaboração: LCA Consultores.

De acordo com dados do anuário Sindipeças¹², o faturamento nominal do setor com base na PIA/IBGE, parametrizado pela CNAE do grupo 29.4, mais do que dobrou durante os anos 2016 a 2022, conforme gráfico abaixo:

Gráfico 5 – Faturamento nominal do setor de autopeças a partir da PIA/IBGE (R\$ Bilhões)



Fonte: Anuário 2023 Sindipeças. Elaboração: LCA Consultores.

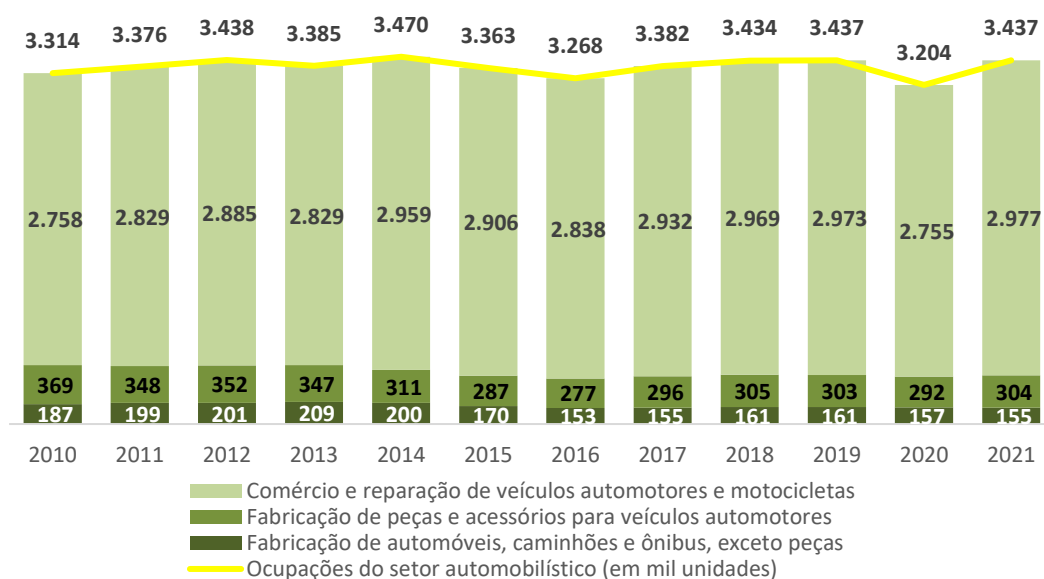
No que diz respeito às ocupações, considerando as mesmas atividades acima e o mesmo período, o setor correspondeu a 3,3%, em média, das ocupações totais da

¹²

Fonte: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2023/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf / Acessado em 15/12/2023

economia (que, neste período, foram da ordem de 102 milhões em média). Abaixo, a evolução da ocupação das atividades no período de 2010 a 2021.

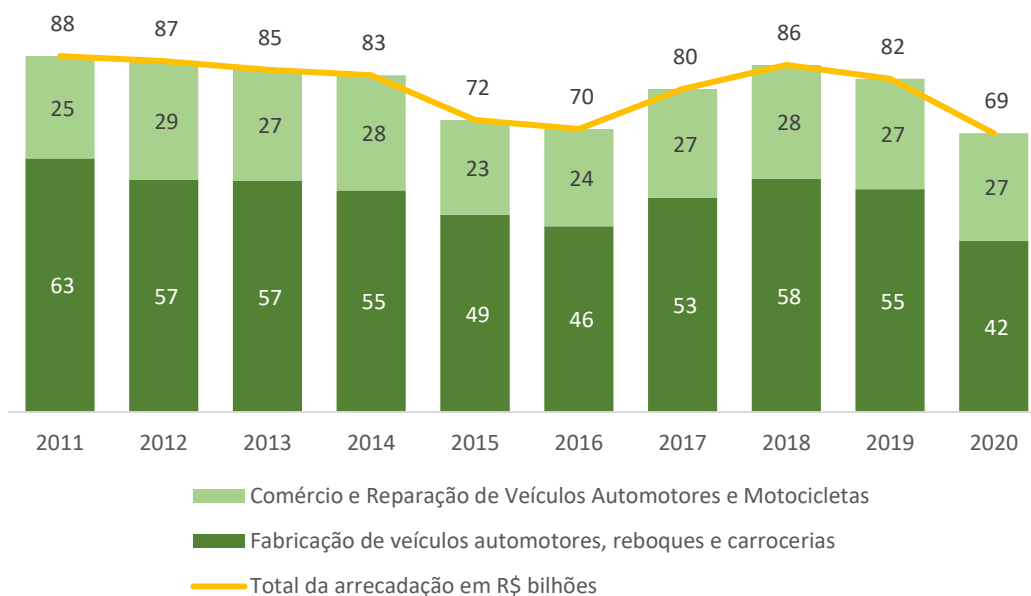
Gráfico 6 – Total das ocupações do setor automobilístico (Mil unidades)



Fonte: Sistema de Contas Nacionais IBGE. Elaboração: LCA Consultores

Ainda segundo o IBGE, a cadeia automotiva foi responsável, em média, por R\$ 80 bilhões de arrecadação¹³ durante o período 2011 a 2020 (último dado disponível pela Receita Federal; vide gráfico abaixo).

¹³ Esse valor engloba todas as receitas de arrecadação, inclusive contribuições previdenciárias, Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/receitadata/arrecadacao/arrecadacao-por-divisao-economica-da-cnae>.

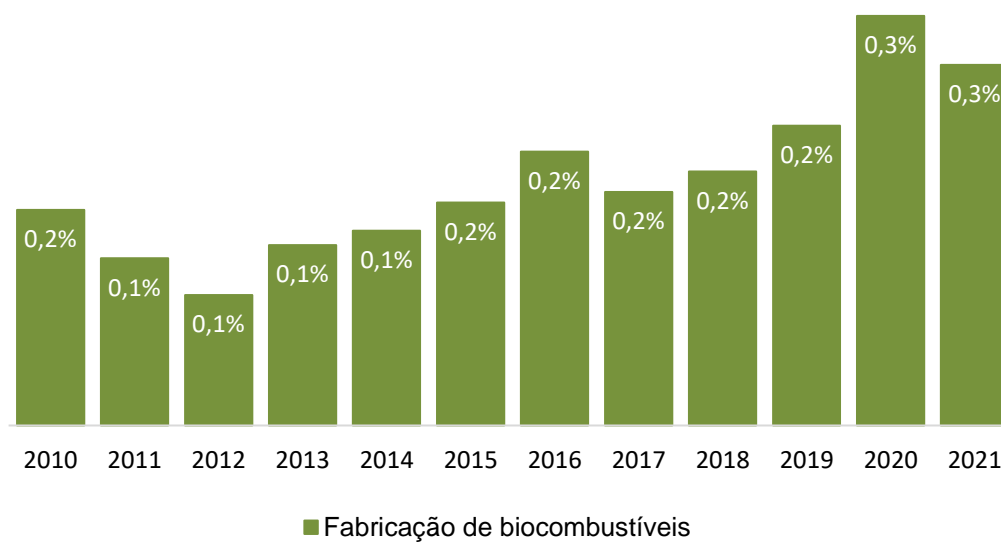
Gráfico 7 – Arrecadação tributária do setor automobilístico (R\$ Bilhões).

Fonte: Receita Federal do Brasil. Elaboração: LCA Consultores.

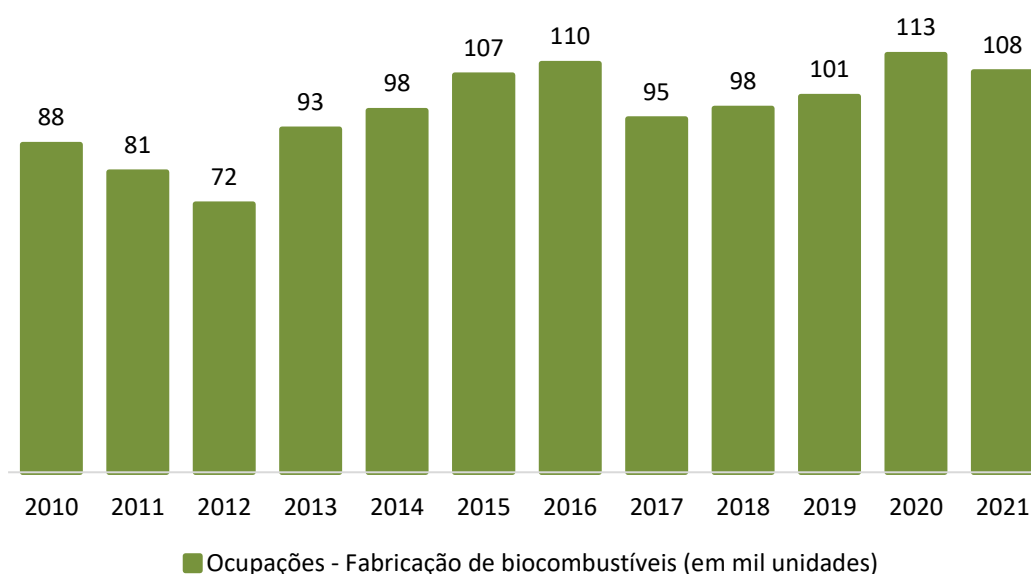
Ainda cabe destaque à fabricação de biocombustíveis (CNAE de atividades a partir do grupo 19.3 nos dados do sistema de contas nacionais), representando as atividades de fabricação de álcool etílico, anidro e hidratado por processamento da cana-de-açúcar, mandioca, madeira e outros vegetais e fabricação de biodiesel obtido a partir da transesterificação de óleos vegetais ou gorduras animais.

Observa-se que o setor tem aumentado sua contribuição ao valor adicionado total nos últimos anos – aumento da ordem de 123% na participação do setor na produção total da economia comparando-se a média 2020-21 com a média 2010-12 (gráfico 8). O setor contribuiu com uma média anual de 97 mil empregos, fechando o ano de 2021 com mais de 108 mil ocupações, 22% acima de 2010 (gráfico 9).

Gráfico 8 – Valor adicionado da fabricação de biocombustíveis (% PIB)



Fonte: Sistema de Contas Nacionais IBGE. Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 9 – Ocupação do setor de fabricação biocombustíveis (Mil unidades)

Fonte: Sistema de Contas Nacionais IBGE. Elaboração: LCA Consultores.

3.1 Veículos Leves

Em 2023, a frota de veículos leves, que engloba automóveis e veículos comerciais leves, registrou um montante de 45.659.926 veículos, de acordo com dados do anuário da Anfavea.

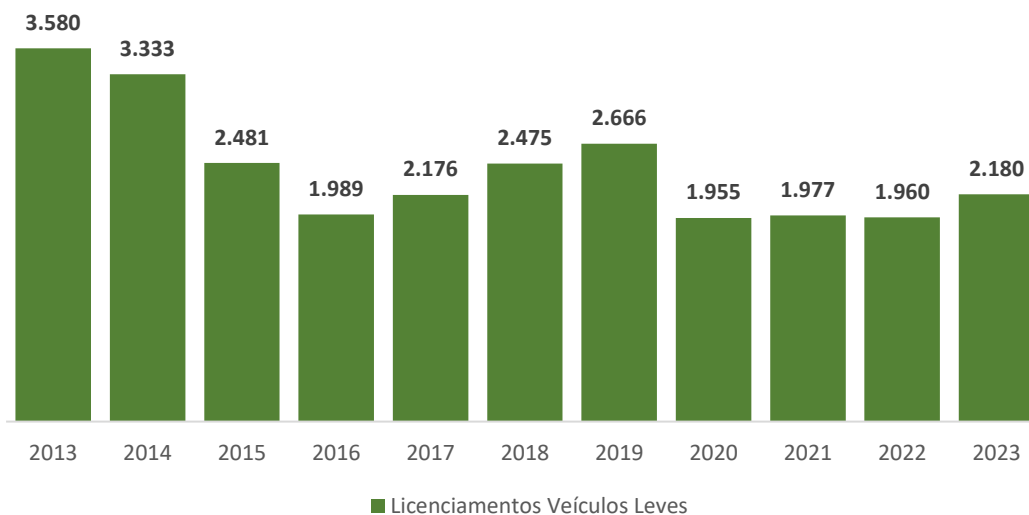
De acordo com o relatório de frota circulante de 2023 do Sindipeças¹⁴, a idade média da frota de veículos leves está na faixa de 10 anos e 9 meses para automóveis e 8 anos e 9 meses para comerciais leves.

Os licenciamentos, parâmetro de vendas do setor, registraram um pouco mais de 2.180 mil veículos leves em 2023, retomando um patamar acima de 2 milhões após

¹⁴Fonte: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2023/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf / Acessado em 15/12/2023.

retração acentuada entre 2020-22 por conta dos efeitos da pandemia, que interrompeu uma tendência de crescimento observada no triênio 2017-19.

Gráfico 10 – Licenciamentos de veículos leves (Mil unidades)



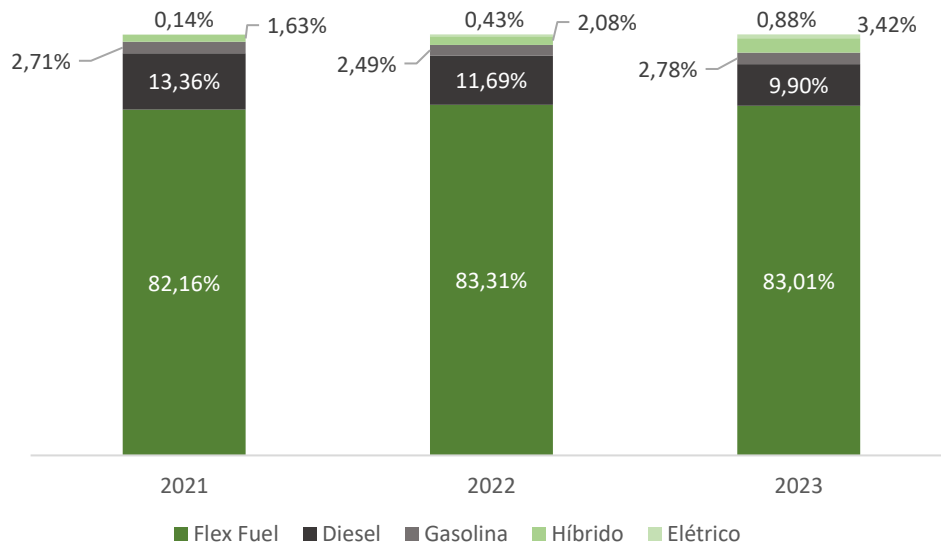
Fonte: Anfavea. Elaboração: LCA Consultores.

Licenciamento por tipo de propulsão

Os licenciamentos podem ser analisados por tipo de propulsão do motor. Os veículos *flexfuel* representam já há muitos anos o maior percentual de vendas do mercado nacional, com mais de 83% dos licenciamentos em 2021-23. Note-se a participação ainda relevante dos veículos movidos a diesel (10% a 13% nos anos 2021-23), sobretudo entre os comerciais leves.

Em linha com a tendência mundial, vem ocorrendo um aumento, ainda que modesto, da participação dos veículos eletrificados (híbridos e elétricos) nos licenciamentos. Em 2021, as vendas de veículos eletrificados constituíram 1,8% do total (ou 34.990 veículos), saltando para 2,5% em 2022 (49.262 novos veículos) e 4,3% em 2023 (93,7 mil veículos eletrificados).

**Gráfico 11 – Composição dos licenciamentos de veículos leves
2021 a 2023 (%)**



Fonte: Carta mensal Anfavea. Elaboração: LCA Consultores.

Ainda que seguindo a tendência de eletrificação já iniciada há mais tempo em outros países, a participação de veículos eletrificados nas vendas totais no Brasil é bem mais modesta do que em países como Noruega, Alemanha, China e EUA, que vêm contando com forte apoio governamental para acelerar a transição energética neste setor.

Iremos abordar as razões e as iniciativas de política pública direcionadas ao setor de mobilidade mais adiante, em capítulo dedicado ao conjunto de incentivos que vem sendo direcionados a este setor por parte dos países mais desenvolvidos (EUA, países da UE, China, Japão). Por ora, cabe antecipar algumas destas razões:

- (i) Estes países e regiões não dispõem de alternativas relevantes capazes de, ao mesmo tempo, pavimentar um caminho de redução das emissões de GEE a curto e médio prazos, alavancar mecanismos de inovação e de produção em larga escala para suas cadeias industriais e induzir o

- desenvolvimento de outras cadeias associadas a partir de novos materiais, com conexões globais;
- (ii) Estes países dispõem de capacidade financeira e fiscal relevante para incentivar novas tecnologias com base em uso substancial de recursos públicos, em prol de objetivos julgados prioritários – como a necessidade de descarbonização e mitigação dos efeitos do aquecimento global;
 - (iii) Países como EUA e membros da UE têm-se proposto a criar polos de irradiação de desenvolvimento econômico nacionais e regionais, em contraposição à tendência de décadas atrás que levou à excessiva concentração da produção de insumos e bens industriais em larga escala na Ásia, com destaque para a China – cujos efeitos dinâmicos sobre a economia favoreceram os países asiáticos em detrimento de EUA e à UE.

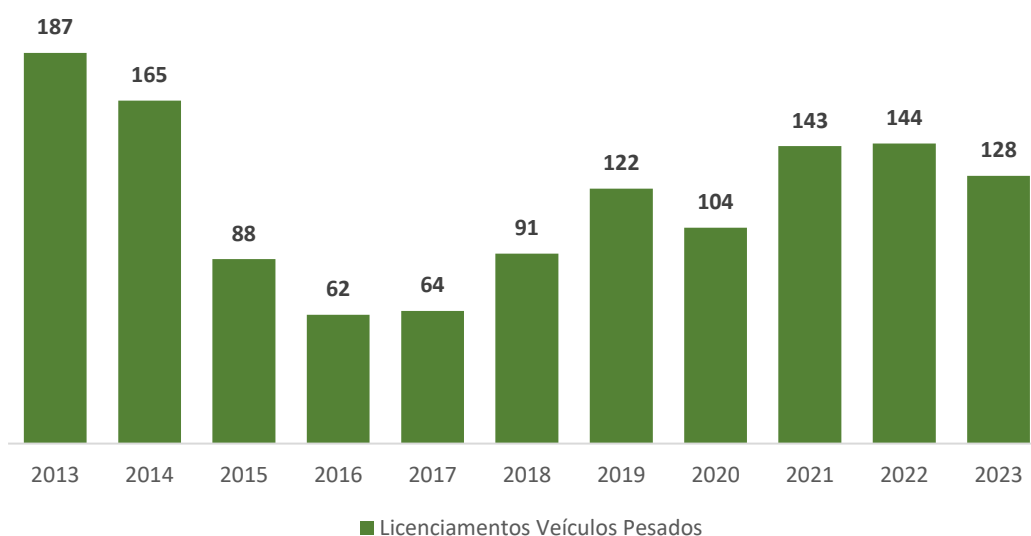
Nem todas estas razões (ou condições) se aplicam ao caso brasileiro. Em primeiro lugar, há aqui alternativas à eletrificação em grande medida já adotadas há décadas e que se mostraram eficientes para a descarbonização, como no caso dos biocombustíveis. O desenvolvimento destas cadeias, ademais, permitiu a criação de setores industriais e agrícolas sólidos e sofisticados, com desenvolvimento de tecnologia própria, articulação com centros e instituições de pesquisa e desenvolvimento (P&D), base exportadora de extensa geração de valor adicionado e empregos locais. Voltaremos mais adiante a estes temas.

3.2 Veículos Pesados e máquinas agrícolas

De acordo com o anuário da Anfavea, a frota de veículos pesados, composta por ônibus e caminhões, apresentava o total de 2.471.859 de veículos em 2023.

A idade média da frota de caminhões, de acordo relatório de frota circulante de 2022 do Sindipeças, é de 11 anos e 11 meses; já a idade média da frota de ônibus é de 11 anos e 3 meses.

Os licenciamentos de veículos pesados no ano de 2023 alcançaram 128.459 veículos. Observa-se desde 2016, com exceção de 2020 (pandemia do Coronavírus), crescimento dos licenciamentos anuais de veículos pesados.

Gráfico 12 – Licenciamentos de veículos pesados (Mil unidades)

Fonte: Anfavea. Elaboração: LCA Consultores.

Licenciamentos por tipo de motorização

De maneira análoga à análise feita para veículos leves, é possível detalhar os licenciamentos de veículos pesados por tipo de propulsão do motor. Os veículos movidos a diesel predominam nos licenciamentos de caminhões e ônibus. Entre 2021 e 2023, 99,5% dos novos licenciamentos foram de veículos movidos a diesel.

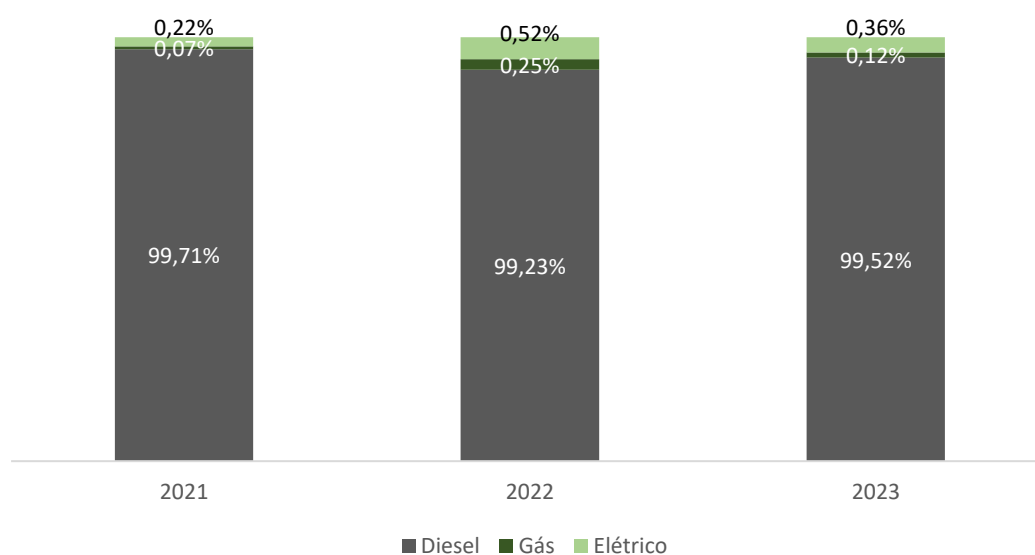
Caminhões e ônibus movidos à eletricidade e a gás são ainda incipientes: menos de 1% dos veículos pesados licenciados no país nos últimos anos. A participação destes veículos aumentou em 2022 de forma significativa, mas voltou a recuar em 2023 – acompanhando a retração de todo o mercado, em boa medida por conta dos juros altos afetando a formação bruta de capital (tabela 1 e gráfico 13, abaixo).

**Tabela 1 – Licenciamentos de veículos pesados
2021 a 2023 (Unidades)**

	2021	2022	2023
Elétrico	313	749	465
variação anual (%)		139,3%	-37,9%
Gás	95	356	149
variação anual (%)		274,7%	-58,1%
Diesel	142.333	142.895	127.845
variação anual (%)		0,4%	-10,5%

Fonte: Carta mensal Anfavea. Elaboração: LCA Consultores.

**Gráfico 13 – Licenciamentos de veículos pesados desde
2021 a 2023 (%)**

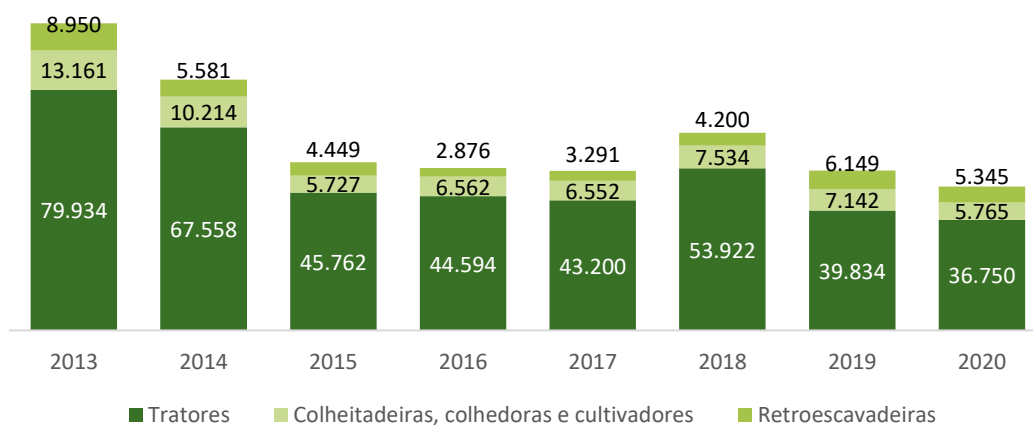


Fonte: Carta mensal Anfavea. Elaboração: LCA Consultores.

Maquinário agrícola

O anuário da Anfavea contém dados das vendas internas de máquinas agrícolas segregados por tipo, como tratores, colheitadeiras/colhedoras e retroescavadeiras desde 1960. Contudo, os dados são fornecidos até 2020, conforme gráfico abaixo:

**Gráfico 14 – Composição das vendas de maquinário agrícola – 2013 a 2020
(Unidades)**



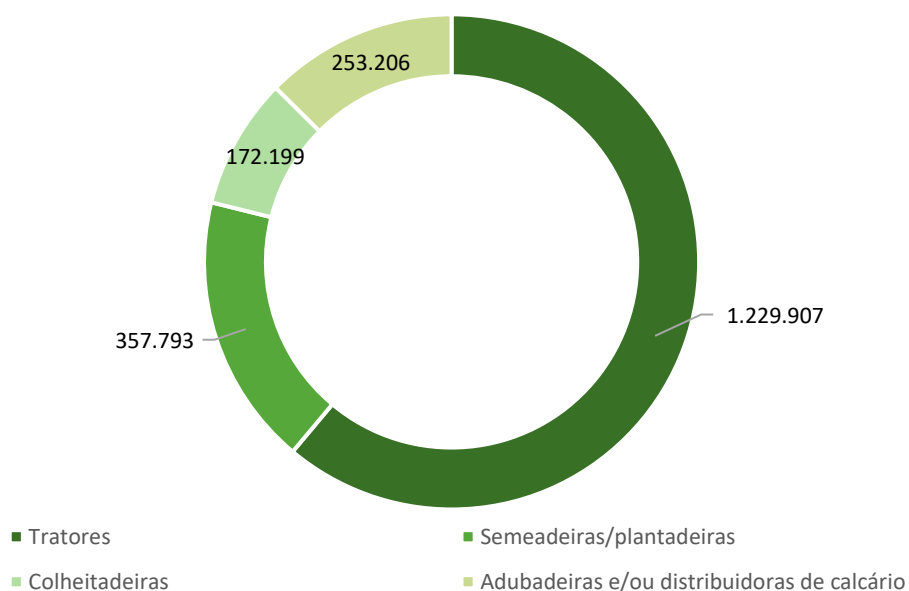
Fonte: ANFAVEA. Elaboração: LCA Consultores.

Informações adicionais sobre evolução da área plantada (IBGE) e, secundariamente, sobre o consumo de diesel (ANP) revelam que houve retomada da atividade agrícola nos últimos anos, indicando que os licenciamentos de máquinas agrícolas devem ter crescido e alcançado patamares próximos ao observado em 2018. no entanto, há pouca informação recente disponível sobre a frota total dos maquinários agrícolas. O Censo Agropecuário de 2017¹⁵ (IBGE) indicou que, naquele momento, existiam

¹⁵ Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/resultados-censo-agro-2017.html/>
Acesso em: 01/12/2023.

1.229.907 tratores, 357.793 semeadeiras/plantadeiras, 172.199 colheitadeiras e 253.206 adubadeiras¹⁶ e/ou distribuidoras de calcário – conforme gráfico abaixo:

Gráfico 15 – Composição da frota de máquinas agrícolas (Unidades)



Fonte: IBGE: Censo Agropecuário 2017. Elaboração: LCA Consultores.

¹⁶ Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/24/76693/> Acesso em:04/12/2023.

4. Rotas tecnológicas

Como antecipado na seção anterior, a relevância do setor de transportes na matriz de emissão dos países desenvolvidos tem conduzido a indústria automotiva a protagonizar mudanças relevantes na motorização de veículos, estimulando uma verdadeira corrida tecnológica em favor da descarbonização. Junta-se a este esforço, de forma concomitante (embora tenha se iniciado antes), medidas de política pública e ações empresariais no sentido de acrescentar fontes renováveis de energia elétrica em suas respectivas matrizes, de forma a permitir que os veículos possam ser cada vez mais movidos por energia renovável, fechando o ciclo de descarbonização.

Grandes produtores como China, Coréia e Japão se somam a EUA e UE neste processo, que vem ganhando contornos globais e se tornando tendência também nos demais países dessas regiões. Esta tendência já está consolidada para a maioria dos países desenvolvidos: dados da IRENA estimam que, aproximadamente, o grosso (67%) da redução das emissões do setor de transporte virá da eletrificação e do uso de hidrogênio¹⁷.

De fato, os dados de vendas de novos veículos elétricos leves¹⁸ (BEVs e PHEVs¹⁹), conforme o Global EV Outlook 2023²⁰ da Agência Internacional de Energia (IEA), indicam um novo recorde nas vendas de veículos elétricos em 2022, ultrapassando a marca de 10 milhões de unidades globalmente. Notavelmente, entre 2017 e 2022, as vendas cresceram de aproximadamente 1 milhão para mais de 10 milhões, demonstrando um crescimento exponencial. No período anterior, de 2012 a 2017, as

¹⁷ IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy. Pg.273

¹⁸ O termo veículo elétrico leve, segundo a IEA, representa veículos leves de passageiros, carros de diferentes tamanhos, SUVs e caminhões leves.

¹⁹ BEVs são a abreviação de carros 100% à bateria, ou Battery Electric Vehicle em inglês; e PHEVs são híbridos que combinam motor à combustão com motor elétrico à bateria recarregável (plug-in), do inglês Plug-in Hybrid Electric Vehicle. Para outros tipos, vide o glossário no início deste relatório.

²⁰ IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0/Acessado em: 21/11/2023

vendas aumentaram de 100.000 para 1 milhão, reforçando o caráter exponencial do crescimento.

A participação de veículos elétricos nas vendas totais de veículos no mundo subiu de 9% em 2021 para 14% em 2022. A **China** lidera as vendas globais de veículos elétricos, contribuindo com quase 60% dos novos licenciamentos. Esse crescimento vigoroso é fruto de quase uma década de incentivos e políticas públicas para os "*early adopters*", o que fez com que os veículos elétricos representassem 29% das vendas totais de veículos na China em 2022²¹.

Em 2022, a **Europa** reafirmou sua posição como o segundo maior mercado para veículos elétricos, contribuindo com 25% das vendas globais. Dentre os países europeus, **Noruega, Suécia e Holanda** se destacam pela expressiva representatividade dos veículos eletrificados em suas vendas totais, registrando percentuais relevantes de 88%, 54% e 35%, respectivamente. No que tange ao volume de vendas, a **Alemanha** lidera, alcançando o montante de 830.000 unidades em 2022. Em seguida, **Reino Unido e França** apresentam volumes consideráveis, registrando 370.000 e 330.000 unidades, respectivamente²². Além desses números expressivos, há indícios de que a tendência de crescimento nas vendas de veículos elétricos na Europa permanecerá, impulsionada, em grande parte, por regulamentação mais rigorosa relacionadas às emissões de CO₂, tendo em vista que há atualizações nos regulamentos visando uma redução de quase 100% nas emissões para novos carros e vans a partir de 2035, em comparação aos níveis de 2021.²³

Nos **Estados Unidos**, o mercado de veículos elétricos está experimentando um crescimento expressivo. Em 2022, os eletrificados conquistaram uma parcela de 8% das vendas totais, quatro vezes maior do que os 2% observados de 2018 a 2020.

²¹ IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0/Acessado em: 21/11/2023

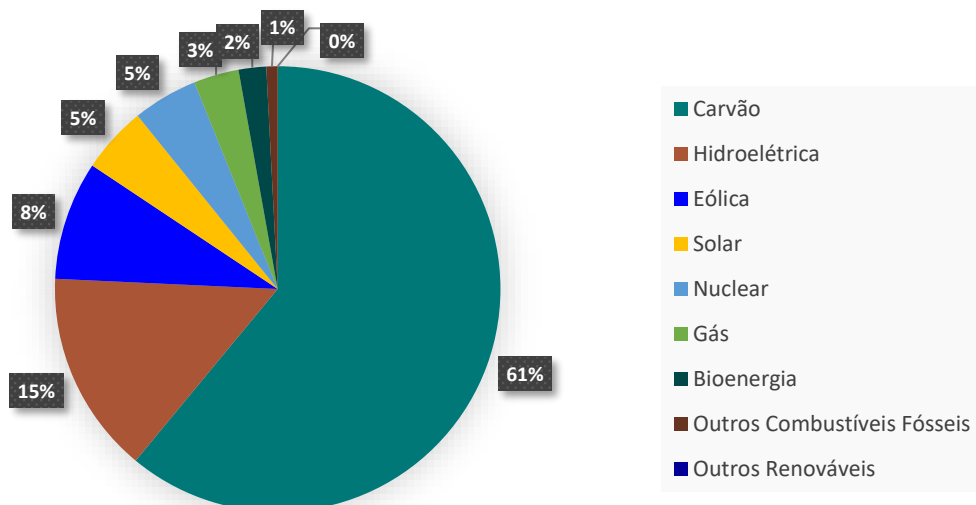
²² IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0/Acessado em: 21/11/2023.

²³ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>/Acessado em:21/11/2023.

Esse crescimento expressivo reflete a ampliação da oferta de modelos eletrificados no mercado (praticamente todas as montadoras passaram a ter novos modelos, oferecendo aos consumidores uma variedade de opções). Da mesma forma como na Europa e na China, os consumidores nos EUA podem se beneficiar de incentivos na compra de veículos elétricos. Há, porém, desafios importantes: a capacidade da infraestrutura de recarga rápida de baterias é um gargalo importante pelas dimensões continentais²⁴.

Além do desafio da infraestrutura de recarga, estes países possuem matrizes elétricas de base predominantemente fóssil, o que afeta as emissões quando se leva em conta a produção da energia. Um exemplo disso é a China, que obtém cerca de 61% de sua eletricidade a partir do carvão, conforme gráfico abaixo.

Gráfico 16 – China: Matriz elétrica – 2022

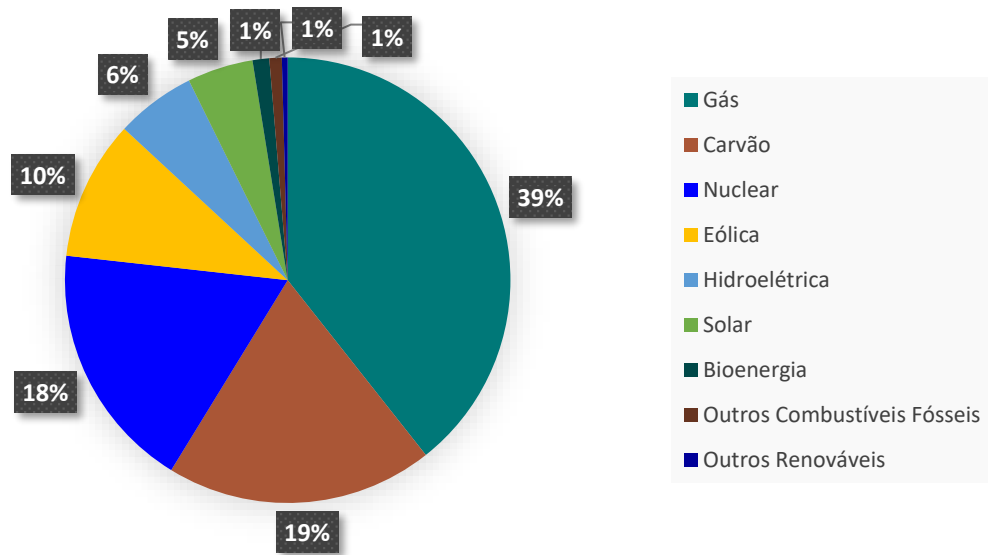


Fonte: Ember Electricity Data Explorer, ember-climate.org. (referente a 2022) Elaboração: LCA Consultores.

Nos EUA e UE a proporção de fósseis é também relevante (gráficos 17 e 18, abaixo).

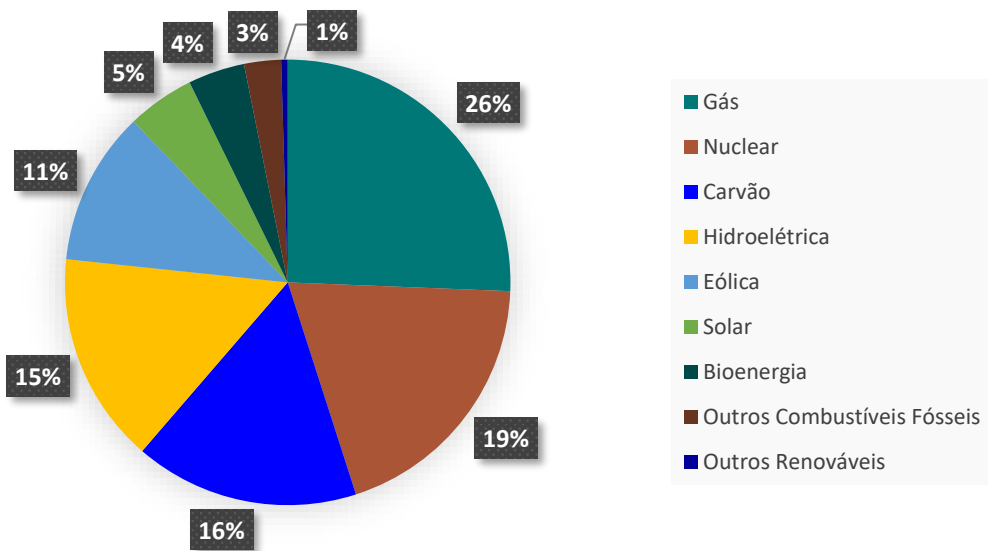
²⁴ IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>, License: CC BY 4.0/Acessado em: 22/11/2023.

Gráfico 17 – Estados Unidos: Matriz elétrica – 2022



Fonte: Ember-climate.org. (2022) Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 18 – Europa: Matriz elétrica – 2022



Fonte: Ember-climate.org. (2022) Elaboração: LCA Consultores.

Não obstante, o principal vetor a impulsionar a eletrificação na Europa e nos EUA é o arcabouço regulatório e fiscal. A União Europeia, por meio de seu Conselho, tem como objetivo se tornar o primeiro continente neutro em termos climáticos. Um dos pilares legislativos para consecução de tal objetivo é chamado de “*Fit for 55*”²⁵. Com esse regulamento, foram estabelecidos como objetivos a redução em pelo menos 55% de emissões de CO₂ para carros novos e 50% para vans novas de 2030 a 2034 em comparação com níveis de 2021, e 100% de redução das emissões de CO₂ para carros novos e vans a partir de 2035²⁶.

Ademais, alguns países da União Europeia, de maneira autônoma, estabeleceram uma série de regulamentações e políticas nos campos tributário e ambiental visando ao fomento de um setor de transporte com baixa emissão de carbono. No campo dos subsídios diretos, na França, carros com emissões abaixo de 20g/km são beneficiados com bônus de 7.000 euros; no Reino Unido, desde 2011, carros eletrificados com emissão de até 75g de CO₂/km são bonificados com 25% do valor do carro, até um máximo de 5.800 euros; já a Suécia, em um programa realizado entre 2012 e 2014, até 5.000 euros na aquisição de carros com emissões de até 50g de CO₂/km²⁷.

Outro aspecto regulatório expressivo é que alguns países europeus vêm estipulando um *phase-out* para a comercialização de veículos à combustão interna. A Alemanha aprovou resolução (2016) proibindo veículos movidos a combustíveis fósseis a partir de 2030²⁸; a Noruega pretende vender apenas carros *zero-emissions* a partir de 2025 (em medida mais restrita, do tanque à roda); Dinamarca e Suécia pretendem diminuir gradativamente as vendas de veículos à combustão interna após 2030; Reino Unido

²⁵ https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en/ Acessado em: 22/10/2023.

²⁶ <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans//> Acessado em: 21/11/2023.

²⁷ MARTINS, Claudia do Nascimento. Infraestrutura de recarga de bateria e subsídios e incentivos fiscais: condições chave para a difusão do carro elétrico. PPEd-IE-UFRJ. v.4, n.1, p.35-55, 2016.

²⁸ De Souza, Lidiane La Picirelli, 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* 203 (2018): 444-468.

e França estipularam os mesmos objetivos a partir de 2035²⁹. O mapa abaixo sinaliza os países e os respectivos prazos.

Imagem 1 – Phase out Europa de veículos a combustão interna



Fonte: WAPPELHORST, Sandra. "The end of road? An overview of combustion-engine car phase-out announcements across Europe" Maio, 2020. International Council on Clean Transportation³⁰.

²⁹ Wappelhorst, Sandra; Hall, Dale; Nicholas, Mike; Lutsey, Nic. "Analyzing Policies to Grow the Electric Vehicle Market in European Cities" Fevereiro, 2020. International Council on Clean Transportation.

https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV_city_policies_white_paper_fv_20200224.pdf / Acessado em 21/11/2023.

³⁰ <https://theicct.org/publication/the-end-of-the-road-an-overview-of-combustion-engine-car-phase-out-announcements-across-europe/> Acessado em:22/11/2023.

Nos Estados Unidos também existe uma regulamentação voltada para promover o uso de veículos elétricos. Do ponto de vista federal, algumas das principais leis em benefício desses veículos incluem:

- 1) *Energy Policy Act* – Visa à renovação da frota;
- 2) *Energy Independence and Security Act* - Fomenta os veículos elétricos no setor de transportes;
- 3) *Clean Energy Act* - Delimita os parâmetros de redução de CO₂;
- 4) *American Recovery ACT* e
- 5) *Public Law* – Permite a circulação de veículos movidos por combustível não-fóssil em faixas exclusivas ³¹.
- 6) *Inflation Reduction Act* – Tem como principal objetivos apoiar iniciativas que reduzam as emissões de GEE em diversos setores da economia (incluindo transportes) e gerem necessariamente investimentos e demandas para empresas sediadas nos EUA ou em áreas de livre comércio. No caso específico do setor de transportes, o IRA prevê subsídios (créditos fiscais) a pessoas físicas para aquisição de veículos elétricos e para a produção de biocombustíveis, hidrogênio verde e baterias para veículos elétricos, com impactos significativos no preço destes produtos para a cadeia subsequente (no caso de H2V, abatimento de US\$ 3/kg)³².

Tais ações e Leis compõem um conjunto abrangente de regulamentações nos Estados Unidos voltados à adoção e ao contínuo desenvolvimento de veículos elétricos como parte integrante da estratégia ambiental e energética do país.

³¹ GESEL. Experiências Internacionais em Mobilidade Elétrica – Texto para discussão do setor elétrico nº102. Agosto, 2021. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/tdse-gesel-no-102-experiencias-internacionais-em-mobilidade-eletrica/> Acessado em: 22.11.2023.

³² Os incentivos tributários são da ordem de US\$ 7.500 por veículo; os veículos elegíveis (cerca de 30 modelos) têm que ser necessariamente montados nos EUA com índices crescentes de nacionalização de partes e peças. SLOWIK, Peter et all. Analyzing the impact of the Inflation Reduction Act (IRA) on electric vehicle uptake in the United States. Janeiro 2023. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/ira-impact-evs-us-jan23/> Acessado em: 04/12/2023.

Adicionalmente, em razão da autonomia e das diferentes legislações em cada estado americano, alguns estados, como a Califórnia, instituíram normativos próprios no âmbito da descarbonização. Os programas "Zero Emissions Vehicle (ZEV)" e "Low Emissions Vehicle (LEV)" fazem parte do conjunto regulatório denominado "California's Advanced Clean Cars (ACC)", estabelecido em 2012 para os anos subsequentes de 2015 a 2025. Este marco regulatório tem se mostrado eficaz na criação e desenvolvimento do mercado de veículos eletrificados³³.

É possível resumir as políticas adotadas por uma lista de países por meio de categorias que dizem respeito ao barateamento da aquisição propriamente dita dos veículos ou a redução dos custos operacionais, como, por exemplo, redução de pedágios, licenciamentos anuais, permissão de circulação em áreas restritas e adensadas, entre outros. A tabela, a seguir, condensa estes dados categorizando os incentivos e política adotada por um rol de países.

³³ BUI, Anh; HALL, Dale and SEARLE, Stephanie. Advanced Clean Cars II: The next phase of California's Zero Emissions Vehicle and Low Emissions Vehicle Regulations. Novembro 2022. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/acii-zev-lez-reg-update-nov22/> Acessado em: 23/11/2023.

Tabela 2 – Políticas por categorias em diferentes países³⁴

Categoria	Política	Noruega	EUA	Canadá	China	Japão	Holanda
Econômicas-fiscais e financeiras	Redução de imposto de registro ^a	✓	×	×	✓	✓	✓
	Redução de imposto de compra ^b	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
	Redução no licenciamento anual	✓	✓	×	-	×	✓✓
	Redução de imposto de carros empresariais	-	×	×	×	×	✓✓
	Tributação por emissão de carbono	✓✓	×	✓✓	×	×	✓
	Aumento do imposto de circulação de MCI	×	-	-	×	×	×
	Redução do seguro	×	×	×	-	×	×
Regulatórias	Mandato de veículo com emissão zero	×	✓✓	✓✓	×	✓	×
	Isenção de tributação de teste de emissão de gases	×	✓	-	×	×	×
	Frota governamental	×	✓	×	×	×	×
Infraestrutura de recarga	Suporte financeiro para estações de recarga	✓	✓✓	-	✓	✓	✓✓
	Estação de recarga rápida	✓	×	×	×	×	✓
	Regulamentação predial	×	×	✓	×	×	×
Planejamento urbano e de transportes	Acesso a faixa de ônibus e HOV	✓✓	✓	-	✓	×	✓
	Redução em estacionamento	✓	-	×	✓	✓	✓
	Redução de pedágio	✓✓	-	×	-	✓	✓

Fonte: Cepal (2020)³⁵. Elaborado: LCA Consultores

Nota: ✓✓ alto impacto, ✓ baixo impacto, - sem impacto, × não avaliado.

^a Imposto para registrar o veículo na região (estado/país) de domicílio do proprietário. No Brasil, é conhecido como taxa de emplacamento.

^b Inclui descontos, taxas de crédito e isenções.

³⁴ Cepal (2020), Big Push para a Mobilidade Sustentável: cenários para acelerar a penetração de veículos elétricos leves no Brasil. Disponível em: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/45694-big-push-mobilidade-sustentavel-cenarios-acelerar-penetracao-veiculos-eletricos/> Acessado em: 27/11/2023.

³⁵ Cepal (2020), Big Push para a Mobilidade Sustentável: cenários para acelerar a penetração de veículos elétricos leves no Brasil. Disponível em: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/45694-big-push-mobilidade-sustentavel-cenarios-acelerar-penetracao-veiculos-eletricos/> Acessado em: 27/11/2023

O arcabouço regulatório e as medidas de emissão,

Em outro espectro, há um elemento metodológico no campo das emissões de gases poluentes em geral, em particular de CO₂, que é de suma relevância para o debate: **qual a metodologia mais adequada para a correta mensuração das emissões de gases de efeito estufa?** A literatura especializada tem apontado a necessidade de análise de todo o ciclo do produto desde a extração dos minérios utilizados em toda a cadeia, passando pela fabricação de todos os componentes e do próprio veículo, geração de energia, uso da terra para a produção de biocombustíveis até o descarte adequado ou reciclagem dos produtos e materiais embarcados.

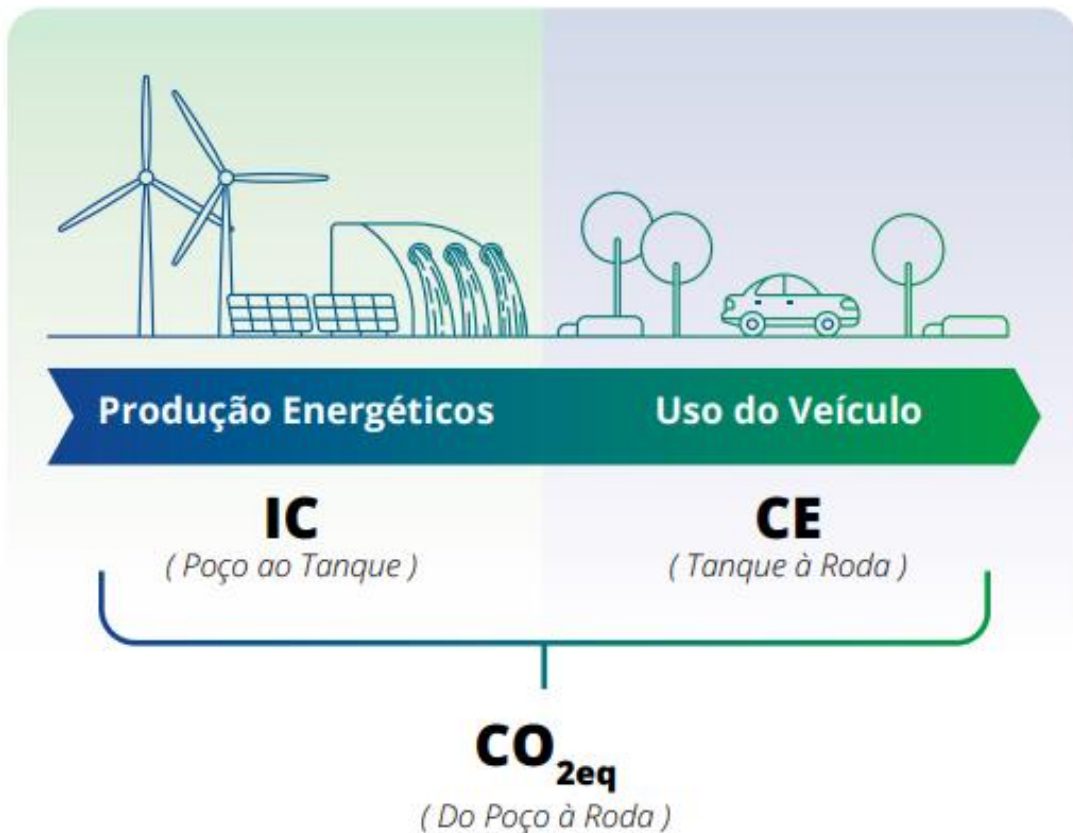
A análise do ciclo de vida engloba algumas metodologias: berço ao túmulo (*cradle to grave*), mais completo; poço ao tanque, que mede as emissões geradas durante o processo de produção dos combustíveis; e tanque à roda, que mensura as emissões durante a utilização do veículo em si. Por fim, pode-se combinar as etapas de poço ao tanque e tanque à roda, formando o conceito de poço à roda (*well to wheel*)³⁶

A AEA (Associação Brasileira de Engenharia Automotiva) divulgou uma cartilha, “Do poço à roda: veículos leves”³⁷, na qual explicita o passo-a-passo da mensuração de CO₂ para os diversos modelos de propulsão vigentes no Brasil, incluindo os veículos *flex*. No estudo, a etapa relativa ao poço ao tanque fornece os dados da intensidade energética dos combustíveis enquanto a etapa tanque à roda apresenta o consumo energético dos veículos, parâmetro que se refere à eficiência automotiva.

³⁶ Athanasopoulou, L., Bikas, H., & Stavropoulos, P. (2018). Comparative well-to-wheel emissions assessment of internal combustion engine and battery electric vehicles. *Procedia CIRP*, 78, 25–30. [https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2018.08.169/](https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2018.08.169) Acessado em: 23/11/2023.

³⁷ [https://aea.org.br/inicio/wp-content/uploads/2022/11/AEA_CARTILHA-CALCULO-POCO-RODA.pdf/](https://aea.org.br/inicio/wp-content/uploads/2022/11/AEA_CARTILHA-CALCULO-POCO-RODA.pdf) Acessado em: 20/10/2023.

Imagem 2 – Cartilha Poço à Roda (AEA)



Fonte: AEA – Cartilha do poço à roda veículos leves.

Com efeito, quando as emissões dos veículos são analisadas pelo conceito de poço à roda, há uma diferenciação nas emissões no caso de veículos a combustão interna e veículos elétricos: enquanto as emissões no escapamento do carro são nulas para os veículos elétricos, há que se somar as emissões relativas à produção de eletricidade dos locais onde o carro é recarregado, o que leva em conta a intensidade de carbono da matriz elétrica dos países, perdas de transmissão e distribuição da energia, entre outros aspectos da infraestrutura elétrica³⁸. Sendo assim, há uma

³⁸ Athanasopoulou, L., Bikas, H., & Stavropoulos, P. (2018). Comparative well-to-wheel emissions assessment of internal combustion engine and battery electric vehicles. *Procedia CIRP*, 78, 25–30. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2018.08.169/> Acessado em:23/11/2023

influência direta da matriz elétrica dos países no sucesso da redução das emissões de CO₂ nos veículos elétricos.

A matriz elétrica brasileira, na base de 2018 (ano-base para a estimativa oficial de emissões no Brasil), apresentava intensidade de carbono de 99,6 gCO_{2eq}/MWh, enquanto a matriz europeia, no mesmo ano de comparação, apresenta o valor de 322,8 gCO_{2eq}/MWh, ou seja, 3,24 vezes mais emissora de CO_{2eq}. Na base 2020, o setor elétrico brasileiro emitiu 85,2 kgCO_{2eq}/MWh relativamente aos 251,6 kgCO_{2eq}/MWh do caso europeu³⁹. Por hipótese, quando a análise é estendida para o conceito de gCO_{2eq}/km, as emissões da matriz elétrica de um veículo BEV no Brasil seriam da ordem de 24,6 gCO_{2eq}/ km, em oposição ao valor de 65,0 gCO_{2eq}/ km da matriz elétrica europeia.⁴⁰

Entretanto, a análise de poço à roda não inclui etapas relevantes para uma medida completa de emissões de gases de efeito estufa. Evidências apontam que a grande diferença entre os veículos BEV e os veículos à combustão interna, no campo das emissões, estão na produção da bateria, que utiliza diversos produtos químicos e energéticos de base fóssil entre outros insumos danosos ao meio ambiente⁴¹. Apesar de os veículos elétricos não emitirem CO₂ de forma direta, tais estudos indicam que a manufatura de baterias é intensiva em emissões de gases de efeito estufa.⁴²

Por isso, uma abordagem de ciclo de vida do berço ao túmulo, considerando desde a exploração de minerais para a produção das baterias e de outras peças do veículo até o descarte dos materiais embarcados, é a metodologia mais assertiva para se medir corretamente emissões, considerando todos os aspectos relevantes. Contudo,

³⁹ EPE. (2023) Balanço Energético Nacional 2023, BEN Relatório Síntese 2023 Ano base 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>.

⁴⁰ Gauto, Marcelo Antunes, et al. "Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles." *Energy for Sustainable Development* 76 (2023): 101261.

⁴⁰ IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy. Pg.27

⁴¹ Glensor, Kain, and María Rosa Muñoz B. "Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways." *Sustainability* 11.22 (2019): 6332.

⁴² Gauto, Marcelo Antunes, et al. "Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles." *Energy for Sustainable Development* 76 (2023): 101261.

deve-se admitir que alguns dados – como emissões causadas pelo descarte de baterias – ainda são pouco conhecidos, dado que boa parte dos produtos está ainda em seu primeiro ciclo de vida⁴³.

Na perspectiva de uma análise de ciclo da vida mais abrangente, há poucos estudos para o caso brasileiro. Estudo coordenado por um grupo de pesquisadores das universidades estaduais paulistas (USP, UNICAMP e UNESP) é o que mais avança neste sentido⁴⁴.

O trabalho de Gauto et al (2022, citado acima) indica que um veículo leve híbrido não plug-in movido 100% a etanol ou biometano produz menos gramas de CO_{2EQ}/km do que um veículo puramente elétrico, mesmo considerando a matriz elétrica brasileira, mais limpa. Outros estudos – a exemplo de Lavrador e Sá Telles (2022) e Glensor (2019) – chegam a resultados semelhantes, ainda que com algumas considerações e premissas ligeiramente diferentes.

Em resumo, os estudos que têm por base avaliações mais amplas da pegada de carbono ao longo de todas as cadeias produtivas envolvidas na produção, uso e descarte de veículos e seus insumos (“berço ao túmulo”) apontam para uma combinação entre eletrificação e biocombustíveis (etanol ou biometano) como sendo a solução com menores níveis de emissão de GEE; na pior das hipóteses, para alguns destes estudos as emissões são apenas um pouco acima daquelas estimadas para veículos puramente elétricos utilizando a matriz renovável brasileira. As tabelas a seguir apresentam os resultados estimados das emissões de gramas de CO_{2eq}/km dos diversos modelos de propulsão de veículos leves vigentes no mercado nacional, por meio do racional de cálculo “Poço à Roda” – seguindo a metodologia da AEA – além dos resultados calculados pelo estudo do Gauto.

Tabela 3 – Emissões gCO₂/km: “Poço à Roda”

Flex	Gasolina C	Diesel	HEV (Flex)	Elétrico
91,0	143,4	202,8	75,4	13,3

⁴³ Gauto, Marcelo Antunes, et al. "Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles." *Energy for Sustainable Development* 76 (2023): 101261.

⁴⁴ Gauto, Marcelo Antunes, et al. "Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles." *Energy for Sustainable Development* 76 (2023): 101261.

Fonte: LCA com base em cartilha AEA. Elaboração: LCA Consultores.

Nota 1: Os cálculos foram baseados em dados do PBEV 2023 (Inmetro), AEA – Cartilha do poço à roda veículos leves e EPE (2022). Nota técnica “Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário – Intensidade de carbono das fontes de energia. O racional de cálculo mais detalhado é apresentado no capítulo 6.

Tabela 4 – Emissões gCO₂/km: “Berço à Roda”

Flex (E100)	Gasolina A	Híbrido (E100)	Elétrico
120,9	269,3	77,5	104,8

Fonte: Gauto et al (2022). Elaboração: LCA Consultores.

Nota 1: O referido estudo calculou as emissões dos veículos flex e híbrido utilizando apenas etanol.

4.1 Etanol e biodiesel

O Brasil possui relevância mundial na produção e desenvolvimento de biocombustíveis por diversas razões. Além de ter um setor agrícola moderno e diversificado, pôde contar ao longo das últimas décadas com estímulos adequados por parte da regulamentação e de políticas voltadas aos biocombustíveis (a exemplo do RenovaBio e do Combustível do Futuro) e à cadeia de transporte (a exemplo do programa Rota 2030), com medidas de comando e controle voltadas à eficiência energética e ao controle das emissões de gases de efeito estufa.

Tal relevância é corroborada por dados da Agência Internacional de Energia⁴⁵ (IEA, sigla em inglês), segundo a qual o Brasil é o segundo maior produtor mundial de biocombustíveis, produção que corresponde a uma participação de 22% do total da energia utilizada em sua matriz de transporte em 2022.

Atualmente, o Brasil possui uma produção diversificada de biocombustíveis, obtendo-os a partir de diversas fontes. Destacam-se o etanol, nas suas variantes anidro e

⁴⁵Fonte: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/338e96c1-7da1-4894-b81b-57ff7bf13040/BiofuelPolicyinBrazil%2CIndiaandtheUnitedStates.pdf>. Acesso em: 27/09/2023

hidratado, o biodiesel, biogás e biometano. Adicionalmente, o país está avançando em pesquisas e estudos de viabilidade para a produção de hidrogênio de baixo carbono com diferentes rotas tecnológicas (hidrólise, reforma-vapor à base de etanol e via biometano em substituição ao gás natural fóssil). Olharemos cada uma destas alternativas.

Breve histórico da produção de etanol no Brasil

Na esteira dos acontecimentos do mercado de petróleo na década de 1970, o Brasil empreendeu políticas visando a uma maior independência energética. Em novembro de 1975, o país anunciou a implementação do Programa Nacional do Álcool⁴⁶, popularmente conhecido como Proálcool, que tinha como objetivo incentivar a substituição da gasolina pelo álcool como combustível veicular.

A primeira fase da medida contou com experiências embrionárias no início da década de 1970, antes mesmo da formalização do Programa. Neste período se iniciaram experimentos de mistura do álcool à gasolina, começando com percentuais entre 10% e 20%.

A segunda fase foi iniciada em 1977, e marcou o desenvolvimento da engenharia automotiva brasileira com o envolvimento de diversos atores – governo, universidades, fabricantes e fornecedores de autopeças. A partir desse movimento, foi possível uma expansão da pesquisa e desenvolvimento com vistas a solucionar os problemas da fase anterior, como a corrosão de peças.

Houve esforços importantes para a padronização do combustível, uma vez que existiam três tipos de álcool (de limpeza, farmacêutico e da indústria alimentícia). Por possuir um teor de água mais controlado, foi definido que o álcool a ser adotado como combustível seria o utilizado na indústria farmacêutica. Também foi padronizado o percentual de álcool na gasolina, definindo teores mínimo e máximo. O primeiro modelo movido 100% a álcool do mundo foi lançado em 1979 – um Fiat 147.

⁴⁶ Fonte: <https://anfavea.com.br/site/o-que-foi-o-proalcool/> . Acesso em: 28/09/2023.

Com isso, definiram-se dois tipos de etanol: anidro e hidratado, que se distinguem pela quantidade de água em sua composição. No hidratado, a proporção de água pode chegar a até 5%; no anidro, o percentual máximo é 0,5%. O etanol anidro é destinado à mistura com a gasolina, sendo uma parte relevante da composição dos combustíveis utilizados em veículos. Por sua vez, o etanol hidratado é comercializado diretamente nas bombas dos postos de combustível, disponível para abastecer veículos flex e aqueles projetados para utilizar etanol como combustível principal.

O uso combinado de combustível fóssil com renováveis alçou novo patamar a partir de 2003, com o lançamento do motor flexfuel, tendo o modelo Gol Total Flex como o primeiro automóvel do país e do mundo a rodar com combustíveis alternados, à escolha do consumidor. Tal tecnologia permitiu que os motores aceitassem qualquer proporção de mistura entre a gasolina e o etanol, fornecendo uma maior liberdade ao consumidor durante o abastecimento do veículo. Assim, os preços relativos de ambos os combustíveis (em função de diferenças na eficiência e autonomia de cada combustível, condições de oferta e sazonalidade da safra de etanol, logística de transporte e disponibilidade nas diferentes regiões, tributos estaduais, influência de cotações internacionais sobre o preço da gasolina por conta da sistemática local de precificação etc.) passaram a ser a variável de decisão do consumidor, além de preferências e crenças pessoais.

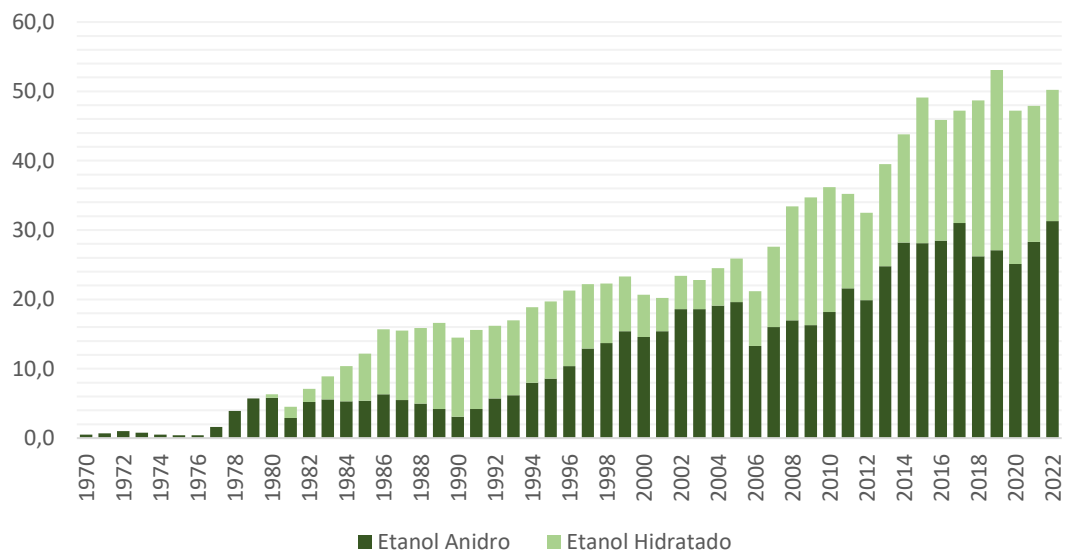
Com a rápida absorção da tecnologia e expansão da demanda, a produção de etanol também cresceu significativamente. Houve, por um lado, rápida mecanização da colheita da cana-de-açúcar com impacto na produtividade das lavouras e, por outro lado, crescimento da área plantada de cana-de-açúcar para a produção do etanol. Segundo a Anfavea⁴⁷, a tecnologia flexfuel estava presente em 80% dos veículos leves comercializados no Brasil já em 2005 – já próxima à participação entre os leves nos anos mais recentes. Com isso, o *share* de biocombustíveis na matriz de veículos leves cresceu continuamente⁴⁸.

⁴⁷ Fonte: <https://anfavea.com.br/site/o-que-foi-o-proalcool/>. Acesso em 28/09/2023

⁴⁸ Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-756/NT-EPE-DPG-SDB-2023-01-Analise-de-Conjuntura-dos-Biocombustiveis-Ano2022.pdf>. Acesso em 05/10/2023

Em nota técnica (“Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022”⁴⁹), a EPE estima o volume de CO₂EQ evitado por este efeito substituição bem como a evolução da demanda dos combustíveis do ciclo otto (etanol total e gasolina A).

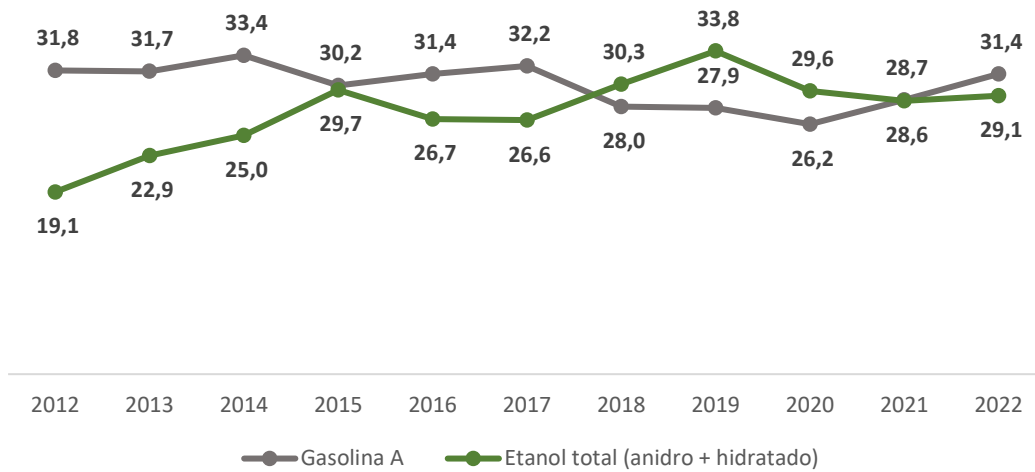
Gráfico 19 – Estimativas de emissões evitadas pelo uso de etanol anidro e hidratado (MtCO₂EQ)



Fonte: EPE50. Elaboração: LCA Consultores.

⁴⁹ Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes/> Vide Nota 49.

⁵⁰ Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes/>. Op. cit., vide Nota 49.

Gráfico 20 – Demanda dos combustíveis do ciclo Otto (Bilhões de litros)

Fonte: EPE- Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022. Elaboração: LCA Consultores.

De fato, tem-se observado uma substituição relevante dos combustíveis fósseis ao longo de décadas, que se intensifica à medida que (i) cresce a proporção de motores flexfuel relativamente à frota e (ii) cresce a mistura de etanol anidro à gasolina. Como resultado, o volume de etanol (anidro + hidratado) medido em bilhões de litros já tem superado o volume de gasolina no Brasil nos últimos anos para veículos de ciclo Otto, (exceto em 2022).

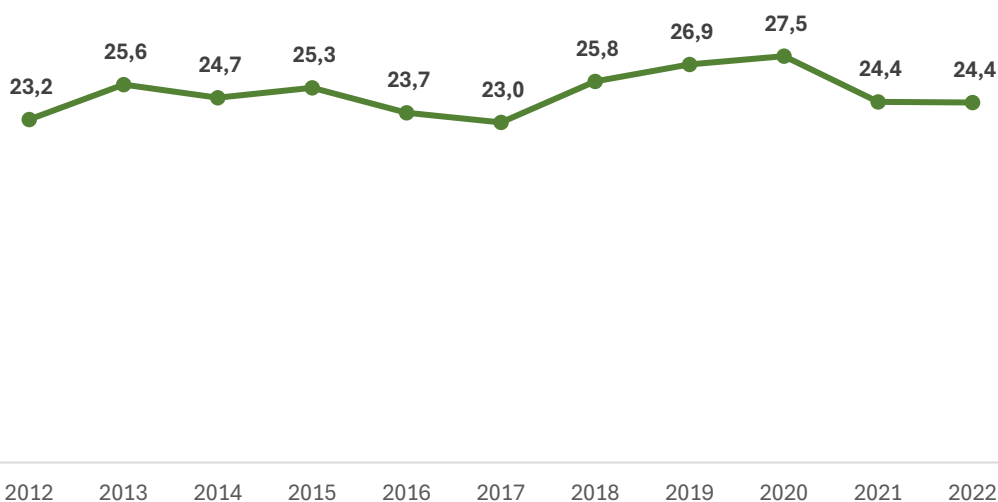
Este movimento não é observado com a proporção de biocombustível presente na mistura com o diesel nos veículos de ciclo diesel, o que se pode explicar pelas limitações físicas presentes nesta mistura (há limitações técnicas relacionadas à oxidação do combustível à base de óleo vegetal, que em maiores proporções tem prejudicado o funcionamento dos motores) e pela ausência de alternativas de motorização que permitam seu uso alternado.

A seguir, avaliaremos a presença e evolução dos principais biocombustíveis.

Produção de etanol

O Brasil é um ator relevante na produção sucroalcooleira e de etanol, sendo responsável por aproximadamente 24,35% da produção mundial do biocombustível, segundo a OCDE⁵¹.

Gráfico 21 - Participação brasileira na produção mundial de etanol (%)



Fonte: OCDE e FAO. Elaboração: LCA Consultores.

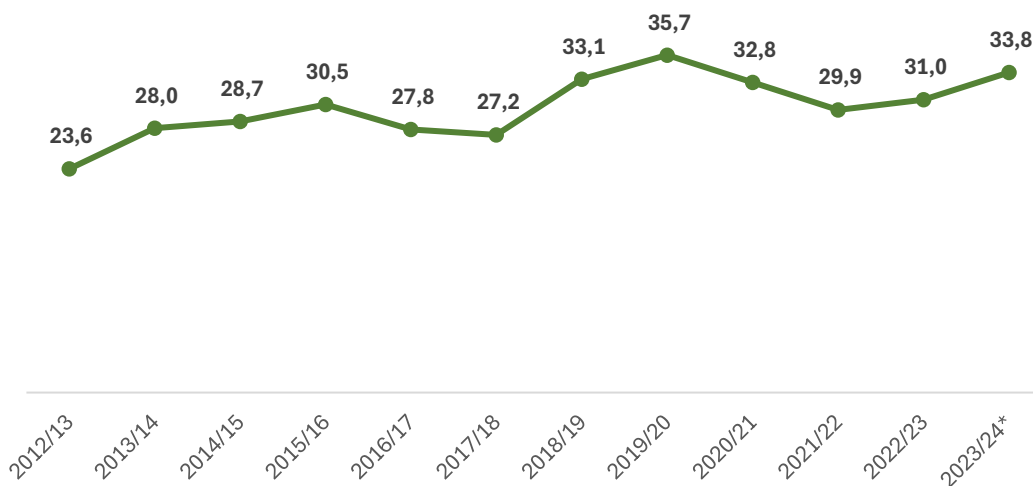
A oferta de etanol brasileira advém basicamente da cana-de-açúcar, com destaque para o crescimento recente da importância do milho. Em 2022, a produção brasileira total de etanol foi de 30,6 bilhões de litros. Desse total, 4,1 bilhões foram provenientes do milho (13,4%) e, 26,5 bilhões, advindos da cana-de-açúcar (86,6%). Conforme estudo da EPE, projeta-se para 2032 produção de 9,1 bilhões de litros de etanol oriundo do milho e 36,1 bilhões provenientes da cana-de-açúcar.⁵²

Para a safra 2023/24, a produção de etanol (cana + milho) está estimada em 33,83 bilhões de litros, crescimento de 9,2% em relação à safra passada.

⁵¹ [OECD Data Explorer • OECD-FAO Agricultural Outlook 2022-2031](#) . Acesso em: 28/09/2023.

⁵² [Apresentação do PowerPoint \(epe.gov.br\)](#)/ Acesso em:05/10/2023

**Gráfico 22 - Produção de etanol: cana-de-açúcar e milho – Brasil
(Bilhões de litros)**



*Estimativa em agosto de 2023. Fonte: Conab. Elaborado: LCA Consultores.

Atualmente, existem 426 usinas de açúcar e etanol no Brasil, com a maior concentração na região Sudeste (227 usinas), seguido pelo Centro-Oeste (84 usinas), Nordeste (74 usinas), Sul (36 usinas) e Norte (5 usinas)⁵³. A capacidade nominal de produção de etanol anidro é de 125 mil m³/dia e de etanol hidratado, 235 mil m³/dia. Adicionalmente, há 23 unidades que produzem etanol através do milho, com capacidade de produção de 5,2 bilhões de litros/ano⁵⁴.

Demanda atual de etanol e seu uso no ciclo otto

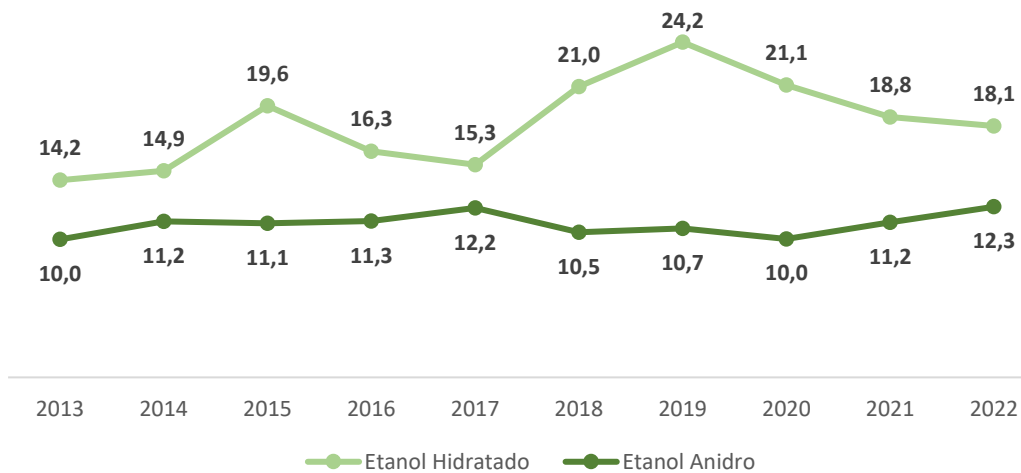
O uso do etanol no Brasil é preponderante em veículos do ciclo otto. Isto fica claro ao compararmos os gráficos de consumo total de etanol anidro e hidratado (Balanço

⁵³ Fonte: https://www.novacana.com/usinas_brasil/ Acessado em: 15/12/2023.

⁵⁴ Fonte: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-756/Apresenta%C3%A7%C3%A3o%20An%C3%A1lise%20de%20Conjuntura_ano.base%202022_2023.08.11.pdf. Acesso em: 05/10/2023

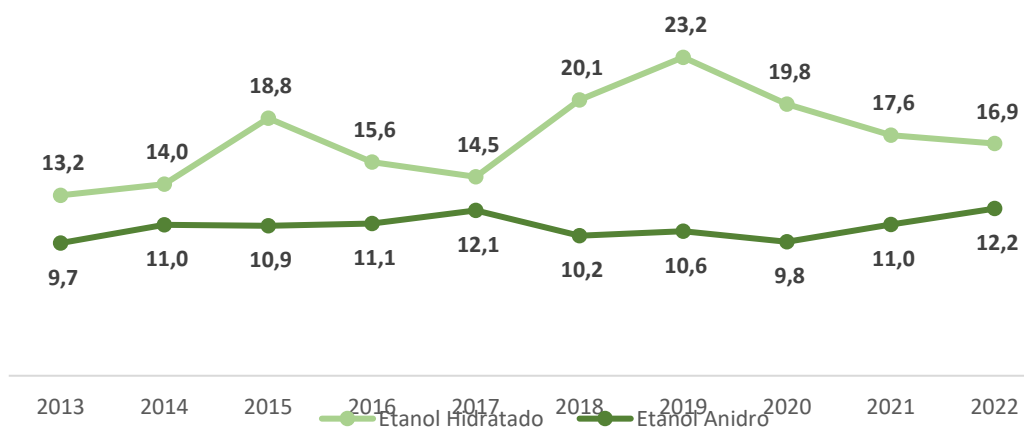
Energético Nacional) e o consumo total de etanol anidro e hidratado do ciclo otto, ambos divulgados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética, do Ministério de Minas e Energia – EPE/MME).

**Gráfico 23 - Consumo total de etanol anidro e hidratado no Brasil
(Bilhões de litros).**



Fonte: Balanço Energético Nacional, MME. Elaboração: LCA Consultores.

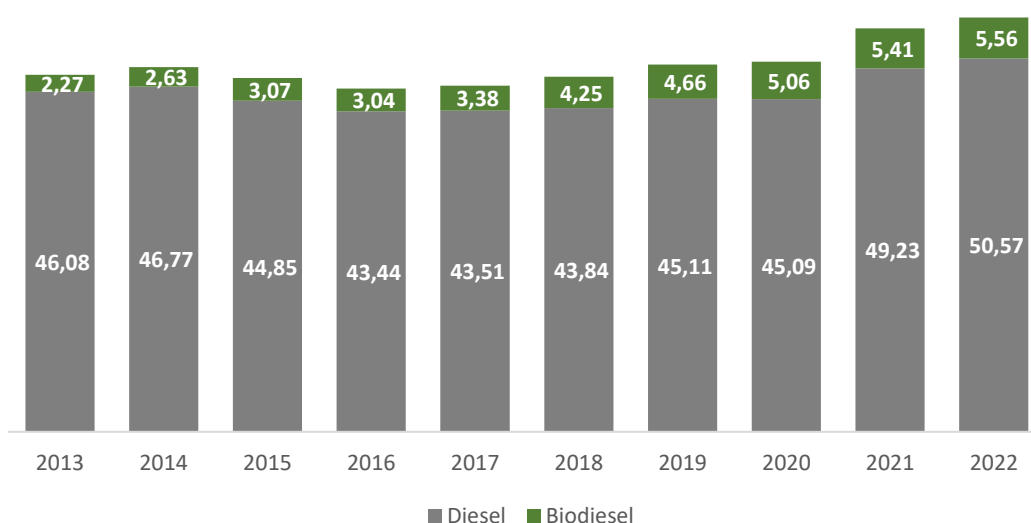
**Gráfico 24 – Consumo de etanol anidro e hidratado em motores do Ciclo Otto
(Bilhões de litros)**



Fonte: EPE- Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022. Elaboração: LCA Consultores.

Quando se trata de veículos pesados, não há opções de motorização que utilizem etanol. Para esta categoria, a alternativa encontrada para iniciar o processo de descarbonização tem sido por meio da mistura de biodiesel ao diesel, de forma semelhante à mistura de etanol anidro à gasolina nos veículos leves. O gráfico abaixo mostra o consumo de diesel e biodiesel do setor rodoviário no período 2013- 2022.

Gráfico 25 – Consumo de diesel e biodiesel – Transportes rodoviários no Brasil (Bilhões de litros)

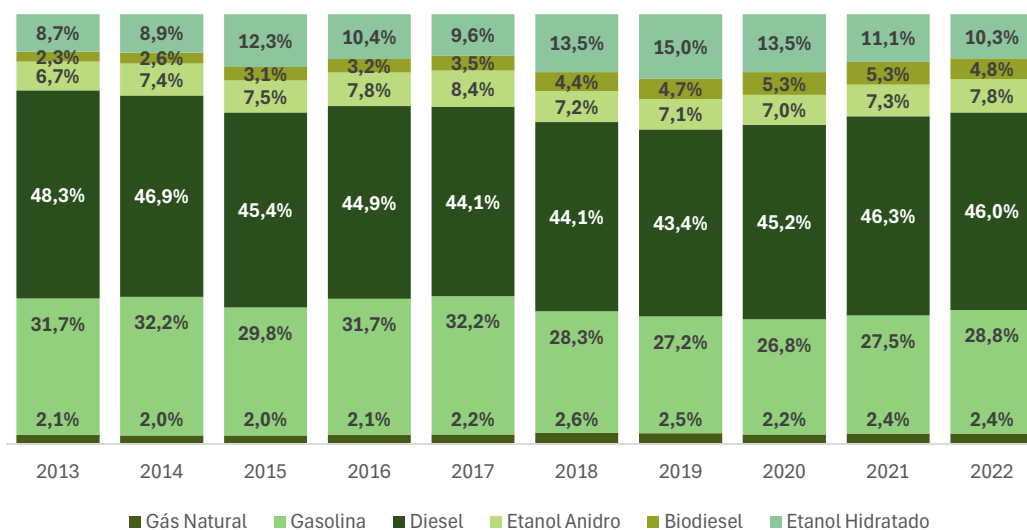


Fonte: Balanço Energético Nacional, MME⁵⁵. Elaboração: LCA Consultores.

Neste contexto, a proporção de biocombustíveis na matriz de transporte rodoviário total (etanol + biodiesel) avançou um pouco mais de 5 pontos percentuais na última década, passando de 17,7% em 2013 para 22,9% em 2022 segundo o Balanço Energético Nacional, MME (gráfico abaixo).

⁵⁵ Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf> p.81.

Gráfico 26 – Consumo de combustíveis do setor de transportes rodoviários no Brasil (%)



Fonte: Balanço Energético Nacional, MME⁵⁶. Elaboração: LCA Consultores.

Neste quadro mais amplo, vê-se que a utilização de etanol anidro + hidratado no total da matriz de transporte rodoviário no Brasil tem oscilado nos últimos anos – a proporção frente o total alcançou 22,1% em 2019, ponto máximo, e recuou para 18,1% em 2022. Este movimento se deveu a mudanças provocadas pela pandemia, com redução da circulação de veículos leves e predomínio de veículos pesados, maiores usuários de diesel. Mudanças na estrutura tributária e nos preços relativos em anos recentes (períodos de barateamento da gasolina frente ao etanol) também contribuíram para esta redução da participação relativa do etanol, fatores que não estão (e acredita-se, não estarão) presentes nos período pós pandemia. Assim, espera-se uma retomada do *market share* do etanol no mercado brasileiro.

⁵⁶ Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf> p.81.

Potencial de aumento da oferta de etanol no Brasil

Uma das preocupações recorrentes em estudos sobre emissão de GEE por parte dos combustíveis diz respeito à percepção de risco associado à produção de etanol no Brasil relativamente ao uso da terra. Assim, é importante conhecer o **potencial de crescimento da produção de etanol no Brasil e se este crescimento pode ou não envolver riscos de desmatamento ou ameaças à produção de alimentos.**

Há muitas evidências de que as atividades no campo vêm incorporando maior mecanização em busca de ganhos de produtividade, em alguns casos incorporando práticas sustentáveis sob efeito de forte regulação combinando controles e incentivos para processos conformes. No caso da cana-de-açúcar, os ganhos de produtividade ocorreram nos anos 2000's (a produção cresceu 120% de 2000 a 2010 e a área colhida 89%, resultando em incremento de 16% da produtividade no período), mas estiveram praticamente estagnados na década seguinte – em contraste com a produtividade do milho, que nos últimos 20 anos triplicou, de forma contínua⁵⁷.

Porém, tem havido avanços relevantes em pesquisa e desenvolvimento de biogenética voltados para a cana de açúcar (desenvolvimento de sementes e novos cultivares) que deverão ampliar em muito a produtividade da cana nas próximas décadas. Estes desenvolvimentos precisarão, evidentemente, chegar ao campo – é esta nossa premissa básica neste estudo, dados os incentivos econômicos e regulatórios para que estes investimentos ocorram. Em resumo:

- (i) Os mecanismos de regulação e controle das atividades agrícolas presentes no âmbito do Renovabio são bastante rigorosos e induzem ao uso sustentável da terra na produção de biocombustíveis;
- (ii) Desenvolvimentos recentes podem mais que duplicar a capacidade de oferta de etanol ao longo de duas décadas, sem acréscimo de área plantada; e
- (iii) A área utilizada para o plantio de cana-de-açúcar no Brasil (cerca de 8,3 milhões de hectares) representa cerca de 15% da área total atualmente

⁵⁷ LSPA, IBGE. Vide <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588>, acessado em 07 de abril de 2024.

utilizada para agricultura e cerca de 2% da área agricultável do país (CONAB, 2022). Ainda, a área atualmente utilizada representa cerca de 65% das áreas degradadas com potencial de recuperação recentemente mapeadas pelos Ministérios da Agricultura e do Meio Ambiente.

A Política Nacional de Biocombustíveis (**RenovaBio**), estabelecida em 2017⁵⁸ com o objetivo de viabilizar as obrigações assumidas pelo Brasil na COP21 – em especial as metas de descarbonização para o setor de biocombustíveis, como a elevação da participação da bioenergia na matriz energética para 18% em 2030 –, estabelece uma série de obrigações de uso sustentável do solo para que os produtores e/ou importadores do biocombustível tenham direito a um crédito para comercialização em mercado aberto (o **C BIO**), a ser adquirido compulsoriamente pelas distribuidoras de combustível.

Tais exigências incluem uma dupla auditoria na produção do biocombustível (uma de responsabilidade do produtor e outra, do agente ambiental responsável, ambos em processos contratados junto a terceiros especializados) para assegurar que os biocombustíveis certificados pelo programa não advenham de áreas desmatadas ou não-regularizadas para este propósito. Atualmente, os dados indicam que mais de 90% do etanol comercializado no Brasil estão em conformidade com as regras do Renovabio, o que garante aos produtores o direito de uso dos CBIOS.^{59 60}

No entanto, há uma série de inovações em curso a partir de pesquisas e tecnologias que foram sendo desenvolvidas e amadurecidas nos últimos anos visando ao aumento da produtividade e da oferta futura de biocombustíveis, com destaque para os projetos desenvolvidos pelo CTC⁶¹ com foco em etanol, com potencial para

⁵⁸ Lei 13.576/2017 (RenovaBio), posteriormente regulamentada pelo Decreto 9.888/2019 e pela Portaria do MME nr. 56/GM/MME. Este tema será abordado com mais profundidade no capítulo 5.

⁵⁹ UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia. (2022). Observatório da Cana, Estimativa do volume comercializado por unidades certificadas. Available at: <https://observatoriodacana.com.br/listagem.php?idMn=142> (Accessed: 24/11/2023).

⁶⁰ Gauto, Marcelo Antunes, et al. "Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles." *Energy for Sustainable Development* 76 (2023): 101261

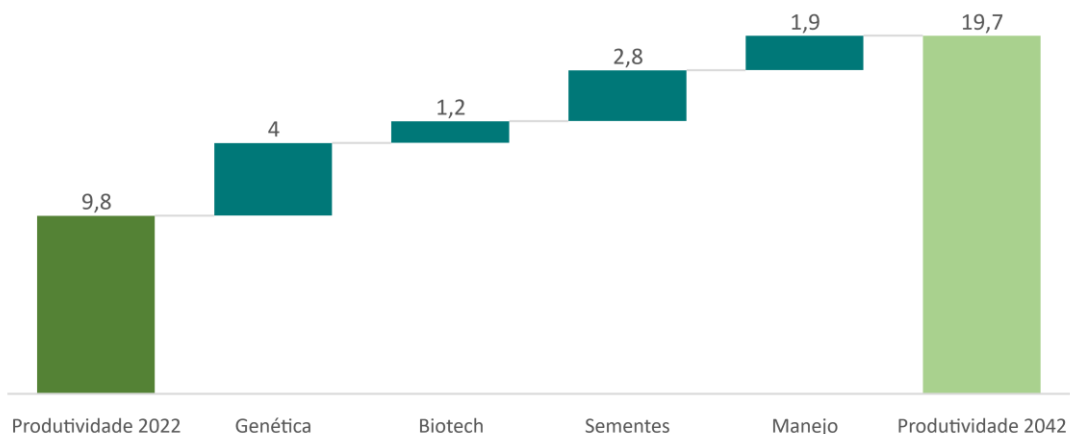
⁶¹ *Centro de Tecnologia Canavieira (CTC)* é uma companhia de capital aberto (Bovespa-Mais) com foco em ciência, pesquisa e desenvolvimento. É composta por empresas do setor de

duplicar a produtividade da ponta agrícola nas próximas duas décadas por meio de três frentes:

- (i) Melhoramento genético e adoção de novas variedades de planta mais resistentes, com maior concentração de açúcar e de crescimento mais rápido;
- (ii) Adoção de sementes transgênicas, o que irá poupar área (atualmente reservada para plantas em desenvolvimento) e permitir maior adequação das variedades às características e condições da terra; e
- (iii) Adaptação da mecanização às sementes, que deverá acelerar em muito o processo de plantio.

A tabela abaixo sintetiza os ganhos de produtividade das três frente mencionadas acima:

Gráfico 27 – Pilares CTC para aumento de produtividade



Fonte: Visão estratégica CTC 2040. Elaboração: LCA Consultores.

bioenergia e participação da BNDES-Par (19%), moderna governança composta por Conselho de Administração com presença dos acionistas mais três conselheiros independentes, gestão profissional enxuta e resultados financeiros positivos e sustentáveis. Vide www.cct.com.br.

Ainda que a aplicação destas novas técnicas ocorra em ritmo mais lento que o esperado, há espaço suficiente de terra degradada para a eventual necessidade de novas áreas em atendimento aos requisitos do Renovabio, caminho viável mesmo com custos adicionais de recuperação da terra, se necessário.

Isto posto, no âmbito deste estudo, **não temos como assegurar que a expansão futura da oferta de cana-de-açúcar se dará apenas por meio de ganhos de produtividade**; assim, **partimos do princípio de que não haverá uso de terras produtivas deslocando produção de alimentos ou adentrando áreas protegidas ou florestas, adotando como hipótese que o crescimento da produção se dará basicamente via ganhos de produtividade.**

Biodiesel

No mesmo ano de lançamento do Proálcool, em 1975, o país também anunciou o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos, conhecido como Pró-Óleo. O Plano visava à geração de excedentes de óleo vegetal de forma a tornar os custos da sua produção competitivos em relação aos custos de derivados do petróleo. Esperava-se a regulamentação da mistura com 30% de óleo vegetal ao óleo diesel, podendo se tornar uma substituição integral no longo prazo. No entanto, apesar do avanço nas pesquisas nacionais em torno do biodiesel, o Pró-Óleo foi abandonado em 1986, após o preço do petróleo recuar no cenário externo.

O biodiesel retorna ao foco de atenção nacional em 2005, com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), visando à expansão da sua produção e uso no Brasil, melhoria da qualidade (buscando mitigar os problemas de oxidação que surgiram no início do programa) e maior competitividade do biocombustível. Ficou definido, conforme a Lei nº 11.097/2005, que o percentual mínimo obrigatório de adição de biodiesel ao óleo diesel seria de 2% a partir de 2008, com elevação gradual deste percentual nos anos seguintes⁶².

⁶² Estes percentuais seriam alterados por resoluções do CNPE (Conselho Nacional de Política Energética). A última, de 2022, estabelece percentual mínimo de mistura de 12% válido a partir de abril/2023, indo a 15% a partir de 2026.

O biodiesel é um biocombustível produzido por meio de fontes renováveis de origem vegetal, como óleos vegetais oriundos de oleaginosas (soja, dendê, canola, girassol) ou gordura animal. Conforme a lei 11.097/2005⁶³, que introduz o biodiesel na matriz energética brasileira, o biodiesel é definido como “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”.

Produção de biodiesel no Brasil

A fabricação de biodiesel no Brasil ocorre a partir da reação entre triglicerídeos e ácidos graxos com álcool.⁶⁴ As principais matérias primas para a produção do biodiesel são óleo de soja, materiais graxos, gorduras bovinas, dentre outras. De acordo com o relatório de análise de conjuntura de biocombustíveis da EPE (ano base 2022), o óleo de soja é a matéria prima mais representativa na produção de biodiesel, sendo responsável por 65,8% do total produzido⁶⁵.

Atualmente, existem 58 usinas produtoras de biodiesel no Brasil com capacidade instalada correspondente a 14 bilhões de litros. Entretanto, a produção em 2023 foi da ordem de 7,3 bilhões de litros. Em função de relativa sobrecapacidade, Resolução nº 16 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) elevou a mistura de biodiesel no diesel convencional para 12% a partir do dia 1 de abril de 2023, 14% em março de 2024 e 15% em 2025, antecipando em um ano o cronograma previsto na

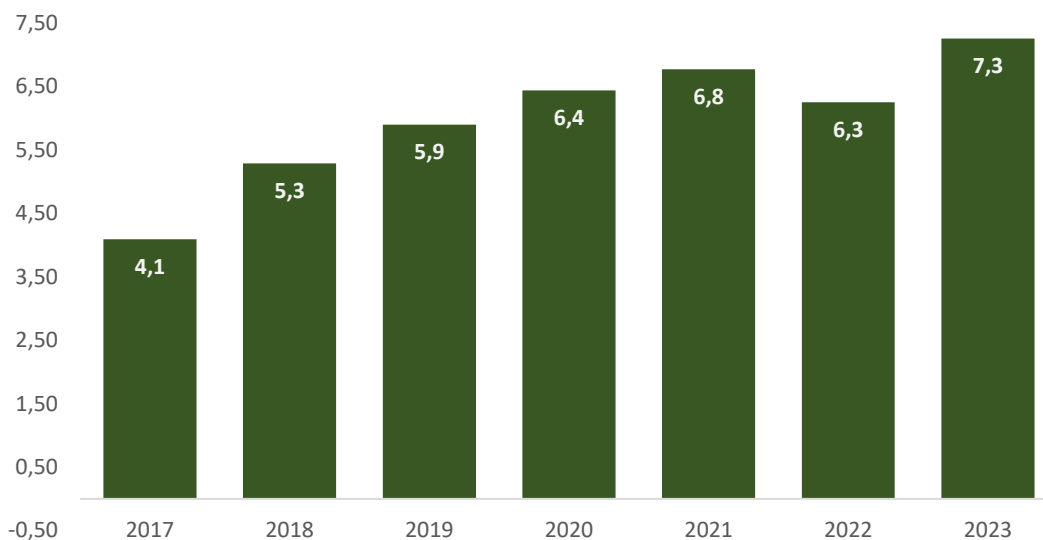
⁶³ Fonte: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm . / Acesso em 03/10/2023.

⁶⁴Fonte:<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nota-T%C3%A9cnica-Descarbonizac%C3%A3o-do-Setor-de-Transporte-Rodovi%C3%A1rio-Intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia.aspx> . /Acesso em 03/10/2023

⁶⁵ Fonte: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2022#:~:text=%E2%80%8BA%20d%C3%A9cima%20quarta%20edi%C3%A7%C3%A3o,do%20etanol%20oriundo%20do%20milho>. Acesso em: 03/10/2023.

resolução anterior⁶⁶. Dessa forma, é esperado um aumento do *share* de biodiesel nos próximos anos.

Gráfico 28 - Produção de biodiesel no Brasil (Bilhões de litros)



Fonte: ANP. Elaboração: LCA Consultores

4.2 Biogás, Biometano, Diesel Verde/HVO

Biogás e Biometano

O biogás é derivado da decomposição de materiais orgânicos que, uma vez decompostos, produzem uma mistura de gases com alta concentração de metano. O biometano, por sua vez, é um biocombustível gasoso derivado da purificação do biogás com composição de, no mínimo, 90% de metano⁶⁷.

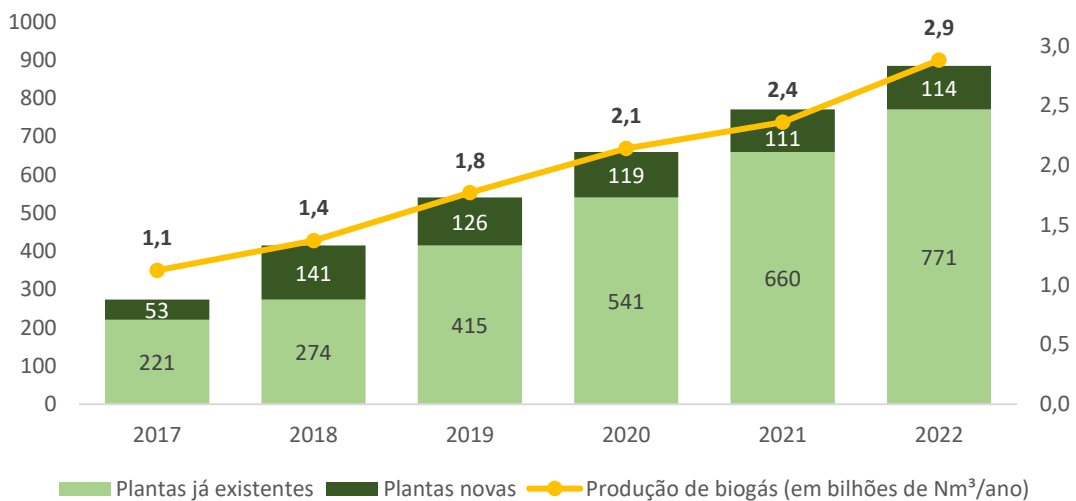
Produção de biogás e biometano

⁶⁶ Fonte: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/dezembro/cnpe-aprova-antecipacao-do-b14-para-marco-de-2024-e-b15-para-marco-de-2025-incentivando-a-producao-de-biocombustiveis-e-a-transicao-energetica>. Acesso em: 26/12/2023.

⁶⁷Fonte: Abiogás perguntas frequentes. Disponível em: <https://abiogas.org.br/perguntas-frequentes#:~:text=Biog%C3%A1s%20%C3%A9%20o%20g%C3%A1s%20bruto,de%20res%C3%ADduos%20e%20efluentes%20org%C3%A2nicos>.

Em 2022, foram produzidos 2,88 bilhões de Nm³/ano para aproveitamento energético, um aumento de 22% em relação ao ano anterior. Segundo a CiBiogás, o crescimento da produção de 2022 pode ser atribuído principalmente à operação das plantas de grande porte iniciada pelo setor de Saneamento. Além disso, do total de plantas com operação iniciada em 2022, 82% eram voltadas à energia elétrica, 10% à energia térmica e 8% ao biometano⁶⁸.

Gráfico 29 - Produção acumulada de biogás e nº de plantas em operação no Brasil



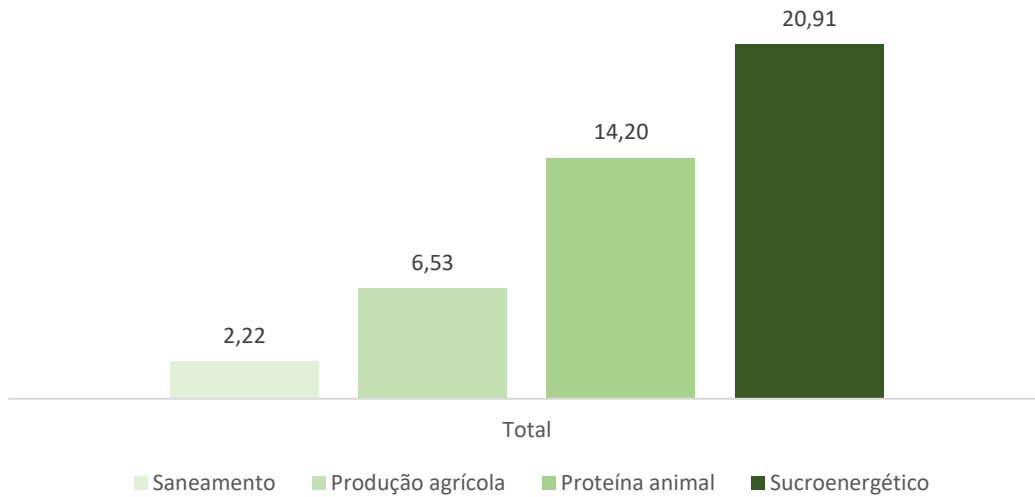
Fonte: CiBiogás⁶⁹. Elaboração: LCA Consultores

De acordo com a CiBiogás, o Brasil possui um potencial de produção teórico de longo-prazo equivalente a 84,6 bilhões de Nm³/ano. A Abiogás descreve o potencial teórico por setor e região, conforme gráficos abaixo:

⁶⁸ Fonte: Panorama do Biogás no Brasil 2022, CiBiogás, p.8. Acesso em: 29/09/2023.

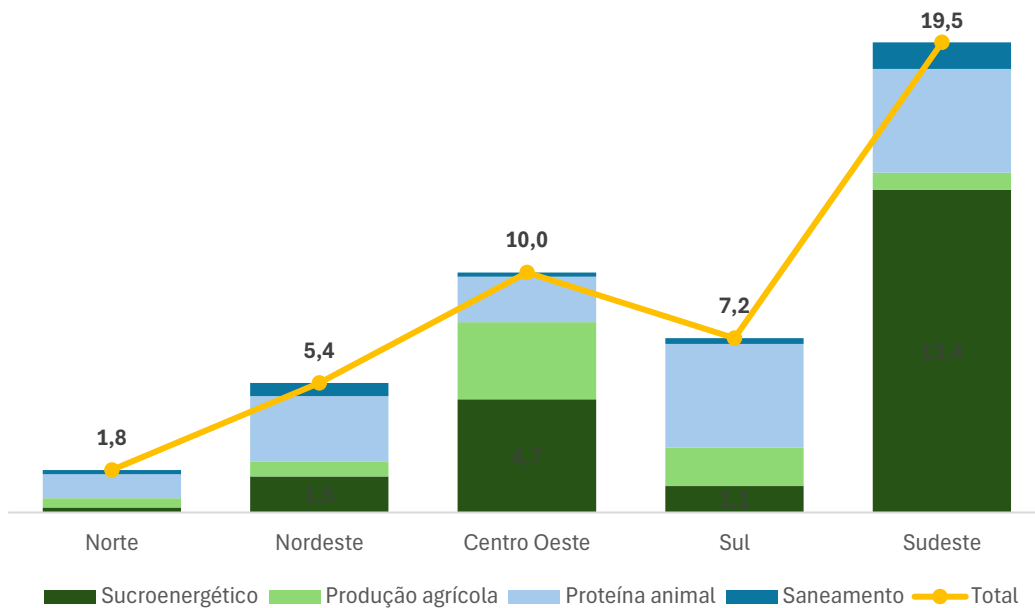
⁶⁹ Fonte: Panorama do Biogás no Brasil 2022, CiBiogás.

Gráfico 30 - Potencial de produção de biogás por setor – Brasil (Nm³/ano Bi)



Fonte: Abiogás,⁷⁰ 2021. Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 31 - Potencial de produção de biogás no Brasil (Nm³/ano Bilhões)



Fonte: Abiogás,⁷¹ 2021. Elaboração: LCA Consultores.

⁷⁰ Fonte: <https://abiogas.org.br/potencial-do-biogas-no-brasil/> Acessado em: 29/09/2023.

⁷¹ Fonte: <https://abiogas.org.br/potencial-do-biogas-no-brasil/> Acessado em: 29/09/2023.

No que se refere à estrutura produtiva, é possível classificar as plantas que fazem uso energético do biogás a partir de três categorias com base no volume de produção. Estruturas que produzem até 1 milhão de Nm³ por ano são classificadas como pequeno porte; empresas classificadas como médio porte produzem de 1 a 5 milhões de Nm³ por ano; por fim, uma produção acima de 5 milhões por ano equivale a uma empresa de grande porte. Abaixo, encontra-se a relação da estrutura produtiva brasileira de biogás até 2022:

Tabela 5 – Estrutura produtiva brasileira de biogás até 2022

Porte de Plantas	Nº de plantas	Participação no total de plantas	Produção de biogás (Nm ³ /ano)	Participação na produção total
Pequeno porte	686	77%	200.055.738	7%
Médio porte	130	15%	292.865.477	10%
Grande porte	69	8%	2.393.541.515	83%
Total	885	100%	2.886.462.730	100%

Fonte: CiBiogás⁷². Elaboração: LCA Consultores.

Além da classificação por porte, é possível categorizar a produção de biogás no Brasil a partir de três fontes: agropecuária, indústria e saneamento. Na agropecuária, o substrato é adquirido através do esterco animal, restos de ração, carcaça de animais etc. Já substrato a partir da indústria é obtido por resíduos oriundos do próprio processo industrial, com destaque para o setor sucroalcooleiro (palha, torta de cana e vinhaça). No caso do saneamento, considera-se como substrato os resíduos sólidos urbanos (RSU) depositados em aterros sanitários (usa-se a fração orgânica do RSU separado na fonte), restos alimentares e o esgoto sanitário⁷³.

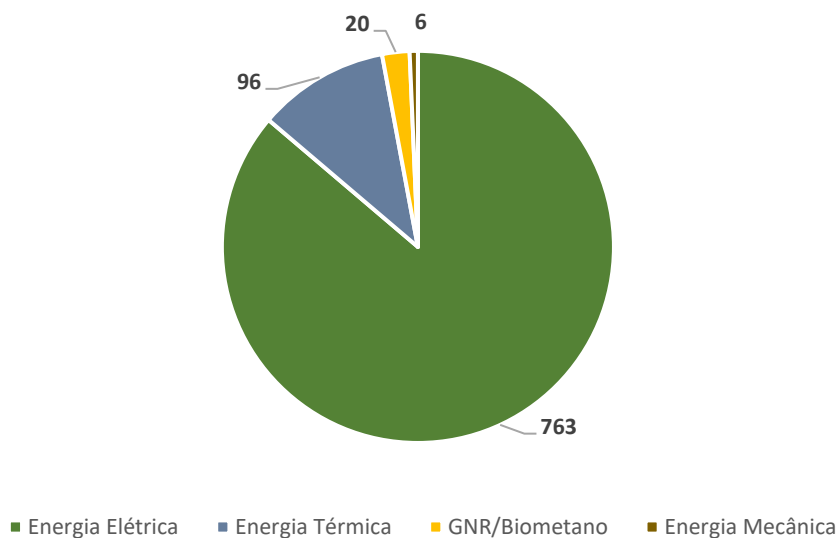
Em relação ao principal uso do biogás, tem-se que mais da metade das plantas em operação são destinadas à produção de energia elétrica, resultando em 763 plantas.

⁷² Fonte: Panorama do Biogás no Brasil 2022, CiBiogás, p.14.

⁷³ Fonte: Panorama do Biogás no Brasil 2022, CiBiogás, p.21.

Em seguida, o uso que se destaca é para a energia térmica, com 96 plantas em operação. Aquelas que possuem como principal uso a geração de biometano e de energia mecânica apresentam um menor número, com 20 e 6 plantas, respectivamente.⁷⁴

Gráfico 32 – Número de plantas de biogás em operação de acordo com o seu principal uso



Fonte: CiBiogás. Elaboração: LCA Consultores.

Embora a geração de biometano tenha pequena representatividade na produção de biogás, o número de plantas que obtém o biometano para a comercialização ou autoconsumo passou de 4 em 2021 para 20 em 2022, correspondendo a um crescimento de 82% do volume. A CiBiogás aponta que essas 20 plantas possuem uma capacidade de produção de biometano equivalente a 359,8 milhões de Nm³/ano,

⁷⁴ Fonte: Panorama do Biogás no Brasil 2022, CiBiogás, p.18. Acesso em: 29/09/2023

volume ainda incipiente, porém, frente ao consumo de diesel no país, da ordem de 63 bilhões de litros⁷⁵.

Economia circular: potencial do Biogás/Biometano para zerar a pegada de carbono do etanol.

A produção do biometano e sua utilização como substituto potencial do diesel tem diversas vantagens, com efeitos positivos irradiadores sobre toda cadeia agrícola e de transporte. A matéria-prima para sua produção (torta de cana, palha, folha e vinhaça) possui elevado teor de matéria orgânica – incluindo carbono que, por sua vez, pode ser capturado neste processo. A decomposição desta matéria orgânica em processo anaeróbico é o princípio para a produção do biogás; como resíduo após o processo de produção do biogás resta uma alta concentração de *potássio e enxofre* e quantidades significativas de *nitrogênio, cálcio e magnésio*, materiais ricos em nutrientes para a fertirrigação das lavouras.

Assim, o aproveitamento adequado dos resíduos da cana-de-açúcar permite a produção de biogás/biometano e de fertilizante organomineral. Com isso, boa parte dos elementos nocivos ao solo e aos corpos d'água presentes neste processo será reduzida drasticamente: efeitos de salinização e acidificação do solo, contaminação dos corpos d'água, lixiviação de nutrientes nas primeiras camadas do solo etc., fatores que atualmente contribuem para a pegada de carbono da cadeia do etanol.

A principal vantagem direta está na substituição do diesel como combustível, sobretudo em veículos pesados, incluindo veículos utilizados internamente nas lavouras e no transporte dentro das usinas. Com isso, tem-se um efeito indireto bastante relevante à medida que esta **substituição de diesel por biometano no consumo interno das lavouras irá reduzir ainda mais a pegada de carbono da**

⁷⁵ O consumo de diesel no Brasil foi da ordem de 63 bilhões de litros em 2022 e deve atingir 65 bilhões em 2023. Assim, o volume atual é da ordem de 0,1% do consumo total. Contando com novos projetos de biometano anunciados e já com investimentos iniciados, o volume de produção poderá chegar a algo como 2 bilhões de litros em 2025, ou perto de 3% do mercado de diesel. Já o potencial de produção, segundo a Abiogás, é da ordem de 44,5 bilhões de Nm³ considerando resíduos advindos do setor sucroalcooleiro, produção agrícola, proteína animal e saneamento ambiental (esgoto e resíduos sólidos), algo como 60% do consumo atual de diesel.

cadeia do etanol, de forma significativa. Estudos indicam que em uma usina sucroalcooleira com planta de biogás pode reduzir em até 26% as emissões de CO₂; caso produza e aplique fertilizantes organominerais em conjunto com a planta de biogás, as emissões podem se reduzir em até 89%, proporcionando um etanol com intensidade de carbono da ordem de 2,69 gCO₂/MJ.

Com isso, os efeitos tendem a ser favoráveis para toda a cadeia e para todo o setor de transporte (incluindo caminhões, máquinas agrícolas e veículos com motor *flexfuel*, parcela mais expressiva da frota de veículos leves no Brasil, que passariam a rodar com um combustível com emissão perto de zero e com potencial de substituir até cerca de 70% das importações de diesel) bem como para o setor agrícola e de fertilizantes⁷⁶.

Diesel Verde/HVO

Linhas gerais, diesel verde e HVO (uma rota específica de diesel verde) são produzidos à base de mistura de álcool (metanol sendo o mais comum) com óleos ou gorduras de origem renovável (biomassa animal ou vegetal). Por conter especificações químicas semelhantes às do diesel fóssil, a mistura de ambos pode ser feita nas mais diversas proporções ou mesmo na forma pura, com motores a ciclo diesel podendo ser alimentados apenas por diesel verde/HVO

No Brasil, as especificações são “A” para o diesel oriundo do petróleo, “B” para o biodiesel convencional (à base de óleo de soja, por exemplo) e “R” para o diesel verde/HVO. Assim, uma mistura de 80% de diesel fóssil com 10% de biodiesel e 10% de HVO seria designado B10R10.

O HVO tem sido produzido e consumido mundo afora, complementando combustíveis fósseis em diversos usos, incluindo navios (misturado ao óleo marítimo) e na indústria, por exemplo para geração de calor e vapor na indústria alimentícia. É o combustível cuja demanda mais cresce no mundo, inclusive no Brasil – a produção já ocorre na REPAR e deverá se expandir para várias outras refinarias da Petrobras

⁷⁶ Apenas a substituição de diesel por biometano tende a reduzir as emissões de GEE de cerca de 269 gCO₂EQ/Km para 73,7 gCO₂EQ/Km. Gauto et. al, 2023, op. Cit.

a curto e médio prazos, como Cubatão, Paulínia e Duque de Caxias. Por sua versatilidade, será um produto importante para atender à próxima fase (P8) do Proconve, reduzindo assim as emissões de GEE no segmento de veículos pesados.

4.3 Hidrogênio de baixo carbono

O Hidrogênio de baixo carbono é a molécula (H_2) produzida a partir de processos renováveis, via energia renovável ou biocombustíveis. Ainda incipiente em todo o mundo, tem sido foco de P&D e estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEAs) em diversos países em diferentes fases, com destaque para Austrália, Alemanha, Holanda, China (maior produtor mundial de hidrogênio à base de energia fóssil), EUA, Arábia Saudita, Chile e Brasil. Em todos estes mercados, predominam os projetos baseados em eletrólise e alimentados por energia renovável, com o desafio de tornarem-se competitivos mesmo tendo-se em vista os esforços para tornar renováveis as matrizes elétricas nestes países.

O Brasil conta novamente com vantagens competitivas relevantes neste aspecto: matriz majoritariamente renovável; elevado potencial de expansão das fontes eólica, solar-fotovoltaica, biomassa, hidráulica; preços competitivos considerando o segmento de geração; e existência de caminhos alternativos para a produção de hidrogênio (eletrólise, reforma-vapor via biomassa).

Para além de dezenas de projetos em desenvolvimento em diferentes estágios, o Brasil já conta com ao menos duas plantas-piloto operando há alguns meses: Itumbiara/GO, da Eletrobras, com 300kW e cerca de 5 toneladas/ano de H_2V em operação desde dezembro/2021; e Pecém/CE, da EDP, com 1,25 MW e cerca de 20 toneladas/ano de H_2V em operação desde dezembro/2023.

Em ambos os casos, são projetos de PD&I financiados por recursos do setor elétrico (P&D Aneel) com o intuito de mapear a operação (a Eletrobras já completou 18 meses de O&M de sua planta, reunindo vasto conhecimento sobre este processo) e todos os potenciais usos da molécula (segmentos industriais e de transportes que se utilizam de hidrogênio produzido via gás natural e outros processos demandantes de combustíveis fósseis).

Com isso, tem sido possível avançar em formas de contratação e modelos de negócio que otimizem este atendimento bem como em pré-contratos que detalhem as condições de atendimento e entrega do gás assim que estiver disponível em larga escala e condições de preço definidas⁷⁷.

Além destas plantas-piloto, há um projeto em construção na Bahia (planta da Unigel em Camaçari, com capacidade de 10 mil toneladas/ano de H₂ e 60 mil toneladas/ano de amônia) e diversos projetos em fase de EVTEA, a grande maioria considerando a principal rota de produção avaliada globalmente (via eletrólise da água, que consiste na separação das moléculas de H₂ e O₂).

Há outras rotas potenciais com diferentes perspectivas. Destaque-se o desenvolvimento pelo RCGI-USP de tecnologia de produção do hidrogênio de baixa emissão de carbono a partir do etanol por meio do método reforma-vapor⁷⁸: combinação de etanol e água em condições de temperatura (a 700°C) e pressão que permitem a separação das moléculas do etanol (C₂H₆O) em Hidrogênio, Oxigênio e CO₂ biogênico.⁷⁹

Esta inovação poderá vir a ser produzida em pequenas estações distribuídas, solucionando o grande desafio do transporte de hidrogênio a longas distâncias e contribuindo para viabilizar o avanço da motorização veicular via célula-combustível, aplicada tanto a veículos pesados quanto a leves. Ainda, há a possibilidade de substituição do gás natural fóssil por biometano para a produção de hidrogênio de baixo carbono, tecnicamente viável em função da similaridade entre as propriedades químicas destes gases – mas que ainda carecem de soluções de transporte do gás

⁷⁷ O caso da Eletrobras é notório: já foram assinados cerca de 50 NDAs para detalhar os processos produtivos usuários do gás e suas características, de forma a entender a melhor forma de atendimento e entrega do H₂V para que a substituição seja possível. Estes acordos têm gerado pré-contratos já formatados para a entrega do gás, de forma que estejam prontos para quando o H₂V estiver disponível em larga escala e com condições de preço definidas.

⁷⁸ Projeto-piloto envolvendo o Instituto de Engenharia de São Paulo, Poli-USP, Raízen, Toyota e Hytron. Com sede em Sumaré-SP, a Hytron passou a ser controlada pelo Grupo alemão NEA em novembro de 2020, com o que se posiciona globalmente para desenvolver diversas soluções em energia renovável com foco em hidrogênio.

⁷⁹ <https://revistapesquisa.fapesp.br/brasil-tera-planta-piloto-pioneira-para-produzir-hidrogenio-a-partir-de-etanol/>

100% renovável para uma planta de hidrogênio, normalmente associada ao tratamento do gás natural fóssil.

Não obstante o Brasil reúna diversas vantagens competitivas que o tornam um local particularmente atraente para a localização de plantas de hidrogênio de baixo carbono – destaque para a disponibilidade de energia renovável a um custo competitivo, considerando apenas a ponta da geração –, os estudos têm revelado um *gap* de competitividade na ponta final, quando se consideram todos os custos de produção do hidrogênio local por meio da eletrólise (logística, impostos e encargos sobre a energia elétrica, custo de capital etc.) bem como os subsídios que vêm sendo concedidos para plantas congêneres em regiões como EUA, UE, China e Oriente Médio⁸⁰, diferenciais de apoio público que influenciam decisões corporativas, afetam a competitividade relativa entre os países e geram incertezas quanto à viabilidade dos projetos em países que não podem contar com tais incentivos, como o Brasil.

Espera-se que o marco regulatório brasileiro e o sistema nacional de fomento à Ciência, Tecnologia e Inovação ofereçam incentivos capazes de reduzir os *gaps* de competitividade existentes em favor dos primeiros entrantes e projetos pioneiros, por tempo determinado e limites monetários, como forma de acelerar as respectivas etapas de desenvolvimento e dar escala comercial às plantas-piloto. Com isso, espera-se que soluções competitivas estejam maduras para entrar em operação até 2030, permitindo ao Brasil se emparelhar a países como China, EUA e Europa que vêm investindo significativamente em novas tecnologias sustentáveis de baixo carbono.

A elevada versatilidade do hidrogênio permite que as opções de mercado sejam elásticas, desde o uso como célula-combustível para o setor de transporte ao uso em processos industriais intensivos em energia – siderurgia, mineração, exploração e produção de petróleo, fertilizantes, transportes de longa distância como navegação,

⁸⁰ Atualmente, há três Projetos de Lei em discussão em Brasília: da Câmara, do Senado e do MME, sendo o da Câmara o mais adiantado e que iniciou os debates. Linhas gerais, definem os contornos do que caracteriza o hidrogênio verde (baixa emissão de GEE ou produção via fonte renovável exclusiva), concedem *status* de autprodutor de energia elétrica aos produtores de H₂V (com vantagens fiscais associadas) e buscam não definir as rotas tecnológicas a serem empregadas.

caminhões pesados, trens etc. Note-se que já há uma demanda expressiva por hidrogênio no mundo à base de gás natural (da ordem de 90 milhões de toneladas em 2022; estima-se algo entre 300 e 500 milhões de toneladas já em 2030) que pode ser substituída pela produção de hidrogênio nas diversas alternativas renováveis que vêm sendo desenvolvidas.

À medida que tais projetos de hidrogênio de baixo carbono amadurecem, espera-se que esta demanda seja crescentemente atendida por versões renováveis de hidrogênio, fabricado a partir de energia renovável ou biomassa. Esta constitui uma das frentes mais promissoras para promover, ao mesmo tempo, a descarbonização e a neointustrialização.

4.4 Veículos elétricos: condicionantes

O mercado de veículo elétricos no Brasil vem se expandindo rapidamente: a frota contabilizada até dezembro de 2023 soma 222.198 veículos, sendo cerca de 16,3% de BEVs (movidos apenas à bateria), 23,5% de PHEVs (híbridos *plugin*) e 60,1% de híbridos convencionais (bateria recarregável via movimentos do veículo e não por via elétrica). Os veículos que requerem estrutura de carregamento somam, portanto, cerca de 88 mil carros. Em sua maioria (100% no caso de BEVs e PHEVs), foram veículos importados durante vigência de uma política de alíquota zero do Imposto de Importação para carros elétricos e foram emplacados nos estados do Sudeste (destaque para São Paulo, com 35% dos emplacamentos), região Sul e DF (respectivamente, 5% e 7% do *market share*)⁸¹.

A alta expressiva das vendas destes veículos em 2023 se explica em boa medida pela estratégia dos principais players deste mercado em antecipação às mudanças na política comercial a partir de 2024, quando as alíquotas iniciam alta gradual até o patamar de 35% em 2027 (maiores detalhes sobre esta política no capítulo 5.7).

⁸¹ Fonte: Neocharge, apoiada em dados da Fenabrave e Anfavea. <https://www.neocharge.com.br/carros-eletricos-brasil>. Acesso em 30/03/2024.

Mesmo com a reoneração, espera-se que este mercado siga crescendo de forma importante, sendo mais uma das opções ao consumidor em linha com os compromissos de descarbonização. Porém, a mudança na política tarifária tende a abrir um novo momento para esta indústria: a produção local desses veículos por parte dos fabricantes tradicionais e de novos entrantes.

Com isso, duas questões tornam-se vitais para o futuro deste mercado, a saber: (i) os limites da estratégia de produção e localização (nacionalização de processos, partes e peças) por parte das empresas; e (ii) o avanço dos investimentos em estações de carregamento (eletropostos).

Em entrevistas realizadas com montadoras ao longo deste trabalho, é notável que todas elas tenham em seus planos mais de um modelo de veículo eletrificado para ser montado no Brasil nos próximos anos, dentre eles diversas versões híbridas bioelétricas (combustão em motor flex ou apenas à base de etanol mais o sistema elétrico à bateria) e veículos puramente elétricos, apenas à base de bateria.

Os planos de investimento dos modelos a serem lançados no país por dezenas de montadoras já são públicos e podem chegar a R\$ 120 bilhões nos próximos anos⁸². As diferenças se dão na estratégia de *supply-chain* a ser adotada por cada montadora e seu impacto sobre custos e preços de mercado, que por sua vez definirão a velocidade de crescimento das vendas e o ritmo de penetração destas novas modalidades na frota de veículos.

O foco tem sido o mercado de veículos leves e, em menor medida, comerciais leves, caminhões de curta distância (*last mile*) e ônibus. Da mesma forma, conta-se com um processo paulatino de nacionalização de partes e peças para os componentes mais relevantes nos novos veículos, com foco nos sistemas de comando do motor elétrico e sua integração com as demais funções do veículo, rumo a veículos cada vez mais autônomos e “inteligentes”, a médio e longo prazos. Apesar dos volumes ainda reduzidos, há investimentos sendo feitos na montagem local de baterias para veículos (da mesma forma que para o mercado de acumulação de energia), mas

⁸²Fonte: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2024/03/07/investimentos-de-montadoras-no-brasil-ultrapassam-os-r-100-bilhes-veja-investimentos-de-cada-uma.ghtml>;

ainda não há sinais claros de planos de nacionalização e localização das células, processo mais complexo que se inicia no refino de beneficiamento de minerais até a composição de catodos e anodos que compõem o núcleo da bateria. Assim, espera-se a montagem de kits, customização e estamparia dos módulos (conjunto de células de bateria a lítio); as células propriamente devem seguir sendo importadas⁸³.

Com relação ao perfil de eletrificação, o mais provável a curto e médio prazos é que os modelos elétricos sigam a estratégia de nicho por um bom tempo, com preços *premium* comparáveis a SUVs e Sedans de grande porte – da ordem de R\$ 200 mil. Há anúncios de modelos mais simples, com valores de entrada entre R\$ 110 e R\$ 120 mil, pensados para serem o segundo veículo de parcela da demanda também de elevada renda e, assim, não alterando significativamente a lógica de nicho⁸⁴.

Com relação à infraestrutura de carregamento de baterias, as entrevistas dão conta da necessidade de investimentos da ordem de US\$ 40 a 50 bilhões (R\$ 200 a 250 bilhões) ao longo das próximas décadas, e pressupõem estruturas de recarga dimensionadas para atender entre 10 (menor voltagem) e 50 veículos (maior voltagem) por unidade de carregamento. Para esta densidade, serão priorizadas as regiões metropolitanas e principais eixos urbanos de cada estado, basicamente na mesma mancha em que este mercado já vem se estruturando (capitais e regiões metropolitanas dos estados do SE, S e DF) e em direção às capitais da região NE, CO e N. Para o grosso dos municípios do interior dos Estados destas regiões, a estratégia será basicamente via veículos híbridos *não plugin*.

Diferentemente de outros países nos quais o Estado tem apoiado a instalação de estações de recarga de baterias, o **modelo de negócios** que deve prevalecer no **Brasil** é privado e independente, desenvolvido pelas principais montadoras, por concessionárias de energia e/ou de rodovia, redes de postos rodoviários e, ainda,

⁸³ A BYD vem se comprometendo a desenvolver a cadeia de baterias no Brasil e pode assumir compromissos de investimento por meio da assinatura de PPB (Processo Produtivo Básico) junto a MDIC e ao MCTI. Ainda não obtivemos, no entanto, maiores detalhes dos termos deste Acordo.

⁸⁴ Neste trabalho, adotamos premissas extraídas de entrevistas conduzidas com players do setor automotivo e anúncios feitos na imprensa especializada. Adotamos parâmetros médios para premissas como preço de novos modelos eletrificados e estimamos as vendas ao longo dos anos com base no *share* de veículos do mesmo segmento de mercado. Vide capítulo 6.

agentes privados em busca de oportunidades neste mercado nascente⁸⁵. Em países como EUA, China e diversos europeus, que há anos possuem políticas de apoio à pesquisa, desenvolvimento e inovação para toda a cadeia e um ecossistema já desenvolvido de produção de baterias e sistemas integrados de motorização elétrica, faz sentido apoiar também o último estágio, mais descentralizado, e com isso fazer deslançar a demanda por veículos elétricos com rebatimentos para todos os elos da cadeia. No Brasil, no entanto, estas iniciativas têm sido lideradas por empresas sem a presença do Estado, dado ser o último estágio deste complexo sem que tenha havido apoio às etapas anteriores da cadeia.

Assim, o ritmo de instalação destas estações deverá se dar em função do ritmo de avanço das vendas e do *market share* de veículos elétricos (BEV e PHEV), de forma a se evitar, por um lado, o excesso de capacidade (e baixa remuneração pelo investimento) e, por outro, longas filas de proprietários desses veículos em busca de recarga⁸⁶. De toda forma, está claro para todos os players que o incremento da estrutura de recarga é crucial para a expansão deste mercado, de forma que deve haver um alinhamento bastante fino entre demanda e oferta de estações para que esta infraestrutura não seja um gargalo para o crescimento das vendas.

Embora ainda não haja uma contagem oficial do número de pontos de recarga existentes no Brasil, estimam-se atualmente cerca de **3.500 pontos de carregamento** espalhados pelas grandes cidades brasileiras – aproximadamente **1 para cada 15 veículos** elétricos ou híbridos *plugin*, considerando o montante de 54 mil veículos de modelos à bateria recarregável emplacados até novembro de 2023.

As estimativas para o número de os veículos à bateria recarregável e para o número de pontos de carregamento necessários, naturalmente, variam muito para cada participante do mercado. Um número de referência segundo players mais focados

⁸⁵ Resolução ANEEL nr. 1000/2021, de 07/12/2021, estabelece regras para a prestação de serviços de recarga de forma independente e desassociada das obrigações e direitos das concessionárias de distribuição. Interessados devem pedir autorização à agência e à distribuidora local informando características como nr. de pontos de recarga em cada estações de carregamento, voltagem (V), potência nominal do modelo (kW), tipo de uso (público ou privado) e localização exata. O modelo de remuneração é livre e não afetará as tarifas das concessionárias.

⁸⁶ Resumo das entrevistas com montadoras.

neste mercado gira em torno de **1 milhão de veículos à bateria recarregável até 2035**, o que exigiria cerca de 65 mil pontos de carregamento – mantendo a atual razão de 1 para cada 15 veículos. Mantidas estas referências, os investimentos estimados para a infraestrutura de carregamento (da ordem de R\$ 200 a 250 bilhões) significam cerca de R\$ 3,8 milhões para cada um dos 65 mil pontos de carregamento até 2035⁸⁷.

A carga adicional de energia necessária para recarregar este volume estimado de veículos (segundo estimativas médias de eficiência e quilometragem rodada ao ano) é da ordem de **6 a 7 GW médios adicionais**, cerca de 6% de energia assegurada do sistema interligado nacional atual (SIN). Considerando que o investimento médio necessário para a produção de 1MW de energia renovável é da ordem de R\$ 6,5 milhões, tem-se que o investimento necessário em energia renovável para fazer frente à demanda adicional de carregamento das baterias vai de R\$ 39 a R\$ 45 bilhões, ou de 18% a 20% dos investimentos necessários para a infraestrutura de estações de carregamento.

Por fim, para completar o quadro de investimentos potenciais com esta nova cadeia nascente, deve-se avaliar as estratégias de localização das montadoras para estes novos modelos de motorização. No caso dos veículos híbridos, espera-se manter as atuais estratégias de *supply-chain* para os componentes do motor à combustão (índice de nacionalização da ordem de 85% a 90% dos veículos), ao que se deve acrescentar mais alguns elementos do motor elétrico – o próprio motor, peças de resfriamento e sistemas eletrônicos de integração entre ambos os motores e comandos inteligentes para o acionamento de cada sistema de forma a otimizar o rendimento e a eficiência do conjunto. Assim, estima-se que o conjunto de partes, peças e componentes de um veículo híbrido contenha, crescentemente, maior valor adicionado local relativamente aos veículos à combustão, com exceção dos primeiros anos nos quais o conteúdo adicional dos sistemas elétricos deverá ser importado, até que as estratégias de localização sejam concretizadas.

⁸⁷ Referências diversas coletadas em entrevistas com players do setor.

Cabe, ainda, diferenciar a capacidade e a eficiência gerada pela adição da bateria aos sistemas entre os diferentes veículos híbridos e os modelos 100% elétricos. Aqui, há que se diferenciar o padrão das baterias para HEVs mild e full e BEVs. Os híbridos leves (*mild hybrid*) têm baterias de menor voltagem (em torno de 12V) que apoiam o acionamento elétrico dos veículos, porém não os auxiliam em termos de torque e arranque, o que traz ganhos pouco expressivos de eficiência (entre 5% e 10%). Já os híbridos full possuem baterias em torno de 48V recarregáveis pelo funcionamento do motor e pelo sistema de frenagem, com o que ampliam a eficiência dos veículos em cerca de 30% (elevando, em média, de 13 km/l na versão turbo para 17 km/l ou mais). Por fim, os veículos 100% à bateria (BEV) têm baterias de cerca de 400V totalmente recarregáveis.

Sem contar com sistemas à combustão, os veículos acionados 100% à bateria simplificam em muito seus componentes: os sistemas de transmissão, frenagem, carburação e escape saem junto com o motor à combustão, e entram o motor elétrico, as baterias e sistemas de comando e controle de diferentes níveis de sofisticação para diferentes níveis de autonomia dos veículos. Espera-se um índice crescente de localização da montagem dos veículos e das baterias, mas não há sinais claros de que seja possível nacionalizar a produção das células destas baterias.

Sobre este aspecto, as impressões apreendidas em entrevistas com agentes do mercado revelam dificuldades para a localização destas células para baterias, basicamente pelo fato de exigirem elevada escala. Como são as mesmas células utilizadas em kits e módulos de tamanhos diversos para baterias de pequeno e grande porte (de 20 a 40 kW para HEVs a 400-500 kW para os PHEVs e BEVs), a viabilidade de uma planta de beneficiamento mineral e produção de células terá os mesmos requisitos de escala mínima para todos os modelos de motorização, independentemente do tamanho das baterias.

Em particular, o desenvolvimento local das etapas de mineração e beneficiamento de lítio e demais componentes minerais utilizados na produção de células para baterias de íons de lítio exige grandes volumes de investimento e é fortemente intensiva em energia elétrica. Por sua vez, não obstante as condições de geração de energia renovável no Brasil sejam muito favoráveis relativamente ao restante do

mundo, o custo final desta energia colocada no ponto de consumo (acrescida de encargos setoriais, tributos, contribuições e custos de transmissão) é bastante elevado comparado a outros países, o que irá requerer soluções especiais para assegurar a competitividade destas plantas no Brasil.

O ponto central aqui será o ritmo de convergência dos preços de mercado das baterias e, por consequência, dos veículos. Partindo de um patamar da ordem de R\$ 200 mil por veículo elétrico, nossas estimativas não vislumbram redução muito expressiva destes preços nas próximas décadas, em se cristalizando a atual rota tecnológica de baterias a lítio. Da mesma forma, o racional para as estimativas de *market-share* dos veículos elétricos e que fundamenta os planos das principais montadoras focalizadas nesta motorização – o **Total Cost of Ownership (TCO)** – ainda traz muitas incertezas e informações desconhecidas do grande público, o que deve fazer com que tais veículos sigam por bastante tempo restritos a um mercado de nicho, com foco em consumidores de elevado poder aquisitivo e usuários intensivos (aplicativos/táxi, entregas etc.)⁸⁸.

Com isso, considerando todos os desafios para o desenvolvimento de mercado dos veículos elétricos à bateria (infraestrutura, custo de aquisição, incertezas para algumas variáveis relevantes, ausência de incentivos fiscais-tributários, dificuldades para a estratégia de localização, entre outros), optamos por não estimar o *share* destes veículos no mercado com base neste modelo de propriedade; no lugar disso, baseamos nossas estimativas em estudos que estimam o licenciamento destes novos modelos e em respostas a questionários encaminhados às montadoras.

Os resultados serão apresentados mais adiante, no capítulo 6.

⁸⁸ O modelo leva em consideração o custo total de propriedade ou de permanência do veículo. As principais variáveis são: (i) custo de aquisição do veículo; (ii) custo do financiamento; (iii) custo de substituição da bateria; (iv) custo do combustível do veículo à combustão; (v) custo de manutenção; (vi) IPVA e (vii) valor residual para revenda. Destes, há pelo menos 3 pouco conhecidos (iii, v e vii), entre outras variáveis muito voláteis no mercado local (ii e vii). Estimativas presentes em estudo publicado pela Anfavea indicam custo da ordem de R\$ 20 mil/ano para veículos convencionais e em torno de R\$ 50 mil/ano para elétricos pequenos (2020), valor este que se estima convergir em 2035; para os veículos médios, a convergência se daria em 2031 para algo em torno de R\$ 35 mil/ano, ambos os casos adotando uso médio de 12 mil km/ano. Vide Anfavea, agosto de 2021.

5. Políticas Públicas: neutralidade tecnológica

5.1 Avanços dos programas de incentivo e novos desafios

É notória a construção, no Brasil, de uma sólida estrutura produtiva que reúne os setores agrícola, industrial e de serviços, base tecnológica autônoma e consistente, uma gama expressiva de empresas associadas a um sistema dinâmico de pesquisa e desenvolvimento apoiado por políticas públicas desenhadas ao longo de décadas (desde início dos anos 70's) com vistas a criar alternativas aos combustíveis fósseis.

Inicialmente pensadas para contornar crises de oferta e de preço do petróleo, as políticas de incentivo aos biocombustíveis no Brasil foram se transformando ao longo dos anos em vetores de inovação e desenvolvimento a serviço da descarbonização, antes mesmo que esta questão ocupasse o centro das iniciativas de política pública em todo o mundo. É natural, portanto, que o país dê sequência a estas iniciativas num momento em que as preocupações com a emissão de gases de efeito estufa (GEE) tomam conta das agendas públicas, e aperfeiçoe o arcabouço de iniciativas para avançar nesta pauta, incluindo todas as alternativas tecnológicas que têm surgido, mas sem perder de vista a linha e os benefícios alcançados.

Nos anos recentes, foram várias as frentes de avanço destas políticas, desde ações de indução ao desenvolvimento e à produção em larga escala de biocombustíveis, incentivo à produção local de automóveis e componentes mais eficientes no uso de combustíveis e capazes de incorporar plenamente os biocombustíveis produzidos localmente (com ênfase em motores flexfuel para o etanol e na mistura de biodiesel ao diesel), melhorias contínuas de produto e na formulação dos combustíveis fósseis visando à redução de emissões em geral, com ênfase nos gases de efeito estufa.

Um dos programas mais relevantes neste longo processo foi o Inovar-Auto⁸⁹, com isenções tributárias voltadas ao aperfeiçoamento da cadeia automotiva e desenvolvimento da capacidade de inovação e da engenharia local com foco no aumento da competitividade, na eficiência dos motores e na redução das emissões de GEE. Para além do aumento da capacidade de produção e da presença de uma ampla gama de fabricantes, todas empenhadas no desenvolvimento de uma cadeia produtiva local de partes, peças, componentes e engenharia, foram expressivos os avanços em direção à eficiência e à descarbonização, sobretudo no segmento de veículos leves, mas com rebatimentos importantes também para o segmento de veículos pesados. Não houve nestes primeiros programas, entretanto, avanços para incorporar as novas tecnologias nascentes em outras regiões do globo, sobretudo na Europa, EUA e na Ásia, e podem ser aperfeiçoadas para contemplá-las de alguma forma⁹⁰.

Em complemento, mas com foco no segmento agrícola e no beneficiamento de combustíveis, destacam-se políticas de incentivo à pesquisa e produção de combustíveis renováveis e na redução contínua da intensidade de carbono dos combustíveis fósseis (RenovaBio e, mais recentemente, Combustível do Futuro).

Nas seções seguintes, iremos abordar cada uma das principais políticas neste campo. Antes, vale abordar com brevidade um dos principais pilares da descarbonização no Brasil introduzido em maio de 1986, o **Proconve**. Instituído pela Resolução Conama nr. 18, de 6 de maio de 1986, seus objetivos eram explicitamente: (i) reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores para atender aos padrões de qualidade do ar; (ii) promover o desenvolvimento tecnológico local tanto na engenharia automotiva quanto em métodos e equipamentos para a medição da emissão de poluentes; (iii) promover a melhoria das características técnicas dos

⁸⁹ Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, criado pela Lei 12.715/2012.

⁹⁰ Mais recentemente, os principais objetivos deste programa foram incorporados ao programa Rota2030, pensado para os aperfeiçoamentos que vêm sendo vislumbrados para esta cadeia.

combustíveis com fins de reduzir as emissões de poluentes; entre outras medidas de conscientização, inspeção e avaliação dos avanços do programa.

Com isso, foram estipuladas metas de redução de poluentes (monóxido de carbono, óxido de hidrogênio, hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, fuligem, material particulado etc.) ao longo do tempo, sendo que as últimas fases de implementação destas metas foram janeiro de 2015 (máquinas agrícolas) e janeiro de 2022 (L7 para leves e P8 para caminhões e ônibus).

Os resultados e o alcance do Proconve são expressivos: modernização do parque industrial automotivo comandado por engenharia local e de novas tecnologias, melhoria da qualidade dos combustíveis automotivos, novos investimentos e geração de empregos qualificados, novas tecnologias e sistemas de medição e acompanhamento de resultados da emissões etc. Dado o momento de sua implementação, a regulação não introduziu metas para a emissão de GEE (basicamente CO₂); por este motivo, as metas basearam-se em medidas mais restritas do tanque à roda, sem que tenha havido necessidade de se levar em conta aspectos relacionados aos efeitos climáticos. Com isso, as metas do PROCONVE podem conflitar com este novo arcabouço, havendo a necessidade de conciliá-las.

Este tópico será retomado mais adiante, nas recomendações de políticas públicas. Em seguida, passaremos a abordar os principais instrumentos de política vigentes, alguns em processo de atualização e/ou revisão.

5.2 MOVER – Mobilidade Verde

O Programa MOVER, instituído pela Lei nº 13.755/2018 e renomeado em 2023 como “Mobilidade Verde”, compreende um regime automotivo sucessor ao Programa Inovar-Auto, que vigorou de 2013 a 2017, depois sucedido pelo Programa Rota 2030. O MOVER possui como principais objetivos o aumento da competitividade dos veículos nacionais, a redução das emissões de gases de efeito estufa e o aumento da segurança veicular a partir de novas tecnologias. Com isso, o desenvolvimento de

tecnologias não é focado apenas nos automóveis, mas também no aprimoramento da indústria e da gestão.

O Programa possui três pilares com as seguintes características⁹¹:

I – Eficiência Energética e Segurança Veicular: Adesão ao Programa de Etiquetagem do INMETRO (PBEV); atendimento a um nível mínimo de eficiência energética com base na média dos veículos comercializados em 12 meses; aos veículos pesados, a eficiência energética deverá ser avaliada a partir do programa europeu **Vecto** (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool⁹²); e bônus de 1 p.p. no Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para aqueles que superarem a meta de eficiência energética em 5,5%, e bônus de 2 p.p. para a superação da meta em 10,5%.

II – Incentivos para Pesquisa e Desenvolvimento: a partir de um montante mínimo de investimento em pesquisa e desenvolvimento no país, as empresas podem descontar do Imposto de Renda valores equivalentes a até 30% desses dispêndios; o investimento mínimo é estabelecido com base em três categorias (veículos leves, pesados e autopeças), sendo fixado em 1,2% da receita operacional bruta para os veículos leves e as autopeças (base 2023) e em 0,75% para veículos pesados.

III – Regime de Autopeças: Ao estabelecer um regime tributário para autopeças não produzidas localmente, este pilar institui que as empresas inscritas no Sistema Integrado de Comércio Exterior (Siscomex) podem dispor de 2% do valor aduaneiro para o investimento em pesquisa e desenvolvimento local; é possível investir em diversas áreas, incluindo em conectividade veicular (que contempla veículos autônomos, comunicação entre veículos e a infraestrutura etc.). O gerenciamento dos recursos é realizado pela Financiadora de Inovação e Pesquisa (Finep), Associação Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep) e pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI).

⁹¹ Fonte: <https://anfavea.com.br/site/rota-2030/>. Acesso em: 21/09/2023.

⁹² Ferramenta VECTO ainda não foi implementada, apesar de previsão legal. Vide capítulo de recomendações de políticas públicas.

O MOVER é uma política pública de longo prazo e compreendendo três ciclos quinquenais que totalizam quinze anos. Ademais, é estabelecido que a cada ciclo haja a revisão da política e a reorientação das metas e dos instrumentos necessários. Como exposto na descrição acima, o primeiro ciclo (2019-2023) contou com a redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) voltada às empresas que investem em pesquisa e desenvolvimento. No entanto, o segundo ciclo (2024-2028) contará com uma “compensação financeira” nas alíquotas do IPI, que ainda será definida a partir das mudanças na Reforma Tributária⁹³.

Analisando os possíveis benefícios e impactos da medida, entende-se que a sua contribuição principal está relacionada com o aumento da segurança, eficiência energética e competitividade do setor automotivo nacional. Ademais, o fornecimento de estímulos fiscais voltados à pesquisa e desenvolvimento do setor pode gerar ganhos de escala na produção, contribuir para a sustentabilidade da matriz energética e melhorar a capacidade doméstica de exportação. Por fim, destaca-se ainda a sincronização com regulamentações de segurança veicular de outros países sul-americanos.

5.3 Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio)

Instituída pela Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) tem como objetivo ampliar a produção e o uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira. Para tanto, considera-se a relação entre a eficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa, a fim de contribuir para a descarbonização da matriz de transportes brasileira, segurança energética e para a previsibilidade do mercado⁹⁴. O funcionamento do programa conta com metas nacionais determinadas pelo governo acerca da emissão dos gases de efeito estufa pela matriz de combustíveis, de forma que tais metas de

⁹³ Fonte: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2023/09/13/montadoras-que-produzem-no-brasil-terao-mais-vantagens-no-rota-2030-diz-presidente-da-anfavea.ghtml>. Acesso em: 21/09/2023.

⁹⁴ Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1>. Acesso em: 21/09/2023.

âmbito nacional sejam desdobradas em metas individuais compulsórias aos distribuidores de combustíveis anualmente, de acordo com suas participações no mercado de combustíveis fósseis, nos termos da Resolução ANP nº 791/2019, de 12 de junho de 2019⁹⁵.

Por meio da certificação da produção de biocombustíveis, será atribuída uma Nota de Eficiência Energético-Ambiental, em valor inversamente proporcional à intensidade de carbono do biocombustível produzido, para cada produtor e importador de biocombustível. Desse modo, a nota refletirá a contribuição individual de cada agente produtor para a mitigação de uma quantidade específica de gases de efeito estufa em relação ao seu substituto fóssil (em termos de toneladas de CO₂ equivalente). O processo de certificação da produção de biocombustíveis considera a origem da biomassa energética (matéria-prima do biocombustível) de forma que a produção seja oriunda de um imóvel com Cadastro Ambiental Rural (CAR) ativo ou pendente, que não possua ocorrência de supressão de vegetação nativa a partir dos marcos legais do RenovaBio (volume elegível).

Para aderir ao programa, os produtores e importadores de biocombustíveis necessitam contratar firmas inspetoras credenciadas na Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a fim de realizar a Certificação de Biocombustível e validar a Nota de Eficiência Energético-Ambiental e o volume elegível. O **Certificado da Produção Eficiente de Biocombustíveis (CBio)** possui validade de três anos, contados a partir da data de sua aprovação pela ANP, e somente poderá ser emitido pela firma inspetora após a aprovação do processo pela Agência – caracterizando uma dupla certificação, o que confere ao programa um atestado mais seguro de conformidade com práticas sustentáveis de produção e manejo ambientais.

Em síntese, os principais instrumentos do RenovaBio podem ser resumidos em três eixos:

⁹⁵ Fonte: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/funcionamento>. Acesso em: 21/09/2023.

I – Metas de redução de emissões dos gases de efeito estufa: De acordo com as definições do Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) fica encarregado de definir anualmente as metas nacionais de descarbonização, as quais são referentes a um período de dez anos. Além disso, o Decreto nº 9.888/2019 instituiu o Comitê da Política Nacional de Biocombustíveis (Comitê RenovaBio) como responsável pela governança do Programa, congregando transversalmente os principais órgãos do Poder Executivo que possuem, dentre outras competências, a de recomendar as metas de descarbonização ao CNPE.

II – Certificação da produção dos biocombustíveis: Os produtores de biocombustíveis (emissores primários) participam do Programa de forma voluntária, de modo a certificar sua produção com base na Análise de Ciclo de Vida (ACV), a partir da Resolução ANP nº 758/2018, e, como resultado, recebem as Notas de Eficiência Energético-Ambiental. Estas, por sua vez, são multiplicadas pelo volume de biocombustível comercializado que atende aos critérios de elegibilidade do programa, de forma a resultar na quantidade de créditos de descarbonização (CBios) que o produtor poderá emitir e negociar no mercado, respeitando o estabelecido pela Portaria MME nº 419/2019.

III – Crédito de descarbonização (CBio): As metas nacionais e as metas individuais são definidas em unidades de CBios, um ativo ambiental equivalente a uma tonelada de CO₂ não emitida pelo uso de biocombustíveis, sendo negociado em balcão a partir da regulamentação presente na Portaria MME nº 419, de 26 de novembro de 2019. A compra de CBios pelos distribuidores e aposentados (retirados em definitivo de circulação do mercado) deve ser realizada até 31 de março do ano seguinte para comprovação do cumprimento da meta que lhes foram atribuídas pela ANP.

Recentemente, o montante financeiro referente aos CBIOs ultrapassou o valor de R\$8 bilhões, no âmbito da política do Renovabio. Até o mês de setembro de 2023, foram emitidos 102,8 milhões de crédito, o que se traduz em uma redução correspondente de 102,8 milhões de toneladas de CO₂ equivalente que deixaram de

ser lançadas na atmosfera. Além disso, destaca-se que o valor médio de cada CBIO foi negociado ao preço de R\$ 111,63⁹⁶.

5.4 Programa Combustível do Futuro

O Programa Combustível do Futuro foi concebido por meio da Resolução CNPE nº 07, de 20 de abril de 2021⁹⁷ e passou a tramitar no Congresso Nacional em setembro de 2023 (PL 4516/2023), tendo sido analisado e votado pela Câmara recentemente (março de 2024). O seu principal objetivo é **expandir o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono**, de modo a integrar políticas públicas já existentes – como o RenovaBio, MOVER e o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – e estimular inovações no setor energético. O projeto compreende 5 eixos principais⁹⁸, os quais são citados abaixo:

I – Programa Nacional de Combustível Sustentável de Aviação (ProBioQAV): O estabelecimento do programa visa incentivar a produção e o uso nacional do Combustível Sustentável de Aviação (SAF, sigla em inglês); a partir do aumento gradual da mistura SAF ao querosene de aviação fóssil, espera-se que as emissões de dióxido de carbono sejam reduzidas em 1% a partir de 2027, alcançando a redução de 10% em 2037;

II – Programa Nacional do Diesel Verde (PNDV): Institui um percentual obrigatório de acréscimo do diesel verde ao diesel fóssil, a ser avaliado pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) a partir da disponibilidade da matéria-prima, a capacidade e a localização; também será observado o impacto desse percentual no preço ao consumidor final e a competitividade do diesel verde produzido internamente frente aos mercados internacionais. Espera-se com este mandato um

⁹⁶ Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/volume-de-negociacao-de-creditos-de-descarbonizacao-cbios-ultrapassa-os-r-8-bilhoes/> Acesso em: 15/12/2023.

⁹⁷ Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro>. Acesso em: 21/09/2023.

⁹⁸ Fonte: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/09/governo-entrega-projeto-de-lei-do-combustivel-do-futuro-ao-congresso>. Acesso em: 21/09/2023.

percentual inicial mínimo de 3% em 2027, que poderá ser incrementado de acordo com avaliações regulares de efeitos, oferta e demanda conduzidas pelo CNPE;

III – Regulamentação do combustível sintético: A regulamentação de tal combustível, conhecido internacionalmente como “e-Fuel”, objetiva contribuir com a redução das emissões de gases poluentes sem que seja necessário modificar as peças ou os componentes dos motores; sua respectiva legislação será atribuída à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP);

IV – Captura e estocagem geológica de dióxido de carbono (CO₂): Captura do gás de efeito estufa na atmosfera para a estocagem via injeção em reservatórios subterrâneos; seu marco regulatório será atribuído à ANP;

V – Novos limites de mistura do etanol anidro à gasolina: Alteração da mistura, que passará do teor mínimo de 18% para 22% e do teor máximo de 27,5% para 30%, de modo a elevar a octanagem do combustível.

Além disso, é possível destacar outros objetivos, tais como a integração de políticas públicas relacionadas ao tema em questão (RenovaBio, Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, Proconve, MOVER, Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular e o CONPET), e a adoção da metodologia do ciclo de vida completo – considerando as emissões do “Poço à Roda”, isto é, desde a geração de energia, extração, produção, até o uso do combustível. Também são propostos estudos de melhoria da qualidade dos combustíveis e estudos a fim de viabilizar a tecnologia de célula-combustível a etanol. Por fim, espera-se que sejam realizadas ações para informar adequadamente ao consumidor visando à escolha consciente do veículo e da fonte de energia a partir do ciclo de vida dos combustíveis.

Desse modo, entende-se que, além de estimular o avanço tecnológico no segmento energético, a integração de políticas públicas prevista no programa contribuirá para o alcance de uma matriz energética nacional mais sustentável.

Como aperfeiçoamento ao PL 4516/2023, espera-se que seja contemplado o Programa Nacional de Biometano com vistas a incentivar a pesquisa, produção,

comercialização e uso do biometano e do biogás na matriz energética brasileira⁹⁹. Com isso, espera-se o reconhecimento da importância do aproveitamento do biometano e do biogás de produção local para alavancar o cumprimento dos compromissos internacionais de descarbonização assumidos pelo Brasil, seja na substituição progressiva de combustíveis fósseis por congêneres renováveis, seja no aprofundamento da descarbonização da própria cadeia de etanol e outros biocombustíveis à medida que incentiva o uso eficiente de resíduos destes processos produtivos e contribui para a economia circular. Assim, a minuta da Emenda Aditiva terá as seguintes diretrizes principais:

- (i) O reconhecimento da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) como a mais acurada para mensurar a diminuição das emissões de GEE e os benefícios ambientais de cada rota;
- (ii) Incentivo à produção e consumo do biometano e do biogás, como através da criação de linhas de crédito com taxas de juros diferenciadas para projetos relacionados à cadeia de produção do biometano e biogás, bem como à fabricação, conversão, comercialização, aquisição e utilização de veículos movidos a tais combustíveis;
- (iii) Criação de incentivos aos projetos de infraestrutura para a conexão de plantas de biometano às redes de distribuição e transporte de gás natural, além da criação de polos logísticos regionais em áreas distantes;
- (iv) Criação de incentivos fiscais e tributários para acelerar o aumento da oferta destes combustíveis;
- (v) Criação de direito de depreciação acelerada para fins de apuração de Imposto de Renda para as pessoas jurídicas tributadas com base no lucro real que invistam em projetos relacionados à cadeia de biometano;
- (vi) Criação de mecanismo de Troca Operacional entre transportadores e distribuidoras a fim de possibilitar a injeção física do biometano na rede de distribuição com acesso comercial à rede de transporte.

⁹⁹ Fonte: conforme Minuta de Emenda Aditiva ao PL 4.516/2023, em discussão na Câmara de Deputados.

O Programa Nacional de Biometano também sugere a adoção de um patamar de demanda mínima ao estabelecer a necessidade de comprovação anual da utilização e/ou comercialização de biometano, de acordo com o CNPE. Tal quantidade mínima deverá ser de, inicialmente, 1% do volume total do gás natural comercializado, autoproduzido, ou autoimportado, sendo aumentada progressivamente até 10%, conforme fixação a ser estabelecida pelo CNPE. Com isso, espera-se que o percentual mínimo deva entrar em vigor a partir de 1º de janeiro de 2026, atingindo o percentual de 10% em até 1º de janeiro de 2030.

A nova versão do PL 4.516/2023 também deverá incluir mandato para redução de emissões no setor aéreo como forma de incentivar o desenvolvimento do SAF – Combustível de Aviação Sustentável. O mandato deverá estabelecer redução de 1% a 10% das emissões entre 2027 e 2037, estimulando com isso a produção de SAF à base de etanol, em processo semelhante ao utilizado na produção de biometano.

Algumas companhias – como TAP e LATAM, com aeronaves A320neo da Airbus. Segundo a ICAO (Organização Internacional de Aviação Civil), 360 mil voos comerciais já utilizaram SAF em 97 aeroportos diferentes, sendo o SAF fabricado especialmente a partir da junção de ácidos graxos hidroprocessados (à base de gordura vegetal e animal, como óleo de soja recuperado e sebo de resíduos da indústria de proteína animal). A ICAO é responsável por um acordo internacional de zeragem das emissões de GEE até 2050, começando com metas de redução em 2027. O Brasil é um dos signatários¹⁰⁰.

Por fim, o PL 4.516/2023 deve ainda contemplar um bônus via CBio (certificado de crédito de carbono previsto no RenovaBio) de 20% para o etanol produzido com métodos de captura de carbono (cerca de R\$ 23 por tonelada de CO₂ capturada); este etanol, uma vez exportado para os EUA, poderá ainda beneficiar-se do crédito previsto pelo *Low Carbon Fuel Standard Credit* (US\$ 200/ton CO₂). Mecanismo parecido está sendo pensado para incentivar a produção de bunker para transporte marítimo à base de resíduos vegetais e animais.

¹⁰⁰ Vide <https://epbr.com.br/o-que-e-saf-conheca-as-diferentes-rotas-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>. Acessado em 19/12/2023.

5.5 Nova Lei do Gás

Sucessora da Lei 11.909/2009, responsável por introduzir o regime de concessão, a Nova Lei do Gás (Lei 14.134/2021) moderniza o marco legal do setor, em linha com o Novo Mercado do Gás, lançado em 2019. A Nova Lei tem como objetivo estimular a indústria de gás natural, de modo a aumentar a concorrência do setor, expandir a rede de transporte, diminuir os preços, disseminar o uso do gás natural e atrair investimentos¹⁰¹. No geral, o regulamento compreende todos os elos da cadeia de gás natural, com exceção da exploração e produção, abordadas na Lei do Petróleo, e dos serviços locais de gás canalizado, que são responsabilidade dos estados. Destacam-se quatro pontos:

I – Transporte de gás: São estabelecidas regras para a construção de gasodutos de transportes, que deixa de ser realizada via processo de concessão (em que era necessária a licitação por parte do poder público) para ser feita via processo de autorização (modelo praticado em outros países), conferindo maior rapidez e eficiência ao procedimento; esses gasodutos devem ser classificados a partir de critérios técnicos de diâmetros, pressão e extensão; e o sistema de transporte de gás natural poderá conter mais de uma área de mercado de capacidade, as quais serão reguladas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) de forma a favorecer o processo de fusão entre elas.

II – Estocagem de gás natural: A ANP pode se organizar com outras agências para regular a estocagem subterrânea de gás natural em formações geológicas que produzem ou já produziram hidrocarbonetos; a Agência também é responsável por regular o acesso de terceiros a essas instalações de estocagem; e a extração residual de hidrocarbonetos líquidos durante a estocagem deve ocorrer por regime simplificado, de acordo com a regulação da ANP.

III – Distribuição e comercialização de gás natural: É responsabilidade da ANP estabelecer, como condição da obtenção e manutenção de autorizações para as

¹⁰¹Fonte: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/06/regulamentacao-da-nova-lei-do-gas-busca-atrair-mais-investimentos-ao-pais>. Acesso em: 26/09/2023.

atividades concorrenciais da indústria do gás natural, normas que impeçam a influência das empresas autorizadas na gestão comercial e nas decisões de investimento de distribuidoras de gás canalizado; a Agência deve acompanhar o funcionamento do mercado de gás natural, o qual deve ter uma formação de preços transparente, regulando também o funcionamento do mercado atacadista de gás natural; e é necessário criar estímulos para a ampliação da concorrência, com diagnósticos elaborados pela ANP acerca da concentração e concorrência na oferta de gás natural no Brasil.

IV – Pacto Nacional: É necessária a articulação do Ministério de Minas e Energia e da ANP com os estados para aperfeiçoar as normas e o desenvolvimento da indústria do gás natural.

Outro ponto de destaque é o estabelecimento de que o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural tenham um tratamento regulatório equivalente ao gás natural, contanto que sejam atendidas as especificações delimitadas pela ANP¹⁰². Entre os benefícios da Lei 14.134/2021, entende-se que há espaço para a expansão da rede de gasodutos para regiões não atendidas, podendo ser uma alternativa para aumentar a competitividade de alguns setores como alimentos, cerâmica, transporte de carga etc.

Além disso, medidas que incentivem o aumento da oferta de biometano (via linhas específicas de financiamento, mandatos que assegurem demanda e auxiliem na constituição de garantias aos financiamentos etc.) e a supervisão da ANP (e do CADE) a fim de evitar a concentração de mercado, podem contribuir para a maior competitividade ao setor.

5.6 Programa Temporário de Carros Populares

O Programa de Carros Populares foi elaborado pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC) em parceria com o Ministério da Fazenda,

¹⁰²Fonte: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/DECRETON10.712DE2DEJUNHODE2021DECRETON10.PDF>. Acesso em: 26/09/2023.

sendo regulamentado pela Medida Provisória nº 1.175/2023. De caráter temporário, seu lançamento ocorreu em junho de 2023, encerrando-se em julho do mesmo ano. O objetivo principal do Programa foi reduzir os preços de veículos populares de acordo com critérios relacionados à sustentabilidade econômica, ambiental e a nacionalidade, de forma a estimular a cadeia automotiva, diminuir as emissões de carbono e renovar a frota brasileira¹⁰³.

Cabe destaque ao apoio ao segmento de veículos de transporte de cargas: o Programa deu foco para a renovação da frota com contrapartida do consumidor. Ficou estabelecido que, para ter direito aos descontos, seria necessária a entrega do veículo com mais de 20 anos de uso em posse da pessoa física ou empresa. Com isso, conforme as faixas detalhadas na MP, os abatimentos poderiam ser de R\$ 33.600,00 até R\$ 99.400,00. Dessa forma, compreende-se que, além de estimular o setor automotivo através da redução de preços, o Programa buscou contribuir para que a frota de caminhões no Brasil se renovasse e se tornasse mais sustentável ao incentivar a adoção de veículos menos poluentes.

Este programa, em que pese não estar conectado às demais frentes voltadas à descarbonização, trouxe elementos positivos que podem ser úteis para futuros programas, a exemplo de mecanismos do incentivo à renovação de frota e garantia à aposentadoria (ou reconversão) de veículos com mais de 20 anos de vida.

5.7 Imposto de Importação sobre veículos eletrificados

Em 10/11/2023, o GECEX-CAMEX Comitê Executivo de Gestão da Câmara de Comércio Exterior restabeleceu alíquotas do Imposto de Importação (II) de forma gradual e criou cotas para importação com isenção até 2026.

¹⁰³ Fonte: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/junho/programa-reduz-preco-de-carros-caminhoes-e-onibus-com-desconto-direto-ao-consumidor>. Acesso em: 26/09/2023.

As alíquotas passarão a valer com os seguintes percentuais e datas, conforme figura abaixo:

Imagem 3 – Alíquotas de Imposto de Importação (%)

Resolução GECEX-CAMEX Nov/2023: Alíquotas de Imposto de Importação (%)				
Categorias	jan/24	jul/24	jul/25	jun/26
Híbridos (HEV)	15%	25%	30%	35%
Híbridos plugin (PHEV)	12%	20%	28%	35%
Elétricos 100% bateria (BEV)	10%	18%	25%	35%
Elétricos para carga	20%	35%		

Fonte: GECEX-CAMEX.

Já o regime de cotas autorizando a importação sob o regime de isenção determinou os seguintes limites (em milhões de dólares dos EUA) válidos até as datas descritas abaixo:

Imagem 4 – Cotas para importação sob isenção (US\$ Milhões).

Resolução GECEX-CAMEX Nov/2023: Cotas para importação sob isenção (US\$ MM)				
Categorias	jan/24	jul/24	jul/25	jun/26
Híbridos (HEV)	130	130	97	43
Híbridos plugin (PHEV)	226	226	169	75
Elétricos 100% bateria (BEV)	283	283	226	141
Elétricos para carga	20	20	13	6

Fonte: GECEX-CAMEX.

Nas declarações públicas que se seguiram à medida, sob comando do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC), o restabelecimento das alíquotas de importação indica claramente o caminho esperado para a produção local desses veículos, sob condições de concorrência que sempre prevaleceram para a cadeia automotiva; e marca um novo ciclo de industrialização no Brasil de produtos que representam o núcleo das ações globais de descarbonização adotadas pelos países

mais desenvolvidos e que, no Brasil, também se tornou um caminho incontornável, ainda que não o único.

5.8 Aspectos geopolíticos

Questões geopolíticas têm determinado as principais linhas de política pública em apoio à transição energética dos países centrais, para além das preocupações com os efeitos climáticos e a tendência de aquecimento do planeta. A base das principais políticas desenhadas tanto nos EUA como UE e nos países asiáticos (China, em particular) tem se apoiado no tripé descarbonização-reindustrialização-tecnologia, cujo objetivo central passa necessariamente pela produção local de bens de alto valor e pela busca de liderança tecnológica nestas frentes, com destaque para a cadeia de **baterias** (e toda gama de tecnologia de produto e processos que envolvem a pesquisa de novos minerais e materiais em processos físico-químicos inovadores), **sistemas eletrônicos de integração e automação** (avanços em nanotecnologia e em semicondutores cada vez menores e mais potentes para a automação de toda gama de produtos) e novos combustíveis renováveis, com destaque para o hidrogênio de baixo carbono e combustíveis sintéticos (SAF, entre outros).

Além de apoio à produção em elevada escala visando à exportação, os incentivos governamentais direcionados à aquisição de veículos elétricos, renovação de frota e à substituição de combustíveis fósseis por renováveis estão associados à produção local dos novos produtos, a programas de aumento progressivo do conteúdo local ou em áreas de livre comércio com os países que os apoiam e financiam. No centro destes programas, há sempre o apoio maciço do Estado na forma de pesquisa e desenvolvimento de novas rotas tecnológicas e incentivos fiscais e financeiros ao desenvolvimento de protótipos até sua maturidade em escala comercial.

No caso brasileiro, há um campo profícuo de desenvolvimento de produtos e processos que atendem a estes mesmos princípios: **descarbonizar, reindustrializar e inovar com tecnologia própria**. Por diversas razões, há vantagens comparativas e um longo processo de aprendizado, investimentos e desenvolvimento de

biocombustíveis renováveis de amplo espectro, indo do etanol ao biometano, biodiesel, diesel verde e SAF até o hidrogênio de baixo carbono, com vantagens que incluem a disponibilidade de condições especiais para a produção de energia renovável, a complexidade da cadeia do agronegócio (inovadora no uso da terra, no avanço de pesquisa e desenvolvimento de genética própria) e na tecnologia de beneficiamento industrial para o processamento destes produtos.

É preciso ter em vista a necessidade de avanços contínuos nos processos de inovação e melhorias técnicas e a necessidade de expansão do mercado para outras geografias, de forma que o país não fique desconectado das principais tendências globais. Neste sentido, três pontos são relevantes no debate:

- (i) As conexões da indústria do biocombustível com o resto do mundo podem se dar por meio da definição e padronização dos combustíveis para os diversos usos: para caminhões (diesel verde, biometano), aviões (SAF) e navios (bunker verde) para o atendimento do mercado global;
- (ii) Há países com capacidade e interesse no desenvolvimento da **rota do etanol** para uso misto em motores à combustão ou híbridos sem ou com bateria (casos de EUA, México, Índia, Indonésia, Colômbia e Panamá, entre outros), países que produzem etanol à base de cana-de-açúcar (Índia, Indonésia, Colômbia, Panamá) ou do milho (EUA, México); para estes países, pode-se desenvolver tecnologias para as quais o Brasil tem domínio e processos produtivos maduros, como é o caso de motores e componentes flexfuel e, mais recentemente, híbridos com motor elétrico sem ou com carregador;
- (iii) A entrada em nosso mercado de veículos elétricos à bateria já foi iniciada e deve se dar por meio da internalização do máximo possível de partes, peças, componentes e tecnologia necessários à fabricação dos veículos localmente, de forma a atender a outro princípio fundamental deste tripé: produção local e multiplicação dos estímulos de investimento e demanda para a geração de empregos, renda e tecnologia no país.

Estes pontos serão retomados na sessão específica sobre recomendação de políticas logo adiante, no capítulo 7.

6. Cenários de eletrificação e os impactos ambientais e econômicos

6.1 Cenários para a evolução da demanda

Para uma compreensão adequada dos impactos das rotas tecnológicas e do efeito das políticas de descarbonização para o setor de transporte faz-se necessário estimar seu resultado em termos da emissão de CO_{2eq} relativamente às condições atuais e seu impacto na economia em termos da dinâmica de geração de empregos e renda, valor adicionado, arrecadação etc.

Assim, o ponto de partida para esta avaliação é estimar as vendas (licenciamento) de novos veículos e o avanço da frota circulante tanto para os veículos leves quanto para os veículos pesados para, em seguida, traçarmos hipóteses fundamentadas em pesquisas e entrevistas com a cadeia produtiva para a decomposição destas vendas/frota nos diversos modelos de motorização em desenvolvimento por parte dos fabricantes.

Nossos cenários buscam estimar a frota circulante até 2050, quando os compromissos do Brasil assumem emissões neutras. A seguir, descreve-se a metodologia adotada para as projeções e seus resultados.

Modelo de projeção de frota

A evolução da frota circulante depende de novos veículos licenciados e do sucateamento dos mais antigos. Descreveremos inicialmente a metodologia de projeção de licenciamentos.

Veículos Leves¹⁰⁴

¹⁰⁴ Na presente abordagem, veículos leves engloba automóveis leves e comerciais leves.

Novos licenciamentos: Com o intuito de estimar os novos licenciamentos, durante o horizonte de tempo desse estudo, utilizou-se um modelo econométrico de regressão múltipla em série de tempo.

Dado que este mercado deverá mudar bastante nos próximos anos em virtude da entrada de novos produtos, optamos por projetar apenas as grandes categorias, e não segmentos e/ou modelos específicos. Assim, os modelos refletem os licenciamentos de automóveis e comerciais leves, ambos dessazonalizados para levar em conta a influência dos diferentes meses do ano.

As variáveis explicativas para ambos os modelos são:

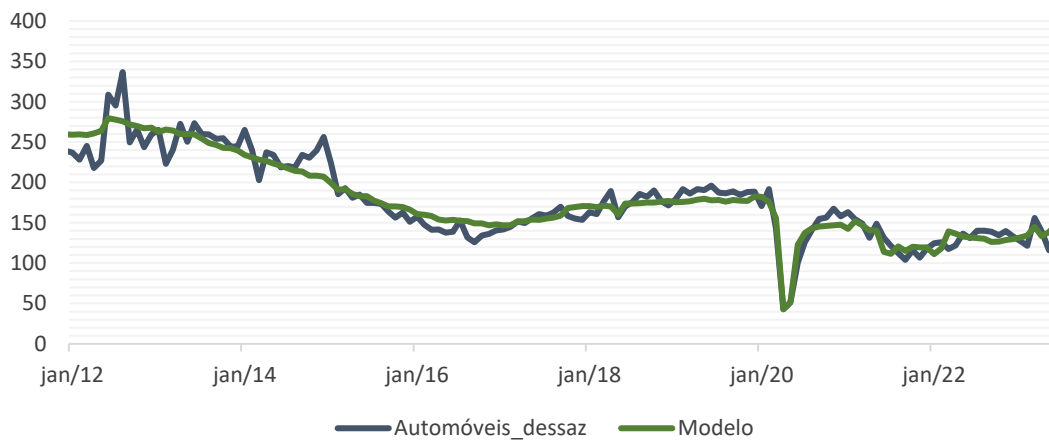
- massa de renda mensal real, que leva em conta rendimentos do trabalho, previdência e estímulos governamentais deflacionados pelo IPCA (elasticidade positiva);
- prazo médio de financiamento (em meses) para aquisição de veículos por Pessoas Físicas (elasticidade positiva);
- taxa de juros real para financiamento de aquisição de veículos por Pessoas Físicas (elasticidade negativa);
- IPCA de automóveis novos deflacionado pelo IPCA geral (elasticidade negativa);
- *dummy* da pandemia entre abril e maio de 2020 (elasticidade negativa);
- *dummy* de escassez de semicondutores (elasticidade negativa);
- indicador de mobilidade das pessoas, para mensurar impacto do isolamento social (Covid-19) (elasticidade negativa).

A **elasticidade** indica como as variáveis explicativas impactam, em média, a variável dependente (licenciamentos). Assim, uma elasticidade positiva indica que uma mudança na variável explicativa irá resultar em uma variação positiva da variável dependente (licenciamentos). Como exemplo, o aumento da massa de renda real ou do prazo dos financiamentos provocará, em média, tudo o mais constante, aumento dos novos licenciamentos de automóveis leves e comerciais leves; ao contrário para

as demais variáveis cuja elasticidade é negativa. Além disso, a magnitude do aumento/decrecimento será quantificada pelo valor da elasticidade.

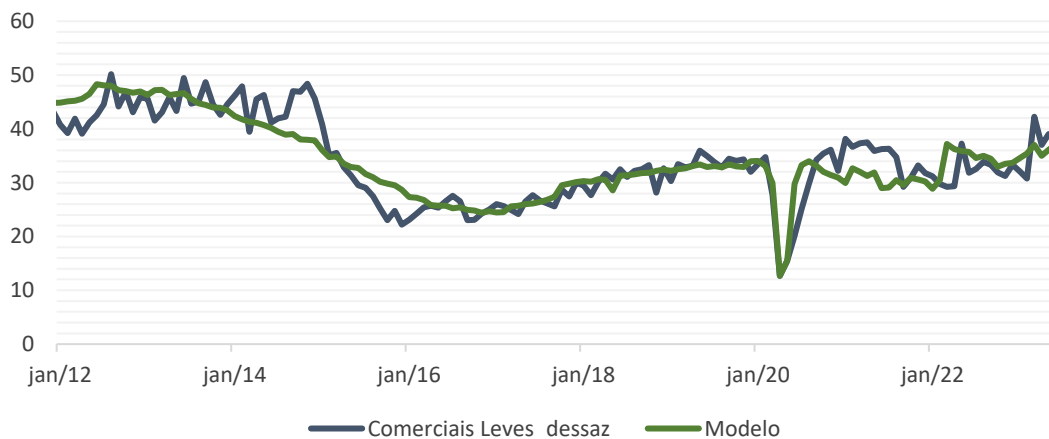
Os modelos apresentaram uma aderência relevante se comparada com a série histórica de dados efetivos, indicando elevado poder preditivo dos modelos. Os gráficos de aderência entre o modelo e os dados efetivos, tanto para automóveis quanto para comerciais leves, são apresentados abaixo.

Gráfico 33 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos automóveis leves aos dados efetivos (Mil unidades).



Fonte: LCA Consultores.

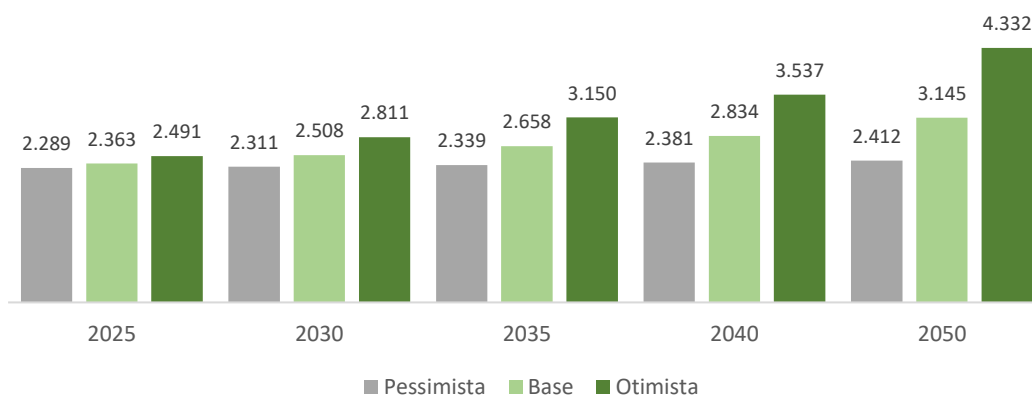
Gráfico 34 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos comerciais leves aos dados efetivos (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

Neste contexto, estimamos o comportamento futuro das variáveis explicativas para três cenários: base, otimista e pessimista. A depender de cada cenário, as variáveis explicativas apresentam valores diferentes que, por sua vez, irão resultar em volumes diferentes de licenciamento. A seguir, apresenta-se gráfico contendo os licenciamentos futuros, em termos anuais, em cada um dos cenários trabalhados.

Gráfico 35 – Licenciamentos de veículos leves: comparação de cenários (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

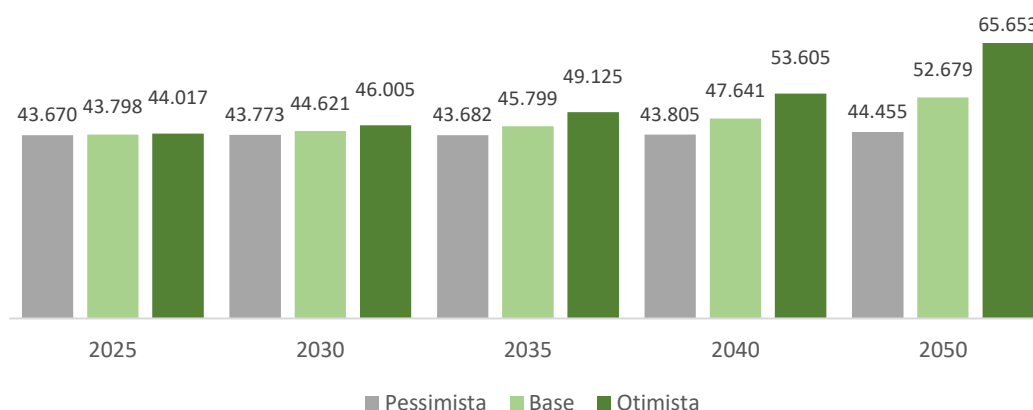
Ato contínuo, ao acrescentar estes novos licenciamentos à frota atual estimamos uma curva de sucateamento de frota, partindo do pressuposto de que o veículo mais antigo tenha, no máximo, 40 anos e que a idade média da frota seja de 10,33 anos (ou 10 anos e 4 meses) para veículos leves, parâmetros consistentes com a metodologia do Sindipeças¹⁰⁵.

Assim, fundamentado na estimativa de novos licenciamentos e na taxa de sucateamento de frota explicitados acima, foi possível estimar a frota circulante de

¹⁰⁵Estes números são consistentes com a frota circulante brasileira. De acordo o relatório de frota circulante edição 2023 do Sindipeças, existiam 14 veículos com 40 anos vida em 2022 no Brasil. Vide Relatório de frota circulante edição de 2023 (https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2023/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf). O relatório aponta que a idade média da frota de automóveis é de 10 ano e 9 meses e de comerciais leves é de 8 anos e 9 meses. Ponderando as idades dessas frota pelo total de automóveis de cada uma, encontra-se uma idade média de 10,48 anos ou 10 anos e 5,7 meses.

veículos leves para os três cenários acima mencionados. Abaixo, os gráficos apresentam a frota circulantes do total de veículos leves para os cenários base, otimista e pessimista.

Gráfico 36 – Frota de veículos leves: comparação de cenários (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

Veículos Pesados¹⁰⁶

Novos licenciamentos: De maneira análoga ao modelo de veículos leves, estimou-se os novos licenciamentos dos veículos pesados com base em um modelo econométrico. Os modelos foram calibrados para projetar caminhões e ônibus, ambos dessazonalizado. As variáveis dependentes são:

- formação Bruta de Capital Fixo (elasticidade positiva);
- razão entre a Concessão de Financiamentos para veículos em termos reais e a massa de renda real (elasticidade positiva);
- PIB do Agronegócio (elasticidade positiva);
- confiança da indústria (elasticidade positiva);

¹⁰⁶ Neste caso, veículos pesados se refere a caminhões e ônibus.

- confiança do consumidor (elasticidade positiva);
- câmbio real (elasticidade positiva);
- licenciamento de automóveis (elasticidade positiva);
- desembolsos do BNDES em % da massa de renda real (elasticidade positiva);
- licenciamento de Caminhões dessazonalizado (elasticidade positiva);
- indicador de mobilidade das pessoas, para mensurar impacto do isolamento social (Covid-19) (elasticidade negativa);
- dummy de escassez de semicondutores (elasticidade negativa);
- dummy em 2016 (elasticidade negativa).

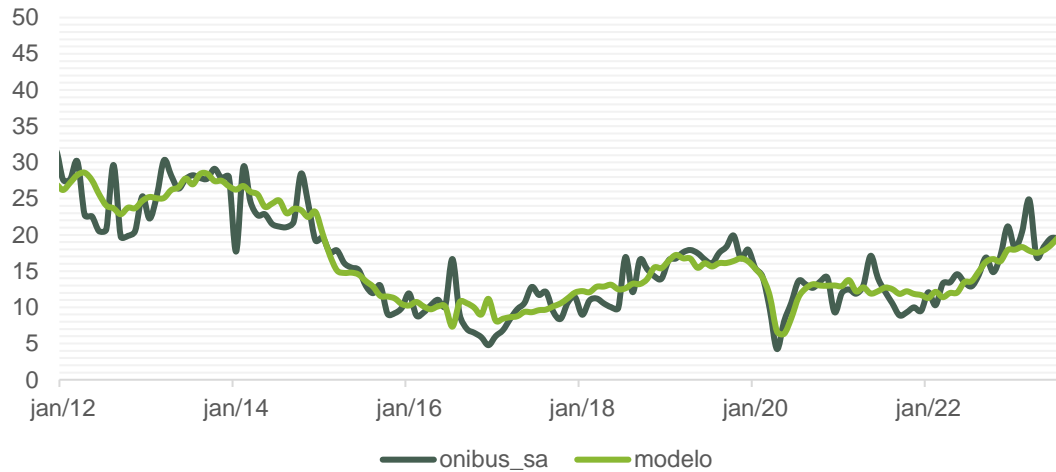
De forma semelhante ao modelo para veículos leves, a aderência do modelo é bastante expressiva ao ser comparada com a série histórica, garantindo a robustez da previsibilidade do modelo. Os gráficos a seguir indicam a aderência entre o modelo e a série histórica tanto para caminhões quanto para ônibus.

Gráfico 37 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos caminhões aos dados efetivos (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

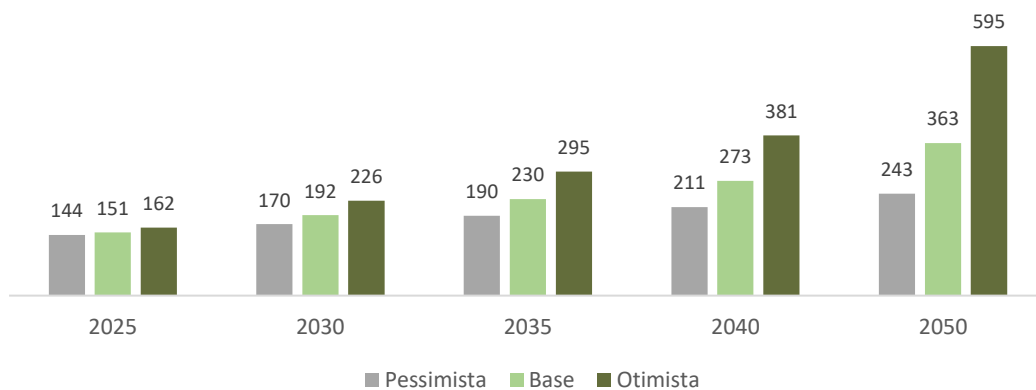
Gráfico 38 – Aderência do modelo de estimação de licenciamentos ôniibus aos dados efetivos (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

Em linha com o explicitado para o modelo de veículos leves, trabalhou-se também com os cenários macroeconômicos base, otimista e pessimista. Abaixo, as projeções dos licenciamentos, em base anual, para os cenários mencionados.

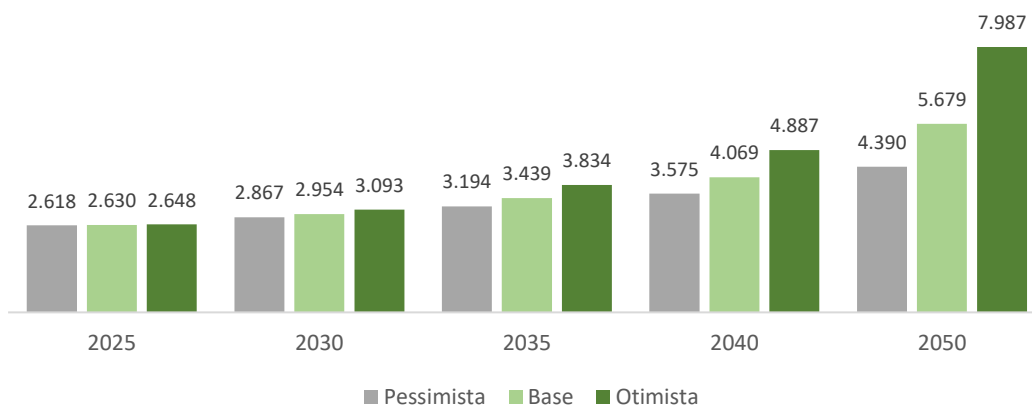
Gráfico 39 – Licenciamentos de veículos pesados: comparação de cenários (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

De forma similar ao estabelecido para os veículos leves, foi possível estimar a frota futura de veículos pesados. O gráfico, na sequência, apresenta o total de frota para os cenários base, otimista e pessimista.

Gráfico 40 – Frota de veículos pesados: comparação de cenários (Mil unidades)



Fonte: LCA Consultores.

6.2 Descarbonização

Em termos ambientais, as múltiplas rotas tecnológicas serão determinantes para o resultado da matriz de emissões do setor de transportes em termos do volume de carbono. Como mencionado no item anterior, nosso intuito ao estimar a frota futura de veículos leves e pesados advém da necessidade de se avaliar, de forma quantitativa, os impactos que cada rota promoverá em termos de descarbonização e do multiplicador de estímulos de demanda sobre a geração de empregos e renda, PIB, valor da produção etc.

A fim de mensurar o montante de carbono emitido pelos diversos caminhos possíveis, é mandatório estabelecer algumas premissas e parâmetros tanto para a composição de frota quanto para os veículos em si e as suas respectivas fontes de propulsão. No que diz respeito à metodologia de apuração das emissões, optou-se pelo **ciclo de vida do poço à roda**, a despeito das ressalvas já mencionadas sobre tal método, complementada por uma metodologia mais ampla (“Berço à Roda”) utilizada por

Gauto et.al (2023). Ressalte-se novamente que ainda há pouca convergência nos dados e parâmetros para uma avaliação do ciclo da vida completo (berço ao túmulo).

Sendo assim, com o objetivo de estimar as emissões para o horizonte de tempo estabelecido, ou seja, até 2050, a análise abaixo abrangerá a mensuração de CO₂EQ dos veículos leves.

Emissões poço à roda - Veículos Leves

Conforme demonstrado nas seções 3 e 4, nos últimos anos, a rota tecnológica dos veículos eletrificados vem despontando como caminho por excelência de descarbonização nos países desenvolvidos. Contudo, tal rota é ainda incipiente no caso brasileiro, no qual há uma dominância clara dos veículos *flex fuel* tanto em termos de participação percentual da frota quanto de licenciamentos ao ano.

Isto posto, estabelecemos hipóteses para três cenários distintos no que diz respeito à evolução da eletrificação da frota veicular brasileira.

- i. **Cenário Status Quo:** cenário de controle no qual a composição da frota mantém as proporções sobre o licenciamento apresentadas em 2023 aplicadas sobre os licenciamentos projetados. Deste modo, os eletrificados serão 1,73% em 2030; 2,57% em 2035; 3,17% em 2040 e 3,84% em 2050, no somatório dos veículos HEV e BEV;
- ii. **Convergência Global Híbridos:** a frota de veículos eletrificados converge para o padrão global de eletrificação, porém com preponderância dos veículos híbridos, que saltam de 4,5% em 2030 para 11,13% em 2035; 20,89% em 2040 e 48,76% em 2050. No somatório com os BEV, a frota eletrificada total atinge 5,59%; 13,82%; 25,79% e 59,31% nos anos de 2030, 2035, 2040 e 2050, respectivamente;
- iii. **Convergência BEV:** o Brasil converge para o padrão global de eletrificação da sua frota de veículos, com preponderância de veículos elétricos puros. Em 2030, os veículos BEV atingem 3,37% da frota total; 9,43% em 2035; 17,95% em 2040 e 40,19% em 2050. Juntamente com os HEV, os veículos

eletrificados totais compõem 5,59%; 13,82%; 24,93% e 53,23% da frota entre 2030 e 2050.

O cálculo de emissões de CO₂eq, na abordagem poço à roda, foi simulado conforme a cartilha da AEA “Do poço à roda veículos leves”. Com base nesta cartilha, adotamos o passo-a-passo para o cálculo de emissões do poço à roda para veículos do tipo monocombustível e veículos Flex (combustão ou híbrido).

Os principais parâmetros utilizados para medir as emissões dos veículos automotivos na mencionada metodologia são a intensidade de carbono dos energéticos, medida em CO₂/MJ, e o consumo energético dos veículos, medido MJ/Km. Em síntese, a intensidade de carbono é o parâmetro relativo aos combustíveis ou energéticos e o consumo energético dos veículos é um padrão de medida da eficiência veicular.

No caso dos veículos monocombustível, ou seja, movidos apenas por um tipo de combustível, o cálculo de CO₂eq é feito da seguinte maneira:

$$CO_{2EQ} = \text{Consumo Energético} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{Km}} \right) \times \text{Intensidade de Carbono} \left(\frac{\text{gCO}_{2EQ}}{\text{MJ}} \right)$$

Para os veículos *flex* (a combustão ou híbridos), o cálculo é um pouco mais complexo:

$$CO_{2EQ} = CE_{100} \times IC_{100} \times FU + CE_{22} \times IC_{22} \times (1 - FU)$$

No qual:

CE_{100} é o consumo energético do etanol hidratado;

IC_{100} é a intensidade de carbono do etanol hidratado;

FU é o fator de uso de etanol por energia, vale dizer, demanda total de etanol sobre a demanda total de combustíveis do ciclo Otto;

CE_{22} é o consumo energético de gasolina E22;

IC_{22} é a intensidade de carbono da gasolina E22;

Apesar da equação estar utilizando o E22, pois é a metodologia utilizada para testes no INMETRO, nossas simulações levaram em conta os dados da E27.

O consumo energético de etanol e da gasolina, nesse caso, tem uma metodologia de cálculo específica, dado que o veículo não é monocombustível. Abaixo, demonstra-se a equação de cálculo:

$$CE_{100} = \left(\frac{20,09}{\left(\frac{(Autonomia\ estrada \left[\frac{km}{L} \right] * 1,3466)}{1 - (Autonomia\ estrada \left[\frac{km}{L} \right] * 0,0032389)} \right)} \right) \times 0,45 + \left(\frac{20,09}{\left(\frac{(Autonomia\ cidade \left[\frac{km}{L} \right] * 1,18053)}{1 - (Autonomia\ cidade \left[\frac{km}{L} \right] * 0,0076712)} \right)} \right) \times 0,55$$

$$CE_{22} = \left(\frac{28,99}{\left(\frac{(Autonomia\ estrada \left[\frac{km}{L} \right] * 1,3466)}{1 - (Autonomia\ estrada \left[\frac{km}{L} \right] * 0,0032389)} \right)} \right) \times 0,45 + \left(\frac{28,99}{\left(\frac{(Autonomia\ cidade \left[\frac{km}{L} \right] * 1,18053)}{1 - (Autonomia\ cidade \left[\frac{km}{L} \right] * 0,0076712)} \right)} \right) \times 0,55$$

Em relação aos dados de intensidade de carbono dos energéticos e fator de uso, a cartilha da AEA e a nota técnica da EPE estabelecem valores para os anos de 2019, 2020, 2027 e 2032, para os seguintes energéticos: Etanol hidratado (E100); Eletricidade; Gasolina (E27); Diesel BX. Apresenta-se a seguir os dados¹⁰⁷:

Tabela 6 - Intensidade de Carbono dos Energéticos (CO₂/MJ)

	2020	2030	2035	2040	2050
Etanol Hidratado (E100)	28,52	24,63	21,61	21,61	21,61
Eletricidade	31,77	22,58	26,62	26,62	26,62
Gasolina C(E27)	75,07	74,3	73,73	73,73	73,73
Diesel BX ¹	79,84	77,6	77,26	77,26	77,26

Fonte: EPE108 e AEA. Elaborado: LCA Consultores.

Nota 1: Teor de biodiesel 11,3% (2020) e 15% (2030 em diante). Fonte EPE.

¹⁰⁷ Mantivemos constantes os dados de intensidade de carbono e fator de uso para os anos de 2040 e 2050.

¹⁰⁸ EPE, (2022). Nota técnica “Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário – Intensidade de carbono das fontes de energia”. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nota-T%C3%A9cnica-Descarbonizacao-do-Setor-de-Transporte-Rodoviario-Intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia.aspx>

Tabela 7 – Fator de uso

	2019	2020	2027	2032	2040	2050
Fator de uso	0,3	0,28	0,38	0,38	0,38	0,38

Fonte: AEA. Elaborado: LCA Consultores.

Os dados de consumo energético dos veículos são fornecidos pelo Inmetro, por meio do PBEV (Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular)¹⁰⁹. Com as duas classes de dados mencionadas acima é possível estimar as emissões de CO_{2eq} dos veículos das mais diversas propulsões da frota de veículos leves brasileira.

A título de exemplificação, é possível mensurar as emissões de CO₂ de um dos veículos flex mais vendidos no Brasil¹¹⁰, em 2023: o Onix. Utilizando os dados do PBEV 2023 e a intensidade de carbono referente a 2020, verifica-se que o veículo emite 90,9 gCO₂/km. Na comparação com um veículo híbrido, o Toyota Corolla Altis HV (my 2024), por exemplo, apresenta uma emissão de 75,4 gCO₂/km, sendo considerado um dos veículos menos poluentes do mercado local¹¹¹. Por outro lado, no caso dos veículos elétricos, um dos mais comercializados, segundo a Fenabreve, o BYD Dolphin emite 13,3 gCO₂/Km. Destaca-se que os veículos mencionados foram utilizados para representar os respectivos modelos de propulsão no cálculo de emissão da frota.

Cabe mencionar que, como essas emissões estão baseadas no cálculo do poço à roda, não estamos levando em conta, por exemplo, as emissões associadas à produção de bateria, à matriz elétrica e à infraestrutura de recarga de baterias do país e o descarte de materiais. Caso estes outros elos da cadeia fossem avaliados, considerando que a produção de baterias emite 36,5gCO_{2eq}/Km, que a matriz elétrica do país de origem e a infraestrutura de recarga representam,

¹⁰⁹ Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>.

¹¹⁰ Dados da Fenabreve. Disponível em: <https://www.fenabreve.org.br/Portal/conteudo/emplacamentos>.

¹¹¹ Fonte: <https://www.terra.com.br/carros-motos/corolla-e-corolla-cross-sao-os-carros-flex-mais-economicos-diz-inmetro,e1d5d30907b30ba25509e5459410f25dno8cbq0x.html/>
Visitado em: 30/11/2023.

respectivamente, 24,6 e 6,44gCO₂eq/Km¹¹², o veículo elétrico do exemplo acima (BYD Dolphin) emitiria 80,88gCO₂eq/Km¹¹³.

Em razão dos cálculos acima representarem as emissões por quilômetro, para a estimação das emissões anuais da frota, é necessário estabelecer uma premissa de quilometragem anual de um veículo leve no Brasil. Gauto *et al.* (2023) indica que, em média, um veículo leve percorre 12.900km por ano. Portanto, em média, anualmente, um veículo flex emite, aproximadamente, 1.206 kg CO₂EQ ao ano.

$$CO_2/ano = CO_{2EQ}/Km \times Km/ano$$

Com as hipóteses e premissas descritas acima, em conjunto com a frota anual apresentada na seção anterior e as hipóteses de composição de frota conforme descrito, temos as emissões anuais totais e por tipo de motorização segundo metodologia do poço à roda. Passaremos a considerar alguns detalhes de cada cenário.

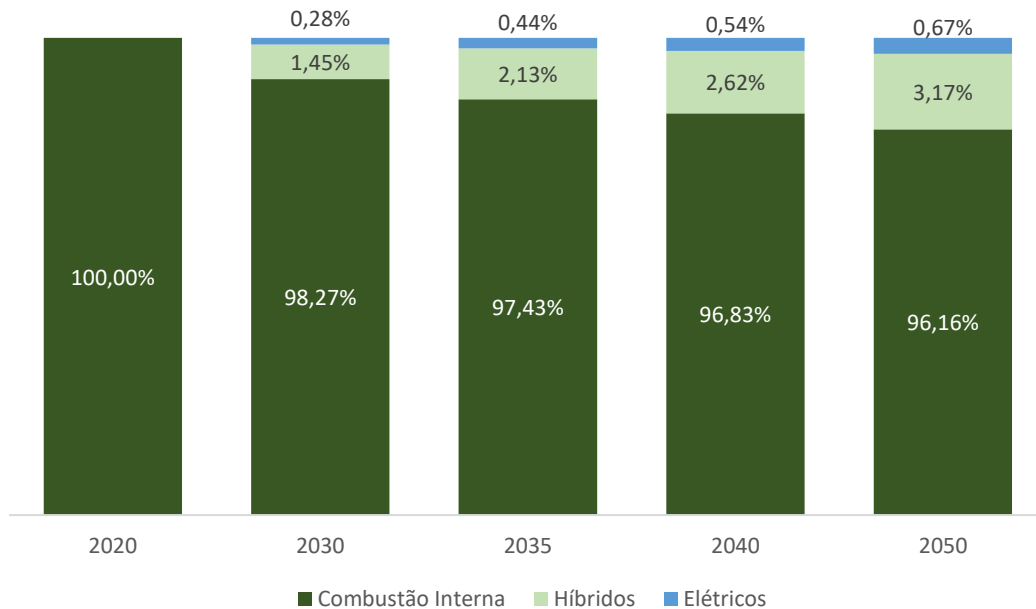
Cenário Status Quo

O cenário status quo é um cenário de controle, utilizado com o intuito de demonstrar como serão as emissões caso o padrão de motorização (proporções de cada tecnologia sobre o licenciamento total) siga o verificado em 2023 até 2050. O gráfico abaixo apresenta a composição de frota para os anos mencionados nesta hipótese:

¹¹² Gauto, Marcelo Antunes, et al. "Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles." *Energy for Sustainable Development* 76 (2023): 101261

¹¹³ Ainda não há uma estimativa adequada para a emissão associada ao descarte de materiais, que tenderia a elevar ainda mais esta estimativa.

Gráfico 41 – Composição de frota de veículos leves Cenário Status Quo Poço à Roda (%)



Fonte: Anfavea e BCG. Elaborado: LCA Consultores.

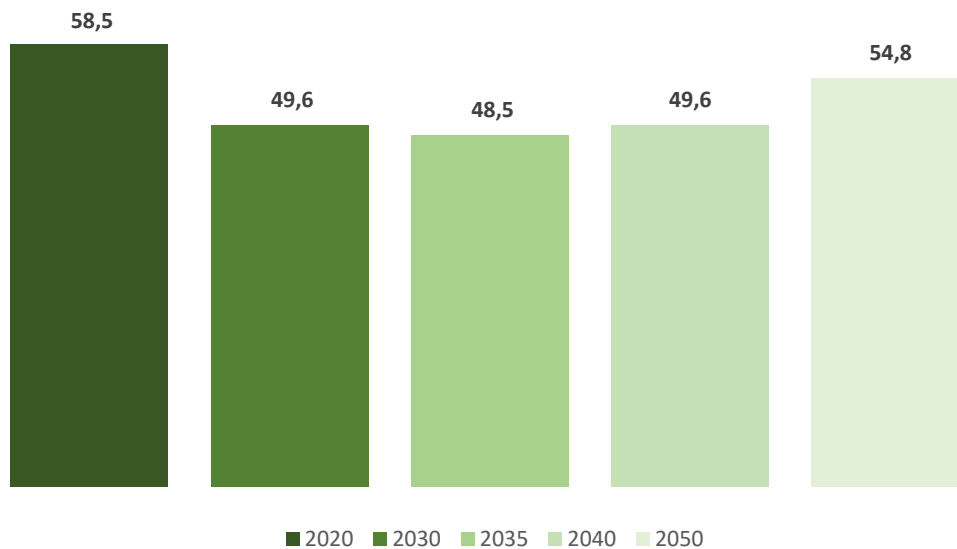
Na sequência, em linha com os parâmetros e hipóteses demonstradas anteriormente, utilizando os dados de emissões anuais de CO_{2eq} para veículos representativos da frota, compilado na tabela abaixo, e com base na subdivisão de combustão interna, híbridos e elétricos, estimou-se as emissões globais de CO_{2eq}, em milhões de toneladas, conforme o gráfico abaixo:

Tabela 8 – Emissões anuais: veículos leves - por motorização, critério do Poço à Roda: todos os cenários (Kg CO_{2eq})

	Flex	Gasolina	Diesel	HEV	BEV
2020	1.173	1.850	2.616	973	172
2030	1.049	1.831	2.543	870	122
2035	1.020	1.817	2.532	846	144
2040	1.020	1.817	2.532	846	144
2050	1.020	1.817	2.532	846	144

Fonte: LCA Consultores.

Gráfico 42 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Status Quo Poço à Roda (CO₂/ano Milhões)

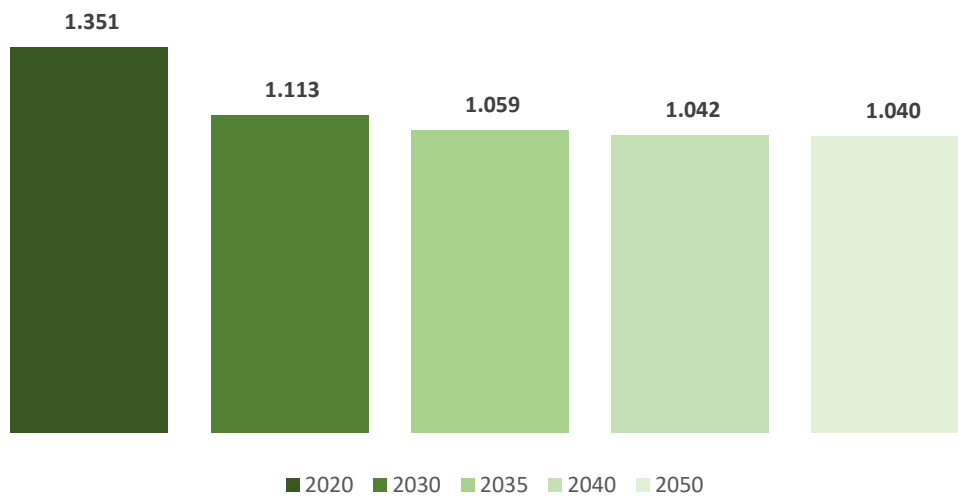


Fonte: LCA Consultores.

Há algumas ressalvas que devem ser mencionadas: Conforme a tabela 6 de intensidade de carbono dos energéticos, a projeção desses dados teve término em 2032. Com isso, para os anos em que não há referência, manteve-se o dado disponível do último período. A eficiência dos veículos é referente ao PBEV 2023, de forma que não foram consideradas curvas de eficiência veicular para os períodos vindouros.

Note-se que as **emissões por veículo**, não afetadas pelo crescimento da frota, declinam consistentemente ao longo do tempo, ainda que não tenhamos adotado premissas de ganhos de eficiência a médio e longo prazos que não os ganhos já apontados por estudos oficiais (AEA, EPE). O gráfico a seguir apresenta os dados para o cenário em questão.

Gráfico 43 – Emissões por veículo: Cenário Status Quo – Poço à Roda (Kg CO₂/ano)

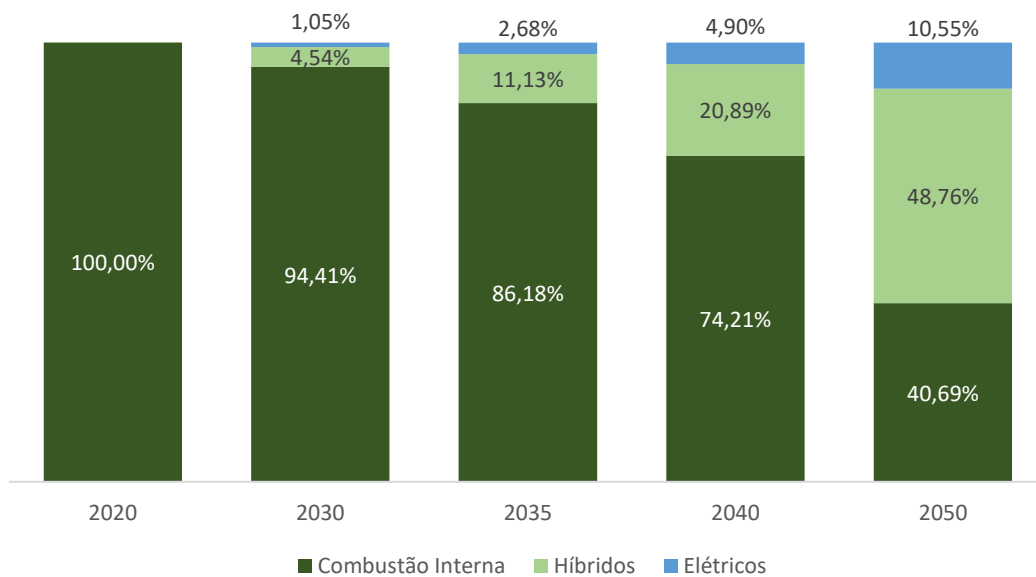


Fonte: LCA Consultores.

Emissões Poço à Roda – Cenário Convergência Global Híbridos

Neste cenário, a eletrificação da frota ocorre de forma mais profunda, com os veículos híbridos predominando em relação aos puramente elétricos. O gráfico a seguir destaca a composição de frota para os anos de 2030;2035; 2040 e 2050:

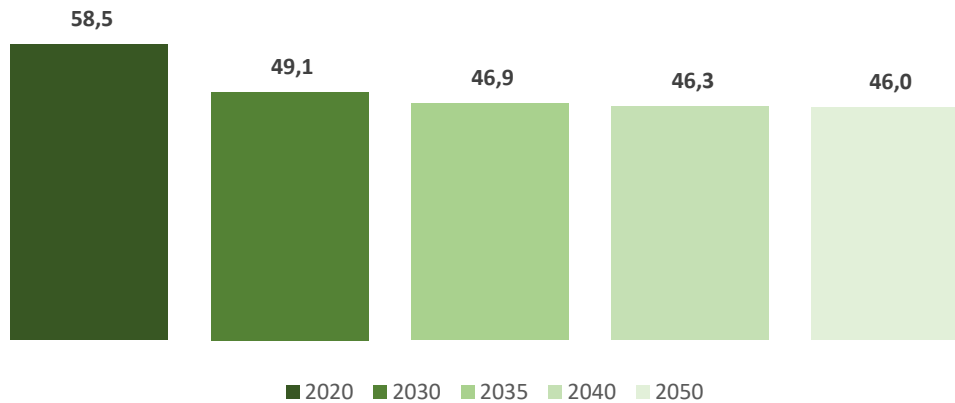
**Gráfico 44 – Composição de frota de veículos leves:
Cenário Convergência Global Híbridos – Poço à Roda (%)**



Fonte: LCA Consultores.

Abaixo as emissões totais de CO_{2eq}, em milhões de toneladas:

**Gráfico 45 – Emissão da frota de veículos leves
Cenário Convergência Global Híbridos – Poço à Roda (CO₂/ano Milhões)**

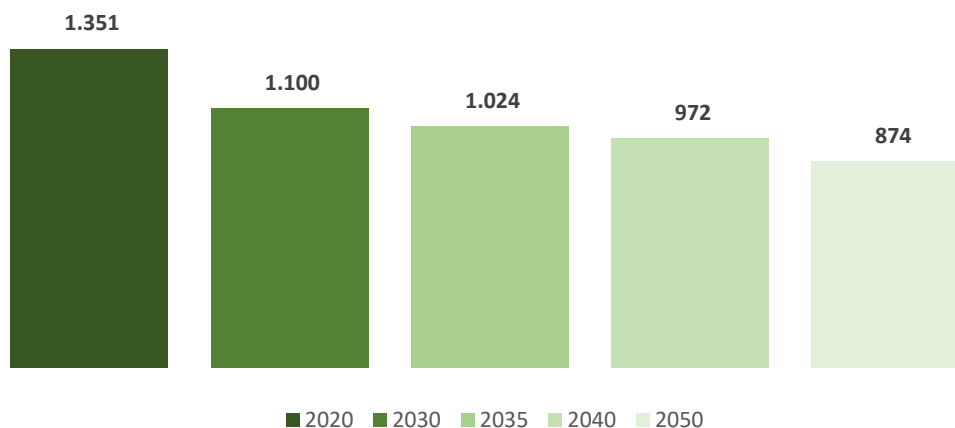


Fonte: LCA Consultores.

Nota-se que, em 2050, mesmo com a frota de veículos leves aumentando em mais de 16 milhões de veículos frente a 2020, as emissões totais deste grupo se reduzem relativamente a 2020.

De forma similar ao cenário anterior, expõe-se, a seguir, o gráfico da emissão por veículo.

**Gráfico 46 – Emissões por veículo: Cenário Convergência Global Híbridos
Poço à Roda (Kg CO₂/ano)**

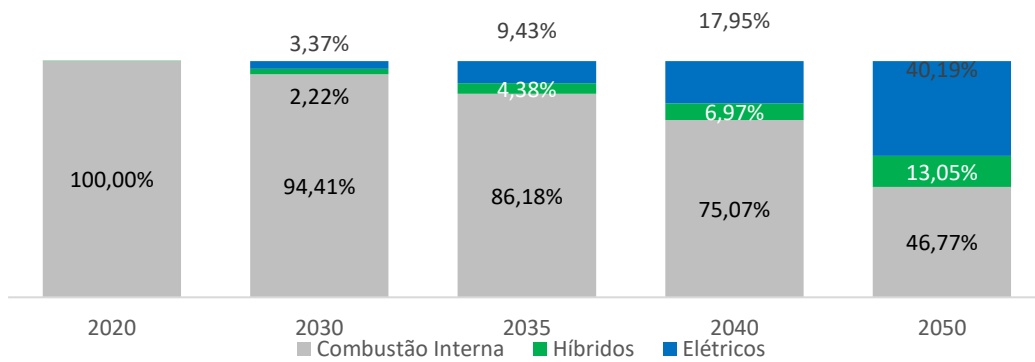


Fonte: LCA Consultores.

Cenário Convergência Global BEV

O cenário convergência BEV se caracteriza pela penetração dominante dos veículos totalmente elétricos à bateria. A composição de eletrificados é análoga ao cenário anterior, entretanto o percentual de veículos puramente elétricos é maior, conforme gráfico adiante:

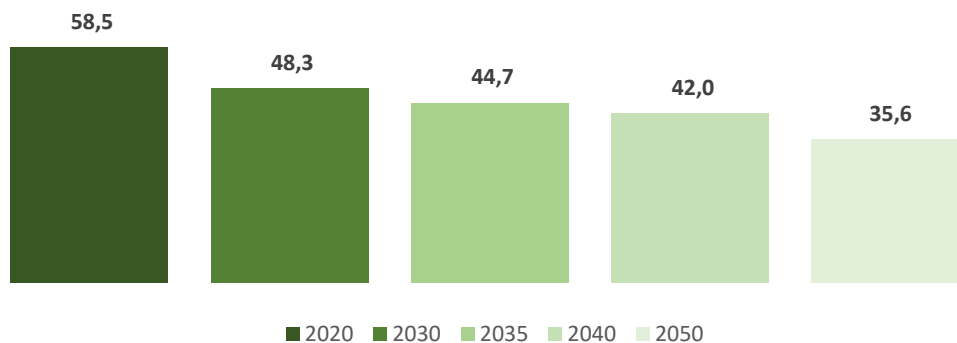
**Gráfico 47 – Composição de frota de veículos leves
Cenário Convergência BEV – Poço à Roda (%)**



Fonte: LCA Consultores.

Como já estabelecido nas outras hipóteses, calculou-se as emissões da totalidade da frota de veículos leves, em termos milhões de toneladas de CO_{2eq}. Na sequência, expõe-se os resultados calculados:

**Gráfico 48 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Convergência BEV
Poço à Roda (CO₂/ano Milhões)**

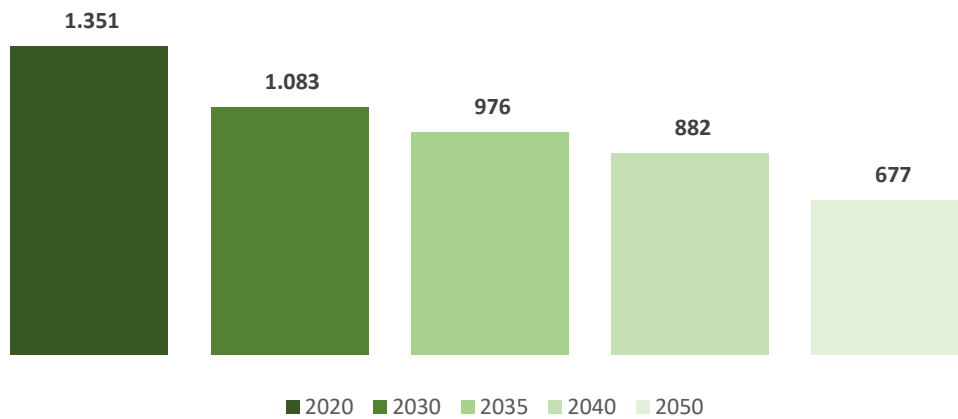


Fonte: LCA Consultores.

Verifica-se que o cenário BEV apresenta, para o ano de 2050, uma redução de 39,1% das emissões em comparação a 2020. Em resumo, este resultado é produzido por uma proporção maior de veículos puramente elétricos que, numa avaliação de ciclo de vida do Poço à Roda, são menos emissores de CO₂.

Por fim, demonstra-se as emissões por veículo, em linha com os cenários anteriores:

Gráfico 49 – Emissões por veículo: Cenário Convergência Global BEV Poço à Roda (Kg CO₂/ano)



Fonte: LCA Consultores.

Cenário status-quo e convergência global híbridos para Biocombustíveis

Além desses resultados, simulamos um outro cenário no qual há protagonismo dos biocombustíveis, principalmente do etanol, a fim de estimarmos o impacto desse condicionante na matriz de emissões dos veículos leves.

Para tanto, partiu-se do **pressuposto de que os veículos flex e híbridos seriam movidos, majoritariamente, por etanol hidratado (E100)**. O cálculo de emissões de CO_{2EQ} dos veículos flex/híbridos foi alterado de forma que o fator de uso, que é a demanda de etanol em relação aos combustíveis do ciclo otto, mencionado na equação abaixo, iniciasse uma curva de crescimento, partindo de 0,40 em 2030 e atingindo 0,64 em 2050.

$$CO_{2EQ} = CE_{100} \times IC_{100} \times FU + CE_{27} \times IC_{27} \times (1 - FU)$$

A título de comparação com o resultado anterior de um veículo flex, no qual a emissão do veículo representativo era de 90,96 gCO_{2EQ}/km (com parâmetros de intensidade do combustível de 2020 e de eficiência veicular referente ao PBEV 2023), a emissão do veículo com fator de uso de 0,64 seria de 59,4 gCO_{2EQ}/km, um decréscimo de 34,7%.

Deste modo, utilizando as mesmas premissas de share de frota do cenário status quo, que pressupõe a dinâmica de composição de frota de acordo com a atual, e do cenário convergência global híbridos, além da mesma distância percorrida, calculamos as emissões de CO₂ para a frota de veículos leves. Apresenta-se, a seguir, a tabela de emissão de gCO_{2EQ} por quilômetro e anual, por veículo representativo, bem como as emissões globais da frota de veículos leves para os anos de 2030, 2035, 2040 e 2050:

Tabela 9 – Emissões por Km (gCO_{2eq}) de veículos leves - por motorização

	Flex	Gasolina	Diesel	Híbridos	Elétricos
2020	91	143	203	75	13
2030	44	142	197	37	9
2035	40	141	196	33	11
2040	40	141	196	33	11
2050	40	141	196	33	11

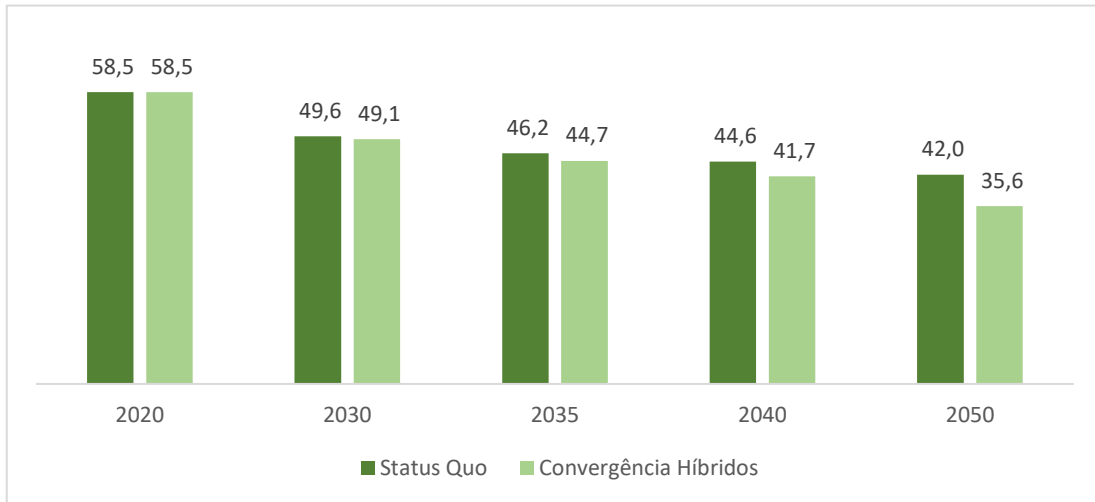
Fonte: LCA Consultores.

Tabela 10 – Emissões anuais (Kg CO_{2eq}) de veículos leves - por motorização.

	Flex	Gasolina	Diesel	Híbridos	Elétricos
2020	1.173	1.850	2.616	973	172
2030	1.049	1.831	2.543	870	122
2035	969	1.817	2.532	804	144
2040	910	1.817	2.532	755	144
2050	766	1.817	2.532	637	144

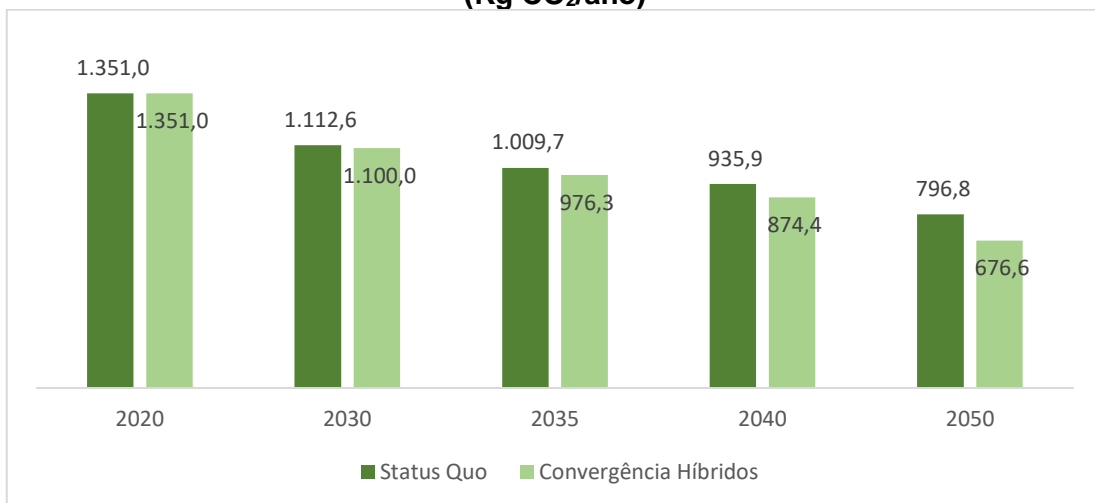
Fonte: LCA Consultores.

Gráfico 50 – Emissão da frota de veículo leves
Cenário Status Quo e Convergência Global Híbridos - Biocombustíveis
(CO₂/ano Milhões)



Fonte: LCA Consultores.

Gráfico 51 – Emissões por veículo: Cenário Status Quo e Convergência Global Híbridos - Biocombustíveis
(Kg CO₂/ano)



Fonte: LCA Consultores.

Sob estas hipóteses e sob o conceito “poço à roda”, as emissões finais de CO₂ do cenário convergência híbridos (HEV) e do cenário convergência BEV seriam equivalentes, ao redor de 35,6 MmtonCO₂/ano.

Note-se que este cenário apresenta uma redução significativa e imediata das emissões globais da frota de veículos leves, explicitando o papel importante que os

biocombustíveis podem desempenhar na redução das emissões veiculares sem a necessidade de renovação de frota (que depende da dinâmica de licenciamento de novos veículos e sucateamento dos mais antigos), tendo em vista a participação majoritária de veículos flex na frota de leves brasileira.

O cenário acima produziria um aumento significativo na demanda por etanol. Em 2022, de acordo com dados da EPE, a demanda do ciclo otto de etanol hidratado e anidro foi de 29,1 bilhões de litros. Estimativas indicam que, no cenário status quo e com fator de uso na faixa de 0,64, a demanda total de etanol crescerá para 51 bilhões de litros em 2050, valor 1,8 vezes maior que a demanda de 2022 – em linha com o aumento de oferta esperado para 2040 por meio de ganhos de produtividade na lavoura de cana-de-açúcar, conforme mencionado no capítulo 4¹¹⁴.

Emissões – Ciclo de vida aumentado (“Berço à Roda”)

Os resultados expostos até então consideram apenas os dados de emissão referentes à metodologia do Poço à Roda. Entendemos ser importante estimar também as emissões considerando um ciclo de vida mais abrangente, na tentativa de englobar outras variáveis relevantes nas emissões de veículos.

Neste sentido, utilizamos os dados de Gauto *et al* (2023) para as emissões de gCO₂/km de diferentes modelos de propulsão. O referido estudo indica que veículos a combustão interna movidos a gasolina A e a etanol hidratado (E100) produzem, respectivamente, 269,3 e 120,9 gCO₂/km. Por outro lado, um veículo HEV utilizando apenas etanol hidratado e um BEV emitem, respectivamente, 77,5 e 104,8 gCO₂/km. Dessa maneira, com a premissa de que um veículo percorre em média 12.900km, estima-se as emissões anuais por tipo de veículo.

¹¹⁴ Importante ressaltar que é um trabalho de estimativa com base em parâmetros de eficiência e consumo atuais.

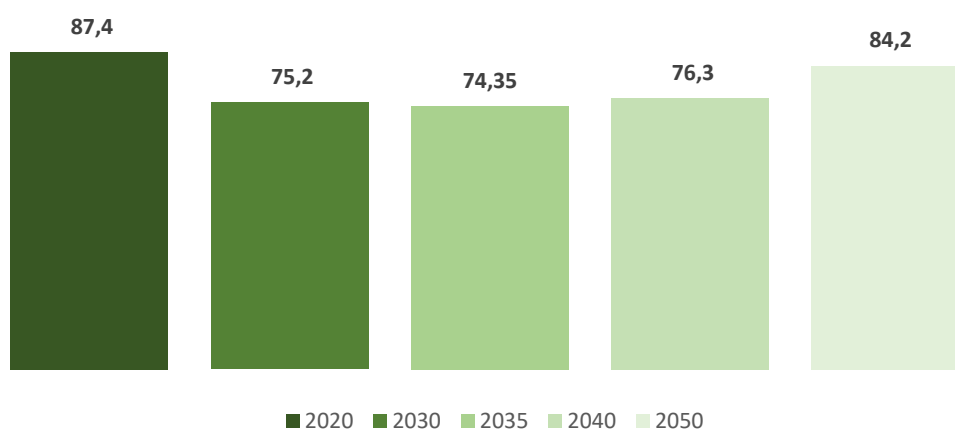
Tabela 11 – Emissões anuais (Kg CO₂eq) veículos leves - por motorização – Berço à Roda¹¹⁵

Flex	Gasolina	Híbridos	Elétricos
1.560	3.474	1.000	1.352

Fonte: Gauto. et. al (2022). Elaborado: LCA Consultores.

Com as mesmas premissas de composição de frota e distância percorrida por ano, apresenta-se, na sequência, os gráficos de emissões para os três cenários, bem como as emissões por veículo, em linha ao apresentado na metodologia Poço à Roda.

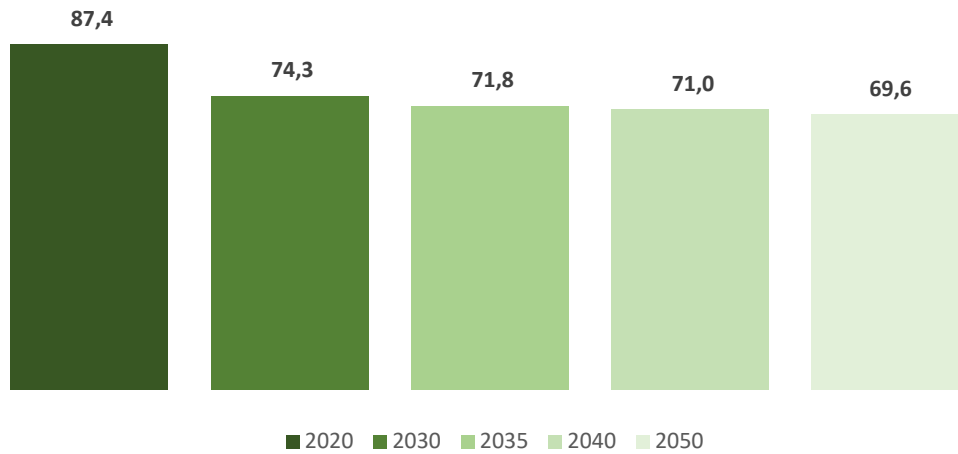
Gráfico 52 – Emissão da frota de veículos leves: Cenário Status Quo Berço à Roda (T CO₂/ano Milhões)



Fonte: LCA Consultores.

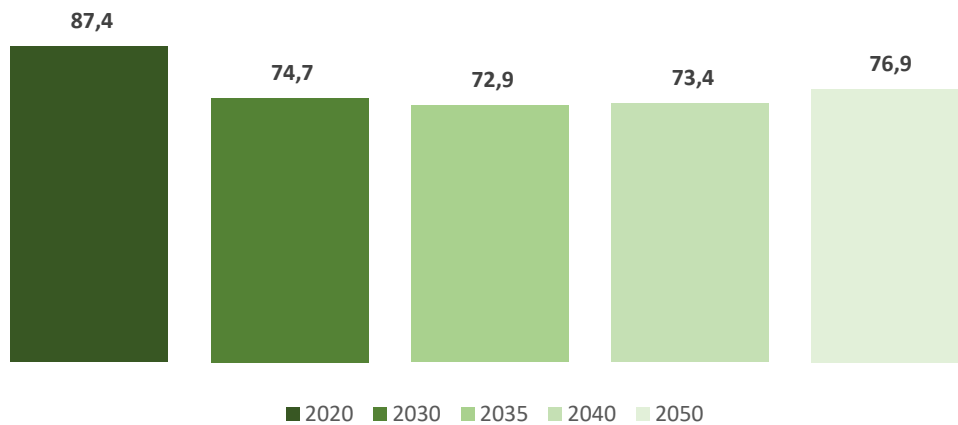
¹¹⁵ No estudo de Gauto et.al (2022) não houve a menção às emissões de veículos a diesel. Sendo assim, por hipótese simplificadora, para tais veículos utilizou-se a mesma emissão dos veículos a gasolina.

Gráfico 53 – Emissão da frota de veículos leves
Cenário Convergência Global Híbridos – Berço à Roda (T CO₂/ano Milhões)



Fonte: LCA Consultores.

Gráfico 54 – Emissão da frota de veículos leves
Cenário Convergência Global BEV – Berço à Roda (T CO₂/ano Milhões)

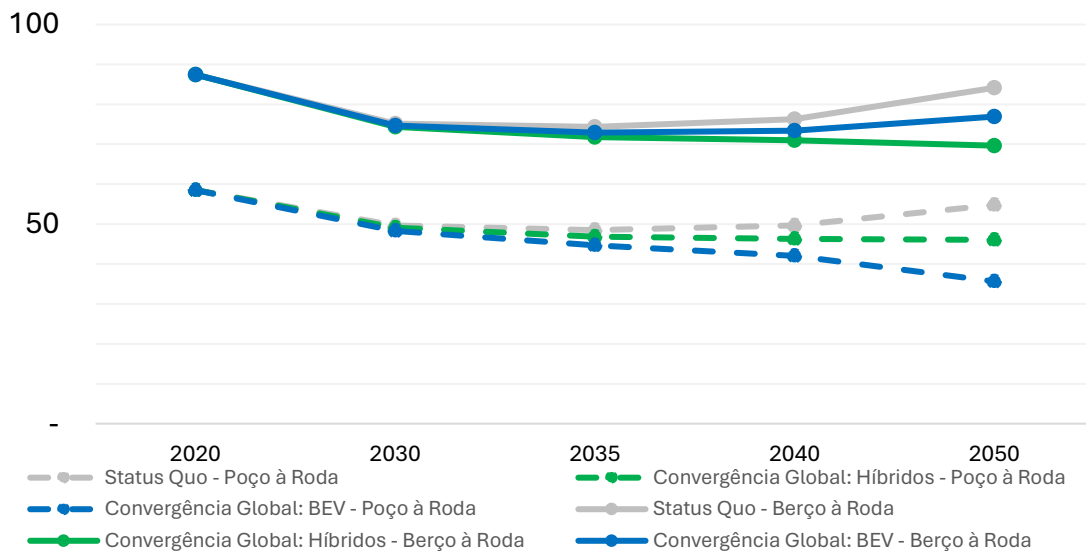


Fonte: LCA Consultores.

Pelo exposto, utilizando a abordagem do ciclo de vida aumentado “Berço à Roda”, analisa-se que o cenário convergência global híbridos apresentou o melhores resultados em termos de emissões dos veículos leves. Uma vez que as premissas

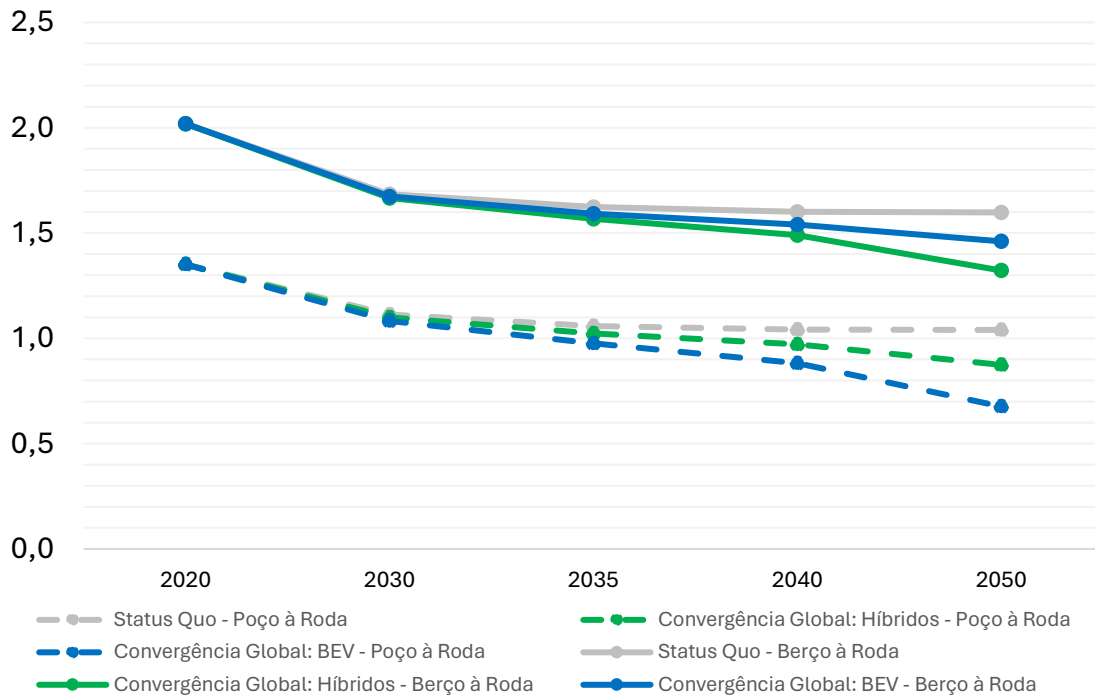
utilizadas consideravam um veículo híbrido movido somente a etanol, demonstra-se novamente como os biocombustíveis podem atuar no caminho da descarbonização. Os gráficos 55 e 56 abaixo sintetizam os resultados e comparam as emissões nas metodologias Poço à Roda (usual, EPE e AEA) e Berço à Roda.

**Gráfico 55 – Emissão de CO₂ da frota de veículos leves
Berço à Roda x Poço à Roda (T CO₂/ano Milhões)**



Fonte: LCA Consultores.

Gráfico 56 – Emissão de CO₂ por veículo: Berço à Roda x Poço à Roda (T CO₂/ano)



Fonte: LCA Consultores.

Veículos Pesados

Como vimos, os veículos pesados têm elevada heterogeneidade de modelos, usos, cargas transportadas, características do pavimento etc. Neste sentido, as rotas tecnológicas que se apresentam devem ser compatíveis com cada tipo de aplicação e viáveis do ponto de vista econômico, financeiro e ambiental.

Os veículos movidos a diesel, em razão da eficiência energética do combustível, possuem vasto domínio comercial. Entretanto, sua intensidade de carbono é elevada. O diesel A, por exemplo, emite 86,50gCO_{2eq}/MJ enquanto o biodiesel emite cerca de 28% desse valor¹¹⁶. A descarbonização requer a mudança do paradigma dominante

¹¹⁶ EPE, (2022). Nota técnica “Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário – Intensidade de carbono das fontes de energia”. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nota-T%C3%A9cnica-Descarbonizacao-do-Setor-de-Transporte-Rodoviario-Intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia.aspx>

de utilização maciça do diesel atual, com alto fator de emissão de gases de efeito estufa.

Se, por um lado, o veículo puramente elétrico tende a ser um modelo viável para caminhões chamados “*last mile*”, que atuam no perímetro urbano, e para os ônibus urbanos, que possuem previsibilidade de itinerário, a descarbonização de caminhões que percorrem maiores distâncias em estradas interestaduais pode ser obtida por meio do GNV/GNL¹¹⁷ e do biometano. Outros biocombustíveis, como biodiesel e HVO, também podem ser complementados no intuito de reduzir a intensidade de carbono atual da frota. Outra opção emergente é o hidrogênio de baixo carbono ou amônia como combustível em veículos movidos à célula de combustível.

Contudo, as novas tecnologias apresentam variados desafios para sua adoção generalizada. Os veículos de carga elétricos requerem a criação de uma robusta infraestrutura de recarga, sobretudo nas áreas mais distantes dos grandes centros. Esta implementação além de exigir investimentos substanciais, necessita de uma expansão na oferta de energia renovável, de maneira que não comprometa a segurança energética do país. Ademais, quanto maior a distância percorrida em média pelo veículo, cresce a necessidade de uma bateria de maior potência e, por consequência, de maior peso. Tal aspecto pode reduzir em até 20%¹¹⁸ a capacidade de carga dos veículos, produzindo ineficiência e maiores custos aos frotistas.

O gás natural pode representar um caminho intermediário para a transição do transporte de baixo carbono. O combustível tem a possibilidade de utilização em dois estados físicos: comprimido e liquefeito. Enquanto o primeiro é, normalmente, utilizado para aplicações de curta e média distância, o último é utilizado em aplicações mais longas. Estima-se que as emissões Poço à Roda do gás natural sejam 15% menores em relação ao diesel, com menores emissões de outros

¹¹⁷ Rotas de descarbonização para o Transporte no Brasil: 2023, 2030 e 2035 – Nota técnica.

¹¹⁸ Mauler, Lukas, et al. "Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: A US case study." *Journal of Energy Storage* 46 (2022): 103891. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X21015565>.

poluentes como o NOx¹¹⁹. Entretanto, no caso de aplicações de maiores distância, é necessário investimentos em uma rede de abastecimento mais abrangente.

No caso do biometano, apesar de sua intercambialidade com o gás natural – aproveitando, assim, a infraestrutura já existente –, surge a necessidade de um arcabouço regulatório que incentive a expansão da produção e o transporte do combustível ao longo do país. Ressalte-se que o incentivo ao biometano pode gerar externalidades positivas por meio da reutilização das matérias primas que originam o combustível (resíduos que, quando não aproveitados, lançam gás metano na atmosfera) e, notadamente, via uso nas próprias lavouras (caminhões e maquinário agrícola) em substituição ao diesel, reduzindo ainda mais a pegada de carbono.

O biodiesel e o diesel renovável se apresentam como soluções de baixo carbono que possuem sinergia com a infraestrutura vigente, sem a necessidade de investimentos adicionais que criem ou modifiquem a infraestrutura de abastecimento já estabelecida¹²⁰. Entretanto, ainda existem entraves técnicos, como a mistura limite de biodiesel no diesel, e restrições produtivas, como o maior custo na produção em relação ao diesel convencional¹²¹.

A solução relacionada ao hidrogênio em veículos elétricos movidos a célula de combustível, em razão da alta densidade energética por unidade de massa, pode ser bem-sucedida para veículos pesados de longa distância com cargas pesadas, que a princípio também apresentam elevada autonomia e rápido processo de reabastecimento, similar aos motores a combustão.

No entanto, a segurança relacionada às estações de recarga e logística de abastecimento, que demanda maior fluxo de transporte, dado a menor densidade volumétrica energética que o diesel, são aspectos relevantes na infraestrutura de reabastecimento¹²². Neste aspecto, uma solução que desponta no horizonte é a

¹¹⁹ Inteligência de mercado – TUPY.

¹²⁰ Inteligência de mercado – TUPY.

¹²¹ Rotas de descarbonização para o Transporte no Brasil: 2023, 2030 e 2035 – Nota técnica.

¹²² van Grinsven, A.H. et al. 2021, Research for TRAN Committee – Alternative fuel infrastructures for heavy duty vehicles, European Parliament, Policy Department for Structural

tecnologia de produção do hidrogênio renovável a partir do etanol por meio do método reforma-vapor – combinação de etanol e água em condições de temperatura (a 700°C) e pressão que permitem a separação das moléculas do etanol (C₂H₆O) em Hidrogênio, Oxigênio e CO₂ biogênico, em desenvolvimento pelo RGCI-USP. Esta inovação poderá vir a ser produzida em pequenas estações distribuídas, solucionando o grande desafio do transporte de hidrogênio a longas distâncias.

Conforme mencionado no capítulo 4, tanto no caso da reforma-vapor como no caso da eletrólise, há ainda que se ultrapassar o desafio do alto custo dos investimentos na produção de hidrogênio verde até que haja ganhos de escala.

Emissões Veículos Pesados

As emissões de gases de efeito estufa de veículos pesados dependem de diversas variáveis como volume e tipo de carga, qualidade da estrada e topografia da rota, quantidade de eixos, característica do motor, tipo de pneus, modelos de transmissão, entre outros. A gama de variáveis envolvidas na estimação de emissões torna essa tarefa árdua e de difícil generalização em torno de um modelo matemático específico. Neste aspecto, a dificuldade de estipular a magnitude de emissão de cada modelo impacta diretamente na viabilidade de elaboração de metas de redução dos gases de efeito estufa¹²³.

Deste modo, um avanço necessário e crucial para a descarbonização dos veículos pesados seria a implementação de um modelo computacional de medição similar ao VECTO¹²⁴ europeu. O VECTO é uma ferramenta desenvolvida pela Comissão Europeia como o instrumento oficial para monitorar as emissões de CO₂ e o consumo

and Cohesion Policies, Brussels. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690888/IPOL_STU\(2021\)690888_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690888/IPOL_STU(2021)690888_EN.pdf).

¹²³ Tong, F., Jaramillo, P. & Azevedo, I. M. Comparison of life cycle greenhouse gases from natural gas pathways for medium and heavy-duty vehicles. *Environmental science & technology* 49, 7123–7133 (2015). Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/es5052759>

¹²⁴ https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/vehicle-energy-consumption-calculation-tool-vecto_en

de combustível dos veículos pesados. As montadoras são determinadas a utilizar a ferramenta no âmbito de veículos com peso bruto acima de 3.500 quilos¹²⁵.

Ao analisarmos um estudo de emissões dos caminhões na União Europeia, relativo ao período de 2020¹²⁶, é possível descrever os grupos de veículos pesados regulados pelo VECTO de acordo com a tabela abaixo:

Tabela 12 – Modelos de caminhões regulado pelo VECTO (2020)

Grupo - VECTO	Subgrupo*	Tipo de Cabine
4	UD	Todas
	RD	Day Cab
		Sleeper Cab
LH	Sleeper Cab	
5	RD	Day Cab
		Sleeper Cab
	LH	Sleeper Cab
9	RD	Sleeper Cab
	LH	Day Cab
10	RD	Sleeper Cab
	LH	Sleeper Cab

Fonte: Mulholland, Eamonn, Pierre-Louis Ragon, and Felipe Rodríguez. "CO2 emissions from trucks in the European Union: An analysis of the 2020 reporting period." (2023). International Council on Clean Transportation.

* UD – Urban Delivery; RD – Regional Delivery; LH – Long Haul.

Segundo o estudo, os veículos do tipo 5-LH foram responsáveis por aproximadamente 60% do total das emissões dos veículos pesados na Europa, muito acima do segundo modelo mais emissor, o 9-LH, que emitiu cerca de 10% do total.

A carga transportada é uma das principais variáveis no volume das emissões dos veículos pesados. A fim de abarcar esse aspecto, é comum que as medidas de emissões de CO₂ sejam estimadas em gCO₂ por tonelada quilômetro. Isto indica, por

¹²⁵ ACEA. CO2 Emissions from Heavy—Duty Vehicles: Preliminary CO2 Baseline (Q3–Q4 2019) Estimate; ACEA: Brussels, Belgium, 2020

¹²⁶ Mulholland, Eamonn, Pierre-Louis Ragon, and Felipe Rodríguez. "CO2 emissions from trucks in the European Union: An analysis of the 2020 reporting period." (2023). International Council on Clean Transportation.

exemplo, que caso um caminhão esteja carregando 4 toneladas e viaje por 1 quilômetro, equivale a 4 toneladas quilômetro.¹²⁷

Com o objetivo de apontar o potencial de redução das emissões de veículos pesados, a tabela abaixo apresenta os resultados com base nos modelos mencionados tabela acima, durante os anos de 2019 e 2020. Note-se que cerca de 96% dos veículos certificados no período de análise do estudo eram movidos a diesel.

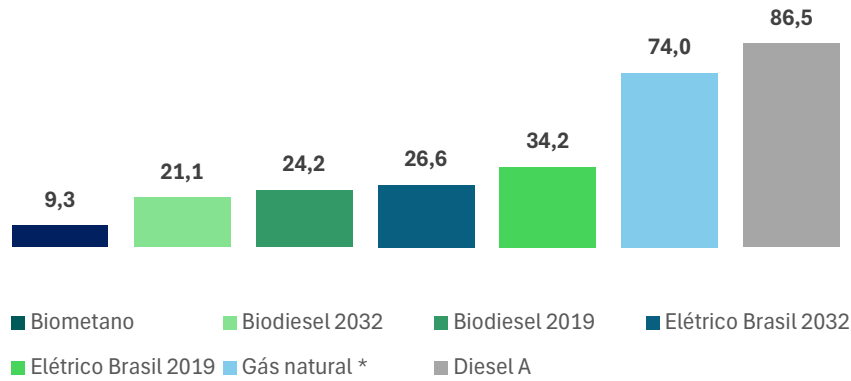
Tabela 13 – Emissões caminhões certificados em 2019 e 2020 (gCO₂/TKm)

Veículo subgrupo	2019	2020
4-LH	106.0	102.3
4-RD	197.2	197.9
4-UD	307.2	307.4
5-LH	56.6	55.9
5-RD	84.0	83.2
9-LH	65.2	64.0
9-RD	111.0	111.7
10-LH	58.3	58.6
10-RD	83.3	88.5

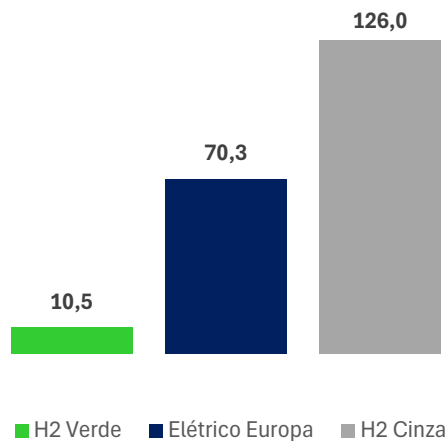
Fonte: Mulholland, Eamonn, Pierre-Louis Ragon, and Felipe Rodríguez. Vide nota 126.

A despeito de não haver um modelo de medições no mercado brasileiro de veículos pesados, é notório que a utilização de combustíveis menos intenso em carbono promove a descarbonização da frota. A utilização de combustíveis como o biometano, que possui uma intensidade de carbono de quase 83% menor que o diesel denota como os biocombustíveis, pode ser bastante eficaz na descarbonização. Os gráficos a seguir detalham a intensidade de carbono, em CO₂/MJ, de alguns combustíveis que estão no cerne das rotas tecnológicas que visam à descarbonização.

¹²⁷ Mulholland, Eamonn, Pierre-Louis Ragon, and Felipe Rodríguez. "CO₂ emissions from trucks in the European Union: An analysis of the 2020 reporting period." (2023). International Council on Clean Transportation

Gráfico 57 – Intensidade de carbono de alguns energéticos (CO₂/MJ)

Fonte: EPE128 e ÚNICA. Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 58 – Intensidade de carbono de alguns energéticos (CO₂/MJ)

Fonte: Reuters¹²⁹ e Roland Berger. Elaboração: LCA Consultores.

¹²⁸ Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf

¹²⁹ Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/europes-top-economies-slash-carbon-intensity-electricity-2023-12-12/>

Ademais, como observado para o caso dos veículos leves, a doção do ciclo de vida do berço ao túmulo é a métrica adequada de medição também nos pesados, a fim de que todos os aspectos de emissão, como a origem das energias, dos insumos, partes e peças e processos de manufaturas em toda a cadeia produtiva, estejam no cálculo.

6.3 Impacto dos cenários de eletrificação sobre a economia conforme a Matriz Insumo-Produto (MIP)

Como foi visto até aqui, a descarbonização da mobilidade automotiva no Brasil tem o privilégio de poder contar com um leque de oportunidades e rotas tecnológicas. Porém, ao consumir tais oportunidades, é essencial conciliar as dimensões ambiental, social e econômica – compreendendo que as diversas escolhas de políticas públicas acarretarão diferentes consequências não somente sobre esforços nacionais de descarbonização, mas também sobre o desenvolvimento socioeconômico do país.

Portanto, para além dos seus impactos na preservação ambiental, as estratégias adotadas afetarão nossos objetivos de neindustrialização, o aumento da produtividade, a geração de empregos qualificados e o conseqüente aumento da renda e da qualidade de vida da população brasileira.

Por isso, faz-se necessário avaliar os impactos socioeconômicos esperados das mudanças no setor automotivo com a introdução dos veículos híbridos e elétricos no Brasil. Para tanto, estimamos um Modelo de multiplicador de estímulos de demanda por meio da Matriz Insumo-Produto (MIP).

O Modelo ou Matriz de Insumo-Produto (MIP) é uma “fotografia econômica’ da própria economia”¹³⁰, utilizado para estudar as múltiplas interações e relações de

130 Guilhoto, Joaquim José Martins and Guilhoto, Joaquim José Martins, Input-Output Analysis: Theory and Foundations (Análise de Insumo-Produto: Teoria e Fundamentos)

interdependência entre os diferentes setores. É baseado na constatação de que a produção de um setor depende dos insumos fornecidos pelos demais, criando uma rede complexa de interrelações de consumo e produção¹³¹.

Neste modelo, os setores econômicos são representados por linhas e colunas de uma matriz onde cada elemento representa a quantidade de insumo que um setor fornece/demanda para/do outro. Essa matriz, por sua vez, é alimentada com os dados obtidos a partir de pesquisas sobre a produção e o consumo intermediário de cada setor (a partir da Tabela de Recursos e Usos da Pesquisa Industrial Anual, ambas do IBGE).

A mecânica de cálculo da MIP envolve a estimação dos coeficientes técnicos e a construção da Matriz de Leontief, com tempo de convergência do estímulo econômico inicial até o resultado econômico final. Os coeficientes técnicos são valores que representam a quantidade de insumos necessários para produzir uma unidade de produto em cada setor da economia. Eles são calculados a partir de dados sobre a produção e o consumo de cada setor. Esses coeficientes são importantes para entender as relações de interdependência entre os setores e para analisar os efeitos de mudanças na demanda ou na produção.

A Matriz de Leontief, mecanismo de cálculo dos impulsos intersetoriais, é uma representação matemática da estrutura produtiva de uma economia que relaciona a produção de cada setor com o consumo de insumos de todos os setores, incluindo o próprio setor. A Matriz de Leontief é construída a partir dos coeficientes técnicos e permite analisar as interações entre os setores e os efeitos multiplicadores na economia. Por sua vez, o prazo de convergência refere-se ao tempo necessário para que um estímulo econômico inicial, como um investimento ou uma política

(August 1, 2011). Disponível em:
SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1900073> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1900073>

¹³¹ Considerando-se as relações diretas e indiretas, pode-se dizer que a produção de cada setor depende dos insumos fornecidos por TODOS os demais segmentos da economia. Por exemplo, a produção de algodão depende da extração mineral, ainda que uma mineradora não seja fornecedora direta de um agricultor, pois os minérios extraídos serão utilizados como matéria-prima pelo setor siderúrgico, cujo produto será utilizado como insumo pelos fabricantes de máquinas e equipamentos que, por sua vez, irão produzir as máquinas e implementos agrícolas utilizados diretamente na produção do algodão.

governamental, produza seus efeitos completos sobre a economia. Esse prazo pode variar dependendo das características da economia em questão e das condições do mercado. Para o Brasil, este período gira em torno de 10 a 14 meses.

Operacionalmente, as análises na MIP são implementadas através de choques monetários na demanda agregada provocados por investimentos ou pelo consumo em um ou mais setores de interesse, que então se disseminam para os demais, gerando estímulos adicionais e cumulativos sobre toda a economia. É importante ressaltar que a MIP é uma ferramenta complexa, utilizada para analisar o impacto de diferentes políticas econômicas, prever os efeitos de choques externos na economia e auxiliar no planejamento econômico de longo prazo.

Por outro lado, por traçar um panorama global e ao mesmo tempo detalhado da economia, a MIP permite analisar o impacto de choques e mudanças em um determinado setor sobre os demais e sobre o conjunto de toda a economia. Por exemplo, é possível estimar como um aumento na produção da indústria química afeta a demanda por insumos dos outros setores, ou como uma redução na demanda pela soja brasileira afeta a produção dos setores relacionados. Além disso, o Modelo de Insumo-Produto também pode ser utilizado para calcular indicadores econômicos, como o valor adicionado da economia (PIB) – global e a contribuição de cada setor –, a arrecadação de impostos, além da geração de empregos e renda.

Em resumo, a MIP é uma ferramenta importante para entender as interações entre os setores da economia e analisar o impacto de mudanças em um segmento sobre os demais. Ela fornece uma visão abrangente das interrelações no mundo da produção e do consumo na economia, permitindo uma análise mais precisa e detalhada dos efeitos desencadeados por mudanças isoladas, mas com repercussão sobre uma gama relevante de setores, sobre a renda e a capacidade de consumo da economia – efeitos diretos, indiretos e induzidos.

No presente estudo, analisamos como os veículos híbridos e elétricos afetarão produção do setor automotivo e quais serão os impactos sobre a economia. Para tanto, tomamos como base os estudos de demanda da Subseção 6.1, além de pesquisas pregressas, conversas com agentes do setor e respostas a questionários

para traçar diferentes cenários de evolução dos novos licenciamentos veiculares no Brasil, assim como diferentes projeções para a sua motorização entre veículos a combustão (IC), híbridos (HEV) e elétricos (BEV).

Em seguida, consideramos que cada uma das modalidades de motorização de veículos planejados pelas montadoras gerará diferentes estímulos produtivos, pois: (i) cada tipo de veículo possui faixas de preço distintas; (ii) cada uma das diferentes motorizações terá frações diferentes de veículos de produção nacional e importados; e (iii) mesmo para aqueles veículos de produção nacional, cada tipo de motorização poderá apresentar proporções distintas de conteúdo local.

Para entender os efeitos das mudanças futuras neste mercado, estimamos os efeitos dos choques de demanda (volume monetário representado pela aquisição de veículos) sobre todos os setores da economia com os quais a indústria automotiva se relaciona, de forma a calcular os impactos para a data-base de 2020 e para os anos de 2030; 2035; 2040 e 2050. Nessa medida, os cenários de estimativas do estímulo econômico no setor automotivo podem ser divididos em três dimensões:

- I. Licenciamentos: evolução da quantidade total de licenciamentos;
- II. Motorização: mix de cada tipo de veículo – IC, HEV e BEV – nos licenciamentos totais; e
- III. Empuxo econômico: evolução do preço, produção nacional e conteúdo local da produção nacional.

A partir dessas estimativas, apresentadas detalhadamente no Anexo I, foram calculados os estímulos na demanda agregada de cada um dos cenários considerados. Tais impulsos iniciais foram então inseridos na MIP, obtendo-se assim o impacto econômico derivado destes impulsos iniciais de demanda sobre a produção total, o valor adicionado (PIB), arrecadação de impostos indiretos e geração de empregos e renda – e assim sucessivamente, de forma interativa, os impactos sobre a produção gerados pelas novas fontes de emprego e renda.

Por outro lado, é importante ressaltar que, por se tratar de uma “fotografia econômica”, a MIP não captura mudanças tecnológicas em produtos e/ou processos

produtivos que serão induzidas pelos veículos híbridos e elétricos, e que por sua vez alterarão as quantidades de insumos demandadas entre os diferentes setores – os coeficientes técnicos¹³².

As tecnologias produtivas empregadas na economia são retratadas na matriz de coeficientes técnicos ("MCT") do Modelo de Insumo-Produto. Nessa medida, alterações nas quantidades de insumo demandadas por um setor ocasionadas por mudanças tecnológicas alterariam os coeficientes técnicos da MIP.

No entanto, tais mudanças futuras não estão retratadas nas estimativas desenvolvidas aqui com a atual MIP. Para que pudessem ser incorporadas, seria necessária a construção de um novo Modelo de Insumo-Produto, tarefa a cargo do IBGE e que foge ao escopo desta análise. Conseqüentemente, em todos os cenários estimados e em todos os anos estudados, os coeficientes técnicos são mantidos fixos. Portanto, a MIP não captura todos os impactos econômicos vindouros associados às novas rotas tecnológicas e padrões produtivos em desenvolvimento no setor automotivo.

Do mesmo modo, o modelo não levou em consideração os estímulos econômicos que serão gerados pela necessidade de instalação da infraestrutura de recarga para os novos veículos eletrificados e a produção adicional para atender à maior demanda de energia; a instalação de linhas de transmissão adicionais; armazenamento; postos de recarga etc. Simetricamente, não são considerados os investimentos necessários para aumentar a oferta de biocombustíveis nem os investimentos na modernização e adaptação das montadoras para os novos modelos, cujos parâmetros não estão discriminados adequadamente e cujos resultados tendem a ser equilibrados para ambos os modelos de eletrificação. Portanto, também sob essa perspectiva, o Modelo de Insumo-Produto não retrata os impactos econômicos totais.

¹³² A atualização dos coeficientes técnicos de uma matriz depende de pesquisas complexas capazes de capturar as demandas intermediárias intersetoriais em toda a economia, não sendo possível fazer estimativas confiáveis sem um retrato completo das diversas interações existentes nas relações de demanda dentro de cadeias complexas. No entanto, nosso interesse reside na comparação entre diferentes cenários, o que minimiza o viés decorrente da hipótese de que os coeficientes técnicos permanecem estáveis.

Assim, os impactos econômicos são estimados *coeteris paribus*, ou seja, “tudo o mais constante”, repercutindo estrutura produtiva de 2020 em todos os anos e cenários.

Não obstante, os efeitos relevantes advêm da comparação entre os diferentes cenários, de forma que os efeitos relativos das diferentes estratégias de políticas públicas possam ser avaliados.

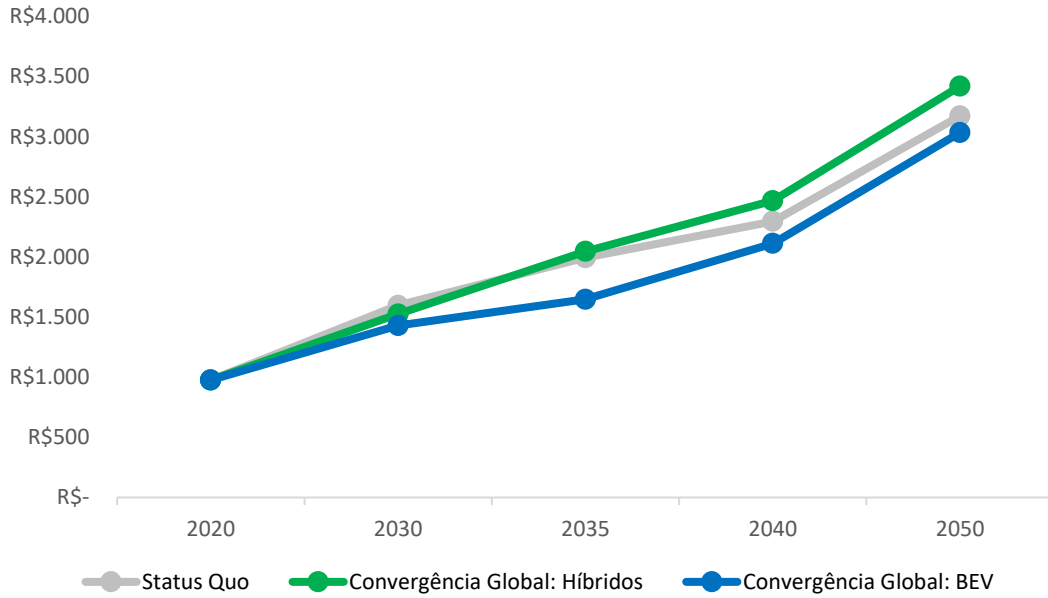
Abaixo, apresentamos os resultados obtidos pelo modelo:

Estimou três cenários distintos para a evolução da eletrificação da frota veicular brasileira.

- i. Status Quo (Prevalência Combustão): cenário de controle, baseia-se no quadro atual dos licenciamentos de veículos no Brasil. Há a prevalência dos veículos a combustão ao longo de todo o período e eletrificação da frota brasileira evolui de modo comedido, atingindo 1,7% em 2030; 2,5% em 2035; 3,1% em 2040 e 3,9% em 2050, no somatório dos veículos HEV e BEV;
- ii. Convergência Global: Híbridos: a frota de veículos eletrificados converge para o padrão global de eletrificação, porém com preponderância dos veículos híbridos, que saltam de 4,5% em 2030 para 11,1% em 2035; 20,9% em 2040 e 48,8% e, 2050. No somatório com os BEV, a frota eletrificada atinge 5,6%; 13,8%; 25,8% e 59,3% nos anos de 2030; 2035; 2040 e 2050, respectivamente;
- iii. Convergência Global: BEV: o Brasil converge para o padrão global de eletrificação da sua frota de veículos, com preponderância de veículos elétricos puros. Em 2030, os veículos BEV atingem 3,4% da frota total; 9,4% em 2035; 18% em 2040 e 40,2% em 2050. Juntamente com os HEV, os veículos eletrificados compõem 5,6%; 13,8%; 25% e 53,2% da frota entre 2030 e 2050.

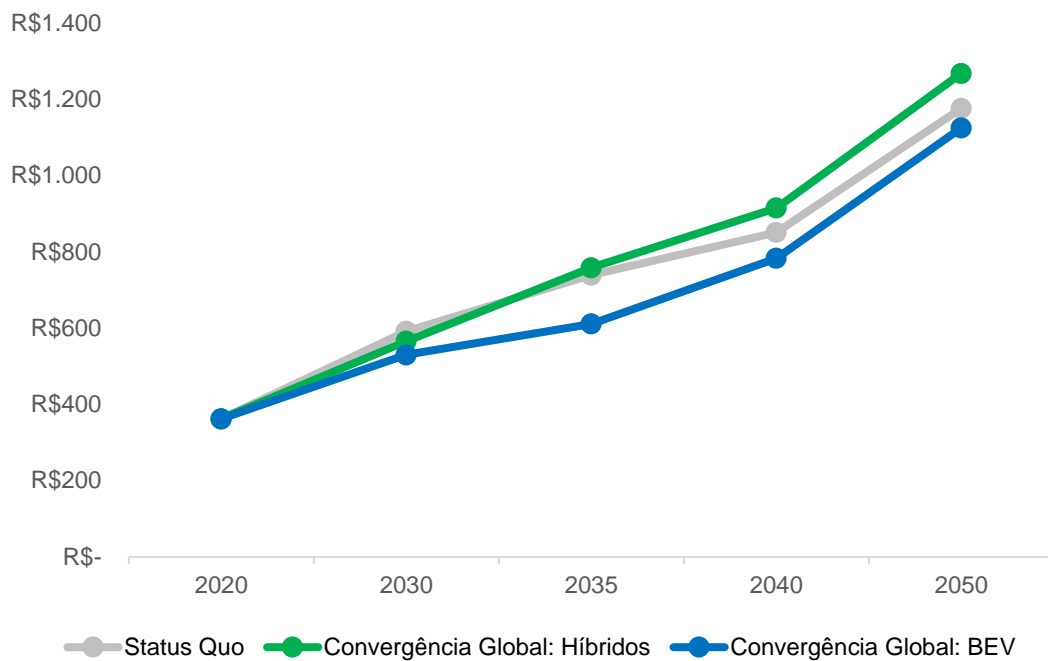
Como pode ser observado nos gráficos abaixo, a convergência brasileira para os padrões globais de eletrificação geraria resultados distintos em relação ao cenário de prevalência dos veículos a combustão, a depender da rota tecnológica dominante.

Gráfico 59 – Produção Total (R\$ Bilhões).



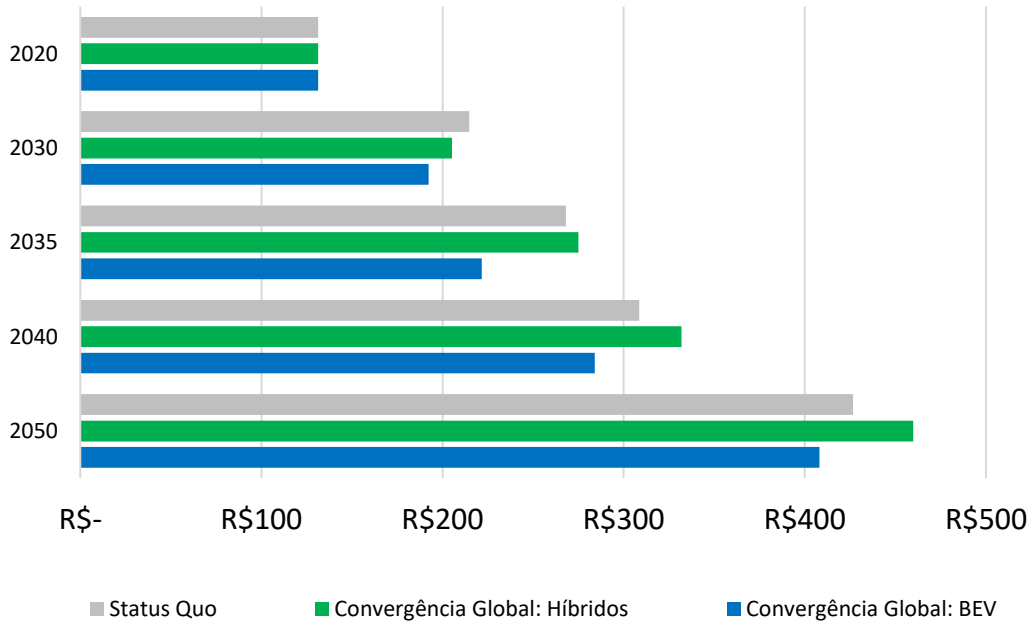
Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 60 – Valor Adicionado: PIB (R\$ Bilhões)



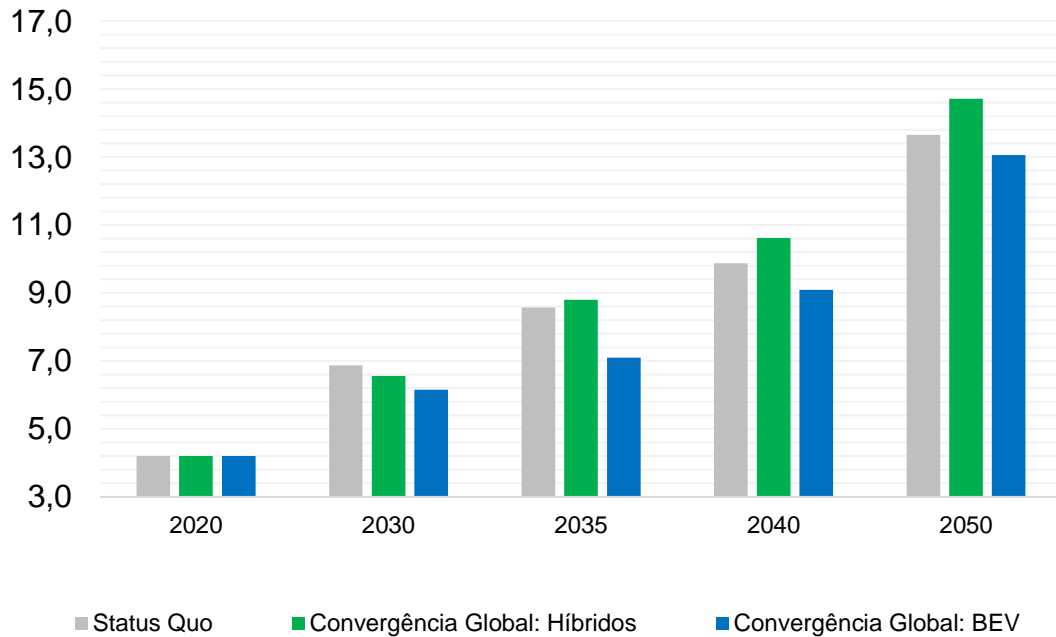
Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 61 – Impostos (R\$ Bilhões)



Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Gráfico 62 – Emprego (Milhões de trabalhadores)

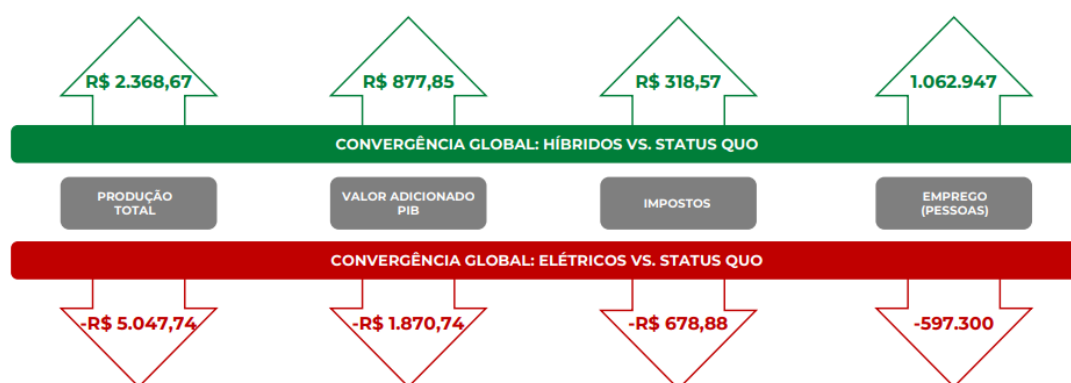


Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Tabela 14 – Síntese dos Impactos Econômicos Acumulados (2020 a 2050)

2020 a 2050	Convergência Global: Híbridos vs. Status Quo	Convergência Global: BEV vs. Status Quo
Produção (R\$ Bilhões)	R\$ 2.368,67	-R\$ 5.047,74
PIB (R\$ Bilhões)	R\$ 877,85	-R\$ 1.870,74
Impostos (R\$ Bilhões)	R\$ 318,57	-R\$ 678,88
Emprego (Unidades)	1.062.947	-597.300

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Imagem 5 – Impactos econômicos acumulados: calculados pela metodologia da Matriz de Insumo Produto – 2020 a 2050 (R\$ Bilhões)

Fonte: LCA Consultores.

Como pode ser observado, os impactos socioeconômicos serão distintos a depender da rota tecnológica prevalescente no processo de eletrificação da frota veicular brasileira.

Caso a eletrificação se dê predominantemente por meio dos veículos híbridos (veículos HEV, cenário Convergência Global: Híbridos), nossas análises mostram impactos positivos significativos, com crescimento acumulado do PIB de R\$ 877,85 bilhões entre 2020 e 2050 e a geração de aproximadamente 1,1 milhão de empregos.

Os resultados positivos verificados no cenário de Convergência Global: Híbridos decorrem principalmente de um percentual de conteúdo local na fabricação dos veículos HEV e do seu maior valor médio em relação aos veículos IC (o percentual total é menor, mas o produto percentual local x valor é maior). A médio prazo, esperamos que a produção local dos componentes da bateria – em especial a montagem e customização dos sistemas de segurança da bateria – aumente os efeitos positivos verificados no cenário de Convergência Global: Híbridos.

Por outro lado, caso a convergência para os padrões globais de eletrificação se dê através do uso predominante de veículos BEV (Convergência Global: BEV), nossas análises indicam possíveis perdas para a economia brasileira. Tal cenário negativo é decorrente do menor conteúdo local atual dos veículos dessa categoria – especificamente aqueles relacionados à fabricação de componentes centrais das baterias e notadamente da exclusão do motor a combustão e da caixa-de-cambio, altamente intensivas em componentes, partes e peças quando comparados aos veículos à combustão, predominantes no cenário Status Quo.

Notamos que tais possíveis efeitos são observados mesmo levando-se em consideração que os veículos elétricos BEV possuem o maior valor médio de todos os tipos de motorização considerados.

Entretanto, é fundamental enfatizar que nossas estimativas e cenários levam em conta tão somente os processos produtivos correntes. Não incorporamos em nossas análises, por falta de informações para balizar as premissas, a evolução tecnológica nos sistemas de manufatura que deverá ser induzida pelos novos padrões de motorização, nem, principalmente, o possível aumento do conteúdo local dos veículos elétricos BEV, em especial a fabricação das células das baterias, que têm valor bastante expressivo no valor total do veículo, a depender do modelo e potência.

Portanto, caso a fabricação das células das baterias seja crescentemente localizada no Brasil, esperamos que o impacto econômico negativo associado aos veículos BEV seja parcialmente mitigado. Esta mitigação poderá ser mais importante se houver desenvolvimento de toda cadeia produtiva à montante, inclusive a mineração, processamento, refino dos metais necessários e montagem das células.

Além dos anos analisados, calculamos, por meio de interpolação, o impacto econômico na produção total, no PIB, arrecadação de impostos e na geração de empregos para todos os anos entre 2020 e 2050. Dessa forma, é possível observar a trajetória de cada cenário ao longo do tempo, além do impacto econômico acumulado ao longo dos próximos 30 anos.

Tabela 15 – Produção Total – impacto acumulado desde 2020 (R\$ Bilhões)

Ano	Convergência Global: Híbridos	Convergência Global: BEV
	vs. Status Quo	vs. Status Quo
2020	-	-
2030	-R\$ 342,12	-R\$ 808,35
2035	-R\$ 354,26	-R\$ 2.154,80
2040	R\$ 253,59	-R\$ 3.422,27
2050	R\$ 2.368,67	-R\$ 5.047,74

Elaboração: LCA Consultores

Tabela 16 – Valor Adicionado: PIB – impacto acumulado desde 2020 (R\$ Bilhões)

Ano	Convergência Global: Híbridos	Convergência Global: BEV
	vs. Status Quo	vs. Status Quo
2020	-	-
2030	-R\$ 126,79	-R\$ 299,58
2035	-R\$ 131,29	-R\$ 798,59
2040	R\$ 93,98	-R\$ 1.268,33
2050	R\$ 877,85	-R\$ 1.870,74

Elaboração: LCA Consultores

Tabela 17 – Impostos – impacto acumulado desde 2020 (R\$ Bilhões)

Ano	Convergência Global: Híbridos	Convergência Global: BEV
	vs. Status Quo	vs. Status Quo
2020	-	-
2030	-R\$ 46,01	-R\$ 108,72
2035	-R\$ 47,64	-R\$ 289,80
2040	R\$ 34,11	-R\$ 460,27
2050	R\$ 318,57	-R\$ 678,88

Elaboração: LCA Consultores

Tabela 18 - Empregos (Trabalhadores acumulados desde 2020)

Ano	Convergência Global: Híbridos	Convergência Global: BEV
	vs. Status Quo	vs. Status Quo
2020	-	-
2030	-306.071	-716.925
2035	223.507	-1.486.062
2040	743.995	-785.555
2050	1.062.947	-597.300

Elaboração: LCA Consultores

A análise das tabelas permite avaliar a trajetória dos cenários de impacto econômico em resposta às mudanças no setor automotivo. No curto prazo, os dois cenários de eletrificação da frota brasileira geram perdas econômicas relativamente ao cenário *Status Quo*. Não obstante, a partir de 2039 o cenário de Convergência Global: Híbridos reverte as perdas de curto prazo e passa a gerar consistentemente resultados econômicos positivos relevantes em relação ao cenário de *Status Quo*. O mesmo não ocorre com o cenário de Convergência Global: BEV, pelos motivos elencados anteriormente.

Reforçamos que tais estimativas consideram tão somente a estrutura produtiva vigente, ou seja, não incorporam eventuais investimentos na construção de novas plantas produtivas e a aquisição das novas máquinas e equipamentos destinados a elas (em nenhum dos cenários). Portanto, é importante frisar que os investimentos nas fábricas para a produção dos novos modelos e seus componentes podem modificar estas estimativas a depender da direção que adotarem (se mais concentradas em BEVs, os efeitos negativos podem ser mitigados); ainda, esta mitigação será tão mais poderosa quanto maiores e mais profundos forem os investimentos nessas novas unidades produtivas, a depender de sua composição e do adensamento da produção local.

7. Recomendações de políticas públicas

Com base numa breve avaliação das políticas em vigor ou em discussão atualmente no país (capítulo 5) e nas simulações que apontam caminhos possíveis para a motorização no Brasil e seus impactos em termos (i) das emissões de GEE resultantes e (ii) dos multiplicadores de emprego e renda na economia, buscaremos avaliar neste capítulo os principais temas de política pública e aperfeiçoamento regulatório com vistas à aceleração do processo de descarbonização e ao desenvolvimento socioeconômico.

Este estudo preza pela neutralidade das políticas públicas, pela não discriminação de segmentos específicos e pela não eleição de “ganhadores”, dado que os avanços tecnológicos estão em curso e os resultados ainda podem surpreender. Como objetivo geral, trata-se de **reduzir as emissões de GEE e gerar vetores de desenvolvimento econômico e tecnológico para o Brasil**.

Assim, listaremos e comentaremos a seguir os objetivos e as ações de política pública que podem contribuir para acelerá-los e/ou consolidá-los.

Harmonização regulatória: consistência entre políticas voltadas à redução das emissões

Como vimos (capítulo 5), todos os esforços recentes da regulação estão voltados a promover ganhos de eficiência na mobilidade (MOVER) e introduzir incentivos à diversificação e à oferta de veículos mais eficientes e combustíveis de baixa emissão de GEE (RenovaBio, Combustível do Futuro).

Em todas estas políticas, tem havido convergência em torno de conceitos mais amplos para medir a emissão de CO₂, partindo do critério de Poço à Roda e evoluindo para conceitos mais amplos como do Berço ao Túmulo, citados no RenovaBio e no Combustível do Futuro como medidas a serem adotadas nas próximas renovações. Com isso, etapas anteriores como mineração, refino e beneficiamento de minerais, uso da terra para biocombustíveis etc. até etapas posteriores como o descarte e/ou reciclagem passariam a estar incorporadas nas medidas de emissão. Espera-se,

assim, que a regulação possa induzir investimentos na descarbonização de todas as etapas do ciclo de vida dos produtos que participam da cadeia da mobilidade, em particular as rotas tecnológicas que gerem o menor impacto ao meio ambiente.

Há matérias regulatórias que podem afetar negativamente a evolução de soluções já consolidadas e interferir nas condições de competitividade dos biocombustíveis. Tal é o caso do PROCONVE: desenhado para regular os limites de emissão de poluentes por montadora ao longo do tempo, a introdução da 8ª Fase do Programa para veículos leves (L8) a partir de 2025 irá afetar negativamente os veículos movidos a etanol devido a um padrão excessivamente rígido em relação às emissões de gases orgânicos não metano (NMOG) – que tendem a ser maiores no etanol relativamente à gasolina pelo critério de medição utilizado –, o que obrigaria à realização de investimentos vultuosos que poderiam inviabilizar os motores a etanol, incluindo híbridos. Assim:

- (i) É necessário adaptar o **Proconve** para evitar que algumas restrições definidas para a emissão de poluentes se choquem com outras políticas voltadas à descarbonização, à medida que podem fechar, a médio prazo, o caminho para rotas alternativas de baixo carbono que combinam eletrificação com biocombustíveis, em particular com o etanol.
- (ii) É desejável que as próximas renovações dos diversos programas e regulamentações sobre veículos e combustíveis levem em conta o conceito do berço ao túmulo como medida de emissões de GEE, tendo em vista a necessidade de incentivar que todas as etapas do ciclo de vida dos produtos estejam alinhadas no esforço de descarbonização.

Ainda sobre este aspecto, as matérias que tratam de eficiência veicular (em particular, o **MOVER**) consideram de forma genérica os veículos híbridos como uma categoria única, sem diferenciar por níveis de eficiência. Assim, qualquer que seja a capacidade do sistema elétrico envolvido, a potência e a voltagem da bateria – e, portanto, a eficiência efetiva do sistema –, todos os modelos da categoria “híbridos” recebem o mesmo tratamento.

Com a aprovação recente da MP 45 (Reforma Tributária), será necessário assegurar que os benefícios de redução do IPI sejam mantidos no novo regime, preferencialmente na forma de alíquotas diferenciadas conforme a eficiência dos sistemas. Assim,

- (iii) É necessário assegurar, na regulamentação da PEC 45, o benefício da redução do IPI previsto no programa MOVER dentro do novo regime tributário (que unificará o IPI com outros tributos federais e estaduais) e escalonar este benefício por categorias de veículos, de acordo com sua eficiência.

No capítulo da Reforma Tributária, há outros pontos de atenção relativos aos biocombustíveis e que podem torná-los viáveis em todo território nacional, utilizando-se de mecanismos tributários que podem compensar desvantagens logísticas em boa parte dos Estados em que não há produção. A redação trazida pela Reforma Tributária (artigo 156-A, §6º, I da Constituição da República) traz dispositivo que torna possível que os biocombustíveis (principalmente o etanol) sejam competitivos em todo o país, possibilitando alíquotas uniformes em todo o território nacional, específicas por unidade de medida e diferenciadas por produto. Os pontos são os seguintes:

- (iv) Seguir as disposições constitucionais (inciso VIII, parágrafo primeiro, artigo 225 da Constituição) que estabelecem regime fiscal favorecido para os biocombustíveis (incluindo hidrogênio de baixo carbono) e asseguram tributação inferior à incidente sobre os combustíveis fósseis; e
- (v) Regular dispositivos constitucionais (artigo 156-A, §6º, I da Constituição), na redação trazida pela Reforma Tributária, observando-se a tributação praticada nos Estados que são maiores consumidores de etanol (São Paulo e Minas Gerais) de forma a estimular o consumo de etanol em mercados nos quais hoje seu custo ultrapassa a equivalência dos 70% do combustível fóssil.

Ainda com relação aos veículos leves e no intuito de ampliar o esforço de descarbonização, é importante assegurar equilíbrio entre as alternativas de

motorização disponíveis para efeito de incentivos via impostos sobre a propriedade (IPVA): ao invés de benefícios seletivos, os efeitos tendem a ser mais benéficos para a sociedade se aplicados sobre os resultados em termos da descarbonização. Assim:

- (vi) O benefício da redução ou isenção do IPVA deve ser aplicado não a tecnologias específicas, mas aos veículos classificados como de baixa emissão de GEE pelo INMETRO (conceito AEA), conforme parâmetros e critérios a serem definidos pelo MDIC em conjunto com Ministério da Fazenda, para posterior aplicação por parte dos Estados.

Por fim, deve-se atualizar os parâmetros de teste de paridade – relação de eficiência energética por volume – entre etanol hidratado e a gasolina de referência. O objetivo é a adoção de protocolos mais próximos à realidade do combustível ora utilizado, já que a gasolina de referência utilizada nos testes contém 22% de etanol anidro, diferentemente do combustível disponível para o consumidor, que atualmente tem teor de 27% de etanol anidro em sua composição. Assim,

- (vii) É necessário que o PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – atualize os parâmetros utilizados nos testes de paridade e considere a mistura atual, de 27% ao invés de 22%, nos moldes do definido em Nota Técnica do MME (74/220/DBIO.SPG).

Da mesma forma como estabelecido para veículos leves, é necessário firmar uma base de dados e um método para a medição das emissões de CO₂ em veículos pesados, cujas características e variabilidade de uso final (sobretudo para os segmentos de pesados e superpesados, que percorrem longas distâncias e são customizados conforme o tipo de carga, o peso a ser transportado, as estradas a serem utilizadas etc.) exigem uma gama elevada de parâmetros bastante heterogêneos, não sendo possível estimar as emissões com base em médias¹³³. Desta forma,

¹³³ Como exemplo, variáveis como tipo de carga (são mais de 60 categorias), peso, número de eixos, padrão de aerodinâmica dos trucks, perfil e qualidade da malha rodoviária, distância percorrida com e sem carga etc. precisam entrar na conta.

- (viii) O governo deve se manifestar com vistas a convocar os fabricantes de veículos pesados para construção de um calendário de implementação do VECTO no Brasil para medição adequada das emissões de CO₂ no âmbito do RenovaBio.

Com relação à cadeia de biocombustíveis, em particular à base da cana-de-açúcar, tem ficado claro o potencial do Brasil para se tornar um produtor global de uma extensa gama de produtos fundamentais para a descarbonização de toda cadeia de transporte, de veículos leves (etanol) a pesados (biometano, diesel verde/HVO, hidrogênio e amônia de baixo carbono), incluindo máquinas agrícolas e de construção pesada (biometano, amônia), aviação (SAF), navegação (metanol) e ferrovia (amônia, metanol). O regime de incentivo previsto no RenovaBio com os CBios tem sido importante para pavimentar o caminho da expansão da produção local, que por sua vez tem assegurado avanços notáveis de produtividade a partir de novas tecnologias já mapeadas por meio de seus centros de pesquisa e desenvolvimento (CCT e EMBRAPA). Ainda assim, há questões relevantes que precisam estar asseguradas, dentre as quais listamos as seguintes ações:

- (ix) Assegurar a aprovação das emendas ao PL 4.516/2023 relativas ao Programa Nacional do Biometano (vide capítulo 5.4 acima, pgs 67-71), fundamentais para dotar o mercado de segurança regulatória e para incentivar investimentos no aumento da oferta e, com isso, pavimentem o caminho de crescimento da demanda por este biocombustível;
- (x) Apoiar investimentos em ramais secundários de gasoduto que interliguem os locais de produção de biocombustíveis e hidrogênio de baixo carbono a partir do mapeamento exaustivo dos principais troncos próximos às regiões produtoras para então interligá-los aos ramais de gasoduto existentes (TAG, TBG, TSB, GOM e NTS). Numa primeira fase da transição, a complementação do gás natural com biometano poderá garantir volumes adicionais de oferta relevantes e, assim, substituir o diesel como combustível para veículos pesados de longo curso. O atendimento da demanda em grandes centros mais distantes das regiões produtoras (Sudeste e Centro Oeste) exigirá investimentos em novos ramais de gasoduto;

- (xi) Para o hidrogênio de baixo carbono, assegurar que os novos ramais de gasoduto sejam estruturados com materiais apropriados para suportar maiores cargas de pressão; para os existentes, assegurar reforços de materiais apropriados para que possam comportar volume crescente de hidrogênio de baixo carbono em sua malha;
- (xii) De forma semelhante, apoiar e incentivar o desenvolvimento de etanoldutos, particularmente do duto central de Minas Gerais à região Centro Oeste, entre outros que permitirão interligar regiões produtoras aos centros consumidores relevantes;
- (xiii) Criar mecanismos de certificação da disponibilidade e conformidade de biocombustíveis que assegurem a emissão de Selos Verdes, de forma a viabilizar que agentes de qualquer local do país banquem o gás que poderá ser utilizado efetivamente em locais em que haja escoamento;
- (xiv) Apoiar com linhas de financiamento especiais, por meio inclusive de *funding* específico voltado à transição energética, os investimentos voltados à produção de biocombustíveis e hidrogênio de baixo carbono;

Um dos setores apoiados por financiamentos do BNDES em condições especiais é o de ônibus elétricos, por meio de repasses aos concessionários em programa recém anunciado pela instituição. No entanto, entendemos que as linhas e financiamento precisam ser estendidas a seus congêneres, em especial para ônibus movidos a biometano ou a hidrogênio de baixo carbono. A depender da origem das células das baterias que acompanham os modelos elétricos, o impacto nas emissões de GEE globais podem ser maiores nestas versões do que nos modelos movidos a biometano ou hidrogênio de baixo carbono. Assim:

- (xv) Estender programas de financiamento a ônibus urbanos desenhados para modelos elétricos também para seus congêneres, desde que eficientes do ponto de vista das emissões e da viabilidade do modelo de negócios. Especificamente, para assegurar o princípio da não discriminação de rotas tecnológicas, que as mesmas linhas de financiamento do BNDES direcionadas à aquisição de ônibus elétricos à bateria possam ser utilizadas na aquisição de ônibus movidos a biometano ou a hidrogênio de baixo carbono.

Nossos exercícios de projeção para a frota de veículos em 2050 evidenciam que a velocidade de renovação no Brasil não será suficiente para uma redução expressiva das emissões na cadeia do transporte rodoviário, sobretudo para os veículos pesados. Assim, para garantirmos uma trajetória de redução mais efetiva destas emissões, serão necessárias políticas de apoio à renovação acelerada da frota de caminhões. Neste sentido, sugerimos:

- (xvi) A criação de linhas de financiamento especiais para a renovação da frota de caminhões e máquinas pesadas (agrícolas e de construção) e garantia de troca dos modelos antigos por novos de emissão mínima, sob gestão dos órgãos regulação ambiental e supervisão do MDIC;
- (xvii) Determinar metas que contemplem uma gama diversa de tecnologias em busca da descarbonização, buscando exponenciar os biocombustíveis (biodiesel, biometano), o hidrogênio de baixo carbono e a eletrificação;
- (xviii) A regulamentação de pesos e dimensões dos veículos pesados também deve ser atualizada no propósito de busca pela descarbonização, de modo que novas tecnologias que preveem aumento do peso permitido no eixo dianteiro possam ser contempladas. Como exemplo, para o biometano a operação seria facilitada com permissão para 7 toneladas no eixo dianteiro; no caso do elétrico, permissão de 9 toneladas;
- (xix) A inserção na lei 14.133/2021 (Lei geral de licitações) de dispositivo que consagre como critério para compras de combustíveis pela Administração pública a sustentabilidade ou que reserve um percentual mínimo de aquisição de biocombustíveis.

8. Conclusões e considerações finais

Os cenários construídos neste estudo adotam informações, perspectivas e deduções obtidas até o momento, mas que podem e devem mudar ao longo dos anos conforme as estratégias vão sendo definidas e o mercado reage a elas. Assim, como qualquer cenário que antecipa um futuro tão distante, os resultados podem mudar se e quando as hipóteses aqui adotadas (e descritas nos anexos, abaixo) mudarem, de forma que nossas conclusões podem ser alteradas conforme o andar dos acontecimentos.

Este trabalho se apoiou num conjunto amplo de informações técnicas coletadas em meios acadêmicos, estudos setoriais, entrevistas com atores relevantes atuantes em todos os segmentos envolvidos no debate da transição energética e da descarbonização da mobilidade no Brasil e no mundo. Nossos princípios norteadores foram a neutralidade das ações e definições no campo das políticas públicas, de forma a não discriminar nem privilegiar segmentos específicos e atender aos objetivos de descarbonizar e gerar vetores de desenvolvimento econômico para o país.

Salta aos olhos o fato de o Brasil ter se antecipado à agenda climática ao criar políticas de apoio ao desenvolvimento de cadeias de biocombustíveis alternativos e complementares aos combustíveis fósseis desde a década de 70, ainda que por outras razões e com outros objetivos. Aliadas a uma regulação firme para o controle das emissões de poluentes na matriz de mobilidade nacional, este conjunto de políticas mobilizou as cadeias agrícolas e industriais ligadas ao setor de transportes no sentido de desenvolver soluções próprias e internalizar tecnologias capazes de alavancar a segurança e eficiência dos motores e a qualidade dos combustíveis, com impactos positivos sobre as emissões de poluentes e de gases de efeito estufa.

Com isso, foi possível estipular metas ousadas de redução das emissões de GEE em acordos para controle do aquecimento global e apresentar resultados ainda melhores do que as metas estipuladas, em boa medida por conta do amadurecimento tecnológico das cadeias de combustíveis renováveis e da engenharia automotiva locais. Some-se a isso a construção, também ao longo de décadas, de uma matriz elétrica predominantemente renovável e toda interligada por um sistema de

transmissão robusto e capaz de atender a todas as regiões, com pouquíssimas exceções. Assim, o Brasil desponta como um dos países mais bem posicionados e capazes de atender às suas metas de emissão até 2050, com potencial para suprir parte da demanda global por combustíveis renováveis.

Olhando isoladamente para o potencial de redução de emissões, vemos que as rotas de motorização presentes no portfólio das principais montadoras serão complementares e atenderão a todos os nichos de mercado com um mix entre biocombustíveis e eletrificação, com ênfase nos ganhos de eficiência decorrentes da combinação entre biocombustíveis e eletrificação híbrida para veículos leves (com etanol) e uma gama de biocombustíveis para pesados (gás natural na transição seguido por biometano, biodiesel e HVO) e, mais a médio e longo prazos, a possibilidade de produção de hidrogênio e amônia de baixo carbono para substituir o gás natural ou o diesel na frota de caminhões, ônibus e maquinários pesados – mineração, navios e locomotivas. Há ainda um potencial relevante para a produção de SAF (em complemento ou substituição gradativa ao querosene de aviação) e combustíveis sintéticos à base de hidrogênio.

Há diversas frentes maduras de pesquisa e desenvolvimento capazes de duplicar, nas próximas duas décadas, a capacidade de produção de cana-de-açúcar e de amido de milho sem a necessidade de novas terras e sem concorrência com alimentos, apenas por meio de ganhos de produtividade. Há ainda resíduos derivados de outros setores (agropecuária, resíduos sólidos e esgoto sanitário) para a produção de biogás e biometano, em complemento ao setor sucroalcooleiro. Com isso, amplia-se a oferta de combustíveis renováveis ao mesmo tempo que se reduz a pegada de carbono na cadeia do etanol, que segue sendo a principal base de produção de biocombustíveis.

Como resultado, modelos híbridos que combinam motores elétricos aos combustíveis renováveis têm se mostrado mais eficientes do ponto de vista da descarbonização, principalmente quando se medem as emissões de CO_{2eq} realizadas ao longo de todo ciclo de vida dos produtos (berço à roda, precedendo as medidas de berço ao túmulo) e, ainda, quando os resíduos da produção sucroalcooleira (palha, torta de cana e vinhaça) passam a ser convertidos em biometano e biofertilizantes.

Os modelos de projeção de licenciamentos, no entanto, indicam que a renovação natural da frota de veículos no Brasil tende a ser mais lenta do que em outros países, seja pela ausência de benefícios fiscais-tributários para a aquisição e substituição de modelos antigos, seja por restrições de renda de extensa parcela de consumidores ou ainda pela hipótese de que a convergência de preço dos novos modelos relativamente aos convencionais será lenta, alargando o prazo para que os novos modelos impactem de forma significativa o resultados das emissões.

Assim, tornam-se necessárias ações e regulamentos que tragam segurança e incentivem os investimentos necessários para elevar a oferta e aprofundar a trajetória bem-sucedida de descarbonização da mobilidade no Brasil por meio de biocombustíveis; esforços no sentido de ampliar a malha de transporte de gás, biocombustíveis renováveis e hidrogênio de baixo carbono; medidas de harmonização tributária que tornem os preços dos biocombustíveis mais competitivos relativamente aos fósseis em regiões mais distantes das áreas produtoras; medidas que estimulem a renovação da frota, sobretudo de veículos pesados; que incentivem compras governamentais de soluções que colaborem para a descarbonização; que acelerem a implementação da ferramenta VECTO para que se tenha medidas adequadas de emissões de CO₂ no segmento de veículos pesados; que incentivem o crescimento da produção de biometano e outros biocombustíveis sintéticos por meio de mandatos, entre outras medidas que se tornam necessárias e urgentes para assegurar ao Brasil um lugar de liderança no cenário da descarbonização em transportes.

Do ponto de vista do impacto socioeconômico de cada rota, vimos que o cenário em que prevalecem os motores híbridos (*flexfuel* ou etanol + bateria de pequeno-médio portes) tendem a gerar maiores multiplicadores de produção, PIB, emprego e renda, alavancando com mais vigor a economia; este resultado decorre do fato de que parcela relevante da cadeia de partes, peças e componentes automotivos deixa de ser utilizada nos modelos elétricos puros bem como da premissa de que parcela expressiva da cadeia de baterias (notadamente, a produção de células) seguirá um bom tempo sendo atendida por importações, o que reduz a capacidade de indução da demanda sobre a economia. Neste sentido, seriam bem-vindas políticas de apoio à pesquisa e desenvolvimento de plantas locais de extração e refino de minérios para

a produção local de células de bateria íon-lítio ou outras rotas que podem se mostrar mais eficientes e competitivas.

Apoiar a expansão das cadeias de biocombustíveis e do hidrogênio de baixo carbono, para além de dinamizar a neindustrialização com base em cadeias sustentáveis, irá acelerar o processo de autonomia tecnológica que poderá alçar o país à condição de *player* global de uma gama relevante de soluções sistêmicas em descarbonização e, com isso, consolidar o Brasil como parceiro e fornecedor de soluções para um conjunto de países de elevado crescimento, como Índia, Indonésia e Américas.

Para a necessária expansão da oferta de biocombustíveis em complemento à eletrificação, nota-se que o Brasil possui condições de fazer com que a produção aumente por meio de ganhos de produtividade nas lavouras, haja vista o avanço recente de novas técnicas e inovações em biotecnologia, sobretudo para a cana-de-açúcar. Assim, espera-se que o país possa dobrar a produção em menos de duas décadas, desde que deslanchem investimentos na renovação das lavouras sem uso de novas terras ou deslocamento de produção de alimentos ou florestas – hipótese de nosso trabalho. Assim, nosso pressuposto é que a expansão futura da produção se dê via investimentos em novas tecnologias com ganhos de produtividade, em virtude da racionalidade econômica e de incentivos regulatórios.

O programa não requer recursos orçamentários ou incentivos fiscais para ser bem-sucedido, mas sim harmonização regulatória para guiar investimentos privados e neutralidade das ações de política com relação às diversas rotas tecnológicas, respeitando-se a escolha do consumidor e os processos competitivos de cada rota.

9. Referências

ABIOGÁS. **Potencial de biogás no Brasil**. Disponível em: <https://abiogas.org.br/potencial-do-biogas-no-brasil>. Acesso em: 29 set. 2023.

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, 2023**. Disponível em: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2023/05/anuario-ATUALIZADO-2023-ALTA_compressed.pdf. Acesso em: 25 out. 2023.

ANFAVEA. **O que é o Programa Rota 2030?**. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/rota-2030/>. Acesso em: 21 set. 2023.

ANFAVEA. **O que foi o Proálcool?**. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/o-que-foi-o-proalcool/>. Acesso em 28 set. 2023.

ANFAVEA; BOSTON CONSULTING GROUP. **O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil**, ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA (AEA). **Cartilha: do poço à roda – Veículos leves**. Disponível em: https://aea.org.br/inicio/wp-content/uploads/2022/11/AEA_CARTILHA-CALCULO-POCO-RODA.pdf. Acesso em: 20 out. 2023.

ATHANASOPOULOU, L.; BIKAS, H.; STAVROPOULOS, P. **Comparative well-to-wheel emissions assessment of internal combustion engine and battery electric vehicles**. Procedia CIRP, v. 78, p.25–30, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2018.08.169>. Acesso em: 23 nov. 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis. **O RenovaBio**, 28 ago. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/funcionamento>. Acesso em: 21 set. 2023.

BRASIL. **Decreto Nº 10.712, de 02 de junho de 2021**. Regulamenta a Lei nº 14.134, de 8 de abril de 2021, que dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de gás natural, de que trata o art. 177 da Constituição, e sobre as atividades de escoamento, tratamento, processamento, estocagem subterrânea, acondicionamento, liquefação, regaseificação e comercialização de gás natural. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/DECRETON10.712DE2DEJUNHODE2021DECRETON10.PDF>. Acesso em: 26 set. 2023.

BRASIL. **Governo entrega Projeto de Lei do Combustível do Futuro ao Congresso**, 14 set. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt->

[br/acompagne-o-planalto/noticias/2023/09/governo-entrega-projeto-de-lei-do-combustivel-do-futuro-ao-congresso](https://www.planalto.gov.br/acompagne-o-planalto/noticias/2023/09/governo-entrega-projeto-de-lei-do-combustivel-do-futuro-ao-congresso). Acesso: 21 set. 2023.

BRASIL. INMETRO. **Veículos Automotivos (PBE veicular)**, 03 fev. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>.

BRASIL. **Lei Nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2005. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2004-2006/2005/lei/l11097.htm. Acesso em 03 out. 2023.

BRASIL. **Lei Nº 12.715, de 17 de setembro de 2012**. Institui o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores; e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/l12715.htm.

BRASIL. **Lei Nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm.

BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Conselho antecipa maior percentual de biodiesel no diesel e incentiva transição energética**, 19 dez. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/dezembro/cnpe-aprova-antecipacao-do-b14-para-marco-de-2024-e-b15-para-marco-de-2025-incentivando-a-producao-de-biocombustiveis-e-a-transicao-energetica>. Acesso em: 26 dez. 2023.

BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompagne-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>.

BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Programa reduz preço de carros, caminhões e ônibus com desconto direto ao consumidor**, 05 jun. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/junho/programa-reduz-preco-de-carros-caminhoes-e-onibus-com-desconto-direto-ao-consumidor>. Acesso em: 26 set. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Combustível do Futuro**, 12 ago. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro>. Acesso em: 21 set. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **RenovaBio**. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/renovabio-1>. Acesso em: 21 set. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Volume de negociação de créditos de descarbonização (CBIOS) ultrapassa os R\$ 8 bilhões**, 04 set. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/volume-de-negociacao-de-creditos-de-descarbonizacao-cbios-ultrapassa-os-r-8-bilhoes/>. Acesso em: 15 dez. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 15 set. 2023.

BRASIL. **Regulamentação da Nova Lei do Gás busca atrair mais investimentos ao país**, 07 jun. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/06/regulamentacao-da-nova-lei-do-gas-busca-atrair-mais-investimentos-ao-pais>. Acesso em: 26 set. 2023.

BUI, Anh; HALL, Dale and SEARLE, Stephanie. International Council on Clean Transportation. **Advanced Clean Cars II: The next phase of California's Zero Emissions Vehicle and Low Emissions Vehicle Regulations**, nov. 2022. Disponível em: <https://theicct.org/publication/accii-zev-lez-reg-update-nov22/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

CIBIOGÁS. **Panorama do Biogás no Brasil 2022**, 2023. Disponível em: <https://materiais.cibioogas.org/webinar-panorama-do-biogas-no-brasil-2022>. Acesso em: 29 set. 2023.

COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE (CEPAL). **Big Push para a Mobilidade Sustentável: cenários para acelerar a penetração de veículos elétricos leves no Brasil**, 2020. Disponível em: <https://www.cepal.org/pt-br/publicaciones/45694-big-push-mobilidade-sustentavel-cenarios-acelerar-penetracao-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 27 nov. 2023.

COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. **'Fit for 55': Council adopts regulation on CO2 emissions for new cars and vans**, 28 mar. 2023. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/03/28/fit-for-55-council-adopts-regulation-on-co2-emissions-for-new-cars-and-vans/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

DE SOUZA, Lidiane La Picirelli, 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** **203**, p.444-468, 2018.

EMBER. **Electricity Data Explorer**, 2022. Disponível em: <https://ember-climate.org/>. Acesso em:

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis: Ano Base 2022**, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/analise-de-conjuntura-dos-biocombustiveis-2022#:~:text=%E2%80%8BA%20d%C3%A9cima%20quarta%20edi%C3%A7%C3%A3o,do%20etanol%20oriundo%20do%20milho>. Acesso em: 20 set. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2022**, ago. 2023. Disponível em https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-756/NT-EPE-DPG-SDB-2023-01_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_Ano2022.pdf. Acesso em: 05 out. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional (BEN) 2023: Ano base 2022**, 2023. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: xxx.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário: Intensidade de carbono das fontes de energia**, set. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Nota-T%C3%A9cnica-Descarbonizacao-do-Setor-de-Transporte-Rodoviario-Intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia.aspx>. Acesso em: 03 out. 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Estudos Plano Decenal de Expansão Energia 2032, dez. 2022**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-689/topico-640/PDE%202032%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis_27dez2022_envio.pdf. Acesso em: 05 out. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Delivering the European Green Deal**. Disponível em: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en. Acesso em: 22 out. 2023.

FENABRAVE. **Índices e Números: Emplacamentos Novos**. Disponível em: <https://www.fenabrave.org.br/Portal/conteudo/emplacamentos>.

GAUTO, Marcelo Antunes, et al. **Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles**. Energy for Sustainable Development, v. 76, 2023.

GESEL. **Experiências Internacionais em Mobilidade Elétrica**. Texto para discussão do setor elétrico, n. 102, ago. 2021. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/tdse-gesel-no-102-experiencias-internacionais-em-mobilidade-eletrica/>. Acesso em: 22 nov. 2023.

GLENSOR, Kain; B. MUÑOZ, María Rosa. **Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways**. Sustainability, 2019.

GUILHOTO, Joaquim José Martins. **Input-Output Analysis: Theory and Foundations**, 01 ago. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1900073>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário de 2017**. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/resultados-censo-agro-2017.html/>. Acesso em: 01 dez. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Biofuel Policy in Brazil, India and the United States Insights for the Global Biofuel Alliance**, 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/338e96c1-7da1-4894-b81b-57ff7bf13040/BiofuelPolicyinBrazil%2CIndiaandtheUnitedStates.pdf>. Acesso em: 27 set. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2023**, abr. 2023, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Acesso em: 21 nov. 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway**, 2021. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf. Acesso em: xxx.

MACHADO, Nayara. O que é SAF? Conheça as diferentes rotas de combustível sustentável de aviação, 09 ago. 2023. **Agência EPBR**. Disponível em: <https://epbr.com.br/o-que-e-saf-conheca-as-diferentes-rotas-de-combustivel-sustentavel-de-aviacao/>. Acesso em: 19 dez. 2023.

MARTINS, Claudia do Nascimento. **Infraestrutura de recarga de bateria e subsídios e incentivos fiscais: condições chave para a difusão do carro elétrico**. PPED-IE-UFRJ. v.4, n.1, p.35-55, 2016.

NEOCHARGE. **Número de carros elétricos no Brasil**. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/carros-eletricos-brasil>. Acesso em: 19 dez. 2023.

NOVA CANA. **As usinas de Açúcar e Etanol do Brasil**. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil/. Acesso em: 15 dez. 2023.

OLMOS, MARLI. Montadoras que produzem no Brasil terão mais vantagens no Rota 2030, diz presidente da Anfavea. **Valor Econômico**, 13 set. 2023. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2023/09/13/montadoras-que-produzem-no-brasil-terao-mais-vantagens-no-rota-2030-diz-presidente-da-anfavea.ghtml>. Acesso em: 21 set. 2023.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **OECD Data Explorer**. Disponível em: <https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=biofuel&pg=0&snb=4&vw=tb&df%5bds%5d=dsDisseminat>

Ficha técnica

Estudo de Avaliação de Trajetórias Tecnológicas mais Eficientes para a Descarbonização da Mobilidade

Elaborado pela LCA Consultores e MTempo Capital



Abril 2024

Equipe Técnica:

Prof. Luciano Coutinho, sócio MTempo Capital

Fernando Camargo, diretor-sócio, LCA Consultores

Bruno Assunção, economista, LCA Consultores

João Queiroz, economista, LCA Consultores

www.lcaconsultores.com.br

A pedido do



www.mbcbrasil.com.br

Anexo I

Anexo I.A

Os estímulos econômicos utilizados como impulso monetário na MIP foram estimados com base em premissas de:

- I. Novos licenciamentos;
- II. Parcela de cada motorização no total de licenciamentos;
- III. Valor Médio dos veículos;
- IV. Parcela de produção nacional dos licenciamentos de cada tipo de motorização; e
- V. Conteúdo local dos veículos de produção nacional de cada tipo de motorização;

A seguir, detalhamos cada uma dessas premissas.

I: Novos licenciamentos

O volume de novos licenciamentos de veículos automotores foi estimado pela LCA Consultores de acordo com o modelo descrito na Subseção 6.1 (“Modelo LCA”). O modelo LCA abrange automóveis de passeio; comerciais leves; motocicletas; caminhões e ônibus. Nessa medida, o volume total de novos licenciamentos no período t é dado pela fórmula:

$$\text{Novos Licenciamentos}_t = \text{Veículos Leves}_t^{134} + \text{Motocicletas}_t + \text{Veículos Pesados}_t$$

¹³⁴ Os Veículos Leves são iguais à soma dos automóveis de passeio e dos comerciais leves, enquanto os Veículos Pesados compreendem caminhões e ônibus.

II: Parcela de cada motorização no total de licenciamentos

Do total de novos licenciamentos, a LCA Consultores computou, em valores percentuais, qual parcela seria composta pelos veículos a combustão interna (IC); híbridos (HEV) e elétricos puros (BEV). Os valores foram estimados pela LCA com base em pesquisas próprias e entrevistas com agentes do mercado. Os *shares* de cada motorização foram estimados para os três cenários analisados: Status Quo; Convergência Global: Híbridos e Convergência Global: BEV

Deve-se notar, entretanto, que o volume total de licenciamentos do mercado não é afetado pela parcela de eletrificação da frota.

III: Valor médio dos veículos

Valor médio, na data-base de dezembro de 2020, dos veículos de cada tipo de motorização. A esse respeito, cumpre notar que o objetivo do modelo era calcular o impulso econômico, em valores monetários, exercido pela eletrificação dos veículos em comparação com a predominância atual dos automóveis a combustão; portanto, o corte relevante eram os diferentes preços para os automóveis IC, HEV e BEV.

Por outro lado, o valor médio foi o mesmo tanto para as motocicletas com motores a combustão como para aquelas eletrificadas, pois devido às menores dificuldades para a migração da produção de motocicletas a combustão para elétricas, inclusive devido à presença relativamente consolidada no mercado brasileiro de motos elétricas, a LCA Consultores considerou que seu preço médio seria estatisticamente idêntico, para os propósitos do modelo, entre os diferentes tipos de motorização.

A partir daí, o preço médio dos veículos foi estimado para cada ano considerado, considerando-se que seu valor real evoluiria de acordo com a diferença entre o IPCA dos veículos automotores e o IPCA geral, de acordo com a fórmula:

$$Preço_{t+1} = Preço_t \cdot \frac{(1 + IPCA_{Automóveis}_t)}{(1 + IPCA_t)}$$

As tabelas abaixo trazem o preço médio apurado para as diversas motorizações:

Tabela 19 – Preço Médio: Veículos Leves e Pesados (R\$ mil)

Ano	IC	MILD HEV	FULL HEV	BEV
2020	R\$ 122,69			
2030	R\$ 149,85	R\$ 133,82	R\$ 741,64	R\$ 1.038,58
2035	R\$ 152,61	R\$ 135,15	R\$ 1.610,90	R\$ 1.018,98
2040	R\$ 170,67	R\$ 136,24	R\$ 1.565,72	R\$ 1.260,19
2050	R\$ 191,19	R\$ 150,24	R\$ 2.096,31	R\$ 1.522,09

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Tabela 20 – Preço Médio: Motocicletas (R\$ mil)

Ano	IC	HEV	BEV
2020	R\$ 15,52		R\$ 13,13
2030	R\$ 17,76		R\$ 15,01
2035	R\$ 18,65		R\$ 15,77
2040	R\$ 19,58		R\$ 16,56
2050	R\$ 21,60		R\$ 18,26

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

IV: Produção nacional

A LCA estimou, em termos percentuais, com base em entrevistas com agentes do mercado e em respostas a questionários, qual a proporção de cada modalidade de motorização dentre os novos licenciamentos a cada ano/período e, ainda, qual a composição entre produto nacional e importado e qual a parcela de produção local (grau de nacionalização) dos veículos produzidos internamente.

As diferenças nos percentuais de produção nacional foram estimadas conforme três eixos: (a) os tipos de motorização – IC, HEV e BEV; (b) as classes de veículos; e (c) o ano de análise.

Detalhamos abaixo os percentuais utilizados para a produção nacional nos cortes mencionados:

Tabela 21 – Produção Nacional: Veículos Leves e Pesados (%)

Ano	IC	MILD HEV	FULL HEV	BEV
2020	89,72%			
2030	89,72%	70,00%	70,00%	49,09%
2035	89,72%	89,70%	89,70%	54,72%
2040	89,72%	89,70%	89,70%	60,18%
2050	89,72%	89,70%	89,70%	63,01%

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Tabela 22 – Produção Nacional: Motocicletas (%)

Ano	IC	HEV	BEV
2020	89,7%		89,7%
2030	89,7%		89,7%
2035	89,7%		89,7%
2040	89,7%		89,7%
2050	89,7%		89,7%

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

V: Conteúdo local

Mesmo para aqueles veículos de produção brasileira, parte dos seus componentes, partes e peças é adquirido no mercado global. Nessa medida, a LCA Consultores estimou, com base em conversas com agentes do mercado e respostas a questionários, o percentual de conteúdo local dos veículos nacionalmente produzidos, para cada ano e tipos de motorização, utilizando as mesmas subdivisões usadas para a produção nacional.

É importante notar que o próprio Modelo de Insumo-Produto já leva em consideração que parte do choque de demanda inicial será destinado a importações. Nessa medida, fez-se a devida correção dos valores informados de modo a evitar a dupla contagem do volume importado e a conseqüente subestimação do conteúdo local e do estímulo econômico decorrente. Assim, quando por exemplo se considera o percentual de 100% para conteúdo local, a matriz já abate o percentual de importação capturado pelo Sistema de Contas Nacionais (conforme Tabela de Recursos e Usos da Pesquisa Industrial Anual – TRU-PIA) para cada setor e segmento.

Ademais, tanto as motocicletas com motores a combustão como aquelas eletrificadas foram tratadas de modo agregado no cálculo dos estímulos econômicos. A LCA Consultores considerou que o parque produtivo nacional será capaz de se adaptar à tendência de crescimento do share de motocicletas eletrificadas sem a necessidade de alteração da parcela de conteúdo local em relação aos modelos à combustão. Nessa medida, a agregação não causa prejuízos à estimação do impulso econômico.

As tabelas abaixo contêm os percentuais de conteúdo local dos tipos de motorização e classes de veículos analisadas:

Tabela 23 – Conteúdo Local: Veículos Leves e Pesados (%)

Ano	IC	MILD HEV	FULL HEV	BEV
2020	100,00%			
2030	100,00%	75,00%	71,00%	9,31%
2035	100,00%	77,52%	73,52%	17,26%
2040	100,00%	80,02%	76,02%	28,92%
2050	100,00%	85,02%	81,02%	42,99%

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Tabela 24 – Conteúdo Local: Motocicletas

Ano	IC	HEV	BEV
2020	100,0%		100,0%
2030	100,0%		100,0%
2035	100,0%		100,0%
2040	100,0%		100,0%
2050	100,0%		100,0%

Fonte: LCA, com dados Anfavea, Abraciclo, Montadoras. Elaboração: LCA Consultores.

Anexo I.B

I: Produção nacional equivalente

De posse dos percentuais de produção nacional, conteúdo local e do valor médio estimados, foi computado, de acordo com as mesmas subdivisões acima, o percentual de “Produção Nacional Equivalente”, dada pela multiplicação dos valores de produção nacional pelo de conteúdo local. Portanto, a Produção Nacional Equivalente estima o percentual de estímulo econômico nacional que será obtido com os novos licenciamentos. Por exemplo: suponha o total de 100 novos licenciamentos, cujo valor médio é R\$ 10.000. Dos 100 veículos licenciados, 50% são de produção brasileira e 50% são importados. Daqueles de veículos de produção nacional, 50% correspondem ao conteúdo local de partes e peças e 50% dos componentes importados. Nessa medida, do valor total de R\$ 1.000.000 dos novos licenciamentos, apenas R\$ 250.000 virariam estímulo econômico efetivo de demanda agregada na MIP (R\$ 250.000 “vazariam” para partes e peças importadas e R\$ 500.000 para veículos importados).

II: Choque de demanda/Estímulos econômicos

Feitas as estimações acima, o choque de demanda foi calculado pela fórmula:

$$EE_t = \sum_i P_{it} * Lic_{it} * \% PN_{eq_{it}}$$

Sendo:

$$\% PN_{eq_{it}} = \% VNP_{it} * \% CL_{it}$$

Em que:

EE = Estímulo Econômico

P = Preço

Lic = Licenciamentos

PN_{eq} = Produção Nacional Equivalente

VNP = Veículos Nacionalmente Produzidos

CL = Conteúdo Local

t = {2020, 2030, 2035, 2040, 2050}

i = {IC, HEV, BEV}

Anexo I.C

I: Impactos acumulados

Abaixo, detalhamos o impacto acumulado ano a ano desde 2020 dos cenários Convergência Global: Híbridos e Convergência Global: BEV vis-à-vis o cenário Status Quo em termos de Produção Total; Valor Adicionado: PIB; Impostos e Emprego.

Tabela 25 – Produção Total – impacto acumulado desde 2020 (R\$ Bilhões)

Ano	Convergência Global: Híbridos vs. Status Quo	Convergência Global: BEV vs. Status Quo
2020	-	-
2021	-R\$ 4,67	-R\$ 11,25
2022	-R\$ 14,45	-R\$ 34,75
2023	-R\$ 29,82	-R\$ 71,57
2024	-R\$ 51,30	-R\$ 122,86
2025	-R\$ 79,44	-R\$ 189,82
2026	-R\$ 114,83	-R\$ 273,76
2027	-R\$ 158,09	-R\$ 376,07
2028	-R\$ 209,91	-R\$ 498,21
2029	-R\$ 270,99	-R\$ 641,74
2030	-R\$ 342,12	-R\$ 808,35
2031	-R\$ 393,58	-R\$ 1.006,27
2032	-R\$ 423,09	-R\$ 1.237,58
2033	-R\$ 428,18	-R\$ 1.504,53
2034	-R\$ 406,20	-R\$ 1.809,45
2035	-R\$ 354,26	-R\$ 2.154,80
2036	-R\$ 281,00	-R\$ 2.473,23
2037	-R\$ 185,06	-R\$ 2.762,10
2038	-R\$ 65,00	-R\$ 3.018,59
2039	R\$ 80,69	-R\$ 3.239,71
2040	R\$ 253,59	-R\$ 3.422,27
2041	R\$ 432,78	-R\$ 3.602,50
2042	R\$ 618,48	-R\$ 3.780,01
2043	R\$ 810,93	-R\$ 3.954,40
2044	R\$ 1.010,38	-R\$ 4.125,23
2045	R\$ 1.217,07	-R\$ 4.292,05
2046	R\$ 1.431,27	-R\$ 4.454,35
2047	R\$ 1.653,24	-R\$ 4.611,64
2048	R\$ 1.883,27	-R\$ 4.763,36
2049	R\$ 2.121,65	-R\$ 4.908,93
2050	R\$ 2.368,67	-R\$ 5.047,74

Elaboração: LCA Consultores

**Tabela 26 – Valor Adicionado: PIB – impacto acumulado desde 2020
(R\$ Bilhões)**

Ano	Convergência Global: Híbridos	Convergência Global: BEV
	vs. Status Quo	vs. Status Quo
2020	-	-
2021	-R\$ 1,73	-R\$ 4,17
2022	-R\$ 5,35	-R\$ 12,88
2023	-R\$ 11,05	-R\$ 26,52
2024	-R\$ 19,01	-R\$ 45,53
2025	-R\$ 29,44	-R\$ 70,35
2026	-R\$ 42,56	-R\$ 101,46
2027	-R\$ 58,59	-R\$ 139,37
2028	-R\$ 77,79	-R\$ 184,64
2029	-R\$ 100,43	-R\$ 237,84
2030	-R\$ 126,79	-R\$ 299,58
2031	-R\$ 145,87	-R\$ 372,93
2032	-R\$ 156,80	-R\$ 458,66
2033	-R\$ 158,69	-R\$ 557,59
2034	-R\$ 150,54	-R\$ 670,60
2035	-R\$ 131,29	-R\$ 798,59
2036	-R\$ 104,14	-R\$ 916,60
2037	-R\$ 68,59	-R\$ 1.023,66
2038	-R\$ 24,09	-R\$ 1.118,72
2039	R\$ 29,90	-R\$ 1.200,67
2040	R\$ 93,98	-R\$ 1.268,33
2041	R\$ 160,39	-R\$ 1.335,12
2042	R\$ 229,21	-R\$ 1.400,91
2043	R\$ 300,54	-R\$ 1.465,54
2044	R\$ 374,46	-R\$ 1.528,85
2045	R\$ 451,06	-R\$ 1.590,67
2046	R\$ 530,44	-R\$ 1.650,83
2047	R\$ 612,71	-R\$ 1.709,12
2048	R\$ 697,96	-R\$ 1.765,35
2049	R\$ 786,30	-R\$ 1.819,30
2050	R\$ 877,85	-R\$ 1.870,74

Elaboração: LCA Consultores

Tabela 27 – Impostos – impacto acumulado desde 2020 (R\$ Bilhões)

Ano	Convergência Global: Híbridos	Convergência Global: BEV
	vs. Status Quo	vs. Status Quo
2020	-	-
2021	-R\$ 0,63	-R\$ 1,51
2022	-R\$ 1,94	-R\$ 4,67
2023	-R\$ 4,01	-R\$ 9,63
2024	-R\$ 6,90	-R\$ 16,52
2025	-R\$ 10,68	-R\$ 25,53
2026	-R\$ 15,44	-R\$ 36,82
2027	-R\$ 21,26	-R\$ 50,58
2028	-R\$ 28,23	-R\$ 67,00
2029	-R\$ 36,45	-R\$ 86,31
2030	-R\$ 46,01	-R\$ 108,72
2031	-R\$ 52,93	-R\$ 135,33
2032	-R\$ 56,90	-R\$ 166,44
2033	-R\$ 57,59	-R\$ 202,35
2034	-R\$ 54,63	-R\$ 243,36
2035	-R\$ 47,64	-R\$ 289,80
2036	-R\$ 37,79	-R\$ 332,63
2037	-R\$ 24,89	-R\$ 371,48
2038	-R\$ 8,74	-R\$ 405,98
2039	R\$ 10,85	-R\$ 435,71
2040	R\$ 34,11	-R\$ 460,27
2041	R\$ 58,20	-R\$ 484,51
2042	R\$ 83,18	-R\$ 508,38
2043	R\$ 109,06	-R\$ 531,83
2044	R\$ 135,89	-R\$ 554,81
2045	R\$ 163,69	-R\$ 577,24
2046	R\$ 192,49	-R\$ 599,07
2047	R\$ 222,35	-R\$ 620,23
2048	R\$ 253,28	-R\$ 640,63
2049	R\$ 285,34	-R\$ 660,21
2050	R\$ 318,57	-R\$ 678,88

Elaboração: LCA Consultores

Tabela 28 - Empregos (Trabalhadores acumulados desde 2020)

Ano	Convergência Global: Híbridos vs. Status Quo	Convergência Global: BEV vs. Status Quo
2020	-	-
2021	-20.080	-48.404
2022	-42.086	-101.122
2023	-66.155	-158.445
2024	-92.436	-220.680
2025	-121.085	-288.154
2026	-152.269	-361.210
2027	-186.164	-440.217
2028	-222.961	-525.560
2029	-262.859	-617.652
2030	-306.071	-716.925
2031	-221.422	-851.617
2032	-126.974	-995.368
2033	-21.922	-1.148.674
2034	94.596	-1.312.056
2035	223.507	-1.486.062
2036	315.224	-1.370.227
2037	412.831	-1.243.016
2038	516.622	-1.103.693
2039	626.903	-951.480
2040	743.995	-785.555
2041	771.053	-775.523
2042	799.086	-763.838
2043	828.130	-750.396
2044	858.221	-735.089
2045	889.397	-717.804
2046	921.695	-698.420
2047	955.157	-676.813
2048	989.824	-652.850
2049	1.025.739	-626.394
2050	1.062.947	-597.300

Elaboração: LCA Consultores

Anexo II – Agradecimentos

Agradecemos às empresas, associações, conselhos, órgãos e sindicatos que dedicaram seu tempo para compartilhar com a LCA e a MTempo informações, percepções, insights e expertise ao longo da realização do presente estudo. As informações fornecidas por meio de entrevistas, realizadas entre setembro de 2023 e março de 2024, foram determinantes para nortear as análises feitas e nossas conclusões.

Além disso, agradecemos ao MBCB pelas contribuições valiosas.

Abiogás – Associação Brasileira do Biogás	MAHLE
	Moura Baterias
AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva	MWM Motores e Geradores
	Robert Bosch
ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores	SAE Brasil
BYD	Scania
Cocal	Sindipeças – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores
Conarem – Conselho Nacional de Retífica de Motores	Stellantis
CTC – Centro de Tecnologia Canavieira	Toyota
Ford	UNICA
GM	Volkswagen
Hudson Zanin (Unicamp)	WEG



MBCB
MOBILIDADE DE BAIXO CARBONO PARA O BRASIL