

Tecnologias de propulsão e emissões de CO₂e: Comparação de veículos elétricos e híbridos no Brasil

Guido Haytzmann, André Cieplinski

RESUMO

Este trabalho estima as emissões de dióxido de carbono (CO₂) equivalente (também conhecido como CO₂e) no ciclo do poço à roda dos modelos de veículos híbridos e elétricos no Brasil, abrangendo híbridos convencionais (HEV), *plug-in* (PHEV) e suaves (MHEV), assim como dos elétricos a baterias (BEV). Considerando modelos vendidos entre janeiro de 2023 e abril de 2024, estimamos que, em média, os HEV flex e a gasolina tiveram emissões 23% e 7,7% menores, respectivamente, do que o carro de passeio médio vendido no Brasil. Os PHEV, todos a gasolina, apresentaram emissões 8,7% menores do que a média do mercado. No entanto, devido à grande variabilidade na autonomia elétrica, observam-se desde modelos com emissões 37% abaixo até 59% acima da média nacional. Os MHEV, por sua vez, apresentaram emissões médias entre 8% (modelos flex) e 77% (modelos a diesel) acima da média brasileira; apenas um dos 29 MHEV analisados teve emissões abaixo da média. Enquanto isso, os BEV emitem 81% a menos da média do mercado. Entre 108 modelos analisados, cinco são fabricados no país: dois HEV e três MHEV. Estima-se que os PHEV possuem o maior potencial de redução de emissões entre os híbridos, por meio de uma combinação de motorização flex, uso de etanol e aumento da autonomia elétrica, mas ainda assim teriam emissões substancialmente maiores do que os BEV.

INTRODUÇÃO

As principais montadoras de veículos leves têm aumentado suas vendas de veículos elétricos a bateria (BEV, do inglês *battery electric vehicles*) nos maiores mercados globais, em especial na China e Europa (Fadhil and Shen, 2024). No Brasil, por outro lado, a adoção dos BEV tem sido mais modesta, à medida que os veículos flex continuam a dominar a frota de veículos leves. Desde o anúncio do programa Mobilidade Verde e Inovação (MOVER), aprovado pelo Congresso Nacional pela Lei Nº 14.902 (2024), 14 das principais montadoras no país anunciaram investimentos com

www.icctbrasil.org.br

comunicacao@theicct.org

linkedin.com/icct-brasil

foco particular no desenvolvimento de híbridos flex (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2024b) que, juntos, superam R\$ 100 bilhões. O programa MOVER prevê incentivos fiscais exclusivos para veículos híbridos flex até 2026.

Vários fatores podem limitar o potencial dos híbridos flex de reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂; Cieplinski, 2024c). Primeiro, não há garantia de que os consumidores escolherão etanol em vez de gasolina. Segundo, no caso dos híbridos *plug-in* (PHEV, de *plug-in hybrid electric vehicles*), o uso em condições reais do modo elétrico é, em média, substancialmente menor do que o esperado (Isenstadt et al., 2022). Terceiro, existem diferenças expressivas entre as tecnologias de propulsão dos híbridos, o que resulta em uma ampla variação de potencial para reduzir emissões.

Neste contexto, este estudo estima as emissões de CO₂ equivalente (CO₂e) do poço à roda dos veículos híbridos e elétricos no Brasil. Avaliamos o impacto das diferentes tecnologias de propulsão de híbridos, do combustível utilizado (gasolina ou etanol) e dos segmentos nos quais os veículos de cada tecnologia são ofertados. Em seguida, avaliamos o potencial de redução de emissões de cada tecnologia de propulsão em função da proporção do uso de etanol nos motores flex, do aumento da autonomia elétrica dos PHEVs e do uso de energia 100% renovável para PHEVs e BEVs.

Nos concentramos em emissões do poço à roda para alinhar com as próximas metas do programa MOVER. Não são incluídas as emissões provenientes da manufatura dos veículos, das baterias e as associadas à manutenção; uma análise incluindo as emissões de manufatura e de manutenção está disponível em Mera et al. (2023).

METODOLOGIA

TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO DE HÍBRIDOS

Este estudo analisa três tecnologias de propulsão de veículos híbridos:

- » Híbridos suaves (MHEV, de *mild hybrid electric vehicles*) possuem baterias capazes apenas de gerenciar *idle-stop* e auxiliar no arranque do veículo. Estes sistemas também possuem um alternador-motor de partida acionado por correia que pode recuperar energia durante a frenagem do veículo, o que é conhecido como frenagem regenerativa.
- » Híbridos convencionais (HEV, de *hybrid electric vehicles*) possuem motores elétricos integrados aos motores a combustão e à transmissão. Apresentam um motor elétrico mais robusto que o dos MHEVs, capazes de tracionar apenas no modo elétrico por maiores distâncias; tal qual os MHEVs, não possuem fonte de carregamento externo e as baterias são carregadas durante a frenagem do carro.
- » Híbridos *plug-in* (PHEV) possuem os motores elétricos mais robustos entre os híbridos, com autonomia para operar em modo elétrico de maneira independente do motor a combustão. O carregamento da bateria é feito através de fonte externa, além de carregar durante a frenagem, como as outras categorias.

CÁLCULO DAS EMISSÕES

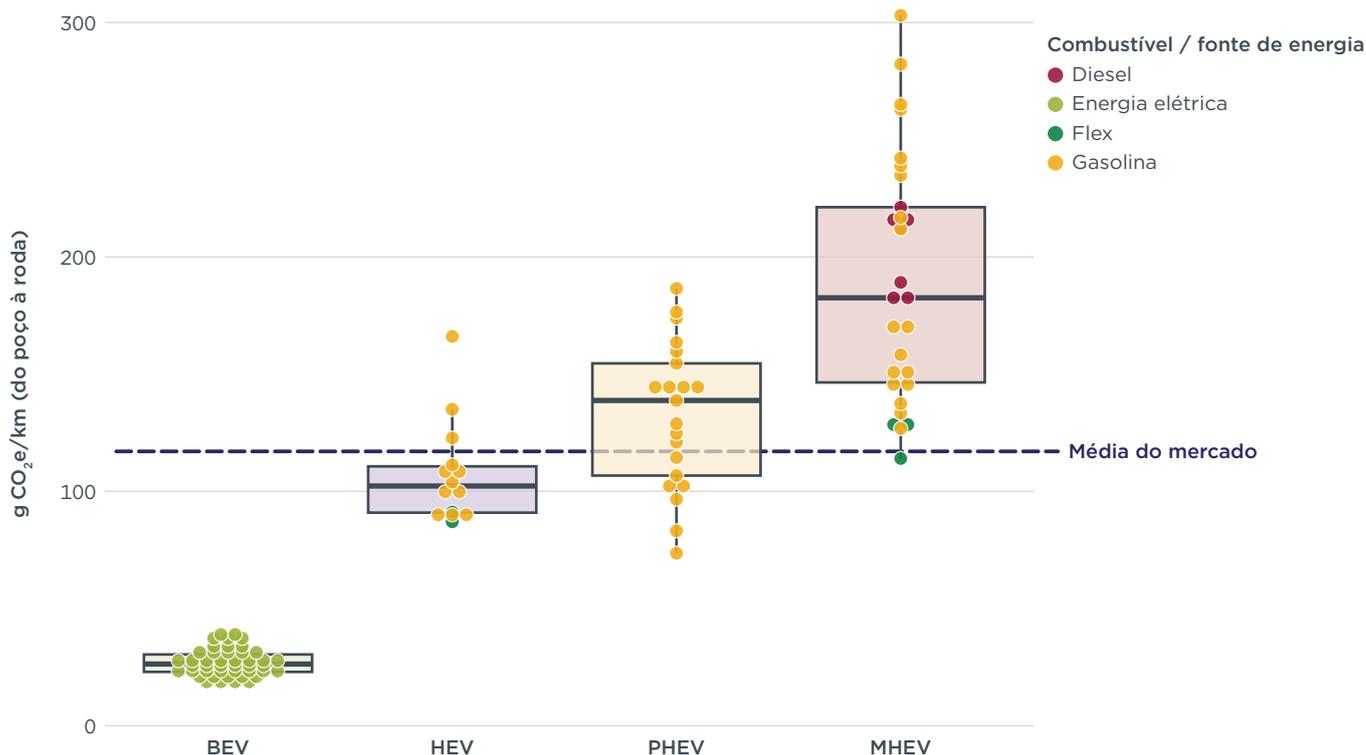
Calculamos emissões do poço à roda, que incluem as emissões de gases do efeito estufa (GEE) que se originam na fase de extração de recursos naturais, na produção e distribuição das fontes energéticas (combustíveis) e no seu uso na combustão. Os dois principais fatores considerados para calcular as emissões de CO₂e do poço à roda dos veículos são o consumo energético (MJ/km) de cada modelo, medido em condições padrão de laboratório, e os fatores de emissão de CO₂ equivalente do poço à roda de cada combustível (g CO₂e/km).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) contém os dados de eficiência energética e autonomia em modo elétrico dos modelos (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia [INMETRO], 2023, 2024). O consumo energético dos PHEV nos modos de condução a combustão e elétrico são distintos e precisam ser calculados separadamente. Eles podem ser obtidos através do PBEV, retirando os ajustes para condições reais de uso (em km/L e km/L_e) conforme as equações apresentadas na Portaria N° 169/2023 (2023). Utilizamos dados de vendas de cada modelo no período analisado, de janeiro de 2023 até abril de 2024, fornecidos pelo JATO Dynamics (2024). Estes dados são necessários para calcular valores médios de mercado, como massa, preço e emissão, ponderados pela quantidade de automóveis vendidos.

Os fatores de emissão para Gasolina C (E27) e etanol hidratado (E100) são os mesmos de Mera et al. (2023). O fator de emissão para a eletricidade foi obtido em Rebouças e Cieplinski (2024), e o fator de emissão do diesel é igual ao utilizado em Cieplinski et al. (2024). Os valores estão dispostos na Tabela A.1, no apêndice. Caso o veículo seja flex, é necessário levar em conta a proporção média do uso do etanol hidratado, que no Brasil foi de cerca de 28% em 2023 (EPE, 2024a). Por fim, no caso dos PHEV, temos que considerar o tempo que o veículo é conduzido em modo elétrico, que depende da autonomia da bateria e de uma curva ajustada para o uso real (Isenstadt et al., 2022). Os resultados apresentados a seguir comparam as emissões dos veículos híbridos e elétricos com a média de todos os novos carros de passeio vendidos no país, incluindo veículos a combustão interna (ICEV, de *internal combustion engine vehicles*).

EMISSÕES POR TECNOLOGIA E MODELO

A Figura 1 apresenta a distribuição das emissões de CO₂e dos modelos elétricos e híbridos vendidos no Brasil entre janeiro de 2023 e abril de 2024. Esses dados abrangem 44 BEV, 21 PHEV, 14 HEV e 29 MHEV. A linha no meio de cada retângulo representa a mediana das emissões de cada tecnologia de propulsão, enquanto as partes inferiores e superiores dos retângulos indicam as emissões do primeiro e terceiro quartis, respectivamente. Cada observação utilizada para calcular os *box plots* corresponde a um modelo, sem ponderação por vendas. Os círculos sobrepostos indicam o nível de emissões do poço à roda dos modelos, com cores representando o combustível ou fonte de energia utilizadas por cada veículo. A linha horizontal tracejada azul representa a média de emissões de CO₂e do poço à roda de todos os novos carros de passeio vendidos no mesmo período no Brasil (117 g CO₂e/km). Esta média inclui os ICEV e é ponderada pelo número de vendas de cada modelo.

Figura 1**Emissões de CO₂e dos MHEV, HEV, PHEV e BEV**

CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICCT.ORG](https://www.theicct.org)

Os resultados apresentados na Figura 1 indicam uma grande dispersão nas emissões de CO₂e dentro de uma única tecnologia de propulsão. As diferenças são tão marcantes que os modelos com as maiores emissões chegam a liberar mais do que o dobro de CO₂e em comparação com os modelos mais eficientes da mesma categoria. As emissões dos BEV variam entre 18 e 39 g CO₂e/km, dos HEV entre 87 e 166 g CO₂e/km, dos PHEV entre 74 e 186 g CO₂e/km e dos MHEV entre 114 e 303 g CO₂e/km. Estes resultados evidenciam que outros fatores, além da tecnologia de propulsão, são determinantes nas emissões de CO₂e dos automóveis. Além disso, a maior parte dos híbridos emitem mais que as emissões de CO₂e médias do mercado nacional, majoritariamente composto de ICEV flex. Nota-se que mesmo o híbrido mais eficiente emite 73,6 g CO₂e/km, 3,3 vezes acima da média dos elétricos (22 g CO₂e/km).

A Figura 1 também evidencia como o tipo de combustível utilizado tem forte influência nas emissões. A Tabela 1, a seguir, compara as emissões médias de cada tecnologia de propulsão, por tipo de combustível. Os resultados indicam que modelos híbridos flex—que representaram 2 dos 14 modelos HEV e 3 dos 22 modelos MHEV analisados—têm, em média, as menores emissões dentro destas duas tecnologias de propulsão.

Tabela 1**Emissões médias de CO₂e do poço à roda de veículos híbridos e elétricos por tecnologia de propulsão e combustível, ponderadas pelo número de vendas de cada modelo**

Tecnologia de propulsão	Combustível / fonte de energia	Número de modelos disponíveis	Emissões médias do poço à roda (g CO ₂ e/km)	Varição em relação à média nacional (%)
HEV	Flex	2	89,6	-23,4%
HEV	Gasolina	12	108,0	-7,7%
PHEV	Gasolina-Eletricidade	21	106,8	-8,7%
MHEV	Flex	3	126,8	+8,4%
MHEV	Gasolina	19	159,5	+36,3%
MHEV	Diesel	7	207,6	+77,4%
BEV	Eletricidade	44	22,1	-81,1%
Média nacional		210*	117,0	0%

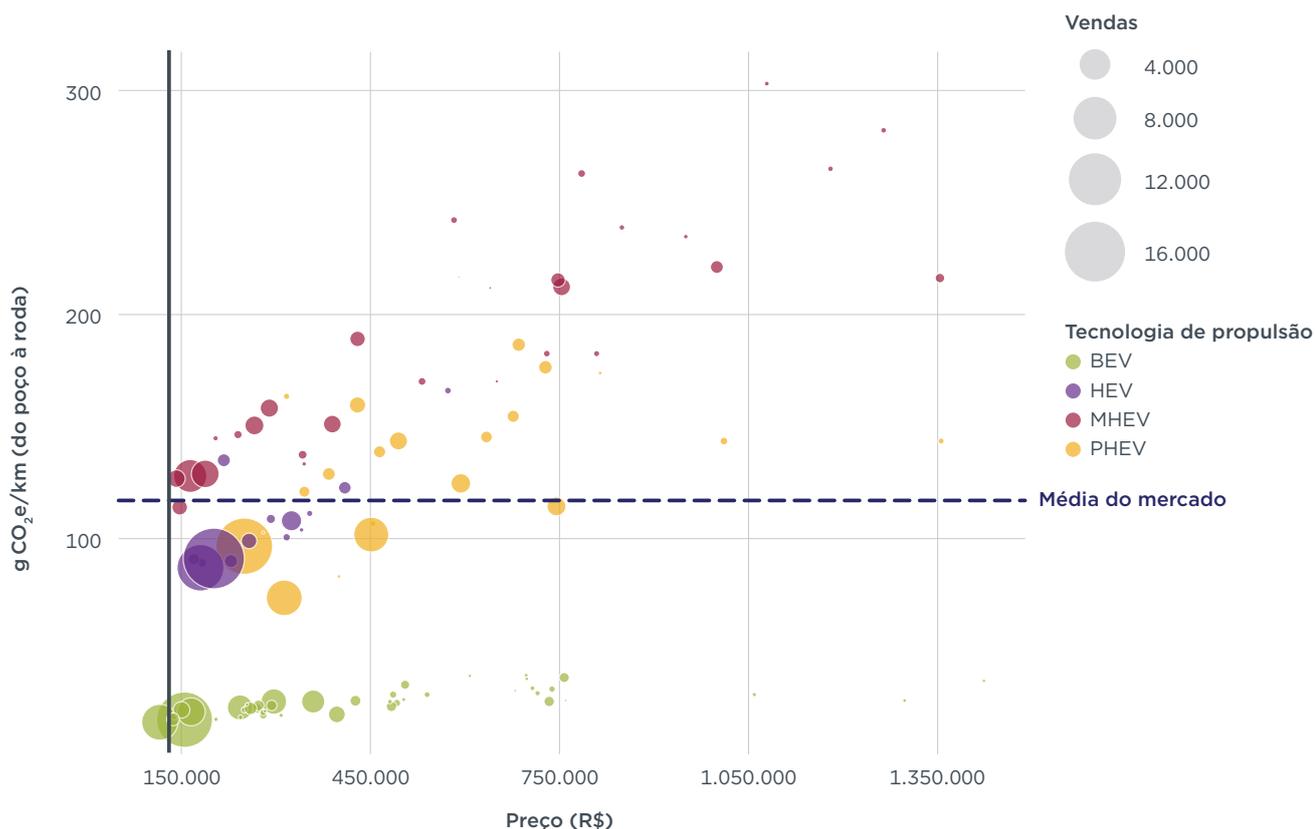
* Total de modelos disponíveis no período, incluindo também veículos a combustão.

Os HEV flex, utilizando a proporção de mercado de 28% de etanol hidratado (E100) e 72% de gasolina C (E27) de 2023 (EPE, 2024a), emitem 23% menos que a média dos carros de passeio nacionais e aproximadamente 4 vezes mais que os BEV. No entanto, apenas dois modelos flex estão disponíveis no Brasil. Por sua vez, os HEV a gasolina e os PHEV têm emissões de CO₂e 7,7% e 8,7% menores do que a média brasileira, respectivamente. O uso exclusivo de gasolina e a predominância de veículos em categorias maiores e mais pesados (discutido abaixo) limitam as reduções de emissões desses veículos. Para os PHEV, o potencial de redução também é limitado pela subutilização do modo elétrico em condições reais (Isenstadt et al., 2022); a autonomia em modo elétrico varia amplamente, de 8 km a 166 km, o que implica em um fator de utilização em modo elétrico entre 6% e 69%. As emissões dos MHEV variam de 8,4% a 77,4% acima da média nacional. Mesmo os MHEV flex apresentam níveis de emissões acima da média.

Por fim, os BEV têm emissões 81,1% menores do que a média nacional e apresentam a menor dispersão entre os modelos. Isso se deve não apenas à baixa intensidade de carbono da geração elétrica nacional, mas também à maior disponibilidade de modelos em segmentos menores e mais leves, como subcompactos, compactos e médios.

A Figura 2 mostra as emissões dos modelos elétricos e híbridos em função dos seus preços sugeridos. As tecnologias de propulsão de cada modelo são diferenciadas pelas cores, enquanto o total de vendas pelo tamanho dos círculos. A linha de referência vertical representa o preço médio, ponderado pelo número de vendas, de todos os veículos de passeio vendidos no Brasil entre janeiro de 2023 e abril de 2024 (R\$ 131.000).

Figura 2
Emissões de CO₂e dos modelos elétricos e híbridos, por preço



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO [THEICCT.ORG](https://www.theicct.org)

A Figura 2 indica que entre todos os veículos híbridos e elétricos analisados, apenas um modelo BEV tem preço menor do que o preço médio dos veículos de passeio. Os HEV apresentam variações de preço entre R\$ 169.000 e R\$ 572.000. Os MHEV e PHEV, além de apresentarem grande dispersão das emissões de CO₂e, também têm preços com variações significativas, com valores situados entre R\$ 142.000 e R\$ 1.350.000. Os PHEV, por sua vez, têm o carro de entrada com valor mais elevado, custando cerca de R\$ 250.000. As trajetórias dos preços médias por tecnologia entre 2021 e 2024 são analisadas em Cieplinski (2024a).

Observa-se uma correlação positiva entre emissões de CO₂e e os preços dos modelos de todas as tecnologias; no entanto, o ritmo de crescimento das emissões em função dos preços dos BEV é muito menor que o dos híbridos. Essa correlação entre preços e emissões está atrelada ao fato de que os veículos mais caros são majoritariamente importados e, em boa parte, esportivos. Estes são os veículos com a pior eficiência energética, além de serem abastecidos exclusivamente com gasolina ou diesel. Da mesma forma, os híbridos flex, produzidos no Brasil, apresentam as menores emissões e são os de menor custo. Consequentemente, os modelos mais vendidos tendem a ser os que emitem menos CO₂e.

Tabela 2

Número de modelos híbridos e elétricos produzidos no Brasil e importados, por tecnologia de propulsão

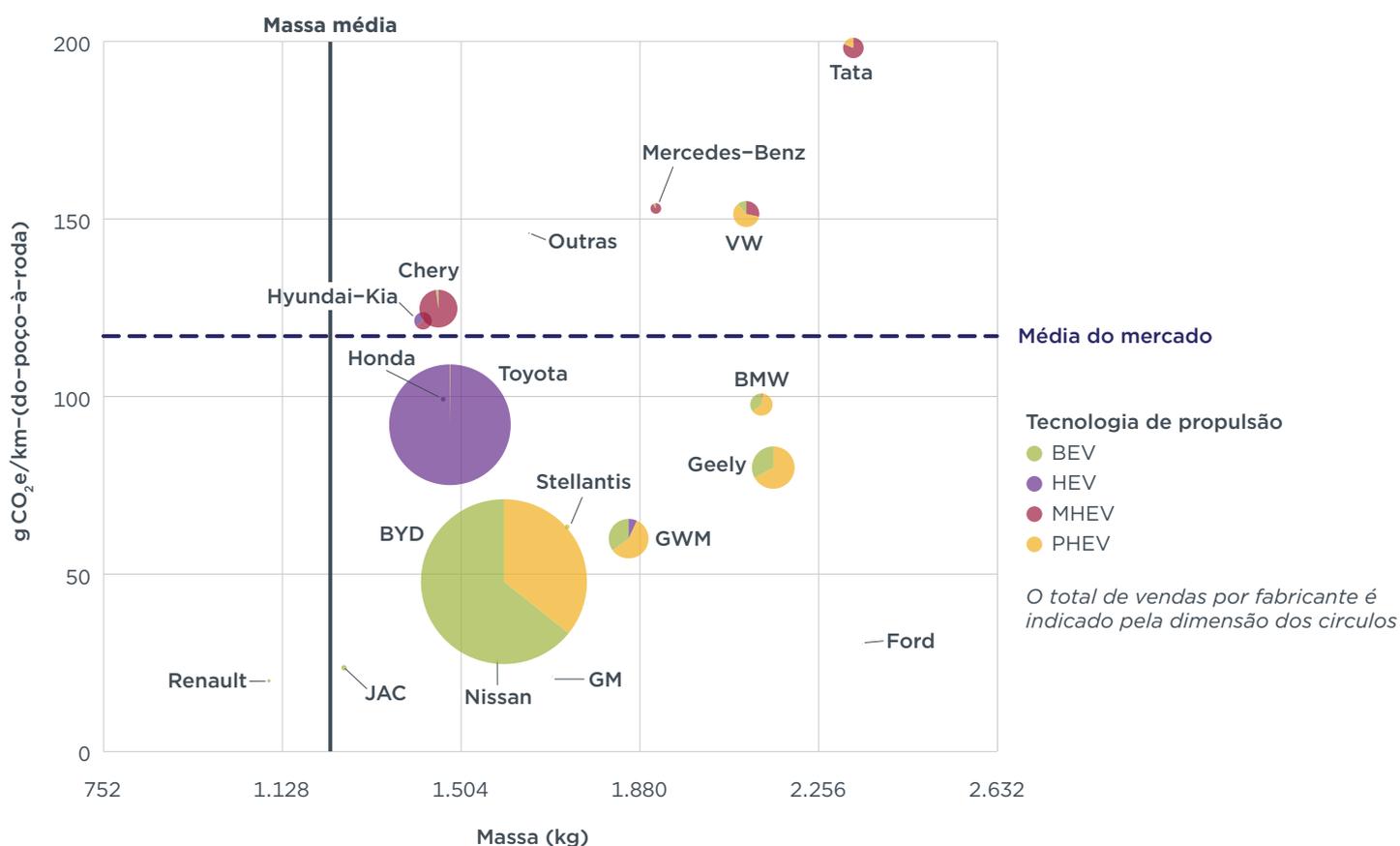
Tecnologia de propulsão	Nacionais	Importados
MHEV	3	26
HEV	2	12
PHEV	0	21
BEV	0	44
Total	5	103

EMISSIONES POR MASSA E CATEGORIA

A Figura 4 apresenta a relação entre as emissões médias de CO₂ e a massa média dos veículos de cada fabricante, considerando apenas veículos híbridos e elétricos. As médias são ponderadas pelas vendas. As vendas totais de cada fabricante, indicadas pela dimensão dos círculos, estão segmentadas por tecnologia de propulsão, em cores diferentes. A linha vertical de referência indica a massa média, em ordem de marcha (apenas carregado com o condutor), dos veículos novos vendidos no mercado nacional no período analisado (1.229 kg).

Figura 3

Emissões de CO₂ e médias entre os híbridos e elétricos por montadora e massa



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO THEICTT.ORG

Na Figura 4, nota-se que os veículos elétricos e híbridos do mercado brasileiro possuem massas consideravelmente maiores que a média nacional. Isto se deve ao peso das baterias, no caso dos BEV, e à oferta predominante de veículos híbridos em segmentos maiores, como discutido abaixo. Também pode-se observar que o nível de emissões por fabricante tende a crescer com o peso médio de seus veículos. No entanto, fabricantes como BYD, GWM e Geely, que vendem principalmente os BEV e PHEV, conseguem manter níveis de emissões substancialmente abaixo da média nacional, mesmo com a massa média elevada.

A Tabela 3 apresenta as emissões médias de GEE dos híbridos e elétricos, segmentados pelas categorias do PBEV e por tecnologia de propulsão. A tabela também lista o número de modelos disponíveis e indica a diferença percentual entre emissões de GEE dos híbridos e elétricos em relação à média de mercado de cada categoria, incluindo os ICEV, ponderada pelo número de vendas.

Tabela 3

Emissões médias de CO₂e do poço à roda de veículos híbridos e elétricos por categoria do PBEV e tecnologia de propulsão, ponderadas pelo número de vendas

Categoria	Tecnologia de propulsão	Emissões do poço à roda (g CO₂e/km)	Número de modelos disponíveis	Variação em relação à média da categoria
Subcompacto	BEV	19	5	-80,7%
	HEV	-	0	-
	MHEV	-	0	-
	PHEV	-	0	-
	Média	98,5	6	-
Compacto	BEV	25,6	2	-76,2%
	HEV	-	0	-
	MHEV	-	0	-
	PHEV	-	0	-
	Média	107,6	8	-
Médio	BEV	20,1	8	-81,1%
	HEV	90,2	2	-15%
	MHEV	136,7	3	+28,9%
	PHEV	163,5	1	+54,1%
	Média	106,1	32	-
Grande	BEV	23,8	4	-79%
	HEV	90,2	5	-20,4%
	MHEV	133,7	2	+18,1%
	PHEV	121	1	+6,8%
	Média	113,2	21	-
Extragrande	BEV	27,9	20	-79,2%
	HEV	111,2	5	-16,8%
	MHEV	181,6	9	+35,9%
	PHEV	94,9	6	-29%
	Média	133,6	53	-
Utilitário esportivo compacto	BEV	-	0	-
	HEV	-	0	-
	MHEV	128	1	+8%
	PHEV	-	0	-
	Média	118,5	19	-
Utilitário esportivo grande	BEV	26,3	4	-80,2%
	HEV	129,1	2	-3,1%
	MHEV	135,6	2	+1,9%
	PHEV	96,1	3	-27,8%
	Média	133,1	24	-
Utilitário esportivo grande 4x4	BEV	30	1	-79,5
	HEV	-	0	-
	MHEV	175,1	7	+19,9
	PHEV	120,5	6	-17,5
	Média	146,1	23	0
Esportivo	BEV	38	1	-82,1%
	HEV	-	0	-
	MHEV	-	0	-
	PHEV	176,5	1	-16,8%
	Média	212	10	-
Fora de estrada grande	BEV	-	0	-
	HEV	-	0	-
	MHEV	209,2	6	+1,9%
	PHEV	151,5	4	-26,2%
	Média	205,4	20	-

Os dados indicam que a oferta de híbridos se concentra nas categorias de veículos maiores, enquanto os elétricos têm mais modelos ofertados em categorias menores. Entre os compactos e subcompactos, não há oferta de modelos híbridos de qualquer tecnologia de propulsão. Além disso, apenas um modelo PHEV está disponível entre os médios e utilitários esportivos compactos, os dois maiores segmentos do mercado brasileiro, que representaram cerca de 55% das vendas de carros de passeio em 2023 (Cieplinski, 2024b).

Os PHEV apresentam grandes variações nas emissões. O único veículo *plug-in* da categoria médio tem emissões 54,1% acima da média de todos os veículos da mesma categoria, ao passo que os PHEV extragrandes (seis modelos) têm níveis de emissão de CO₂ e 29% abaixo da média dos seus semelhantes. Os HEV, por sua vez, têm emissões de GEE entre 3,1% e 20,4% menores do que a média de suas categorias. Por fim, os MHEV não têm emissões abaixo da média em nenhuma categoria e chegam a ser 35,9% mais poluentes do que a média no caso dos extragrandes, que incluem nove modelos MHEV. Vale mencionar que algumas categorias apresentam números baixos de modelos de uma determinada tecnologia de propulsão, o que pode gerar valores médios de emissão de CO₂ e não representativos, como é o caso dos PHEV médios, onde o único modelo é aquele com menor autonomia elétrica entre os veículos *plug-in*. Isso também pode explicar o motivo pelo qual os MHEV grandes emitem menos CO₂ e que os MHEV médios.

Para uma comparação ainda mais precisa, podemos comparar modelos que são ofertados com mais de uma tecnologia de propulsão. Quatro modelos são vendidos em versões ICEV e BEV, com reduções de emissões entre 75% e 84% nos elétricos. Entre os ICEV e MHEV do mesmo modelo, as emissões são entre 2% e 11% menores para o MHEV, dependendo do modelo. Por sua vez, os modelos vendidos no Brasil em versões ICEV flex e HEV flex possuem emissões 24% e 26% menores nas versões híbridas.

Analogamente, dos cinco modelos vendidos como PHEV ou ICEV a gasolina, as reduções de emissões dos PHEVs variaram entre 13% e 47%. Por fim, dos dois modelos vendidos como PHEV ou ICEV flex, um modelo PHEV tem 12% menos emissões do que seu equivalente ICEV, mas o outro apresenta uma redução de emissões de apenas 1%, indicando que a troca de um ICEV flex por um híbrido abastecido exclusivamente a gasolina, pode não promover reduções significantes nas emissões.

POTENCIAL DE REDUÇÃO DE EMISSÕES

Apesar das limitadas reduções de emissões apresentadas pelos modelos híbridos atualmente disponíveis no mercado brasileiro, aumentos na autonomia em modo elétrico dos PHEV, na oferta de híbridos flex, no consumo de etanol e no uso de eletricidade a partir de fontes 100% renováveis podem aumentar seu potencial de reduzir as emissões no futuro.

A Figura 5 ilustra o potencial estimado de redução de emissões dos MHEV, HEV, PHEV e BEV. As barras à esquerda de cada gráfico indicam as emissões de um veículo com a eficiência energética média dentro de cada tecnologia de propulsão utilizando somente gasolina ou, no caso dos elétricos, utilizando o fator de emissão de CO₂ e da produção de energia elétrica da matriz energética brasileira atual. Em seguida, são consideradas as reduções de emissões sob várias suposições alternativas:

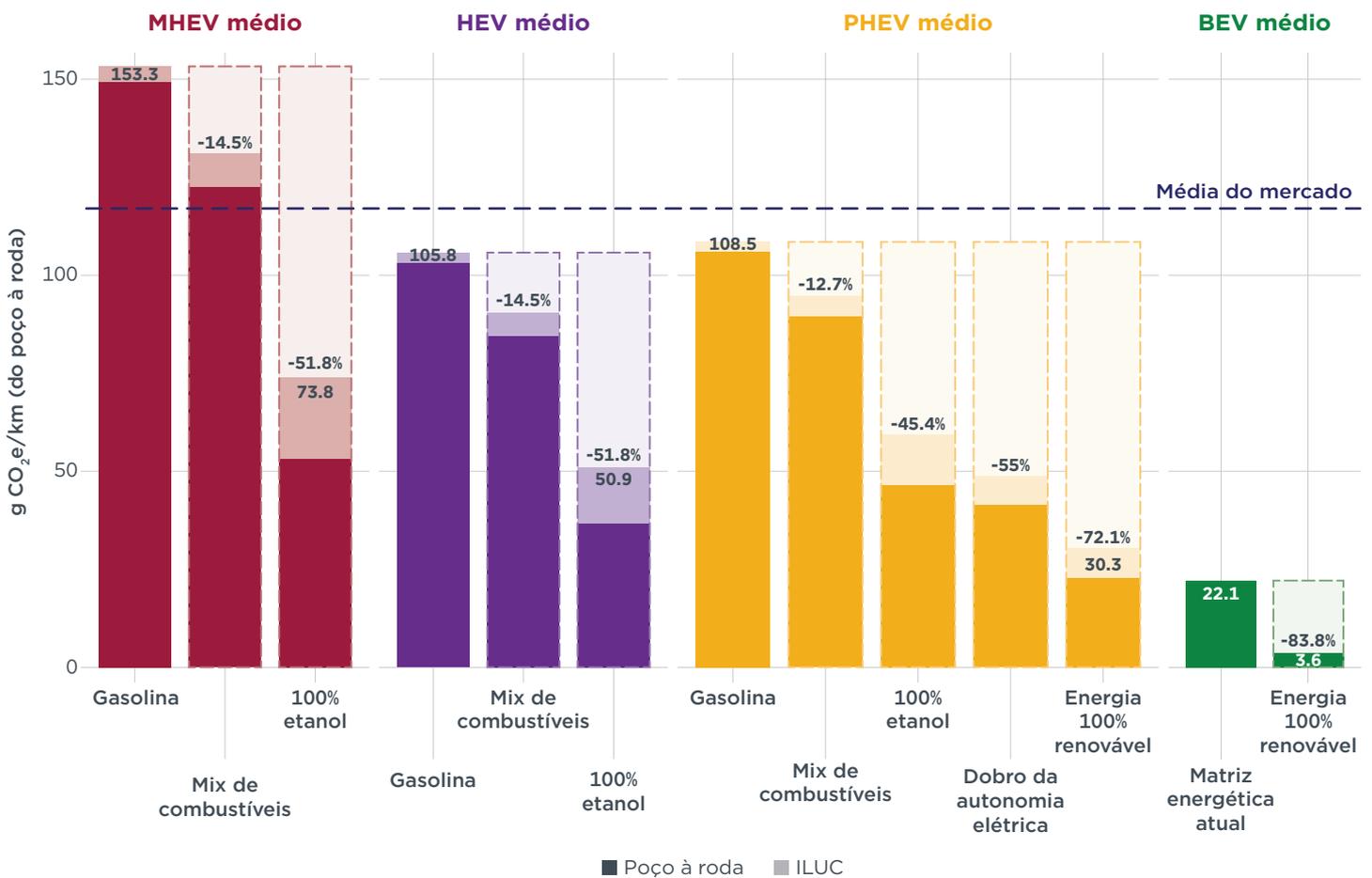
- » **Mix de combustíveis:** Assume a utilização da média nacional do consumo de etanol (38%) e gasolina C (62%).
- » **100% etanol:** Assume a utilização de 100% etanol.
- » **Dobro da autonomia elétrica:** Para os PHEV apenas, considera um aumento do fator de utilização do modo elétrico em função de um aumento das baterias. Em particular,

considera-se o dobro da média atual de autonomia elétrica, que é de 72 km, o que resulta em um aumento do fator de utilização do modo elétrico de 40% para 65%.

- » **Energia 100% renovável:** Para os PHEV e BEV, considera as emissões utilizando 100% energia renovável para o carregamento das baterias, com um fator de emissão de 7,1 g CO₂e/MJ. O fator de emissão de energia elétrica 100% renovável foi calculado considerando uma matriz energética composta de 70% hidrelétrica, 15% eólica e 15% solar. As intensidades de carbono de cada uma dessas fontes de energia foram calculadas no quinto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, do *Intergovernmental Panel on Climate Change*) por Schlömer et al. (2014).

Em contraste com as medianas apresentadas na Figura 1, o consumo dos veículos médios abaixo é calculado utilizando a média ponderada por vendas de cada modelo. Portanto, como os modelos mais vendidos entre os PHEV estão entre os mais eficientes desta tecnologia, o PHEV médio na Figura 5 tem emissões inferiores à média nacional. Por fim, as cores mais claras de cada barra indicam a parcela das emissões atribuída à mudança indireta do uso do solo (ILUC, de *indirect land-use change*), que ocorrem quando um aumento da demanda por matéria-prima para biocombustíveis resulta na conversão da terra, deslocando as atividades existentes, como a produção agrícola.¹

Figura 4
Potencial de descarbonização dos híbridos e elétricos por tecnologia de propulsão



CONSELHO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPO THEICT.ORG

¹ As emissões de ILUC são maiores quando o aumento da demanda por biocombustíveis resulta na conversão de terras com alto estoque de carbono que não eram usadas anteriormente para a agricultura.

Os resultados sugerem que os PHEV são os híbridos com maior potencial de redução das emissões de CO₂e. Estes veículos, utilizando 100% etanol e eletricidade 100% renovável para recargar, acompanhados de um fator de utilização do modo elétrico de 65%, poderiam emitir 30,3 g CO₂e/km. No melhor cenário, os HEV utilizando 100% etanol poderiam emitir 50,9 g CO₂e/km, enquanto os MHEV poderiam emitir, no mínimo, 73,8 g CO₂e/km. Portanto, em comparação com modelos atuais a gasolina, os PHEV poderiam reduzir suas emissões em até 72%, e os HEV e MHEV 52%.

O PHEV e o HEV médio, utilizando a proporção do mercado entre gasolina e etanol, teriam emissões de CO₂e 19% e 23% menores que a média do mercado, respectivamente, mesmo com massas elevadas. No entanto, o MHEV médio continuaria cerca de 12% acima da média, mesmo utilizando a proporção do mercado entre gasolina e etanol. Vale mencionar que as emissões de todas as tecnologias de propulsão podem reduzir também, caso o peso médio dos veículos diminua. Para tanto, seria necessária a ampliação da oferta de modelos híbridos nos segmentos subcompacto, compacto e médio, que hoje é muito limitada, e garantir que estes sejam flex.

Por outro lado, os BEVs atuais emitem cerca de 22 g CO₂e/km e poderiam emitir no mínimo 3,6 g CO₂e/km com eletricidade 100% renovável, o que representa uma redução de emissões de 84%. A redução de emissões do poço à roda obtidas com o uso de eletricidade 100% renovável nos BEV é notável, e é explicada pela grande diferença entre os fatores de emissão dos combustíveis fósseis e fontes renováveis. Por exemplo, o fator de emissão mediano da geração hidroelétrica é de 24 g CO₂e/kWh (6,66 g CO₂e/MJ) e da geração a gás fóssil de 490 g CO₂e/kWh (163 g CO₂e/MJ). Logo, uma matriz de geração 90% hidrelétrica e 10% a gás fóssil tem emissões médias de 70,6 g CO₂e/kWh (19,6 g CO₂e/MJ). Substituindo somente os 10% de gás fóssil por uma matriz 100% hidrelétrica, teríamos uma redução de 66% nas emissões médias. Na Figura 5 acima, estimamos uma emissão média 100% renovável de 23,25 g CO₂e/kWh (6,45 g CO₂e/MJ)² que multiplicada pela eficiência energética média dos BEV no Brasil, de 0,56 MJ/km, resulta em uma emissão média do poço à roda de 3,6 g CO₂e/MJ.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Este estudo calculou a diferença nas emissões do poço à roda entre veículos híbridos e elétricos vendidos no Brasil entre janeiro de 2023 e abril de 2024. Ao comparar as emissões dos híbridos com a média do mercado brasileiro, foi estimado que seu potencial de redução de emissões é limitado: apenas 18 dos 64 modelos analisados apresentaram um fator de emissão abaixo da média do mercado. Por outro lado, os dados mostraram que os quatro modelos híbridos mais vendidos (dois HEV e dois PHEV) emitem entre 17% e 37% a menos do que a média, devido à motorização flex-fuel destes HEV e à maior autonomia da bateria destes PHEV. No entanto, mesmo o híbrido mais eficiente emite entre 3 e 4 vezes mais do que o veículo elétrico médio.

No período de desenvolvimento deste estudo, apenas 5 dos 64 modelos MHEV, HEV e PHEV a venda eram flex, e a maior parte dos modelos híbridos comercializados eram importados. Em contrapartida, o mercado de veículos leves brasileiro é composto majoritariamente por ICEV flex.

Os resultados também indicam uma variação substancial nas emissões de CO₂e dos híbridos, com modelos menos eficientes emitindo o dobro daqueles com menor nível de emissão, dentro da mesma tecnologia de propulsão. Entre os fatores que influenciam os níveis de emissões destes veículos, além da tecnologia de propulsão, destacam-se o tipo de combustível utilizado no seu abastecimento e seu peso. A maior

² Consideramos uma matriz 70% hidrelétrica, 15% solar e 15% eólica. Os fatores de emissão medianos no ciclo de vida destas fontes são de 24 g CO₂e/kWh, 48 g CO₂e/kWh e 11 g CO₂e/kWh, respectivamente.

parte dos híbridos apresentou um fator de emissão de CO₂ e acima da média nacional, principalmente em função do uso exclusivo de gasolina e pela concentração da oferta em categorias de maior dimensão e peso. Todos os modelos híbridos estavam acima da média do mercado em peso e preço. No entanto, as emissões estimadas dos MHEV são maiores do que a média nacional, mesmo quando comparados exclusivamente com veículos da mesma categoria do PBEV. Esta constatação sugere que pode ser importante categorizar os MHEV separadamente ao elaborar políticas públicas para que veículos mais poluentes não sejam subsidiados.

Entre as tecnologias híbridas, os PHEV são os veículos com maior potencial de descarbonização. Em um cenário onde estes veículos sejam abastecidos exclusivamente a etanol e sua autonomia elétrica dobre, suas emissões seriam reduzidas em 55%; se a eletricidade para recarga fosse de uma fonte 100% renovável, essa redução seria de 72%. Porém, mesmo que operados da maneira mais sustentável possível, suas emissões seriam maiores que a dos elétricos alimentados com a energia da matriz brasileira atual e mais de 8 vezes maior que a dos elétricos alimentados com energia 100% renovável.

Portanto, na medida em que as montadoras continuem investindo em híbridos, o direcionamento de recursos para o fomento à produção nacional de híbridos *plug-in flex* e incentivos para aumentar o consumo de etanol ajudariam a maximizar as possíveis reduções de emissões. A oferta de híbridos em segmentos menores e menos pesados também contribuiria para reduzir suas emissões médias, bem como o aumento da capacidade de baterias e, assim, da utilização do modo elétrico nos híbridos *plug-in*. No longo prazo, no entanto, os veículos elétricos oferecem de longe as reduções mais significativas nas emissões.

REFERÊNCIAS

- Cieplinski, A. (2024a). *Evolução recente do mercado brasileiro de veículos leves: a chegada de elétricos e híbridos (2021-2024)*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/evolucao-recente-do-mercado-brasileiro-de-veiculos-leves-a-chegada-de-eletricos-e-hibridos-2021-2024-dec24/>
- Cieplinski, A. (2024b). *O potencial de descarbonização do programa MOVER: Explorando variações nas vendas de veículos de diferentes tecnologias até 2027*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/o-potencial-de-descarbonizacao-do-programa-mover-explorando-variacoes-nas-vendas-de-veiculos-de-diferentes-tecnologias-ate-2027-jul24/>
- Cieplinski, A. (2024c). *Os riscos da aposta em carros híbridos plug-in flex-fuel no Brasil*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/riscos-da-aposta-em-carros-hibridos-plug-in-flex-fuel-brasil-jan24/>
- Cieplinski, A., Rebouças, A. B., Yadav, A., & Araujo, C. (2024). *Descarbonização da frota de coleta de resíduos sólidos em São Paulo*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/descarbonizacao-da-frota-de-coleta-de-residuos-solidos-em-sao-paulo-oct24/>
- Empresa de Pesquisa Energética. (2024a). *Balanço energético nacional: Relatório síntese 2023 (ano base 2023)*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf
- Empresa de Pesquisa Energética. (2024b). *Eletromobilidade: Transporte rodoviário (estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034)*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/CA-EPE-DPG-SDB-2024-08_Eletromobilidade_2024.08.30%20(1).pdf)
- Fadhil, I., & Shen, C. (2024). *Global electric vehicle market monitor for light-duty vehicles in key markets, 2024 H1*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/global-ev-market-monitor-ldv-2024-h1-dec24/>
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. (2023). *Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular: Veículos leves 2023 - 15º ciclo*. <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/pbe-veicular-2023.pdf/view>
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. (2024). *Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular: Veículos leves 2024 - 16º ciclo*. <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/pbe-veicular-2024-1.pdf/view>
- Isenstadt, A., Yang, Z., Searle, S., & German, J. (2022). *Real world usage of plug-in hybrid electric vehicles in the United States*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/real-world-phev-us-dec22.pdf>
- Jato Dynamics. (2024). *Vendas de carros e comerciais leves no Brasil, 2021-2024* [Banco de dados].
- Lei Nº 14.902, de 27 de junho de 2024, https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14902.htm
- Mera, Z., Bieker, G., Rebouças, A. B., & Cieplinski, A. (2023). *Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A4-PORT-v4.pdf>
- Portaria Nº 169, de 3 de maio de 2023, <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-169-de-3-de-maio-de-2023-485619287>
- Rebouças, A. B., & Cieplinski, A. (2024). *Quantificação das emissões de gases de efeito estufa evitadas por ônibus elétricos na América Latina: Uma metodologia simplificada de avaliação do ciclo de vida*. International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/pt-quantifying-avoided-ghg-emissions-by-e-buses-in-latin-america-aug24/>
- Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Perczyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., & Wiser, R. (2014). Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, J., von Stechow, C., Zwickel, T., & Minx, J.C. (eds.), *Climate change 2014: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1329-1356). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf

APÊNDICE A. METODOLOGIA

Tabela A.1

Fatores de emissão de CO₂e do poço à roda dos combustíveis estudados

Tipo de combustível	Fator de emissão (g CO ₂ e/MJ)
Gasolina C (E27)	81,8
Etanol hidratado	39,4
Diesel (B12)	82,2
Eletricidade	44,1

Para calcular as emissões de CO₂/km, utilizamos a equação (1), onde i está relacionado com o tipo de propulsão do carro e j informa se o veículo é flex ou não. FU_i assume o fator de utilização no modo elétrico quando o carro é PHEV, 1 quando é BEV e 0 para os outros tipos de propulsão. FU_j assume o valor da proporção do uso de etanol quando o automóvel é flex e 0 caso contrário.

$$\begin{aligned} \text{Emissão}_{i,j} = & FU_i \times \text{Consumo Energético}_{\text{elétrico}} \times \text{Fator de Emissão}_{\text{Eletricidade}} \\ & + (1-FU_i) \times \text{Consumo Energético}_{\text{combustão}} \times (FU_j \times \text{Fator de Emissão}_{\text{Etanol}} \\ & + (1-FU_j) \times \text{Fator de Emissão}_{\text{Gasolina/Diesel}} \end{aligned} \quad (1)$$



www.icctbrasil.org.br

comunicacao@theicct.org

linkedin.com/icct-brasil

icct
CONSELHO INTERNACIONAL
DE TRANSPORTE LIMPO