

OUTUBRO DE 2023

COMPARAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO CICLO DE VIDA DE CARROS DE PASSEIO A COMBUSTÃO E ELÉTRICOS NO BRASIL

ZAMIR MERA, GEORG BIEKER, ANA BEATRIZ REBOUÇAS E ANDRÉ CIEPLINSKI



AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Crux Alliance. Os autores agradecem a Marcelo Bales, da CETESB, e aos colegas Carmen Araujo, Nikita Pavlenko e Jane O'Malley, do ICCT, a revisão deste relatório. Eventuais inconsistências são de inteira responsabilidade dos autores.

Edição: Amy Smorodin

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW, Suite 650
Washington, DC 20005

communications@theicct.org | www.theicct.org | [@TheICCT](https://twitter.com/TheICCT)

© 2023 International Council on Clean Transportation

SUMÁRIO EXECUTIVO

Para alcançar as metas do governo brasileiro de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) pela metade até 2030 em comparação com os níveis de 2005, bem como de atingir neutralidade climática até 2050, o setor de transportes precisa avançar rumo à emissão zero. Atualmente, o mercado de carros de passeio no Brasil é dominado por veículos movidos a combustão interna (ICEVs) flex, capazes de operar tanto com etanol hidratado quanto com gasolina C, uma mistura de gasolina com 27% de etanol anidro. O etanol responde por cerca da metade do consumo de combustível (em volume) da frota de carros de passeio, seja na forma de etanol hidratado, seja na mistura da gasolina C, e é produzido principalmente a partir de cana-de-açúcar. Diferentemente do que acontece em outros grandes mercados de veículos, a participação de elétricos híbridos (HEVs, de *hybrid electric vehicles*), elétricos híbridos *plug-in* (PHEVs, de *plug-in hybrid electric vehicles*) e elétricos a bateria (BEVs, de *battery electric vehicles*) nas vendas permanece em níveis baixos no Brasil. Diante das metas governamentais para mitigar a mudança climática, surgem questionamentos sobre quais tecnologias e combustíveis permitirão que a frota de carros de passeio zere as emissões de GEE no longo prazo.

Este estudo apresenta uma avaliação de ciclo de vida das emissões de GEE de carros de passeio com diferentes tipos de motorização e rotas de produção de combustível. Dado que a meta brasileira de neutralidade climática envolve todos os setores produtivos, avaliam-se as emissões de escapamento, as oriundas da produção de combustível e eletricidade e as provenientes da fabricação de veículos e baterias. O estudo compara as emissões do ciclo de vida de veículos flex, movidos a etanol e gasolina, BEVs, HEVs e PHEVs. Também são calculadas as emissões de elétricos movidos a célula de combustível a hidrogênio (FCEVs, de *fuel cell electric vehicles*), abastecidos com hidrogênio produzido a partir de gás natural e de eletricidade. Dados detalhados de vendas são usados para definir veículos representativos dos três maiores segmentos do mercado interno: compactos, médios e SUVs compactos. Enquanto os ICEVs e os BEVs são comparados nos três segmentos, os HEVs e PHEVs são incluídos na avaliação de carros médios e os FCEVs são avaliados no segmento de SUVs compactos. Além de avaliar as emissões do ciclo de vida dos veículos comercializados atualmente, o estudo estima as emissões daqueles que serão vendidos em 2030, considerando o desenvolvimento futuro da matriz elétrica e de combustíveis, diferentes hipóteses para a evolução do uso de etanol em veículos flex e possíveis melhorias na eficiência energética dos veículos.

As principais conclusões estão resumidas na Figura SE1. A figura apresenta as emissões de GEE no ciclo de vida por distância percorrida ao longo da vida útil (em g CO₂eq./km) para ICEVs flex e BEVs por segmento, além de HEVs e PHEVs no segmento de médios. As emissões totais estão discriminadas por fabricação de veículos e baterias, manutenção, queima de combustível, produção de combustível ou eletricidade e mudança indireta do uso da terra (ILUC), para biocombustíveis. Para ICEVs e HEVs flex, as emissões são calculadas usando as médias de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado. As barras de erro indicam as emissões quando os veículos operam exclusivamente com gasolina C (valores superiores) e etanol hidratado (valores inferiores). Assume-se que os PHEVs utilizam gasolina C, uma vez que atualmente não há modelos de PHEVs flex disponíveis.

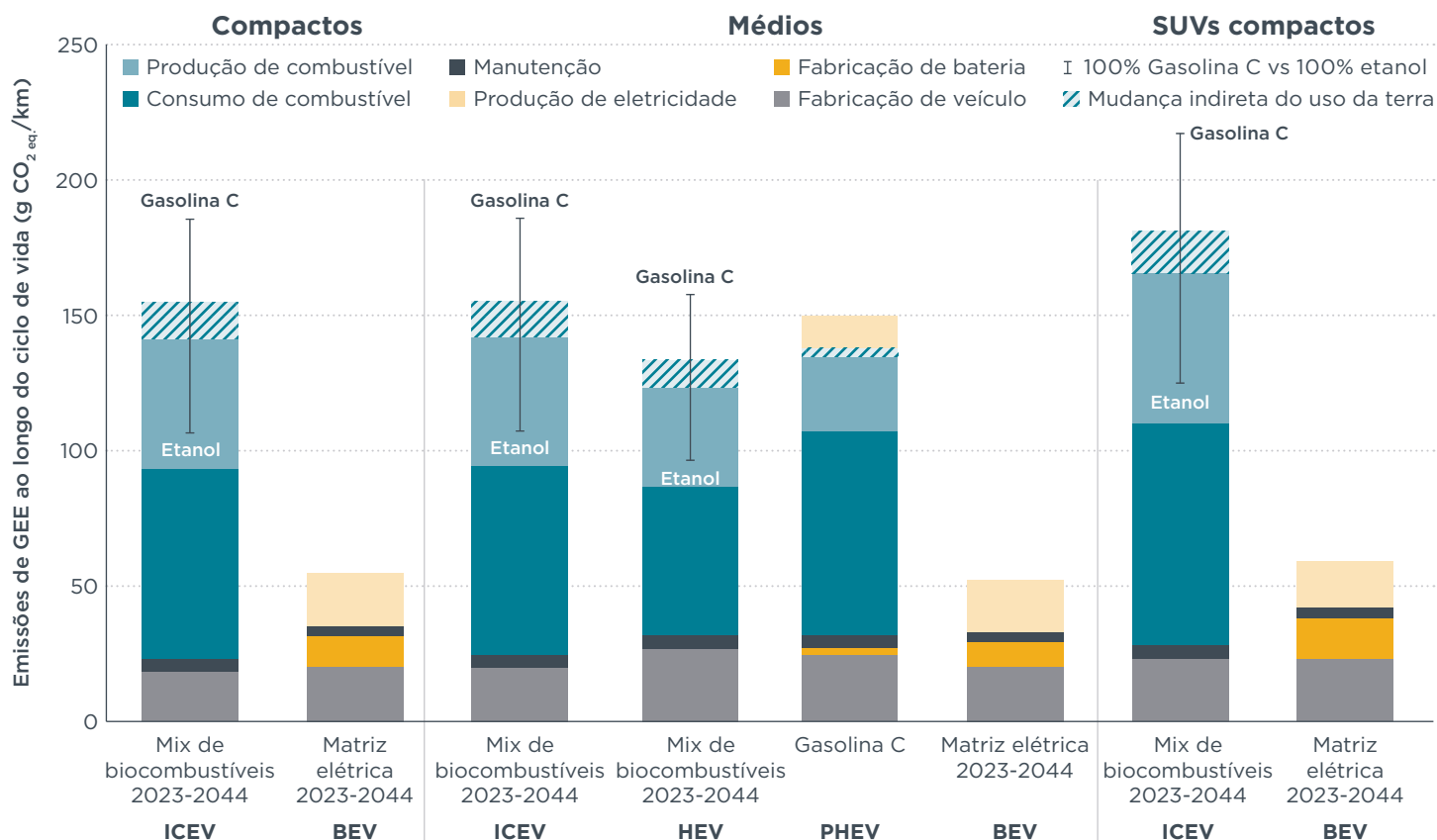


Figura SE1. Emissões de ciclo de vida de GEE de ICEVs flex e BEVs dos segmentos compacto, médio e SUV compacto, bem como de HEVs e PHEVs do segmento médio, comercializados no Brasil em 2023. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo).

As emissões de GEE no ciclo de vida de BEVs são bem inferiores às de qualquer outra motorização e combustível considerados, devido à alta eficiência energética do veículo elétrico e à matriz elétrica de baixo carbono do Brasil. Para os veículos comercializados em 2023, **os BEVs têm emissões 65% a 67% mais baixas** que as dos ICEVs flex utilizando o consumo médio de gasolina C e etanol. Em contraste, HEVs e PHEVs exibem um benefício muito limitado em termos de emissões de GEE em comparação com os ICEVs. **Os HEVs têm emissões 14% mais baixas** que as dos ICEVs flex quando consomem a mesma proporção de gasolina C e etanol. Os **PHEVs** atuais, que usam exclusivamente gasolina C, **geram emissões apenas 3% menores** que as dos ICEVs flex que usam a média de mercado de gasolina C e etanol.

Um potencial aprimoramento na economia de combustível dos ICEVs flex registrados em 2030, paralelamente ao aumento projetado da participação do etanol no mercado, resultaria em emissões ao longo do ciclo de vida 12% menores que as dos modelos de 2023. Estas reduções nas emissões do ciclo de vida comparadas aos atuais ICEVs flex não são suficientes para alinhar as emissões da frota brasileira de carros de passeio com as metas climáticas do país. Alinhar o setor de transporte com o objetivo de atingir neutralidade climática até 2050 requer uma transição para veículos elétricos.

As emissões de GEE no ciclo de vida de veículos flex que operam exclusivamente com etanol hidratado são 31% menores do que quando operam com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado. Com o uso apenas de gasolina C, as emissões são 20% maiores. Os resultados são semelhantes para HEVs flex. Isso indica que o uso do etanol brasileiro pode reduzir significativamente as emissões em comparação com a gasolina fóssil. No entanto, ainda que os HEVs operassem exclusivamente com etanol durante toda a vida útil, as emissões no ciclo de vida seriam 85% superiores às dos BEVs que utilizam a matriz elétrica média. Além disso, mesmo considerando que a participação do etanol hidratado deve aumentar de 35% para 55% até 2050, o caso de ICEVs ou HEVs flex que operam exclusivamente com etanol não é representativo do consumo médio da frota.

As emissões de GEE no ciclo de vida de FCEVs movidos a hidrogênio podem se aproximar daquelas dos BEVs, mas apenas quando abastecidos exclusivamente com hidrogênio verde. Porém, ao considerar as perdas de energia durante a produção e compressão do hidrogênio, isso ocorre ao custo de usar três vezes mais energia elétrica do que os BEVs. Portanto, apoiar a adoção de BEVs é a maneira mais eficiente de descarbonizar a frota de carros de passeio no Brasil.

RECOMENDAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

As conclusões deste estudo têm implicações diretas para dois programas de políticas públicas no Brasil: os padrões de eficiência energética do novo Programa Mobilidade Verde e Inovação (PROMOVI), que é a continuação do programa Rota2030, e a política de biocombustíveis RenovaBio. Além disso, os resultados sugerem ações para apoiar a indústria automotiva e os consumidores na transição para veículos elétricos a fim de cumprir as metas climáticas governamentais.

A definição das novas metas do PROMOVI em termos de emissões de CO₂ em vez de consumo de energia exigirá fatores de emissão realistas, de modo que as metas possam ser alcançadas através de ganhos de eficiência dos veículos para manter a eficácia do programa. As metas do PROMOVI serão definidas em termos de emissão de CO₂ em vez de consumo de energia. Essa mudança gera grande incerteza sobre como as emissões serão determinadas, particularmente para os ICEVs flex. O impacto climático desses veículos varia conforme eles operam exclusivamente com etanol hidratado, gasolina C ou uma mistura desses combustíveis. Para melhor representar o consumo de combustível real e as emissões relacionadas, as participações médias de mercado do etanol e da gasolina C devem ser adotadas como fixas para a definição dos valores de emissão de CO₂ dos ICEVs flex. Eventuais aumentos na participação do etanol no mercado não devem substituir melhorias na eficiência energética dos veículos.

Para atingir as metas climáticas no setor de transportes, o PROMOVI pode determinar metas corporativas que preparem para uma transição para BEVs ou FCEVs. O aumento das vendas de BEVs e FCEVs no curto prazo acelerará a descarbonização da frota brasileira de carros de passeio. Devido à longa vida útil desses carros na frota nacional, atrasos na introdução dos BEVs podem resultar na necessidade de ações políticas mais ambiciosas em um futuro próximo. Para concretizar o potencial de reduzir as emissões de GEE dos FCEVs, deve-se assegurar o uso de hidrogênio verde no setor de transportes.

Incentivos à produção de BEVs no Brasil combinariam benefícios ambientais com competitividade econômica. Não produzir BEVs coloca a indústria automotiva brasileira em risco de perder competitividade nos mercados internacionais. A produção continuada exclusivamente de veículos com motor de combustão pode resultar na redução das exportações de veículos e no aumento das importações de BEVs. Paralelamente ao apoio público à produção de BEVs no Brasil, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, que os fabricantes podem optar por fazer para obter os benefícios do atual Rota2030, podem ser direcionados a BEVs e FCEVs. Isso incentivaria a produção nacional desses veículos. Usufruidos da geração elétrica limpa, as baterias fabricadas no Brasil fortaleceriam ainda mais o benefício dos BEVs em termos de emissões no ciclo de vida.

Incentivar o uso de etanol em substituição à gasolina fóssil na frota existente de veículos flex e incluir as emissões ILUC no programa RenovaBio para melhorar a sustentabilidade do etanol. A substituição da gasolina pelo etanol à base de cana-de-açúcar reduz significativamente as emissões veiculares de GEE no ciclo de vida, mas também implica riscos. Portanto, embora se deva priorizar a comercialização de BEVs como veículos novos, aumentar a participação do etanol no mercado em comparação com a gasolina fóssil permanece uma ferramenta relevante para reduzir as emissões dos veículos flex existentes no curto prazo. No entanto, qualquer aumento na produção de etanol deve ser acompanhado de políticas que garantam que tal expansão não aumentará sua intensidade média de carbono. A introdução de emissões ILUC no programa RenovaBio proporcionaria um incentivo maior à produção de combustível de segunda geração, bem como estimularia uma produção mais eficiente nas instalações existentes de etanol de primeira geração.

SUMÁRIO

Sumário executivo	i
Introdução.....	1
Dados e metodologia.....	3
Objetivo e escopo.....	3
Modelos de veículos representativos	5
Ciclo do veículo.....	6
Ciclo de combustível e eletricidade.....	9
Resultados	17
Carros de passeio de 2023	17
Carros de passeio de 2030	20
Veículos elétricos movidos a célula de combustível a hidrogênio.....	23
Resumo e conclusões.....	25
Recomendações para políticas públicas.....	28
Referências	30
Apêndice	33

INTRODUÇÃO

Alcançar as metas de mitigação da mudança climática estabelecidas no Acordo de Paris para limitar o aquecimento global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais exige ações globais rápidas e deliberadas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE). A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, do inglês *Nationally Determined Contribution*) do Brasil estabelece reduções de emissões de 37% até 2025 e 50% até 2030, em comparação com os níveis de 2005, além de uma meta de neutralidade climática até 2050 (Governo do Brasil, 2022). Agir sobre a mudança climática é uma prioridade para o novo governo brasileiro, o que abre uma nova oportunidade para as estratégias de mitigação do clima, incluindo a implementação de veículos de emissão zero, setor no qual o país ficou atrás de seus pares.

O setor de transportes do Brasil respondeu por 13% das emissões nacionais de GEE em 2020 e foi a terceira maior fonte de emissões depois da agricultura (35%) e da mudança no uso da terra (27%) (World Resources Institute, 2023). O transporte rodoviário é, sozinho, responsável por 94% da demanda de energia no setor de transportes, sendo 46% de veículos leves (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2023). Em 2022, o país tinha um estoque de cerca de 38 milhões de carros de passeio e 1,6 milhão de vendas de carros novos (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores [ANFAVEA], 2023), constituindo o sétimo maior mercado de carros de passeio do mundo (Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles, 2023). O mercado brasileiro é caracterizado por veículos com motor de combustão interna (ICEVs, de *internal combustion engine vehicles*) flexíveis para etanol e gasolina, que representaram 92% das vendas de carros de passeio em 2020 (ADK Automotive, 2021), e uma alta participação do etanol à base de cana-de-açúcar no consumo de combustíveis. O restante das vendas de carros de passeio são ICEVs movidos exclusivamente a gasolina (5%), ICEVs a diesel (3%) e elétricos híbridos (HEVs, de *hybrid electric vehicles*) (menos de 1%) (ADK Automotive, 2021). Juntas, as vendas de elétricos híbridos *plug-in* (PHEVs, de *plug-in hybrid electric vehicles*) e elétricos a bateria (BEVs, de *battery electric vehicles*) aumentaram de 0,1% em 2020 para 0,5% em 2022 (EV-Volumes, 2023).

A participação das vendas de BEVs e PHEVs no Brasil é baixa em comparação com outros grandes mercados de veículos, como a China (27% em 2022), a Europa (21%) e os Estados Unidos (7%), ficando também abaixo da participação média global de vendas, que é 13% (Chu & Cui, 2023). Com volumes de produção de 2,18 milhões de veículos leves em 2022, dos quais 1,82 milhão eram carros de passeio, o Brasil é o oitavo maior produtor de veículos leves e o quinto maior produtor de carros de passeio (OICA, 2023). Na transição global para veículos elétricos, a falta de produção doméstica de BEVs compromete a competitividade internacional da indústria automotiva brasileira.

Para alinhar o setor de transportes no Brasil com as metas climáticas nacionais para 2025 e 2030 e para atingir a neutralidade climática até 2050, é importante que os formuladores de políticas entendam quais tipos de motorização e rotas de produção de combustível são capazes de reduzir mais as emissões de GEE. Este estudo apresenta uma avaliação do ciclo de vida (ACV) das emissões de GEE de carros de passeio no Brasil. Além das emissões de escapamento, consideram-se as emissões da produção de combustível e de eletricidade, bem como da fabricação de veículos e baterias. O estudo compara as emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs nos segmentos de carros de passeio compactos, médios e SUVs compactos e avalia ainda as emissões de HEVs, PHEVs e veículos com célula de combustível movidos a hidrogênio (FCEVs, de *fuel cell electric vehicles*). Faz-se uma comparação das emissões durante a vida útil dos veículos comercializados em 2023 e estima-se como essas emissões mudariam para os veículos vendidos em 2030.

Este texto está estruturado da seguinte forma. A seção de dados e metodologia apresenta detalhes sobre o objetivo e escopo da ACV, análise de dados e características

dos combustíveis, da eletricidade e dos veículos. A seção de resultados oferece uma comparação das emissões de GEE no ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs, bem como de HEVs e PHEVs quando aplicável, para veículos atuais e futuros. Além disso, apresenta as emissões de GEE no ciclo de vida dos FCEVs movidos a hidrogênio oriundo de diferentes rotas de produção. O estudo termina com uma seção de resumo e conclusões, seguida de recomendações para políticas públicas.

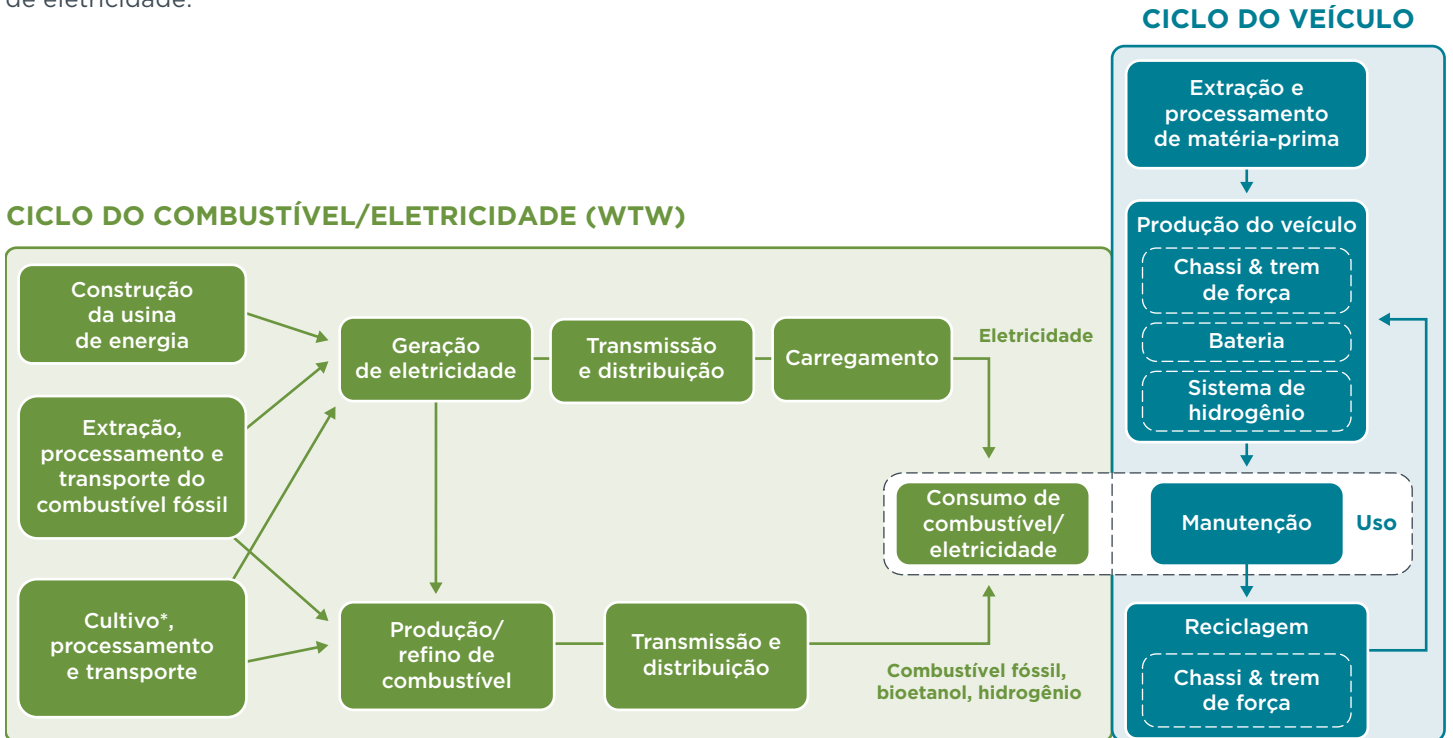
DADOS E METODOLOGIA

OBJETIVO E ESCOPO

O objetivo desta ACV é identificar quais tipos de motorização e rotas de produção de energia permitem a maior redução das emissões de GEE de carros de passeio no Brasil. O estudo compara as emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs nos segmentos de compactos, médios e SUVs compactos e, quando possível, HEVs, PHEVs e FCEVs a hidrogênio. Além de comparar as emissões de GEE durante a vida útil dos veículos comercializados em 2023, o estudo estima as emissões dos veículos vendidos em 2030.

A unidade funcional de comparação é grama de CO₂ equivalente por quilômetro percorrido durante a vida útil dos veículos (g CO₂eq./km), para os quais são consideradas as emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), com base nos fatores de potencial de aquecimento global de 100 anos do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (2021). A ACV geralmente segue uma abordagem de atribuição e considera as emissões médias de GEE que podem ser atribuídas a um veículo. Para a fase de uso dos veículos, a avaliação considera as mudanças na combinação média de combustível ou eletricidade durante a vida útil. Alguns valores, como o das emissões de mudança indireta no uso da terra (ILUC) da produção de biocombustível, são capturados por uma abordagem consequencial. Dessa forma, refletem as mudanças que a produção causa na economia em geral.

O escopo geral e o limite do sistema deste estudo são mostrados na Figura 1. Eles se baseiam no escopo e na metodologia de uma ACV de carros de passeio na Europa, nos Estados Unidos, na China e na Índia publicada anteriormente pelo *International Council on Clean Transportation* (Bieker, 2021). O escopo abrange as emissões de GEE do ciclo de vida do veículo, que incorpora a produção, manutenção e reciclagem dos veículos; e o ciclo do combustível, que inclui a produção e o consumo de combustível e de eletricidade.



*Emissões de mudança indireta no uso da terra (ILUC), considerada apenas para a produção de bioetanol usado em veículos

Figura 1. Escopo geral e limite do sistema da ACV.

No ciclo do veículo, as emissões correspondentes à produção de baterias para BEVs e PHEVs, incluindo a extração e o processamento de matérias-primas, são apresentadas separadamente das emissões da produção do restante do veículo, indicadas como chassi e trem de força. Da mesma forma, as emissões correspondentes à produção do tanque de armazenamento de hidrogênio e da célula de combustível nos FCEVs são apresentadas separadamente. O ciclo do veículo também abrange a substituição de peças do veículo durante a vida útil. A Tabela 1 resume as emissões de GEE consideradas no ciclo do veículo.

Tabela 1. Escopo das emissões de GEE no ciclo do veículo adotado neste estudo.

Dados	Resumo do escopo
Chassi e trem de força	Produção do veículo, incluindo extração e processamento de matéria-prima, fabricação de componentes e montagem; e reciclagem de componentes do veículo. Foi adotada metodologia híbrida entre <i>avoided burden</i> e <i>cut-off</i> , como em Hill et al. (2020)
Bateria	Produção da bateria, incluindo extração e processamento de matérias-primas, produção de células e montagem
Sistema de hidrogênio	Produção de tanque de hidrogênio e célula de combustível, incluindo extração e processamento de matéria-prima e fabricação de componentes
Manutenção	Substituição de peças durante a vida útil, incluindo pneus, escapamento/pós-tratamento, líquido de arrefecimento, óleo etc.

As emissões associadas ao ciclo de combustível e eletricidade, ou emissões *well-to-wheel* (WTW), incluem as referentes à produção de combustível fóssil, biocombustível, eletricidade ou hidrogênio (*well-to-tank*, WTT) bem como à queima de combustível fóssil no veículo (*tank-to-wheel*, TTW). Para os combustíveis fósseis, o escopo desta análise inclui a extração de petróleo bruto (incluindo a queima); o processamento e o transporte; o refino e a distribuição de combustível; todas as emissões fugitivas de metano associadas; e a queima do combustível nos veículos. As emissões de metano e óxido nitroso durante a combustão (incompleta) de combustíveis fósseis e biocombustíveis também são contabilizadas.

Para biocombustíveis, a análise abrange as emissões do cultivo, processamento e transporte de matéria-prima, bem como as emissões da produção e distribuição do biocombustível. As emissões de CO₂ da queima de combustível não são consideradas, pois são compensadas pela absorção biogênica de CO₂ durante o crescimento das respectivas plantas. Para a produção de biocombustíveis, a análise inclui as emissões de ILUC. Estas correspondem à expansão regional e global da área usada para agricultura, que resulta indiretamente da demanda por biocombustíveis no Brasil. Tais emissões refletem o desmatamento da biomassa acima do solo e a mudança do carbono do solo ao converter a vegetação natural em área de agricultura.

As emissões do ciclo de vida da produção de eletricidade incluem as emissões diretas e à montante da geração de eletricidade, bem como a construção de novas plantas para energias renováveis. As perdas de energia na transmissão e na distribuição também são contabilizadas. A intensidade de carbono da produção de combustível e de eletricidade considera as misturas atuais de biocombustíveis e o mix de eletricidade, bem como seu desenvolvimento projetado durante a vida útil dos veículos.

Para o hidrogênio, a análise distingue entre hidrogênio baseado em gás natural e eletricidade. Outras rotas de produção, como o hidrogênio à base de biogás e etanol, ainda não foram exploradas comercialmente e, portanto, não foram incluídas neste estudo. Para o hidrogênio à base de gás natural, contabiliza-se a extração, o processamento e o transporte do combustível fóssil, bem como as emissões durante o processo de reforma a vapor, incluindo as emissões de metano em todas as etapas. O hidrogênio baseado em eletricidade considera as emissões de GEE do ciclo de vida da geração de eletricidade e as perdas de energia durante a eletrólise. Todos as

rotas de produção do hidrogênio consideram o consumo de energia da compressão de hidrogênio e do transporte de curta distância. A Tabela 2 resume o escopo das emissões no ciclo de combustível e eletricidade.

Tabela 2. Escopo das emissões de GEE no ciclo de combustível e eletricidade.

Dados	Resumo do escopo
Combustíveis fósseis	Extração de petróleo bruto/gás natural (incluindo queima no flare), processamento e transporte; refino e distribuição de combustível; queima de combustível, incluindo emissões de metano e óxido nitroso do veículo
Biocombustíveis	Cultivo de matéria-prima/coleta de resíduos, processamento e transporte; produção e distribuição de combustível; emissões de GEE de ILUC proveniente do cultivo de plantas; emissões de metano e óxido nitroso dos veículos
Eletricidade	Emissões de GEE do ciclo de vida da geração de eletricidade (incluindo a infraestrutura da usina), transmissão, distribuição e perdas de carga
Hidrogênio	Hidrogênio produzido com eletricidade: emissões de GEE provenientes de eletricidade, ajustadas por perdas de energia durante a eletrólise e a compressão de hidrogênio; hidrogênio obtido de gás natural: extração, processamento e transporte de gás natural, reforma a vapor e compressão de hidrogênio, todas as etapas incluindo emissões fugitivas de metano. Não incluído: transporte de hidrogênio a longas distâncias

Este estudo não abrange as emissões de GEE correspondentes à construção e manutenção da infraestrutura para produção de veículos, infraestrutura para abastecimento e recarga de veículos ou infraestrutura rodoviária.

Modelos de veículos representativos

A comparação das emissões de GEE do ciclo de vida de veículos com diferentes tipos de motorização baseia-se nas características médias ponderadas de vendas de carros de passeio nos segmentos compacto, médio e SUV compacto. A seguir, descreve-se como essas características são obtidas.

Em 2020, um total de 1,95 milhão de veículos leves foi vendido no Brasil (ANFAVEA, 2023). Desses, 1,62 milhão eram carros de passeio, dos quais os segmentos de compactos (30%), médios (26%) e SUVs compactos (25%) dominam o mercado (ADK Automotive, 2021).¹ O restante das vendas de carros de passeio corresponde principalmente a carros subcompactos (5%), grandes e extragrandes (7%) e SUVs extragrandes (5%). Minivans e veículos *off-road* correspondem a 1% cada.

A maioria dos carros de passeio vendidos no Brasil são ICEVs flex (92% em 2020), sendo os demais ICEVs movidos a gasolina (5%), ICEVs movidos a diesel (3%) e HEVs (menos de 1%). Para PHEVs e BEVs, a participação nas vendas aumentou de 0,2% em 2020 para 0,7% em 2022, enquanto nenhum FCEV foi vendido nesses anos (EV-Volumes, 2023).

Neste estudo, as emissões de ICEVs flex e BEVs são comparadas nos segmentos de compactos, médios e SUVs compactos. Para veículos com esses tipos de motorização, as emissões de GEE do ciclo de vida são calculadas com base na média do peso do veículo no segmento, da capacidade das baterias e do consumo de combustível ou eletricidade. As características de segmento de ICEVs flex são derivadas da combinação de dados da ADK Automotive (2021) sobre vendas de veículos em 2020.

¹ A atribuição de modelos de veículos aos segmentos é baseada na Portaria nº 169 (INMETRO, 2023). No Brasil, os carros de passeio têm massa em ordem de marcha máxima de 2.720 kg, massa máxima total de 3.856 kg e até oito assentos (excluindo o do motorista). Os segmentos de carros de passeio também são diferenciados pela área definida pelo comprimento e pela largura máximos do modelo. Por exemplo, um carro compacto tem uma área de 6,5m² e menos de 7,0m², enquanto um carro médio tem uma área de menos de 8,0m². Um SUV compacto tem uma área de menos de 8,0m², enquanto os SUVs grandes e extragrandes excedem esse valor. Além disso, os SUVs são definidos pela distância do solo, bem como pelos ângulos de rampa, aproximação e saída.

Os dados de classificação do segmento e de consumo de combustível foram obtidos do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2023). Devido ao desenvolvimento mais dinâmico do mercado de BEVs, dados da EV-Volumes (2023) de vendas e características de veículos de 2022 foram combinados com dados do INMETRO sobre classificação do segmento e consumo de eletricidade. As emissões de HEVs e PHEVs também são avaliadas no segmento de médios. Para os HEVs, o peso médio e o consumo de combustível são determinados conforme descrito para os veículos flex. Já para os PHEVs, o Mini Countryman foi o único modelo no segmento de médios vendido no Brasil de 2020 a 2022.

As emissões de FCEVs são avaliadas no segmento de SUVs compactos. Como nenhum FCEV foi vendido no Brasil entre 2020 e 2022, o Hyundai Nexu, um dos poucos modelos no mercado global, é usado como modelo representativo. Apesar de atrair o interesse de produtores de etanol nacional e de fabricantes de automóveis, nenhum modelo equipado com células a combustível de etanol direto está disponível comercialmente, nem estará em breve. Portanto, esses veículos hipotéticos não são considerados nesta análise. A Tabela 3 apresenta uma visão geral das características dos veículos selecionados.

Tabela 3. Características dos veículos dos segmentos compacto, médio e SUV compacto.

Segmento	Tipo de motorização	Potência do motor (kW)	Peso em ordem de marcha (kg)	Footprint ^a (m ²)
Compacto	ICEV flex	66	1.039	3,7
	BEV	100	1.455	3,8
Médio	ICEV flex	80	1.100	3,8
	HEV	95	1.415	4,3
	PHEV	169 + 65 ^b	1.390	4,2
	BEV	116	1.390	3,8
SUV compacto	ICEV flex	87	1.261	3,9
	BEV	110	1.708	4,3
	FCEV	120	1.814	4,5

^aFootprint do veículo, definida pela distância entre eixos e largura do eixo do veículo.

^bPotência do motor de combustão interna e potência do motor elétrico.

CICLO DO VEÍCULO

Chassi e trem de força

As emissões de GEE correspondentes à produção e reciclagem do chassi e do trem de força são derivadas dos fatores específicos de motorização e dependentes da massa do veículo em Hill et al. (2020). O chassi e o trem de força correspondem ao veículo sem a bateria, no caso dos BEVs e PHEVs, e sem o sistema de hidrogênio no caso dos FCEVs. Isso significa que a massa desses componentes é subtraída do peso total do veículo. O peso da bateria é estimado a partir da capacidade da bateria (ver Tabela 5) e pressupõe uma energia específica do conjunto de baterias de 148 Wh/kg (Hill et al., 2020). As emissões resultantes do chassi e do trem de força são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4. Emissões de GEE da produção e reciclagem do chassi e do trem de força, bem como provenientes da manutenção dos veículos produzidos em 2023.

Segmento	Tipo de motorização	Produção e reciclagem do veículo (t CO ₂ eq.)	Manutenção (g CO ₂ eq./km)
Compacto	ICEV flex	5,4	4,6
	BEV	5,8	3,6
Médio	ICEV flex	5,8	4,7
	HEV	7,7	5,2
	PHEV	7,2	5,2
	BEV	5,8	3,6
SUV compacto	ICEV flex	6,7	5,0
	BEV	6,7	3,7
	FCEV	8,8	3,5

Para veículos produzidos em 2030, considera-se que a massa do chassi e do trem de força seja a mesma dos modelos de 2023. Ainda assim, supõe-se que as emissões exibidas na Tabela 4 sejam 15% menores, com base na descarbonização projetada dos setores de indústria e energia (Bieker, 2021; Hill et al., 2020).

Bateria

A Tabela 5 mostra as emissões de GEE da produção de baterias para os veículos elétricos atuais. As emissões são derivadas da capacidade das baterias dos modelos considerados e de um fator de emissão de 67 kg de CO₂ eq. por kWh de capacidade da bateria. Esse fator corresponde à intensidade de carbono da produção de baterias à base de óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto (NMC622) (Bieker, 2021), ponderada com a produção global de baterias para veículos elétricos em 2022—China (76%), Estados Unidos (7%), União Europeia (7%), Japão (5%) e Coreia do Sul (5%) (IEA, 2022a)—, e às intensidades de carbono nesses países do modelo GREET (Argonne National Laboratory, 2020). Essa variante de baterias de íons de lítio é considerada para todos os veículos deste estudo, pois é o tipo mais comum no mercado global. Como referência, as emissões da produção de baterias à base de fosfato de ferro e lítio seriam 20% menores, com 54 kg CO₂ eq./kWh. A reciclagem de baterias, que reduz o impacto de suas emissões de GEE (Tankou et al., 2023), não foi considerada neste estudo.

Considera-se que as baterias duram mais que a vida útil do veículo. Essa premissa é baseada em estudos que mostram que as baterias de íons de lítio de última geração oferecem 90% a 95% de sua capacidade inicial mesmo após 3 mil ciclos completos de carga e descarga rápidas (Harlow et al., 2019). Com autonomia real de 200 km a 400 km, 3 mil ciclos correspondem a uma quilometragem de 600.000 km a 1.200.000 km, respectivamente. Esses números excedem em muito a quilometragem discutida a seguir. Portanto, em geral, espera-se que as baterias de BEVs durem mais que os veículos. Em termos de emissões, o benefício de um possível uso de segunda vida, por exemplo, como armazenamento estacionário para a rede elétrica (Tankou et al., 2023), não é considerado neste estudo.

Tabela 5. Capacidade da bateria e emissões de GEE da produção de baterias de BEVs e PHEVs comercializados no Brasil em 2023 e 2030.

Segmento	Tipo de motorização	Veículo modelo 2023		Veículo modelo 2030	
		Capacidade bruta (kWh)	Emissões de GEE (t CO ₂ eq.)	Capacidade bruta (kWh)	Emissões de GEE (t CO ₂ eq.)
Compacto	BEV	50	3,4	60	2,5
Médio	PHEV	10	0,7	12	0,5
	BEV	41	2,7	49	2,1
SUV compacto	BEV	66	4,4	79	3,3

Para os modelos hipotéticos de 2030, o fator de emissão para produzir baterias de íons de lítio é reduzido para 53 kg CO₂ eq. por kWh. A justificativa é que se supõe uma mudança de baterias à base de NMC622 para NMC811 e uma redução geral da intensidade de carbono da produção de baterias em 20% (Bieker, 2021). A capacidade e a autonomia da bateria de BEVs e PHEVs têm aumentado nos últimos anos. Presume-se que essa tendência (que pode ser explicada pela queda nos custos de produção de baterias) continuará, resultando em um aumento médio de 20% em comparação com os modelos atuais.

Sistema de hidrogênio

As emissões de GEE correspondentes ao tanque de hidrogênio e à célula de combustível também foram obtidas do modelo GREET (Argonne National Laboratory, 2020). Para um carro de passeio FCEV no segmento de SUV, o modelo fornece emissões de 4,2 t CO₂ eq. Segundo Bieker (2021), valores semelhantes são usados em outros estudos de ACV (Agora Verkehrswende, 2019; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2019; Hill et al., 2020).

Quilometragem de vida útil

Os dados oficiais mais recentes sobre a curva de sucateamento dos carros de passeio no Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020) mostram que 50% dos veículos permanecem em uso por 22 ou 23 anos no Brasil. Com base nessas evidências, este estudo considera uma vida útil média de 22 anos para os veículos.

O cálculo da quilometragem anual em relação à idade do veículo é obtido do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (Ministério do Meio Ambiente, 2014). A combinação de 22 anos de uso com a quilometragem anual resulta em uma quilometragem acumulada ao longo da vida útil de 288.000 km.

Vale observar que a quilometragem anual dos carros de passeio é maior nos primeiros anos de operação. O Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários considera que a quilometragem anual diminui linearmente em 600 km/ano (Ministério do Meio Ambiente, 2014). Isso significa que a intensidade de carbono do combustível e da eletricidade utilizados nos primeiros anos é contabilizada em uma proporção maior.

Manutenção

Durante a vida útil, os veículos exigem a substituição de componentes, como pneus e sistemas de pós-tratamento de escapamento, bem como de consumíveis, como líquido de arrefecimento e óleo. Segundo Bieker (2021), os veículos com motor a combustão geralmente exigem mais manutenção do que os veículos elétricos e, portanto, têm emissões de GEE associadas à manutenção ligeiramente mais altas. Para levar em conta as emissões de GEE correspondentes, os fatores de emissão específicos

do tipo de motorização e do peso do veículo são derivados de Hill et al. (2020) e dimensionados com o peso dos modelos considerados. A Tabela 4 mostra os fatores específicos de distância derivados (em g CO₂_{eq}/km).

CICLO DE COMBUSTÍVEL E ELETRICIDADE

Consumo de combustível e eletricidade

Os valores de consumo de combustível e eletricidade considerados neste estudo baseiam-se, em geral, naqueles informados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, coordenado e publicado pelo INMETRO (2023). No caso de ICEVs e HEVs flex, o programa de etiquetagem aplica uma correção para ajustar os valores de consumo de combustível da homologação aos valores encontrados em condições reais.² Neste estudo, os valores ajustados informados individualmente para os modelos em seus respectivos segmentos são ponderados com os dados de vendas de 2020 da ADK Automotive (2021). Os atuais padrões brasileiros de economia de combustível do programa Rota 2030 exigem que o consumo médio corporativo de energia dos carros de passeio vendidos a partir de 2022 seja reduzido para uma média de 1,62 MJ/km (Presidência da República, 2018), abaixo do valor-alvo de 1,82 MJ/km para veículos comercializados de 2017 a 2021 (Presidência da República, 2012). Admitindo essa melhoria, considera-se que os veículos vendidos hoje têm maior eficiência energética que os comercializados em 2020. Refletindo a redução relativa do valor médio de consumo corporativo de energia, os valores de consumo de energia para a homologação dos veículos de 2020 são reduzidos em 11% antes de ser ajustados às condições reais. A Tabela 6 mostra o consumo de combustível ou de eletricidade em condições reais conforme a motorização e o segmento. Os valores de consumo de combustível em litros por 100 km correspondem à mistura da gasolina C.

Tabela 6. Consumo de combustível, eletricidade e hidrogênio dos carros de passeio no Brasil.

Segmento	Tipo de motorização	Consumo de combustível ou hidrogênio (L/100 km ^a ou kg/100 km)	Consumo de eletricidade (kWh/100 km)	Consumo total de energia (MJ/km)
Compacto	ICEV flex	6,6	-	2,0
	BEV	-	23,4	0,8
Médio	ICEV flex	6,6	-	2,0
	HEV	5,1	-	1,5
	PHEV	4,3	14,2	1,3 + 0,5
	BEV	-	22,9	0,8
SUV compacto	ICEV flex	7,7	-	2,3
	BEV	-	20,6	0,7
	FCEV	1,1	-	1,3 ^b

^a Consumo de combustível expresso em litros de gasolina C (E27) por 100 km. PCI = 29,6 MJ/L.

^b PCI para hidrogênio igual a 120 MJ/kg (Prussi et al., 2020).

Uma atualização da metodologia para os valores de consumo de eletricidade dos BEVs no programa de etiquetagem, aplicável a partir de setembro de 2023, divide os valores de consumo de eletricidade da homologação (em kWh/100 km) por um fator de 0,7 para ajustá-los às condições reais de direção (INMETRO, 2023). Esse procedimento é semelhante à metodologia usada para os valores de etiquetagem da Agência de

² As normas brasileiras ABNT NBR 7024, para rodovias, e ABNT NBR 6601, para condições de direção urbana, utilizam o FTP75, mesmo procedimento de testagem da Agência de Proteção Ambiental (EPA, de *Environmental Protection Agency*) dos Estados Unidos. Para o programa de etiquetagem, o consumo de combustível testado nos ciclos de direção urbana e rodoviária é aumentado por fatores de 18% e 35%, respectivamente, bem como por uma constante. Os valores corrigidos são então ponderados por uma parcela de 55% de direção urbana e 45% de direção rodoviária (INMETRO, 2023).

Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 2017). Os valores de consumo de eletricidade corrigidos para modelos individuais são ponderados com as participações nas vendas de 2022 nos respectivos segmentos (EV-Volumes, 2023).

No caso dos PHEVs, o consumo de combustível e eletricidade é determinado por quanto o veículo opera no modo sustentado com motor a combustão e por quanto opera no modo predominantemente elétrico de depleção de carga, considerando ainda o consumo de combustível e de eletricidade nesses dois modos. Como o único PHEV médio atualmente disponível no Brasil ainda não foi testado pelo INMETRO, os valores de consumo de combustível e de eletricidade foram extraídos dos testes de etiquetagem da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA & U.S. Department of Energy [U.S. DOE], 2022).³ O consumo de combustível e de eletricidade nesses dois modos é ponderado com uma parcela de 50% de direção no modo elétrico, conforme observado para esse modelo, em média, em operações reais de consumidores privados na Alemanha (Plötz et al., 2022). Cabe observar que, nos Estados Unidos, a participação da direção no modo elétrico desse modelo é de apenas 30% (Isenstadt et al., 2022).

O consumo de hidrogênio do Hyundai Nexa não é fornecido no programa de etiquetagem brasileiro. Portanto, para os FCEVs, foram usados os valores do programa de etiquetagem da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA & U.S. DOE, 2022). Para os ICEVs e HEVs flex hipotéticos comercializados em 2030, fez-se uma projeção otimista de melhoria de 11% na eficiência energética em comparação com os veículos atuais. Isso se baseia na expectativa de que um padrão mais alto de eficiência energética média corporativa seja implementado para veículos comercializados após 2028, e que esse novo padrão possa levar a uma melhoria semelhante à exigida pelo Rota 2030 para veículos de 2022 em comparação com os vendidos em 2017. Para os BEVs, por outro lado, considerou-se que o consumo de eletricidade permanecerá o mesmo.

Para os PHEVs comercializados em 2030, presume-se que a capacidade da bateria e, portanto, a autonomia elétrica seja 20% maior que a dos modelos atuais (novamente, considerando a continuidade das tendências observadas atualmente). Com base na relação entre a autonomia elétrica e a proporção real de direção no modo elétrico para modelos PHEV na Europa (Plötz et al., 2022), estima-se que isso aumentaria o uso do modo elétrico de direção de 50% para 55%. Por sua vez, esse aumento reduziria o consumo médio de combustível em 10%, aumentando o consumo de eletricidade na mesma proporção.

Emissões de GEE dos combustíveis fósseis e biocombustíveis

Os ICEVs flex no Brasil podem operar com dois combustíveis, etanol hidratado (E100) e gasolina C, ou ainda uma mistura dos dois. A gasolina C (E27) é uma mistura de gasolina fóssil que contém 27%, em volume, de etanol anidro. Alguns modelos de HEV podem operar com ambos os combustíveis. Atualmente, não há modelo de PHEV que opere com etanol hidratado.

Este estudo avalia as emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs e HEVs flex quando conduzidos com a média de mercado para consumo de gasolina C e etanol hidratado. As emissões resultantes desse consumo médio são comparadas com as emissões da operação com gasolina C ou etanol hidratado. A avaliação dos veículos comercializados em 2023 considera apenas o consumo de gasolina C e eletricidade pelos PHEVs, enquanto a avaliação dos veículos de 2030 considera o consumo de gasolina C e etanol hidratado pelos ICEVs, HEVs e PHEVs.

³ Os valores de consumo de combustível da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos correspondem ao combustível de referência usado no processo de homologação. Com base na respectiva densidade de energia (em MJ/L), esses valores são ajustados à densidade de energia da mistura de combustível no Brasil.

A maior parte do etanol usado no Brasil é de primeira geração proveniente da cana-de-açúcar (93% do etanol anidro e 91% do etanol hidratado em 2020), sendo o restante produzido a partir do milho (7% do etanol anidro e 9% do etanol hidratado) (EPE, 2022b). A Tabela 7 e a Figura 2 apresentam a intensidade de carbono da gasolina fóssil, bem como as rotas de produção do etanol à base de cana-de-açúcar e de milho, para o etanol anidro e o etanol hidratado. As emissões da produção de combustível (WTT) de cada rota são derivadas do Observatório da Cana e Bioenergia (União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2023), que apresenta a intensidade média de carbono para produtores de biocombustíveis certificados no programa RenovaBio. Para referência, também é exibida a intensidade de carbono da mistura média de etanol à base de cana-de-açúcar e de milho em 2020, que replica de perto os valores WTT considerados pelo relatório da EPE (2022b) sobre a intensidade de carbono do etanol e de outros combustíveis usados no transporte.

Tabela 7. Emissões do ciclo de combustível (WTT, ILUC, TTW e WTW), poder calorífico inferior (PCI) e proporção volumétrica das rotas de produção da gasolina C e do etanol hidratado em 2020.

Combustível	Rota de produção	Proporção na mistura (vol.%)	PCI (MJ/L)	WTT (exceto ILUC) (g CO _{2 eq.} /MJ)	ILUC (g CO _{2 eq.} /MJ)	TTW (g CO _{2 eq.} /MJ)	WTW (g CO _{2 eq.} /MJ)
Gasolina C	Gasolina fóssil	73%	32,1	19,9	0	73,4	93,3
	Etanol anidro de cana-de-açúcar	25%	22,4	27,2	8,7	-	35,9
	Etanol anidro de milho	2%	22,4	23,3	34,5	-	57,8
	Mistura de gasolina C em 2020	100%	29,5	21,3	2,1	58,4	81,8
Etanol hidratado	Etanol hidratado de cana-de-açúcar	91%	21,3	27,9	8,7	-	36,6
	Etanol hidratado de milho	9%	21,3	33,2	34,5	-	67,7
	Mistura de etanol hidratado em 2020	100%	21,3	28,4	11,0	-	39,4

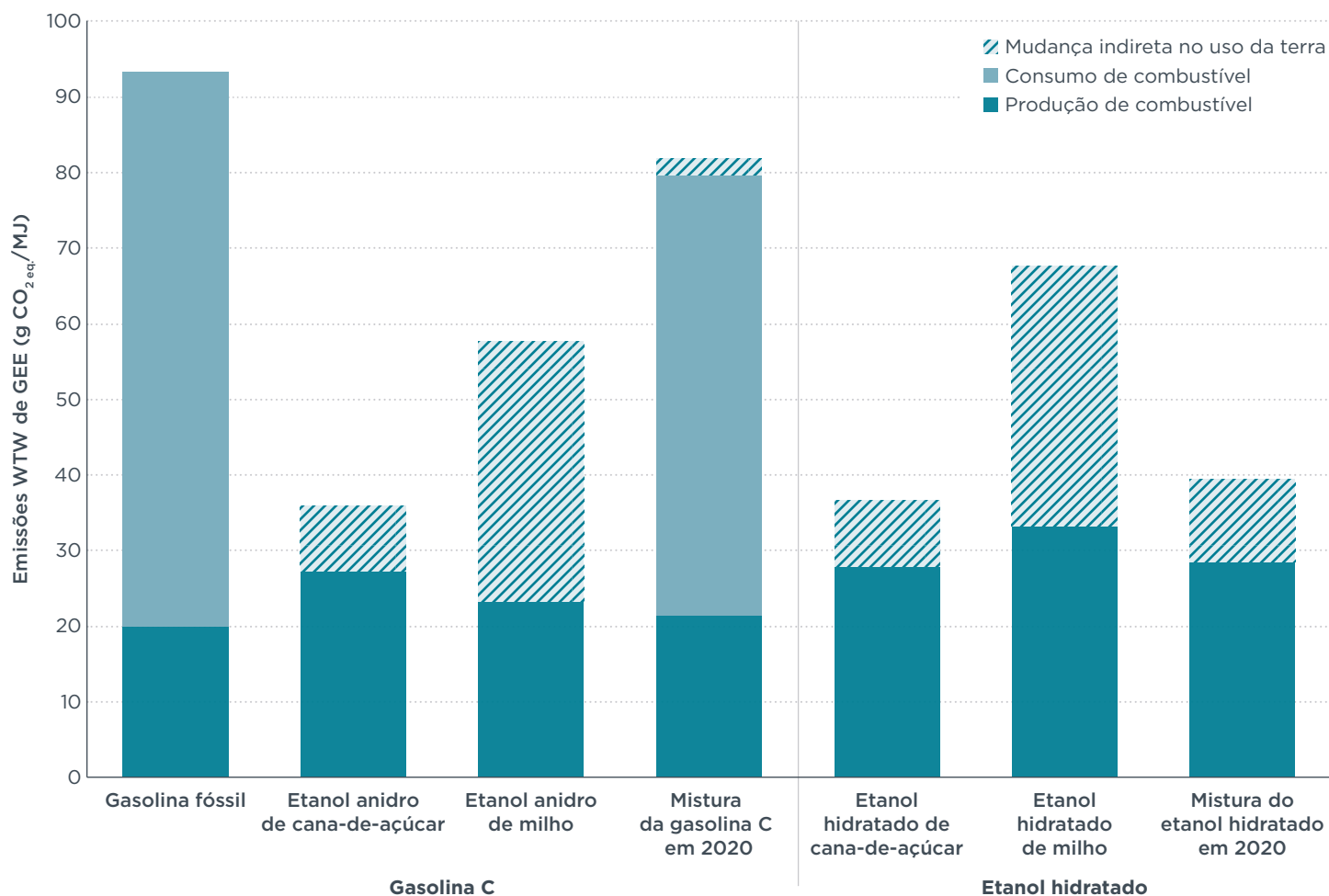


Figura 2. Comparação das emissões WTW de GEE da gasolina C e do etanol hidratado, incluindo as rotas correspondentes de produção de etanol no Brasil.

Este estudo também considera as emissões ILUC da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e de milho. Essas emissões correspondem à expansão regional e global da área usada para agricultura, que resulta indiretamente da demanda por biocombustíveis no Brasil. Uma explicação metodológica detalhada do cálculo das emissões ILUC é oferecida por Marlins et al. (2014). Como o RenovaBio não contabiliza as emissões ILUC, foram usados os valores de emissão de ILUC de 25 anos da Organização da Aviação Civil Internacional, que publica regularmente o Esquema de Compensação e Redução de Carbono para a Aviação Internacional (CORSIA) (International Civil Aviation Organization, 2022). As emissões ILUC do etanol à base de cana-de-açúcar produzido no Brasil são de 8,7 g CO_{2 eq.}/MJ, inferior aos 13,6 g CO_{2 eq.}/MJ determinados com o modelo GLOBIOM (Valin et al., 2015) e aos 14,2 g CO_{2 eq.}/MJ considerados pelo California Air Resources Board (2015).⁴ Quanto ao etanol à base de milho produzido no Brasil, não existe avaliação publicada sobre as emissões ILUC. Portanto, o valor é estimado com o valor do CORSIA para o milho nos Estados Unidos: 25,1 g CO_{2 eq.}/MJ. Esse valor é semelhante aos 23,8 g CO_{2 eq.}/MJ para o milho dos Estados Unidos considerado pelo California Air Resources Board, mas inferior ao valor do CORSIA de 34,9 g CO_{2 eq.}/MJ para o milho global. Esses valores indicam que o etanol à base de milho gera mais impactos de mudança no uso da terra que o etanol à base de cana-de-açúcar.

⁴ Todos os valores são ajustados para uma alocação das emissões de mudança de uso da terra durante a produção de biocombustível por 25 anos.

Para a gasolina fóssil, as emissões da produção de combustível (WTT) são derivadas das emissões do ciclo completo de combustível (WTW) consideradas pela Diretiva de Qualidade de Combustível da União Europeia (Council of the European Union, 2015) e pelo Programa Padrão de Combustível Renovável (U.S. EPA, 2010), dos Estados Unidos. As emissões da queima de combustível (TTW) são provenientes de um relatório feito por um consórcio entre Centro de Pesquisa Conjunta da Comissão Europeia (JRC, de *Joint Research Center*), EUCAR e Concawe (Prussi et al., 2020).

Este estudo considera as mudanças projetadas na intensidade de carbono das misturas médias de combustível de gasolina C e etanol hidratado durante a vida útil dos veículos. Para a mistura da gasolina C, a proporção de etanol anidro de 27% em volume é mantida até 2050. No entanto, supõe-se que a parcela do etanol à base de milho nessa proporção total de etanol anidro aumentará linearmente de 7% em 2020 para 19% em 2027 e permanecerá nesse nível até 2050 (EPE, 2022b), enquanto a participação do etanol anidro à base de cana-de-açúcar diminuirá de 93% em 2020 para 81% em 2027. Para a mistura média de etanol hidratado, com base nas projeções da EPE (2022b), este estudo considera um aumento linear da participação do etanol à base de milho de 9% em 2020 para 18% em 2027, com a participação do etanol à base de cana-de-açúcar diminuindo de 91% para 82% no mesmo período. Considera-se que as proporções do etanol à base de cana-de-açúcar e de milho em 2027 serão mantidas até 2050. Atualmente, o etanol de segunda geração é responsável por uma parcela insignificante da demanda total de etanol (menos de 0,1% em 2019 e 2020), o que deve aumentar ligeiramente, para 1,3%, até 2050 (EPE, 2022b). Portanto, este estudo considera apenas as intensidades de carbono do etanol de cana-de-açúcar e de milho de primeira geração.

Para as emissões decorrentes da operação com a média de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado, este estudo parte do pressuposto de que a participação geral do uso de etanol hidratado em comparação com a gasolina C aumentará. Embora o consumo de gasolina C e etanol hidratado tenha sido de 65% e 35% em volume, respectivamente, em 2020 (EPE, 2022b), supõe-se que essa proporção mudará linearmente para 54% e 46% em 2032 (EPE, 2022b) e para 45% e 55% em 2050 (Plano Nacional de Energia, 2050; Ministério de Minas e Energia & EPE, 2020). A Tabela 8 apresenta os fatores de emissão médios ao longo da vida de combustíveis para carros flex usados de 2023 a 2044 e de 2030 a 2051. Já está considerada, nos números apresentados, a diminuição da quilometragem anual.

Tabela 8. Média das emissões WTT, TTW e ILUC ao longo da vida e do ciclo (WTW) do combustível usado em carros de passeio em 2023 e 2030.

Combustível	Veículos (2023)				Veículos (2030)			
	WTT (exceto ILUC) (g CO ₂ eq./MJ)	ILUC (g CO ₂ eq./MJ)	TTW (g CO ₂ eq./MJ)	WTW (g CO ₂ eq./MJ)	WTT (exceto ILUC) (g CO ₂ eq./MJ)	ILUC (g CO ₂ eq./MJ)	TTW (g CO ₂ eq./MJ)	WTW (g CO ₂ eq./MJ)
Gasolina C	21,3	2,7	58,4	82,3	21,2	2,8	58,4	82,4
Etanol hidratado	28,8	13,2	0	42,1	28,9	13,5	0	42,4
Consumo médio de gasolina C e etanol hidratado	24,2	6,8	35,5	66,6	24,5	7,3	33,5	65,3

A queima incompleta no motor de combustão interna e o impacto do pós-tratamento dos gases de escapamento levam à produção de CH₄ e N₂O. Essas emissões são detalhadas em Bieker (2021). Em média, as emissões de CH₄ e N₂O dos carros a gasolina resultam em emissões TTW de GEE de 1 g CO₂ eq./km (Bieker, 2021). Esses valores não estão exibidos na Tabela 8, mas são adicionados separadamente nos cálculos.

Emissões de GEE da eletricidade

O desenvolvimento futuro da matriz elétrica no Brasil é estimado a partir da participação das tecnologias de geração de eletricidade no *Stated Policy Scenario*, da Agência Internacional de Energia (IEA, 2022c), conforme apresentado na Figura 3. O cenário considera que a produção de eletricidade no Brasil dobrará até 2050, sendo as capacidades adicionais atendidas pela energia solar e eólica. Assim, a participação de 87% de energias renováveis em 2020 aumenta para 95% em 2030 e 97% em 2050. Para fins de comparação, a Figura A1, no Apêndice, mostra uma projeção da EPE para o desenvolvimento da matriz elétrica até 2032, em que um aumento semelhante na produção total de eletricidade é alcançado principalmente com energia hidrelétrica e eólica adicional, atingindo uma participação de 90% de energias renováveis até 2027 (EPE, 2022b).

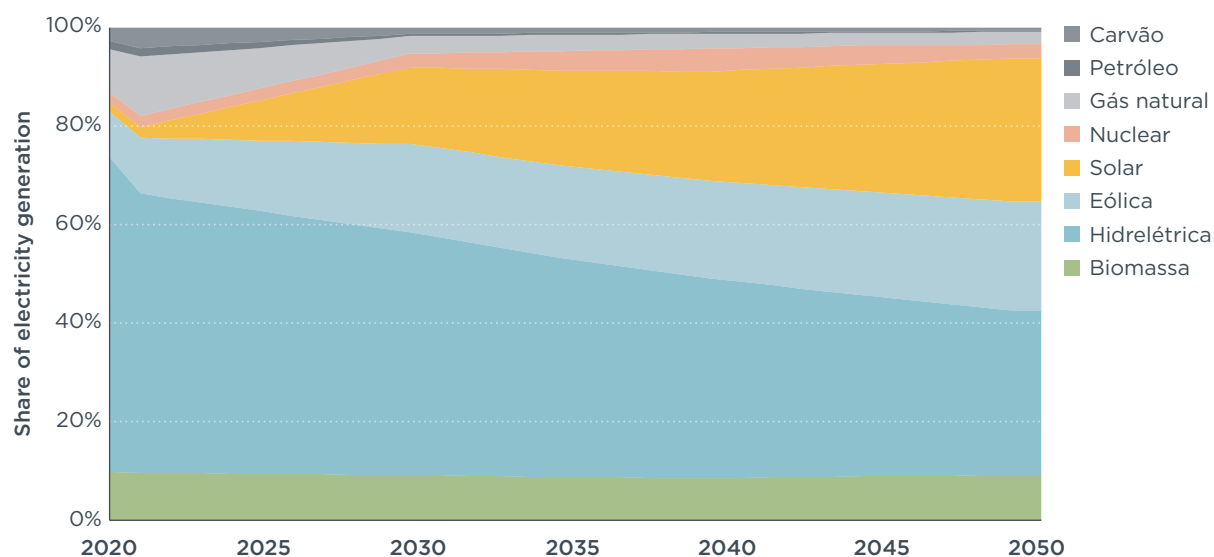


Figura 3. Participação projetada das tecnologias na geração de eletricidade no Brasil, de acordo com o *Stated Policy Scenario*, da IEA.

Com base no cenário projetado pela IEA, a Figura 4 apresenta a evolução das emissões de GEE do ciclo de vida da matriz elétrica média no Brasil de 2020 a 2050. Para fins de comparação, a figura também exibe a evolução das emissões com base no cenário projetado pela EPE até 2032. A participação das tecnologias de geração de eletricidade nos cenários projetados pela IEA e pela EPE são aplicadas como pesos aos fatores de intensidade de carbono do ciclo de vida apresentados pela EPE (2022b) (ver Tabela A1). Para considerar as perdas de energia na rede elétrica, são incluídas perdas de transmissão e distribuição de 16% (EPE, 2022a).

Os fatores de intensidade de carbono da EPE baseiam-se principalmente na mediana global dos fatores de intensidade de carbono do ciclo de vida do IPCC (Moomaw et al., 2011). Eles abrangem as emissões a montante (*upstream*) e as emissões da construção de novas usinas de energia ao longo da vida útil em função da eletricidade gerada. Usando uma abordagem conservadora, não se considerou qualquer redução nesses fatores em anos futuros, ainda que a descarbonização em curso do setor vá diminuir as emissões da construção de usinas de energia renovável (Pehl et al., 2017).

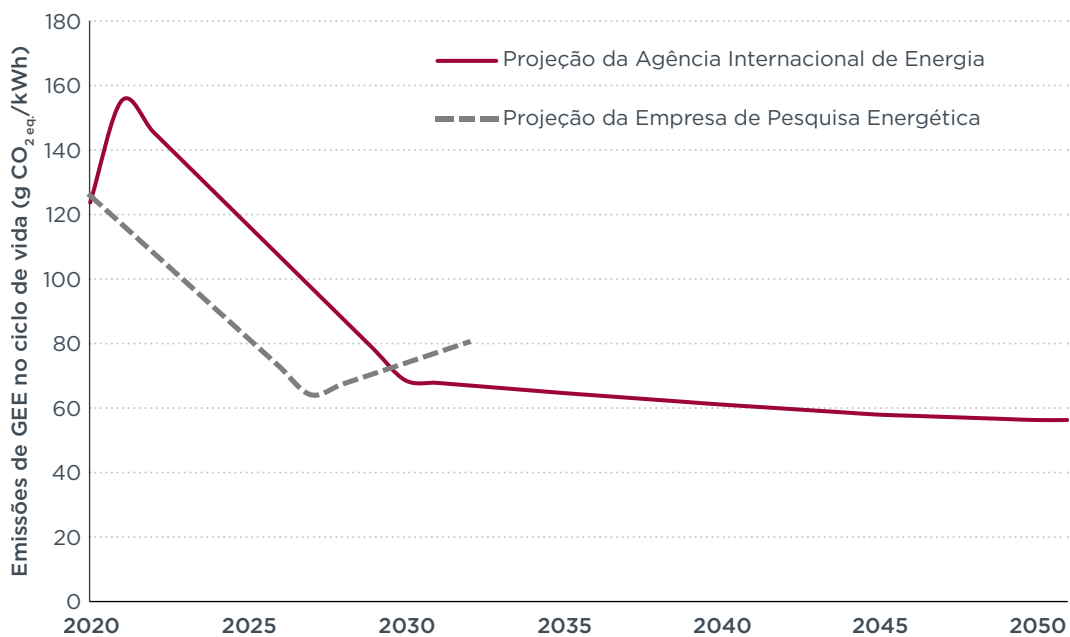


Figura 4. Evolução das emissões de GEE no ciclo de vida do consumo de eletricidade no Brasil, com base nas projeções de matriz elétrica da IEA e da EPE.

A intensidade média de carbono durante a vida útil referente ao consumo de eletricidade dos carros de passeio comercializados em 2023 é estimada em 83 g CO₂eq./kWh, o que corresponde à projeção da IEA para a matriz elétrica de 2023 a 2044. Para carros de passeio comercializados em 2030, a intensidade de carbono é reduzida para 63 g CO₂eq./kWh, correspondendo à matriz elétrica projetada de 2030 a 2051. Esses números consideram a evolução anual da intensidade de carbono do ciclo de vida do consumo de eletricidade e a diminuição da quilometragem anual dos veículos. Como os veículos tendem a ter uma quilometragem anual maior nos primeiros anos de uso, esta análise considera uma intensidade de carbono da matriz elétrica em maior proporção nos primeiros anos.

Também é considerada uma matriz elétrica puramente renovável de 33% de energia solar e 67% de energia eólica, com emissões de GEE do ciclo de vida de 21 g CO₂eq./kWh. Apenas a energia solar e a eólica são analisadas, por serem as mais escaláveis e, muitas vezes, adicionais às usinas existentes. A participação de ambas segue a proporção projetada para a produção de eletricidade no *Stated Policy Scenario* da IEA (ver Figura 3).

As perdas de energia durante a recarga dos veículos são contabilizadas nos valores reais de consumo de eletricidade.

Emissões de GEE do hidrogênio

Este estudo compara as emissões de GEE do ciclo de vida dos FCEVs que usam hidrogênio produzido a partir da reforma a vapor do gás natural (hidrogênio cinza) com as do hidrogênio obtido por eletrólise, seja da rede elétrica, seja exclusivamente da eletricidade renovável adicional (hidrogênio verde). Em 2021, o hidrogênio obtido a partir do gás natural correspondeu a 62% da produção global, e o hidrogênio à base de carvão, a 19%, enquanto a participação do hidrogênio à base de eletricidade foi de 0,04% (IEA, 2022b). Apesar disso, a produção do hidrogênio com eletricidade renovável deve tornar-se a rota dominante no futuro. A Tabela 9 mostra as emissões de GEE do hidrogênio obtido de gás natural e eletrólise (em kg CO₂eq. por kg de hidrogênio) para veículos de 2023.

As emissões de GEE do ciclo de vida do hidrogênio produzido a partir de gás natural baseiam-se nos valores para a produção de gás natural nos Estados Unidos fornecidos pelo modelo GREET (Argonne National Laboratory, 2020), que consideram a extração de gás natural, o transporte e o processo de obtenção do hidrogênio. Todas as etapas incluem emissões fugitivas de metano. Para o hidrogênio produzido com eletricidade, as emissões de GEE do ciclo de vida baseiam-se naquelas da produção de eletricidade e em uma demanda energética de 1,69 MJ de eletricidade por MJ de hidrogênio. Essa demanda considera a produção de hidrogênio por eletrólise com uma eficiência energética de 70% (Prussi et al., 2020), o que corresponde a uma perda de energia de 0,43 MJ por MJ de hidrogênio. Além disso, incluem-se perdas de energia de 0,25 MJ por MJ de hidrogênio que ocorrem durante a compressão (Prussi et al., 2020). Todas as rotas incluem as perdas de energia e as emissões correspondentes à compressão e ao transporte de curta distância do hidrogênio. As perdas de energia no transporte de longa distância não são abordadas neste estudo.

Tabela 9. Emissões de GEE do ciclo de vida de diferentes rotas de produção de hidrogênio em combinação com cenários de matriz elétrica durante a vida útil de veículos comercializados em 2023.

Fonte ou tecnologia	Matriz elétrica	Emissões de GEE da produção (kg CO ₂ eq./kg H ₂)
Gás natural		10,1
Eletrólise	Matriz elétrica 2023-2044	4,7
	Renováveis	1,2

RESULTADOS

CARROS DE PASSEIO DE 2023

As figuras 5, 6 e 7 apresentam as emissões de GEE no ciclo de vida (em g CO_{2eq}/km) durante a vida útil dos carros de passeio compactos, médios e SUVs compactos comercializados em 2023. Presume-se que todos os veículos usam a média de mercado de consumo de gasolina C e etanol hidratado ou a matriz elétrica média, dependendo da motorização. O consumo médio de combustível e a matriz elétrica consideram as mudanças projetadas para os 22 anos de vida útil do veículo, que correspondem à mais recente curva de sucateamento nacional oficial para carros de passeio (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020). As emissões referentes à operação exclusiva com gasolina C (valores superiores) ou etanol hidratado (valores inferiores) de ICEVs são indicadas por barras de erro. Os números nas figuras comparam as emissões da respectiva motorização e combustíveis com as de um ICEV flex usando a média de mercado de consumo de etanol e gasolina C.

Para o segmento de médios, a Figura 6 também apresenta as emissões de GEE do ciclo de vida de HEVs e PHEVs. A figura mostra o caso de HEVs operando com o consumo médio de combustível. A barra de erro indica os casos de operação exclusiva com gasolina C ou etanol hidratado. No caso dos PHEVs, é apresentada apenas a opção com gasolina C, pois atualmente não há modelos de PHEV que operem com etanol hidratado.

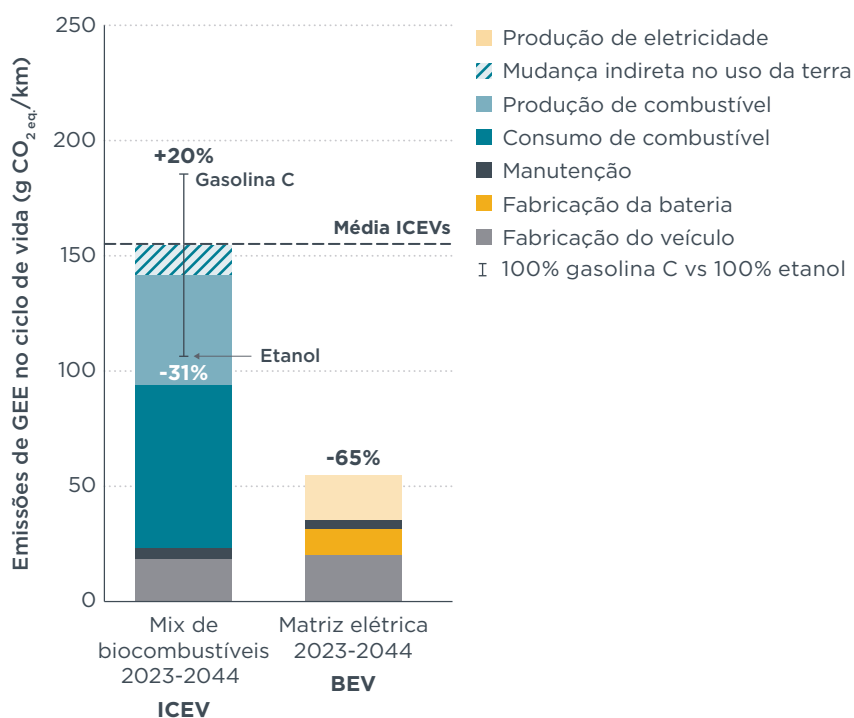


Figura 5. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs do segmento de compactos comercializados no Brasil em 2023. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso dos dois combustíveis.

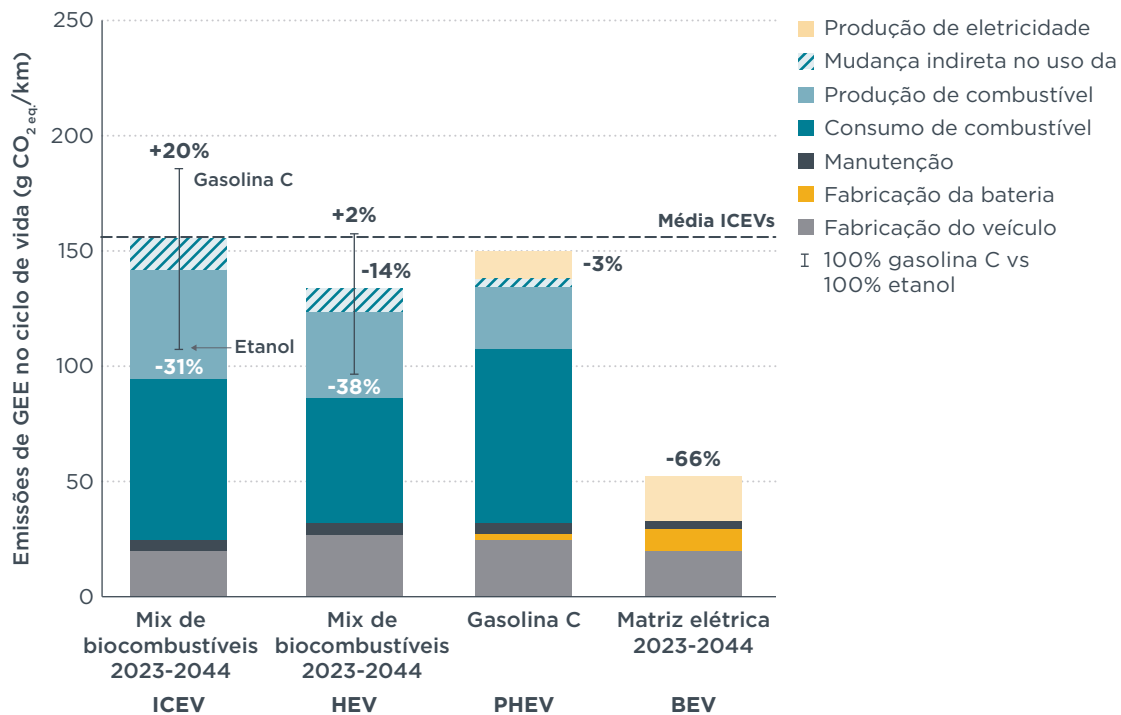


Figura 6. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex, HEVs flex, PHEVs e BEVs do segmento de médios comercializados no Brasil em 2023. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso dos dois combustíveis.

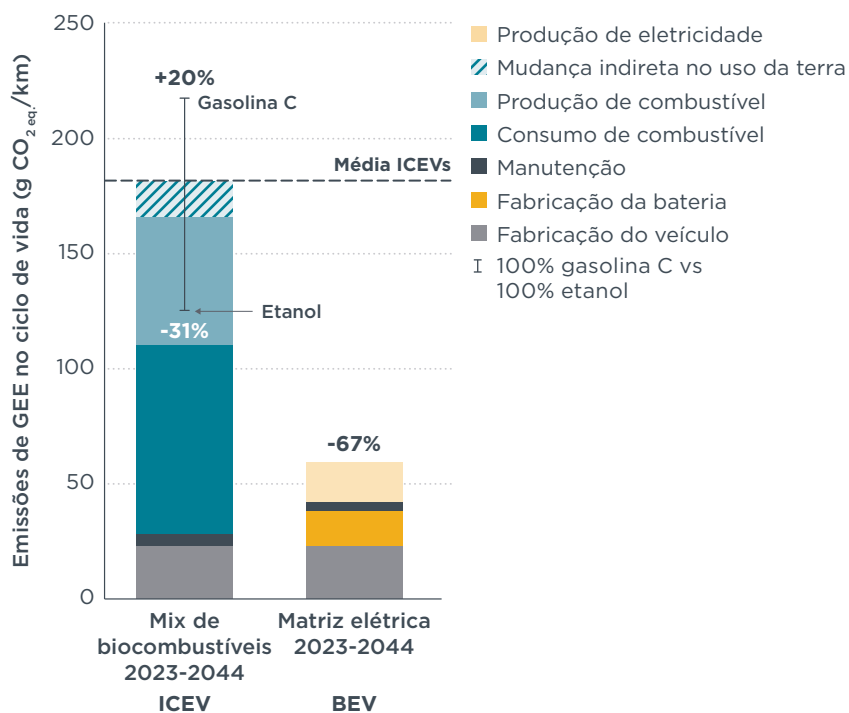


Figura 7. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs do segmento de SUVs compactos comercializados no Brasil em 2023. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso dos dois combustíveis.

Os BEVs têm emissões de GEE do ciclo de vida 65% a 67% mais baixas que as dos ICEVs flex.

As emissões de GEE do ciclo de vida dos ICEVs flex que operam com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado são de 155 g CO_{2 eq.}/km, para carros dos segmentos compacto e médio, e 181 g CO_{2 eq.}/km para SUVs compactos. No caso dos BEVs, as emissões de GEE do ciclo de vida são 65% a 67% menores, com 55 g CO_{2 eq.}/km para carros compactos, 52 g CO_{2 eq.}/km para carros médios e 59 g CO_{2 eq.}/km para SUVs compactos. As emissões mais baixas de GEE dos BEVs devem-se a dois fatores. Primeiro, o consumo de energia dos BEVs (0,7-0,8 MJ/km) é cerca de três vezes menor que o dos ICEVs comparáveis (2,0-2,3 MJ/km). Segundo, as emissões no ciclo da energia de carros elétricos que utilizam a matriz elétrica do Brasil são quase três vezes menores do que as dos ICEVs flex que operam com a média de mercado de gasolina C e etanol hidratado, ao longo de sua vida útil. Enquanto a matriz elétrica de 2023-2044 tem emissões de GEE do ciclo de vida de 23,1 g CO_{2 eq.}/MJ (83,1 g CO_{2 eq.}/kWh), a intensidade de carbono média dos combustíveis de 2023-2044 é de 66,6 g CO_{2 eq.}/MJ.

As emissões de GEE correspondentes à produção da bateria (9,5-15,3 g CO_{2 eq.}/km) são pequenas quando comparadas ao grande benefício do uso de BEVs em termos de emissão de GEE. Com uma substituição de bateria durante a vida útil do veículo, as emissões de GEE do ciclo de vida dos BEVs aumentariam para 67 g CO_{2 eq.}/km para carros compactos, 62 g CO_{2 eq.}/km para carros médios e 75 g CO_{2 eq.}/km para SUVs compactos. Esses valores ainda são 57% a 60% mais baixos que o dos ICEVs flex.

A operação de ICEVs exclusivamente com etanol hidratado resulta em emissões 31% menores do que a operação com a média de mercado de consumo dos dois combustíveis. Já operar somente com gasolina C resulta em emissões 20% maiores.

Operando exclusivamente com etanol hidratado, as emissões de GEE do ciclo de vida dos ICEVs flex são de 107 g CO_{2 eq.}/km para os segmentos compacto e médio e de 125 g CO_{2 eq.}/km para SUVs compactos, 31% a menos do que com o consumo médio de combustíveis. Por outro lado, operando exclusivamente com gasolina C, as emissões do ciclo de vida são de 186 g CO_{2 eq.}/km para carros compactos e médios e de 217 g CO_{2 eq.}/km para SUV compactos, 20% a mais do que com o consumo médio de combustíveis. Assim, as emissões de GEE do ciclo de vida dos ICEVs flex que operam exclusivamente com etanol hidratado são duas vezes maiores que as dos BEVs. Para ICEVs que operam exclusivamente com gasolina C, as emissões são quatro vezes maiores.

Os HEVs têm emissões de GEE do ciclo de vida 14% mais baixas que as dos ICEVs quando consomem a mesma proporção de gasolina C e etanol.

O menor consumo de combustível dos HEVs em comparação com os ICEVs flex convencionais traduz-se diretamente em emissões mais baixas de GEE do ciclo de vida quando os veículos de ambos os tipos de motorização usam a mesma proporção de combustível. No segmento de médios, o consumo de energia dos HEVs é de 1,5 MJ/km, 22% menor que os 2,0 MJ/km dos ICEVs equivalentes. Com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado, as emissões do ciclo de vida de HEVs médios são de 134 g CO_{2 eq.}/km, o que é 14% menor do que para os ICEVs flex convencionais com o mesmo consumo. No entanto, é importante observar que há poucos modelos de HEV flex disponíveis no mercado atualmente, e nenhum deles é do segmento de médios. Os HEVs que usam exclusivamente gasolina C têm emissões de GEE do ciclo de vida de 158 g CO_{2 eq.}/km, 2% mais altas que a dos ICEVs operando com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado. No caso de operação exclusiva com etanol hidratado, as emissões do ciclo de vida dos HEVs são de 97 g CO_{2 eq.}/km, ou seja, apenas 10% abaixo dos ICEVs operando exclusivamente com etanol hidratado e 85% acima dos BEVs operando com a matriz elétrica média.

Os híbridos plug-in geram emissões apenas 3% menores que as dos ICEVs flex.

No caso dos PHEVs, as emissões de GEE do ciclo de vida são determinadas, em grande parte, pela operação com combustível ou eletricidade. Este estudo considera uma proporção de 50% de operação elétrica. É uma suposição otimista em comparação com o uso médio real na Europa (Plötz et al., 2022) e nos Estados Unidos (Isenstadt et al., 2022), considerando que ambas as regiões têm uma rede de infraestrutura de recarga mais extensa que a do Brasil. Para os PHEVs do segmento de médios, as emissões de GEE do ciclo de vida são de 150 g CO_{2eq}/km, ou seja, apenas 3% mais baixas que as dos ICEVs flex que utilizam o consumo médio de mercado de gasolina C e etanol hidratado. Cabe observar que esse valor corresponde ao uso de gasolina C, pois não há modelos de PHEV disponíveis atualmente que também operem com etanol hidratado.

CARROS DE PASSEIO DE 2030

Esta seção apresenta uma estimativa das emissões de GEE do ciclo de vida durante a vida útil dos carros de passeio dos segmentos compacto, médio e SUV compacto a ser comercializados em 2030, como exibem as figuras 8, 9 e 10, respectivamente. Essas estimativas baseiam-se em projeções das participações médias da gasolina C e do etanol hidratado no mercado; em mudanças nesses dois combustíveis; e na evolução da matriz elétrica média ao longo dos 22 anos de vida útil dos veículos, de 2030 a 2051. Além disso, supõe-se que os futuros ICEVs e HEVs flex consumirão menos combustível que os veículos comercializados em 2023, e que os futuros BEVs e PHEVs terão baterias maiores que as atuais. Supõe-se também que os futuros PHEVs serão capazes de operar com etanol hidratado e rodarão mais em modo elétrico, devido à maior capacidade da bateria. Para todos os tipos de motorização, considera-se que a intensidade de carbono da produção de veículos e baterias diminuirá.

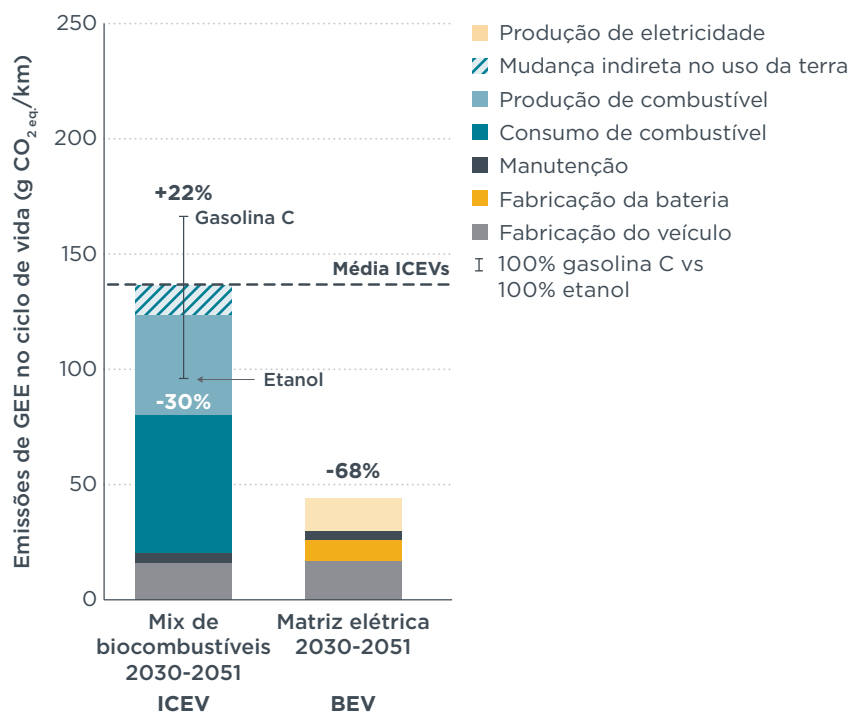


Figura 8. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs do segmento de compactos comercializados no Brasil, projetados para 2030. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou com etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso das duas misturas de combustível.

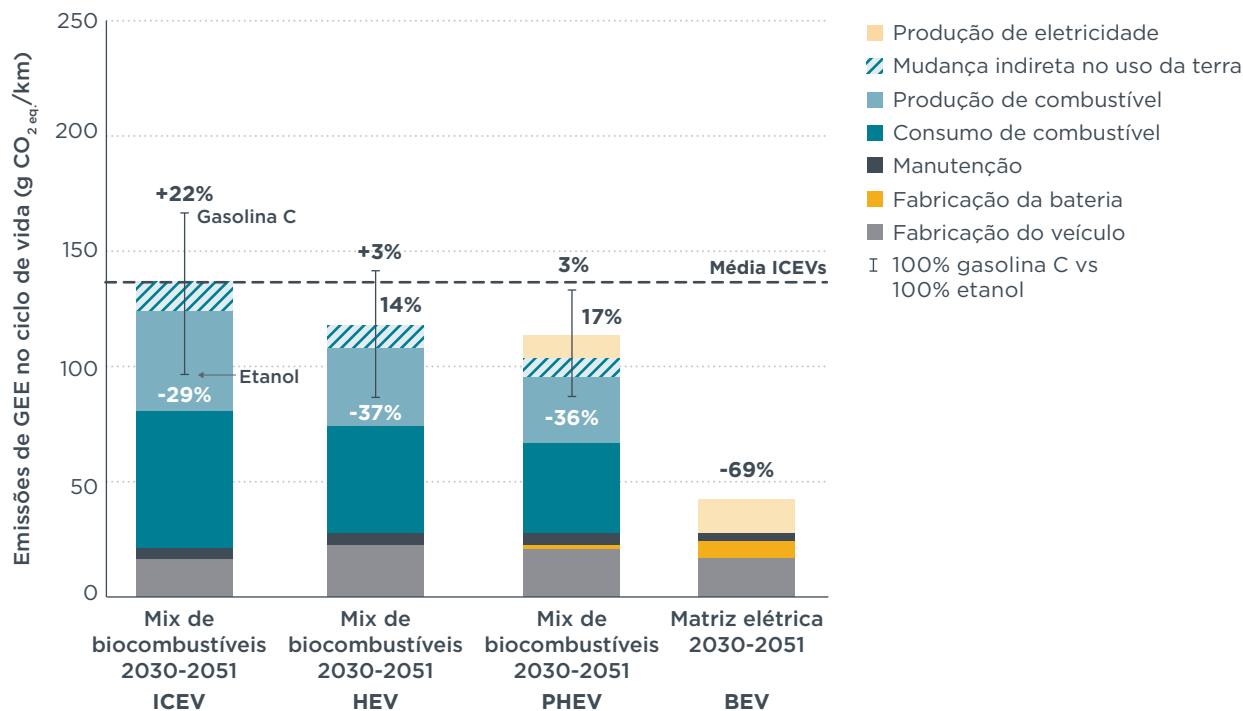


Figura 9. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex, HEVs flex, PHEVs flex e BEVs do segmento de médios comercializados no Brasil, projetados para 2030. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou com etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso das duas misturas de combustível.

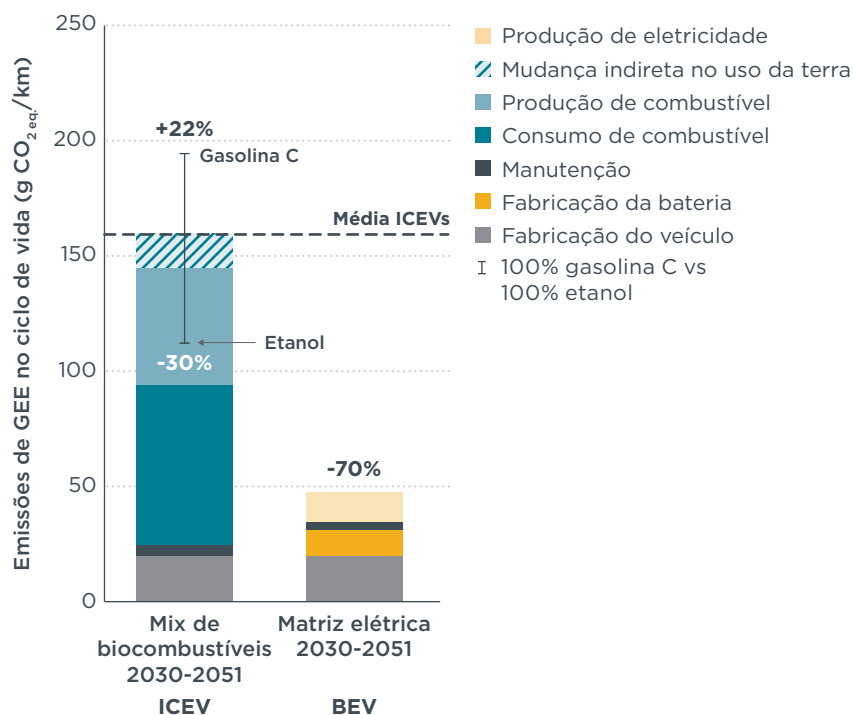


Figura 10. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs do segmento de SUVs compactos comercializados no Brasil em 2030. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou com etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso das duas misturas de combustível.

Os futuros BEVs terão emissões de GEE do ciclo de vida 68% a 70% menores que as dos ICEVs flex.

As emissões de GEE do ciclo de vida dos futuros ICEVs flex operando com o consumo médio de mercado projetado para 2030 a 2051 de gasolina C e etanol hidratado são de 136-137 g CO_{2 eq.}/km para carros dos segmentos compacto e médio e de 160 g CO_{2 eq.}/km para os SUVs compactos. Por outro lado, as emissões de GEE do ciclo de vida dos BEVs comercializados em 2030 correspondem a 44 g CO_{2 eq.}/km para carros compactos, 42 g CO_{2 eq.}/km para carros médios e 48 g CO_{2 eq.}/km para SUVs compactos. Estima-se, portanto, que os BEVs comercializados em 2030 tenham emissões de GEE do ciclo de vida 68% a 70% menores que as dos ICEVs flex comparáveis.

A redução das emissões de GEE para veículos futuros é mais rápida para os BEVs que para os ICEVs flex.

Estima-se que os BEVs comercializados em 2030 gerarão 19% menos emissões de ciclo de vida que os BEVs comercializados em 2023, e que as emissões dos ICEVs flex de 2030 serão 12% menores que as dos ICEVs atuais. No caso dos BEVs, essa redução deve ocorrer mesmo com a premissa de que as baterias serão maiores, por causa da diminuição da intensidade média de carbono da matriz elétrica: de 37,8 g CO_{2 eq.}/MJ em 2023 para 19,1 g CO_{2 eq.}/kWh em 2030 (-49%) e 15,7 g CO_{2 eq.}/MJ em 2050 (-59%). Em contrapartida, a intensidade de carbono do consumo médio de gasolina C e etanol hidratado deve diminuir de 68,6 g CO_{2 eq.}/MJ em 2023 para 67,1 g CO_{2 eq.}/MJ em 2030 (-2%) e 63,5 g CO_{2 eq.}/MJ em 2050 (-7%). Essa redução resulta da pressuposição de uma maior participação de mercado do etanol hidratado em comparação com a gasolina C e da expectativa de que os modelos futuros a combustão terão um consumo de combustível 11% menor.

Em termos de emissão de GEE, o benefício dos futuros HEVs em relação aos ICEVs permanece o mesmo dos veículos atuais.

Supondo que os HEVs comercializados em 2030 consumam 11% menos combustível que os HEVs comercializados em 2023, os modelos do segmento de médios operando com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado teriam emissões de GEE do ciclo de vida de 118 g CO_{2 eq.}/km. Assim como nos modelos atuais, isso corresponde a um benefício de emissão de GEE de 14% em comparação aos ICEVs flex convencionais. Para os futuros modelos de HEV operando exclusivamente com gasolina C, as emissões de GEE do ciclo de vida seriam de 141 g CO_{2 eq.}/km, ou seja, 3% maiores que as dos ICEVs flex operando com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado. Mesmo supondo que os HEVs operariam apenas com etanol, as emissões de GEE do ciclo de vida de 87 g CO_{2 eq.}/km ainda seriam duas vezes mais altas que as dos BEVs.

Os futuros PHEVs podem gerar 17% menos emissões que os ICEVs com o mesmo consumo médio de combustível.

Estima-se que a autonomia elétrica dos futuros PHEVs aumentará em 20%, o que deve reduzir seu consumo de combustível em 10% em comparação aos modelos comercializados em 2023. Para futuros modelos de PHEV operando com gasolina C e eletricidade, isso reduziria as emissões de GEE do ciclo de vida do segmento de médios para 133 g CO_{2 eq.}/km. Esse valor é apenas 3% inferior ao dos futuros ICEVs flex operando com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado, já que eles devem consumir menos combustível que os modelos atuais. Com o consumo médio de gasolina C e etanol hidratado, as emissões de GEE do ciclo de vida dos futuros modelos de PHEV flex devem ser de 114 g CO_{2 eq.}/km. As emissões dos futuros PHEVs serão, portanto, 17% mais baixas que as dos futuros ICEVs flex convencionais com o mesmo consumo médio de combustível. No entanto, em comparação com os futuros BEVs, esses PHEVs flex hipotéticos ainda teriam emissões 2,6 vezes maiores no ciclo de vida.

VEÍCULOS MOVIDOS A CÉLULA DE COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO

A Figura 11 mostra as emissões de GEE do ciclo de vida dos FCEVs do segmento de SUVs compactos operando com hidrogênio produzido a partir de gás natural (hidrogênio cinza), com a matriz elétrica média de 2023 a 2044 e somente com eletricidade renovável (hidrogênio verde). Também são apresentadas as emissões médias de GEE do ciclo de vida dos ICEVs flex e BEVs. Para os BEVs, a figura apresenta as emissões da operação com a matriz elétrica média ou exclusivamente com eletricidade renovável. Assim como as emissões da fabricação de baterias, no caso dos BEVs, as emissões do tanque de hidrogênio são exibidas separadamente das referentes à fabricação do veículo.

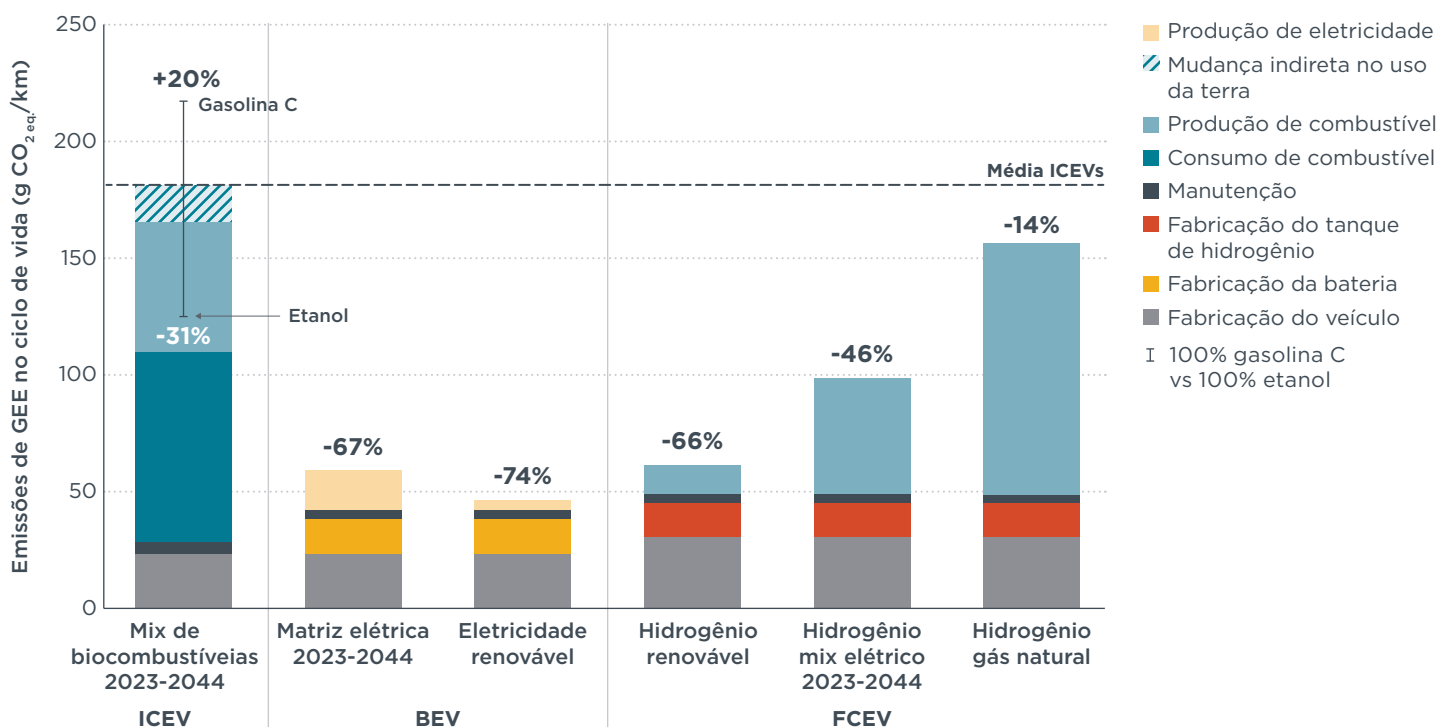


Figura 11. Emissões de GEE do ciclo de vida de ICEVs flex e BEVs do segmento de SUVs compactos comercializados no Brasil em 2023 em comparação com FCEVs que usam hidrogênio de diferentes rotas de produção. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo) em torno da média de mercado de uso dos dois combustíveis.

Os FCEVs que usam hidrogênio à base de gás natural geram 14% menos emissões que os ICEVs.

Os FCEVs do segmento de SUVs compactos movidos a hidrogênio de gás natural têm emissões de GEE do ciclo de vida de 157 g CO₂eq./km. Esse valor é 14% menor que a média por segmento dos ICEVs flex operando com as médias de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado, e quase três vezes maior que o dos BEVs usando a matriz elétrica média.

Os FCEVs movidos a hidrogênio obtido de eletricidade têm emissões 46% a 66% menores que as dos ICEVs.

Na operação com hidrogênio à base de eletricidade, as emissões do ciclo de vida dos FCEVs no segmento de SUVs compactos são de 99 g CO₂eq./km usando a matriz elétrica média e de 61 g CO₂eq./km usando apenas energias renováveis. Os valores médios baseados na matriz elétrica são 46% menores que para os ICEVs flex. Já os valores para o hidrogênio obtido com eletricidade renovável são 66% menores. No

entanto, os BEVs no mesmo segmento têm emissões de ciclo de vida de 59 g CO_{2eq.}/km com a rede elétrica média e de 46 g CO_{2eq.}/km com energias renováveis.

A operação com hidrogênio produzido a partir de eletricidade requer até três vezes mais energia do que o uso direto da eletricidade em BEVs.

As emissões mais altas de GEE dos FCEVs que utilizam hidrogênio obtido por eletrólise em comparação com os BEVs movidos pela mesma matriz elétrica resultam diretamente das altas perdas de energia no processo de produção do hidrogênio. Na primeira etapa desse processo, a produção de hidrogênio por eletrólise tem eficiência energética de 70% (Prussi et al., 2020). Isso corresponde a uma perda de energia de 0,43 MJ por MJ de hidrogênio. Com mais 0,25 MJ por MJ de hidrogênio referente à compressão do hidrogênio (Prussi et al., 2020), as perdas de energia totalizam 0,69 MJ por MJ de hidrogênio. O modelo FCEV no segmento de SUVs compactos, por exemplo, tem um consumo de energia de 128 MJ (1,07 kg) de hidrogênio por 100 km. Somando-se as perdas de energia durante a produção e compressão do hidrogênio, a demanda energética aumenta para 216 MJ por 100 km. Esse valor é três vezes maior que os 70 MJ de eletricidade por 100 km consumidos por um BEV do segmento de SUVs compactos. Ao usar a mesma matriz elétrica como fonte de energia, as emissões de GEE da produção de hidrogênio para os FCEVs do segmento de SUVs compactos são, portanto, cerca de três vezes maiores do que ao usar a eletricidade diretamente nos BEVs. Para a matriz elétrica média de 2023-2044, as emissões correspondentes à produção de hidrogênio são de 50 g CO_{2eq.}/km e, para uso direto em BEVs, são de 17 g CO_{2eq.}/km. O uso exclusivo de eletricidade renovável adicional corresponde a 14 g CO_{2eq.}/km para FCEVs e 5 g CO_{2eq.}/km para BEVs.

RESUMO E CONCLUSÕES

Este estudo avaliou quais tipos de motorização e opções de combustível permitem que a frota brasileira de carros de passeio se alinhe às metas governamentais de reduzir em 50% as emissões de GEE em comparação com 2005 até 2030 e de atingir neutralidade climática até 2050. Os resultados da análise mostram que, para os veículos comercializados em 2023, os BEVs têm as menores emissões do ciclo de vida entre todos os tipos de motorização. Para veículos nos segmentos de SUVs compactos, médios e compactos, os atuais BEVs apresentam emissões de ciclo de vida 65% a 67% menores que as dos ICEVs flex usando as médias de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado. O potencial de mitigação dos HEVs e PHEVs, por outro lado, é limitado. Os HEVs apresentam emissões de GEE do ciclo de vida 14% menores que as dos ICEVs flex, mas somente quando operam com o mesmo consumo médio de gasolina C e etanol hidratado. Os PHEVs, cujos modelos atualmente disponíveis no Brasil usam gasolina C, têm cerca de 3% menos emissões que os ICEVs flex comparáveis. Os FCEVs a hidrogênio apresentam um amplo potencial de redução de emissões a depender de como o hidrogênio é produzido. Somente ao operar com hidrogênio verde, obtido com eletricidade renovável, eles têm emissões de GEE semelhantes às dos BEVs movidos a eletricidade.

A comparação das emissões de GEE do ciclo de vida das diferentes opções de motorização no Brasil mostra as mesmas tendências observadas na China, na Europa, na Índia, na Indonésia e nos Estados Unidos (Bieker, 2021; Mera & Bieker, 2023). As características e o uso dos veículos, bem como a matriz elétrica e de combustível, podem diferir bastante entre essas regiões. Em particular, os ICEVs flex operando com alta proporção de etanol no Brasil apresentam emissões mais baixas que a dos ICEVs movidos a gasolina comparáveis em outras regiões. Ainda assim, em todas as regiões, os BEVs apresentam as menores emissões de GEE do ciclo de vida entre todos os tipos de motorização disponíveis. Esse benefício aumentará com a descarbonização contínua projetada para a matriz elétrica brasileira.

BEVs

O grande potencial de mitigação de emissões de GEE dos BEVs é favorecido pela alta participação de energias renováveis na rede elétrica brasileira, bem como pela maior eficiência energética dessa tecnologia de motorização. De fato, o consumo de energia dos BEVs nos segmentos de médios, compactos e SUVs compactos é três vezes menor que o dos ICEVs flex correspondentes. Quando comparados a ICEVs abastecidos com a média de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado, os BEVs comercializados em 2023 reduzem as emissões em 65% a 67%. Ainda que fosse necessária uma substituição de bateria durante a vida útil de um BEV (o que não costuma acontecer com as tecnologias de bateria atuais), suas emissões de GEE do ciclo de vida ainda seriam 57% a 60% menores que as dos ICEVs flex. Para os veículos projetados para 2030, as emissões são de 68% a 70% menores, mesmo diante da suposição otimista de que os futuros ICEVs consumirão 11% menos combustível que os modelos de 2023. Quando comparados aos ICEVs que usam apenas etanol hidratado, as emissões do ciclo de vida dos BEVs são 49% a 53% menores para os veículos de 2023 e 54% a 57% menores para os de 2030. Em comparação com os ICEVs movidos exclusivamente a gasolina C, as emissões do ciclo de vida dos BEVs são 70% a 73% menores para veículos de 2023 e 73% a 75% menores para os de 2030. Assim, a eletrificação da frota de carros de passeio tem um potencial de redução de emissões de GEE muito maior que o da expansão do uso do etanol. Em paralelo com a descarbonização total do setor energético, os BEVs permitem que o Brasil atinja a neutralidade climática até 2050.

ICEVs movidos a etanol

Os carros flex representam a maior parte das vendas e da frota de veículos de passageiros no Brasil. Para esses veículos, as emissões de GEE do ciclo de vida variam muito conforme a operação ocorra somente com gasolina C, somente com etanol hidratado ou com uma mistura dos dois combustíveis. Para os ICEVs de 2023 e 2030, operar exclusivamente com etanol gera emissões de ciclo de vida 29% a 31% menores que a operação com as médias de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado. Abastecer os mesmos veículos somente com gasolina C, por outro lado, gera emissões 20% a 22% mais altas que com o consumo médio.

Embora esses resultados reflitam que o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar tenha maiores benefícios em termos de emissões de GEE que o uso de gasolina fóssil, outros fatores colocam em dúvida a aposta nos motores flex como a principal via de mitigação de emissões de GEE para carros de passeio no Brasil. Apesar da disponibilidade do etanol hidratado em todo o país, os consumidores brasileiros ainda optam predominantemente pela gasolina para abastecer seus carros. O consumo de gasolina C foi quase duas vezes maior que o de etanol hidratado em 2020. Projeta-se um aumento na participação do consumo de etanol hidratado em comparação com a gasolina C de 35% em volume em 2020 para 55% em volume em 2050 (EPE, 2022b). Assim, meramente focar os ICEVs flex pode não levar a um aumento significativo no uso de etanol hidratado. As medidas políticas para aumentar o consumo de etanol, como o aumento da mistura obrigatória de etanol anidro na gasolina C, podem trazer riscos ambientais e outros riscos relacionados ao aumento necessário da produção. Em particular, expandir a produção de etanol à base de milho pode causar impactos ambientais adversos, como o desmatamento. De qualquer forma, mesmo que grande parte da frota de veículos operasse exclusivamente com etanol hidratado, as emissões de GEE associadas seriam mais que o dobro das emissões dos BEVs operando com a matriz elétrica média.

Potenciais aprimoramentos na economia de combustível dos ICEVs flex podem resultar em uma redução significativa das emissões de GEE do ciclo de vida no curto prazo. Se o consumo de combustível dos ICEVs flex em 2030 for 11% menor que o dos modelos comercializados em 2023, as emissões de GEE do ciclo de vida com o consumo médio de etanol e gasolina C seriam 12% menores que as dos veículos atuais. No entanto, esse nível de redução não é suficiente para alinhar a frota de carros de passeio às metas governamentais de redução de emissões de GEE.

Híbridos e híbridos *plug-in*

Os híbridos e os híbridos *plug-in* têm um potencial de mitigação limitado em comparação com os ICEVs flex atuais. Os atuais HEVs do segmento de médios apresentam emissões de GEE do ciclo de vida 14% mais baixas que as dos ICEVs flex comparáveis no Brasil, mas somente quando consomem a mesma proporção de mercado de gasolina C e etanol hidratado. Ao usar somente etanol, o benefício dos HEVs, em termos de emissão, em comparação com os ICEVs diminui de 14% para 10%. As emissões do ciclo de vida de HEVs operando exclusivamente com gasolina C, o que é o caso de muitos dos modelos atuais, são 2% mais altas que as dos ICEVs flex usando as médias de mercado do consumo de gasolina C e etanol hidratado.

As emissões de GEE do ciclo de vida dos PHEVs atuais no segmento de médios são cerca de 3% menores que as dos ICEVs flex comparáveis. Mesmo considerando como premissa uma parcela de 50% de operação elétrica em condições reais, o que reduz significativamente o consumo de combustível, os modelos atuais de PHEVs só funcionam com gasolina C, que tem uma intensidade de carbono mais alta que a do consumo médio de gasolina C e etanol hidratado considerado para os ICEVs flex. Futuros modelos hipotéticos de PHEVs usando o consumo médio de gasolina C e

etanol hidratado, considerando uma participação maior de 55% de operação elétrica, gerariam 17% menos emissões de ciclo de vida que os futuros ICEVs flex.

Aprimorar a economia de combustível dos futuros HEVs e PHEVs resulta em reduções comparativamente pequenas nas emissões de GEE do ciclo de vida. Isso não é suficiente para que o setor de transportes se alinhe às metas brasileiras de redução de emissões.

FCEVs a hidrogênio

Os FCEVs a hidrogênio apresentam emissão variável a depender de como o hidrogênio é produzido. As emissões do ciclo de vida de um FCEV do segmento de SUVs compactos operando com hidrogênio de gás natural (cinza) são apenas 14% menores que as de ICEVs flex comparáveis. Quando operam com hidrogênio verde, produzido a partir de eletricidade renovável, eles apresentam emissões 66% menores que as dos ICEVs. O uso de hidrogênio produzido a partir da matriz elétrica nacional resulta em 46% menos emissões de GEE do ciclo de vida em comparação com ICEVs. Incluindo as perdas de energia durante a produção (por eletrólise) e a compressão do hidrogênio, o consumo de energia de um FCEV é cerca de três vezes maior que o de um BEV. Por isso, as emissões de GEE dos FCEVs que operam com hidrogênio obtido com eletricidade são sempre maiores que as dos BEVs que usam a mesma matriz elétrica. Cabe observar que as emissões da produção de tanques de hidrogênio para FCEVs são semelhantes às da produção de baterias para BEVs.

Os FCEVs que rodam exclusivamente com hidrogênio verde podem levar a maiores reduções de emissões de GEE no ciclo de vida em comparação com os veículos flex atuais. Em teoria, eles também são uma via para alinhar a frota brasileira de carros de passeio com as metas climáticas governamentais. Dado o consumo de energia três vezes maior que o dos BEVs, no entanto, os custos do hidrogênio são uma barreira à adoção em massa dos FCEVs.

Segmentos de veículos maiores geram mais emissões de ciclo de vida

Ao comparar veículos do mesmo tipo de motorização de diferentes segmentos, esta análise mostrou que veículos maiores no segmento de SUVs compactos têm emissões de ciclo de vida 7% a 15% superiores às dos carros compactos e médios. No entanto, os SUVs compactos elétricos ainda têm emissões totais 44% abaixo dos ICEVs flex compactos e médios abastecidos apenas com etanol.

Este estudo conclui que os BEVs apresentam grande vantagem, em termos de emissões de GEE, sobre os veículos flex movidos a gasolina C e etanol quando se consideram as emissões da produção tanto de veículos e baterias como de combustível e eletricidade. Os ICEVs flex oferecem um potencial limitado de redução de emissões de GEE, mesmo com projeções de melhoria na economia de combustível e aumento da participação do etanol. Da mesma forma, os HEVs e PHEVs têm potencial limitado de redução de emissões de GEE. Os FCEVs podem se aproximar das baixas emissões de GEE dos BEVs, mas somente quando abastecidos exclusivamente por hidrogênio verde e ao custo de usar três vezes mais energia elétrica que os BEVs. Apoiar a adoção de BEVs é, portanto, a maneira mais eficiente de reduzir o impacto climático da frota de carros de passeio no Brasil. O alinhamento do setor de transportes com a meta de atingir a neutralidade de carbono até 2050 exige uma transição para veículos elétricos.

RECOMENDAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS

As ações para descarbonizar a frota de carros de passeio são cruciais para alcançar as metas ambientais do Brasil. Os resultados apresentados neste estudo indicam que uma transição para BEVs permite que a frota brasileira de carros de passeio se aproxime da neutralidade climática até 2050, o que não é possível com ICEVs, HEVs e PHEVs flex. Os FCEVs podem oferecer reduções de emissões de GEE semelhantes às dos BEVs, mas somente quando usam exclusivamente hidrogênio obtido com eletricidade renovável e ao custo de gastar três vezes mais energia elétrica que os BEVs.

Com base nesses resultados, sugere-se considerar as seguintes recomendações de políticas públicas:

A definição das novas metas do Programa Mobilidade Verde e Inovação (PROMOVI), em termos de emissões de CO₂ em vez de consumo de energia, precisa estar baseada nos fatores de emissão das médias de mercado do consumo de etanol e gasolina C para manter a eficácia do programa. O programa deve definir novas metas médias corporativas que possam ser alcançadas plenamente por meio de melhorias na eficiência energética, incluindo uma transição para BEVs e FCEVs.

As metas do PROMOVI serão definidas em termos de emissões de CO₂ em vez de consumo de energia. Essa mudança cria incertezas com relação a como as emissões são determinadas, especialmente para os ICEVs flex. Conforme apresentado neste estudo, o impacto climático dos ICEVs flex depende se sua operação ocorre somente com etanol hidratado, somente com gasolina C ou com uma mistura desses combustíveis. Para representar melhor o consumo de combustível e as emissões relacionadas, as participações médias de mercado do etanol e da gasolina C devem ser consideradas para os valores de emissão de CO₂ dos ICEVs flex. Eventuais aumentos na participação de mercado do etanol não devem substituir melhorias na eficiência energética dos veículos.

Para atingir as metas climáticas no setor de transportes, o PROMOVI pode determinar metas corporativas que favoreçam uma transição para BEVs ou FCEVs.

O aumento das vendas de BEVs ou FCEVs no curto prazo acelerará a descarbonização da frota brasileira de carros de passeio. Devido à longa vida útil dos carros na frota nacional, atrasos na introdução dos BEVs podem resultar na necessidade de políticas mais ambiciosas em um futuro próximo. Para concretizar o potencial de reduzir as emissões de GEE dos FCEVs, deve-se assegurar o uso de hidrogênio obtido a partir de eletricidade renovável no setor de transportes.

Os incentivos à produção de BEVs no Brasil combinariam seus benefícios ambientais com a competitividade econômica.

Não produzir BEVs coloca a indústria automotiva brasileira em risco de perder competitividade nos mercados internacionais. A produção exclusiva de ICEVs pode resultar na redução das exportações de veículos e no aumento das importações de BEVs. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, que os fabricantes podem optar por fazer para obter os benefícios do atual Rota2030, podem ser direcionados a BEVs e FCEVs. Isso incentivaria a produção nacional desses veículos. Usufruindo da geração elétrica limpa, as baterias fabricadas no Brasil fortaleceriam ainda mais o benefício dos BEVs em termos de emissões no ciclo de vida.

Apoiar os consumidores brasileiros na adoção de veículos elétricos. Atualmente, os consumidores pagam mais pela compra de BEVs do que por veículos ICEVs comparáveis, embora se espere que os custos dos futuros BEVs diminuam. No curto prazo, essa lacuna de custo poderia ser mitigada direcionando aos BEVs incentivos existentes à compra de veículos. Aos preços atuais, nenhum modelo BEV

foi elegível ao recente programa de incentivos à compra de veículos.⁵ O impacto ambiental desse programa de incentivo poderia crescer com o aumento do limite de preço de compra dos BEVs, dado o grande benefício desses veículos em termos de emissões de GEE. Ao mesmo tempo, os incentivos para HEVs e PHEVs no PROMOTIV poderiam ser diminuídos, pois esses veículos têm potenciais limitados de redução de emissões de GEE. Para equilibrar os possíveis gastos públicos com incentivos aos BEVs, o governo poderia introduzir um programa de desconto de taxa (*feebate*), no qual esses incentivos são compensados por uma tributação mais alta das vendas de veículos novos altamente poluentes. Esse tipo de programa foi introduzido com sucesso na França e em outros países (Wappelhorst, 2022). Os governos regionais e municipais também poderiam introduzir benefícios não financeiros aos BEVs, como zonas de emissão zero ou baixa nas cidades, privilégios de acesso a estradas e vagas de estacionamento exclusivas. Além de desenvolver uma estratégia nacional de infraestrutura de recarga, as tarifas preferenciais de eletricidade e os incentivos fiscais poderiam estimular o investimento em infraestrutura de recarga.

Incentivar o uso de etanol em substituição à gasolina fóssil na frota existente de veículos flex e incluir as emissões ILUC no programa RenovaBio para melhorar a sustentabilidade do etanol. A substituição da gasolina pelo etanol à base de cana-de-açúcar reduz significativamente as emissões veiculares de GEE no ciclo de vida. Portanto, embora se deva priorizar a comercialização de BEVs como veículos novos, aumentar a participação do etanol no mercado em comparação com a gasolina fóssil permanece uma ferramenta relevante para reduzir as emissões da frota atual de veículos flex no curto prazo. No entanto, qualquer aumento na produção de etanol deve ser acompanhado de políticas que garantam que tal expansão não aumentará a intensidade média de carbono do etanol. A introdução de emissões ILUC no programa RenovaBio proporcionaria um incentivo maior à produção de biocombustíveis de segunda geração, bem como estimularia uma produção mais eficiente nas instalações existentes de etanol de primeira geração.

5 O programa de incentivo à compra de veículos foi lançado em junho de 2023 pela Medida Provisória nº 1.175 (Presidência da República, 2023) e ofereceu incentivos financeiros à aquisição de carros de passeio. Os descontos variaram de R\$ 2 mil a R\$ 8 mil e foram aplicados a veículos novos com preços de mercado de até R\$ 120 mil. Esses descontos foram definidos com base em quatro critérios: i) preço (preços mais baixos têm desconto maior); ii) eficiência energética (maior desconto para maior eficiência energética); iii) conteúdo nacional (desconto maior para veículos com mais conteúdo nacional); e iv) combustível (desconto maior para veículos flex que para veículos exclusivamente a gasolina). Todos os modelos de BEVs disponíveis no Brasil são mais caros do que o limite de incentivo, por isso esses veículos não se beneficiaram do programa.

REFERÊNCIAS

- ADK Automotive. (2021). *Brazil's light-duty vehicle registration database, 2010-2020* [banco de dados].
- Agora Verkehrswende. (2019). *Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen*. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeugen/82_Klimabilanz_E-Autos_alt-Antriebe-V2.pdf
- Argonne National Laboratory. (2020). *The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model (GREET) (Version 2020)*. <https://greet.es.anl.gov/index.php>
- Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. (2023). *Yearbooks*. <https://anfavea.com.br/site/yearbooks/?lang=en>
- Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publications/global-LCA-passenger-cars-jul2021>
- California Air Resources Board. (2015). *Detailed analysis for indirect land use change*. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-land-use-change-assessment>
- Chu, Y., & Cui, H. (2023). *Annual update on the global transition to electric vehicles: 2022*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/global-transition-electric-vehicles-update-jun23/>
- Council of the European Union. (2015). Council Directive (EU) 2015/652 of 20 April 2015 laying down calculation methods and reporting requirements pursuant to Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council relating to the quality of petrol and diesel fuels. *Official Journal of the European Union*, L107. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0652&from=DE>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022a). *Balanco Energético Nacional 2021*. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2022b). *Descarbonização do setor de transporte rodoviário: intensidade de carbono das fontes de energia*. (Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2022/03). 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
- Empresa de Pesquisa Energética. (2023). *Balanco Energético Nacional Interativo*. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-interativo>
- EV-volumes. (2023). *EV Data Center*. <https://www.ev-volumes.com/datacenter/>
- Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. (2019). *Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw*. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2019/klimabilanz-kosten-potenziale-antriebe-pkw-lkw.pdf>
- Governo do Brasil. (2022). *Nationally Determined Contribution*. <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>
- Harlow, J. E., Ma, X., Li, J., Logan, E., Liu, Y., Zhang, N., Ma, L., Glazier, S. L., Cormier, M. M. E., Genovese, M., Buteau, S., Cameron, A., Stark, J. E., & Dahn, J. R. (2019). A wide range of testing results on an excellent lithium-ion cell chemistry to be used as benchmarks for new battery technologies. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(13), A3031. <https://doi.org/10.1149/2.0981913jes>
- Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Helms, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Abdalla, N., Jöhrens, J., Cotton, E., German, L., Harris, A., Haye, S., Sim, C., & Bauen, A. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA*. Ricardo-AEA, ifeu, E4tech. <https://data.europa.eu/doi/10.2834/91418>
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. (2023). *Decreto n. 169, de 3 de maio de 2023. Aprova os requisitos de avaliação da conformidade para veículos leves de passageiros e comerciais leves*. http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=3000
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- International Civil Aviation Organization. (2022). *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20June%202022.pdf
- International Energy Agency. (2022a). *Global EV Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>

- International Energy Agency. (2022b). *Global Hydrogen Review 2022*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- International Energy Agency. (2022c). *World Energy Outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- Isenstadt, A., Yang, Z., Searle, S., & German, J. (2022). *Real world usage of plug-in hybrid vehicles in the United States*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/real-world-phev-us-dec22/>
- Marlins, C., Searle, S., & Baral, A. (2014). *A guide for the perplexed to the indirect effects biofuels production*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/a-guide-for-the-perplexed-to-the-indirect-effects-of-biofuels-production/>
- Mera, Z., & Bieker, G. (2023). *Comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars and two-wheelers in Indonesia*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/comparison-life-cycle-ghg-emissions-combustion-engine-and-electric-pv-and-2w-indonesia-sept23/>
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. (2020). *Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - relatórios de referência. Categoria Transporte Rodoviário*. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>
- Ministério do Meio Ambiente. (2014). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: ano-base 2012*. https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf
- Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética. (2020). *Plano Nacional de Energia 2050*. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf#search=Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202050>
- Moomaw, W., Burgherr, P., Heath, G., Lenzen, M., Nyboer, J., & Verbrugge, A. (2011). Annex II: Methodology. In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/Annex-II-Methodology-1.pdf>
- Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles. (2023). *2022 Production statistics*. <https://www.oica.net/category/production-statistics/2022-statistics/>
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2(12), Article 12. <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- Plötz, P., Link, S., Ringelschwendner, H., Keller, M., Moll, C., Bieker, G., Dornoff, J., & Mock, P. (2022). *Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe: a 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/real-world-phev-use-jun22/>
- Presidência da República. (2012). *Decreto n. 7.819, de 3 de outubro de 2012. Regulamenta os arts. 40 a 44 da Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012, que dispõe sobre o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO, e os arts. 5º e 6º da Lei nº 12.546, de 14 de dezembro de 2011, que dispõe sobre redução do Imposto sobre Produtos Industrializados, na hipótese que especifica*. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/decreto/d7819.htm
- Presidência da República. (2018). *Decreto n. 9.557, de 8 de novembro de 2018. Regulamenta a Medida Provisória n. 843, de 5 de julho de 2018, que estabelece requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no País, institui o Programa Rota 2030—Mobilidade e Logística e dispõe sobre o regime tributário de autopeças não produzidas*. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/D9557.htm
- Presidência da República. (2023). *Medida Provisória n. 1.175, de 5 de junho de 2023. Dispõe sobre mecanismo de desconto patrocinado na aquisição de veículos sustentáveis*. <https://in.gov.br/en/web/dou/-/medida-provisoria-n-1.175-de-5-de-junho-de-2023-488176081>
- Prussi, M., Yugo, M., Prada, L. D., Padella, M., Edwards, R., & Lonza, L. (2020). *JEC well-to-tank report v5*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/959137>
- Tankou, A., Bieker, G., & Hall, D. (2023). *Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23/>
- União da Indústria de Cana-de-Açúcar. (2023). *Observatório da Cana e Bioenergia*. <https://unicadata.com.br/>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2010). *40 CFR Part 80. Regulation of fuels and fuel additives: changes to Renewable Fuel Standard Program*. <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2010-03-26/pdf/2010-3851.pdf>

- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *EPA test procedures for electric vehicles and plug-in hybrids*. <https://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/EPA%20test%20procedure%20for%20EVs-PHEVs-11-14-2017.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency & U.S. Department of Energy. (2022). *Fuel economy*. <https://www.fueleconomy.gov/>
- Valin, H., Peters, D., van der Berg, M., Frank, S., Havlik, D., Forsell, N., & Hamelinck, C. (2015). *The land use change impact of biofuels consumed in the EU: quantification of area and greenhouse gas impacts*. Ecofys, IIASA and E4tech report for the European Commission. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2016-03/Final%2520Report_GLOBIOM_publication_0.pdf
- Wappelhorst, S. (2022, June 8). *Incentivizing zero- and low-emission vehicles: the magic of feebate programs* [Post de blog]. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/magic-of-feebate-programs-jun22/>
- World Resources Institute. (2023). *4 charts explain greenhouse gas emissions by countries and sectors*. <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

APÊNDICE

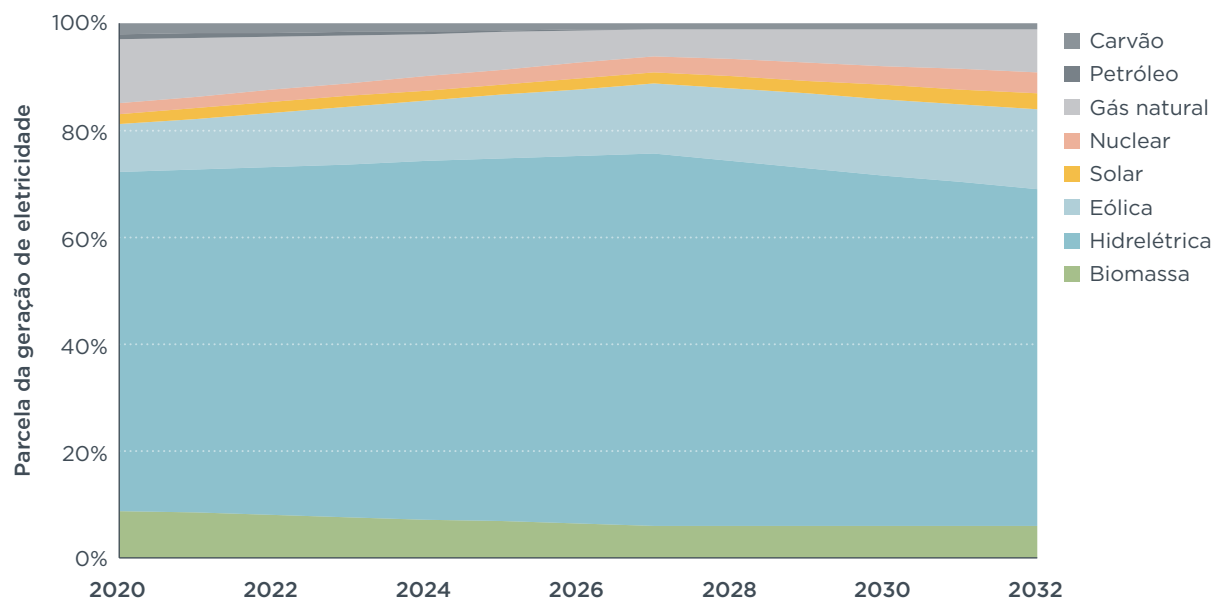
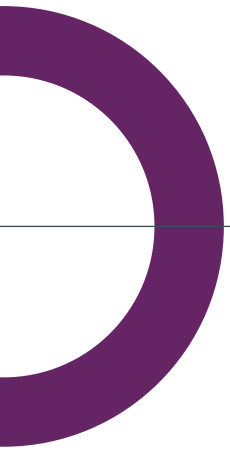


Figura A1. Participação projetada das tecnologias para a geração de eletricidade no Brasil, de acordo com a EPE (2022b).

Tabela A1. Emissões de GEE no ciclo de vida das tecnologias de geração de eletricidade.

Tipo	Tecnologia de geração de eletricidade	Emissões de GEE no ciclo de vida (g CO ₂ eq./kWh)
Não renovável	Carvão	820
	Petróleo	1.061
	Gás natural	490
	Energia nuclear	12
Renovável	Biomassa	58
	Solar	41
	Eólica	11
	Energia hidrelétrica	24

Fonte: EPE (2022b)



www.theicct.org

communications@theicct.org

[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)