



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO MECÂNICA

Lucas Gauer Anschau

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA ELETRIFICAÇÃO
DO TRANSPORTE POR APLICATIVO**

Florianópolis
2026

Lucas Gauer Anschau

**AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA ELETRIFICAÇÃO
DO TRANSPORTE POR APLICATIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Produção Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica com habilitação em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.^a Gisele de Lorena Diniz Chaves,
Dra.

Florianópolis

2026

Anschau, Lucas Gauer

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA
ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE POR APLICATIVO / Lucas Gauer
Anschau ; orientador, Gisele de Lorena Diniz Chaves, 2026.
124 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Mecânica,
Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

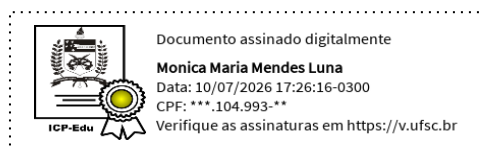
1. Engenharia de Produção Mecânica. 2. ride-hailing. 3.
emissões de CO₂eq. 4. veículos elétricos. I. Chaves,
Gisele de Lorena Diniz . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica.
III. Título.

Lucas Gauer Anschau

AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO NA ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE POR APLICATIVO

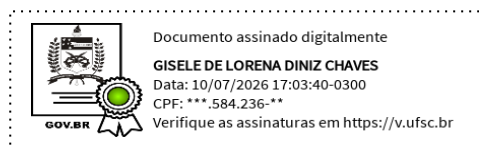
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Produção Mecânica.

Florianópolis, 01 de julho de 2026.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof.^a Gisele de Lorena Diniz Chaves, Dra.

Orientadora



Prof. Mauricio Uriona Maldonado, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Alexandre Borges Fagundes, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Laerte e Rosane, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e por sempre acreditarem em mim ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. O incentivo, a confiança e o suporte que me ofereceram foram fundamentais para que eu pudesse superar os desafios encontrados durante essa jornada.

À minha namorada, Alissa Aiko, expresso minha profunda gratidão por todo o carinho, compreensão e companheirismo. Seu apoio constante, suas palavras de incentivo e sua presença nos momentos mais difíceis foram essenciais para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao meu primo, João Pedro, por sua influência positiva em minha vida, por me motivar a buscar novos desafios e por me incentivar a ingressar na Universidade Federal de Santa Catarina. Sua confiança em meu potencial contribuiu significativamente para minhas escolhas e conquistas.

Por fim, agradeço à professora Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves pela orientação, dedicação e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seus conhecimentos, sugestões e incentivo foram fundamentais para a superação dos desafios encontrados durante a pesquisa e para a conclusão desta etapa acadêmica.

RESUMO

O setor de transportes é um dos principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa no Brasil, sendo o transporte por aplicativo (*ride-hailing*) uma modalidade com elevado potencial para estratégias de descarbonização devido à alta quilometragem percorrida pelos veículos. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos da substituição de veículos a combustão utilizados no *ride-hailing* por veículos eletrificados. Foram comparadas as emissões de veículos com motor a combustão interna (ICE), híbridos (HEV), híbridos *plug-in* (PHEV) e elétricos a bateria (BEV). As emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) foram estimadas por meio das abordagens *Tank-to-Wheel* (T2W), *Well-to-Wheel* (W2W) e Análise do Ciclo de Vida (ACV). Foram avaliados diferentes níveis de eletrificação das viagens, além de cenários de eletrificação direcionada baseados na quilometragem percorrida pelos motoristas e na influência do *deadheading* sobre as emissões totais. Florianópolis foi utilizada como estudo de caso para a análise de estratégias de eletrificação direcionada, enquanto Porto Alegre foi empregada para avaliar o impacto da eletrificação em um contexto de maior volume de viagens. Os resultados demonstram que a eletrificação reduz as emissões de CO₂eq em todos os métodos analisados, com destaque para os veículos elétricos a bateria, que apresentaram o menor nível de emissões no contexto da matriz elétrica brasileira. Na abordagem de ACV, os BEVs alcançaram uma redução máxima de 79,54% das emissões em comparação aos veículos a combustão. Observou-se ainda que a eletrificação direcionada de motoristas com maior quilometragem praticamente dobrou o potencial de mitigação das emissões em relação à eletrificação de motoristas com menor quilometragem, evidenciando a importância da priorização de usuários com maior intensidade de uso para maximizar os benefícios ambientais da eletrificação. Conclui-se que a eletrificação do *ride-hailing* representa uma alternativa relevante para a redução das emissões do setor de transportes, especialmente quando associada à expansão da infraestrutura de recarga e à implementação de mecanismos de incentivo à adoção dessas tecnologias. O estudo contribui para a compreensão do potencial da eletrificação do *ride-hailing* como estratégia de descarbonização urbana e fornece subsídios para o desenvolvimento de políticas públicas e estratégias de transição voltadas à mobilidade sustentável.

Palavras-chave: *ride-hailing*; emissões de CO₂eq; veículos elétricos.

ABSTRACT

The transportation sector is one of the main contributors to greenhouse gas emissions in Brazil, and ride-hailing services represent a mobility mode with significant decarbonization potential due to the high mileage traveled by their vehicles. In this context, this study aims to evaluate the impacts of replacing internal combustion engine vehicles used in ride-hailing services with electrified vehicles. Emissions from internal combustion engine vehicles (ICE), hybrid electric vehicles (HEV), plug-in hybrid electric vehicles (PHEV), and battery electric vehicles (BEV) were compared. Carbon dioxide equivalent (CO_2eq) emissions were estimated using the Tank-to-Wheel (T2W), Well-to-Wheel (W2W), and Life Cycle Assessment (LCA) approaches. Different levels of trip electrification were evaluated, as well as targeted electrification scenarios based on drivers' traveled mileage and the influence of deadheading on total emissions. Florianópolis was used as a case study to analyze targeted electrification strategies, while Porto Alegre was employed to assess the impacts of electrification in a context with a larger volume of trips. The results indicate that electrification reduces CO_2eq emissions under all assessment methods, with battery electric vehicles presenting the lowest emission levels within the context of the Brazilian electricity matrix. Under the LCA approach, BEVs achieved a maximum emission reduction of 79.54% compared to internal combustion engine vehicles. Furthermore, targeted electrification of high-mileage drivers nearly doubled the emission mitigation potential when compared to the electrification of lower-mileage drivers, highlighting the importance of prioritizing users with greater vehicle utilization in order to maximize the environmental benefits of electrification. It is concluded that the electrification of ride-hailing services represents a relevant alternative for reducing emissions in the transportation sector, especially when combined with the expansion of charging infrastructure and incentive mechanisms that support the adoption of these technologies. This study contributes to the understanding of the potential of ride-hailing electrification as an urban decarbonization strategy and provides support for the development of public policies and transition strategies aimed at sustainable mobility.

Keywords: *ride-hailing; CO_2eq emissions; electric vehicles.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Sistemas de Propulsão	21
Figura 2 — Cenários analisados	36
Figura 3 — Emissões do ciclo de vida para veículos ICE e HEV	55
Figura 4 — Emissões do ciclo de vida para veículos PHEV para diferentes matrizes elétricas	57
Figura 5 — Emissões do ciclo de vida para veículos BEV para cada matriz elétrica	59
Figura 6 — Relação entre número de viagens semanais e quilometragem percorrida por semana	61
Figura 7 — Emissões T2W por tecnologia veicular para diferentes cenários de distância média em Florianópolis	63
Figura 8 - Emissões semanais T2W em diferentes percentuais de viagens eletrificadas em Florianópolis	64
Figura 9 — Emissões T2W nos cenários de eletrificação direcionada	66
Figura 10 — Emissões semanais T2W em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando deadheading em Florianópolis	68
Figura 11 — Emissões W2W por tecnologia veicular para diferentes cenários de distância média em Florianópolis	69
Figura 12 — Emissões semanais W2W em diferentes percentuais de viagens eletrificadas em Florianópolis	70
Figura 13 — Emissões W2W em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de menor quilometragem	72
Figura 14 — Emissões W2W em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de alta quilometragem	73
Figura 15 — Emissões semanais W2W em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando deadheading em Florianópolis	75
Figura 16 — Emissões ACV por tecnologia veicular para diferentes cenários de distância média em Florianópolis	76
Figura 17 — Emissões semanais ACV em diferentes níveis de eletrificação das viagens	77
Figura 18 — Emissões ACV em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de menor quilometragem	79
Figura 19 — Emissões ACV em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de maior quilometragem	80

Figura 20 — Emissões médias por viagem em Porto Alegre pelo Método T2W	86
Figura 21 — Emissões diárias de CO ₂ eq pelo método T2W em Porto Alegre	87
Figura 22 — Emissões semanais T2W em diferentes percentuais de viagens eletrificadas em Porto Alegre	88
Figura 23 — Emissões anuais T2W em diferentes percentuais de viagens eletrificadas em Porto Alegre	89
Figura 24 — Emissões anuais T2W em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando <i>deadheading</i> em Porto Alegre	91
Figura 25 — Emissões médias por viagem em Porto Alegre pelo Método W2W	92
Figura 26 — Emissões diárias de CO ₂ eq pelo método W2W em Porto Alegre	93
Figura 27 — Emissões semanais W2W em diferentes percentuais de viagens eletrificadas em Porto Alegre	94
Figura 28 — Emissões anuais de CO ₂ eq em diferentes níveis de eletrificação da frota pelo método W2W em Porto Alegre	96
Figura 29 — Emissões anuais de CO ₂ eq considerando cenários de <i>deadheading</i> mínimo e máximo em Porto Alegre pelo método W2W	97
Figura 30 — Emissões de CO ₂ por viagem média em Porto Alegre pelo método ACV	99
Figura 31 — Emissões diárias de CO ₂ eq pelo método ACV em Porto Alegre	99
Figura 32 — Emissões semanais de CO ₂ eq em diferentes níveis de eletrificação da frota pelo método ACV em Porto Alegre	100
Figura 33 — Emissões anuais de CO ₂ eq em diferentes níveis de eletrificação da frota pelo método ACV em Porto Alegre	102
Figura 34 — Emissões anuais de CO ₂ eq considerando cenários de <i>deadheading</i> mínimo e máximo em Porto Alegre pelo método ACV	104
Figura 35 — Influência do fator α nas emissões dos veículos PHEV	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Avaliação comparativa das principais tecnologias veiculares.....	26
Quadro 2 - Comparação dos contextos de análise por cidade.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Plano Decenal EPE	40
Tabela 2 — Valor de EF em diferentes cenários	41
Tabela 3 — Distribuição das viagens por horário do dia no Rio de Janeiro	42
Tabela 4 — Distribuição das viagens por dia em Porto Alegre	43
Tabela 5 — Dados operacionais do cenário de Porto Alegre	43
Tabela 6 — Veículos HEV mais vendidos em Florianópolis	46
Tabela 7 — Emissões T2W por tecnologia veicular	47
Tabela 8 — Veículos PHEV mais vendidos em Florianópolis	48
Tabela 9 — Estimativa das emissões T2W dos veículos PHEV	49
Tabela 10 — Fatores de emissão WTT da gasolina C convertidos para gCO ₂ eq/L ..	50
Tabela 11 — Emissões por quilômetro de veículos ICE e HEV considerando o ciclo W2W	50
Tabela 12 — Estimativa das emissões W2W da gasolina tipo C dos veículos PHEV	51
Tabela 13 — Estimativa das emissões W2W da eletricidade dos veículos PHEV	51
Tabela 14 — Emissões totais W2W dos veículos PHEV em diferentes cenários da matriz elétrica	52
Tabela 15 — Emissões totais W2W dos veículos BEV em diferentes cenários da matriz elétrica	53
Tabela 16 — Emissões da parcela de combustível para ICE e HEV convertidas para gCO ₂ eq/km	54
Tabela 17 — Emissões do ciclo de vida para veículos ICE e HEV (gCO ₂ eq/km)	55
Tabela 18 — Emissões da parcela de combustível para PHEV convertidas para gCO ₂ eq/km	56
Tabela 19 — Emissões do ciclo de vida para veículos PHEV	57
Tabela 20 — Emissões por etapa do ciclo de vida de um BEV (gCO ₂ eq/km)	58
Tabela 21 — Parâmetros utilizados no cenário de Florianópolis	62
Tabela 22 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método T2W em Florianópolis	65
Tabela 23 — Motoristas com maior e menor quilometragem semanal	65
Tabela 24 — Redução das emissões pelo método T2W nos cenários de eletrificação direcionada	67

Tabela 25 — Quilometragem semanal da frota considerando a inclusão de <i>deadheading</i> em Florianópolis	68
Tabela 26 — Redução das emissões T2W em cenários com inclusão de <i>deadheading</i> em Florianópolis	69
Tabela 27 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método W2W em Florianópolis.....	71
Tabela 28 — Redução das emissões pelo método W2W nos cenários de eletrificação direcionada.....	74
Tabela 29 — Redução das emissões W2W em cenários com inclusão de <i>deadheading</i> em Florianópolis	76
Tabela 30 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV em Florianópolis	78
Tabela 31 — Redução das emissões pelo método ACV nos cenários de eletrificação direcionada.....	81
Tabela 32 — Emissões semanais ACV em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando <i>deadheading</i> em Florianópolis.....	81
Tabela 33 — Redução das emissões ACV em cenários com inclusão de <i>deadheading</i> em Florianópolis	82
Tabela 34 — Redução das emissões nos cenários de eletrificação das viagens em Florianópolis	83
Tabela 35 — Redução das emissões nos cenários de eletrificação direcionada	84
Tabela 36 — Redução das emissões em cenários com inclusão de <i>deadheading</i> em Florianópolis	85
Tabela 37 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método T2W em Porto Alegre	88
Tabela 38 — Redução anual das emissões de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE, pelo método T2W, em Porto Alegre	89
Tabela 39 — Quilometragem anual da frota considerando a inclusão de <i>deadheading</i> em Porto Alegre	90
Tabela 40 — Redução anual das emissões de t CO ₂ eq considerando cenários de <i>deadheading</i> em Porto Alegre.....	91
Tabela 41 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método W2W em Porto Alegre	95

Tabela 42 — Redução anual das emissões de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método W2W.....	97
Tabela 43 — Redução anual das emissões de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE considerando diferentes cenários de deadheading	98
Tabela 44 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV	101
Tabela 45 — Redução das emissões anual de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV	103
Tabela 46 — Redução das emissões semanais de CO ₂ eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV	104
Tabela 47 — Redução das emissões anuais nos cenários de eletrificação aleatória em Porto Alegre	105
Tabela 48 — Redução das emissões em cenários com inclusão de deadheading em Porto Alegre	107
Tabela 49 — Comparação de preços entre veículos BEV e PHEV no mercado brasileiro.....	114

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV — Análise do Ciclo de Vida
BEV — Battery Electric Vehicle
CAISO — California Independent System Operator
CO₂ — Dióxido de Carbono
CO₂eq — Dióxido de Carbono Equivalente
EPA — Environmental Protection Agency
EPE — Empresa de Pesquisa Energética
FCEV — Fuel Cell Electric Vehicle
GEE — Gases de Efeito Estufa
HEV — Hybrid Electric Vehicle
ICE — Internal Combustion Engine
MOVES — Motor Vehicle Emission Simulator
MPG — Miles per Gallon
PHEV — Plug-in Hybrid Electric Vehicle
T2W — Tank-to-Wheel
VKT — Vehicle Kilometers Traveled
VMT — Vehicle Miles Traveled
W2W — Well-to-Wheel
WTT — Well-to-Tank

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	19
1.2	JUSTIFICATIVA	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	TECNOLOGIAS VEICULARES	21
2.1.1	Propulsão híbrida	22
2.1.2	Propulsão elétrica a bateria (BEV)	23
2.1.3	Propulsão por célula combustível a hidrogênio	24
2.1.4	Comparação das Tecnologias de Propulsão	25
2.2	TRANSPORTE POR APLICATIVO	27
2.2.1	Eletificação das Frotas	28
2.3	ESTUDOS E PROJETOS SOBRE ELETRIFICAÇÃO DO RIDE-HAILING	29
2.3.1	Emissões dos veículos	32
2.4	POLÍTICAS DE INCENTIVO À ELETRIFICAÇÃO DO <i>RIDE-HAILING</i>	34
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	36
3.1	CENÁRIOS ANALISADOS	36
3.2	CÁLCULO DAS EMISSÕES	44
3.2.1	Método T2W	44
3.2.2	Método W2W	49
3.2.3	Método ACV	53
3.3	PERFIL DE VIAGENS EM FLORIANÓPOLIS	60
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1	EMISSIONES DE CO ₂ EQ EM FLORIANÓPOLIS	63
4.1.1	Emissões de CO₂eq em Florianópolis pelo método T2W	63
4.1.2	Emissões de CO₂eq em Florianópolis pelo método W2W	69
4.1.3	Emissões de CO₂eq em Florianópolis pelo método ACV	76
4.1.4	Considerações sobre Florianópolis	82
4.2	EMISSIONES DE CO ₂ EQ EM PORTO ALEGRE	86
4.2.1	Emissões de CO₂eq em Porto Alegre pelo método T2W	86

4.2.2	Emissões de CO₂eq em Porto Alegre pelo método W2W	91
4.2.3	Emissões de CO₂eq em Porto Alegre pelo método ACV	98
4.2.4	Considerações sobre Porto Alegre	105
4.3	DISCUSSÃO	108
4.3.1	Influência da matriz elétrica e das baterias no ACV dos BEVs.....	108
4.3.2	Eletrificação direcionada.....	111
4.3.3	Viabilidade de tecnologias híbridas como transição.....	112
4.3.4	Políticas de incentivo	115
5	CONCLUSÃO	118

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética global e os impactos ambientais cada vez mais evidentes do uso de combustíveis fósseis, que resultam em elevadas emissões de dióxido de carbono (CO₂), têm impulsionado a discussão sobre energias renováveis em diversos setores. Segundo Addai et al. (2024), as mudanças ambientais globais exigem ações emergenciais para reduzir as emissões de CO₂ do setor energético, sendo a eficiência energética e o avanço tecnológico caminhos fundamentais para a transição de uma matriz baseada em combustíveis fósseis para fontes renováveis.

O setor de transportes destaca-se como um dos principais responsáveis por essas emissões. No Brasil, em 2023, todas as atividades que envolveram a queima de combustíveis para produção de energia resultaram na emissão de 420 milhões de toneladas de gases de efeito estufa, medidas em CO₂eq. Desse total, 224 milhões de toneladas foram provenientes do setor de transporte, ou seja, esse setor gerou mais de 50% dessas emissões, o que acabou refletindo no consumo recorde de combustível fóssil no país (Observatório do Clima, 2024). Em Florianópolis, o cenário das emissões de CO₂eq apresenta particularidades. Cerca de 73,1% das emissões totais da cidade são atribuídas ao setor de energia. Nesse setor, o transporte emerge como a principal fonte, concentrando 93,1% das emissões energéticas, o que corresponde a 571,86 mil toneladas de CO₂eq (SEEG, 2025). Em Porto Alegre, o setor de transportes também representa a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa, sendo responsável por aproximadamente 1,6 milhão de toneladas de CO₂eq em 2019, o que corresponde a 67,7% das emissões totais do município (Porto Alegre, 2021). A partir disso, fica evidente a predominância do transporte como fonte de emissões nas cidades. Além disso, o tráfego tem aumentado nas últimas décadas, o que tem agravado o congestionamento, reduzido o espaço nas vias, poluído o ar e intensificado a poluição sonora (Jin; Rafferty, 2018).

Diante dos desafios relacionados às emissões e ao congestionamento urbano, novas formas de mobilidade vêm ganhando destaque, entre elas os serviços de transporte por aplicativo (*ride-hailing*). Essa modalidade pode contribuir para melhorar a mobilidade urbana e reduzir congestionamentos e emissões, dependendo das condições de operação e do nível de compartilhamento das viagens (Haouari et al., 2025). Além disso, esta modalidade apresenta expressiva adesão, uma vez que, entre

2022 e 2024, o número de motoristas de aplicativo cresceu 35% no Brasil, totalizando 1,7 milhão de profissionais (Amobitec, 2025). Como exemplo, a Uber, empresa pioneira neste segmento, já registrou mais de 11 bilhões de viagens no país desde 2014 (Uber, 2024). Apesar de seu potencial, a contribuição dos serviços de transporte por aplicativo para a redução das emissões de GEE é limitada, pois a grande maioria da frota ainda é composta por veículos com motor a combustão. Esses veículos dependem principalmente de combustíveis fósseis e emitem poluentes como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (PM), que contribuem para a degradação da qualidade do ar e para o aumento das emissões associadas ao transporte urbano (Brasil, 2025). Como esses automóveis permanecem por longos períodos em circulação devido às extensas jornadas de trabalho dos motoristas, o volume total de emissões tende a ser ampliado. Além disso, é importante constatar que uma parcela significativa do tempo de operação ocorre sem passageiros a bordo, o chamado *deadheading*. Dependendo da região e da dinâmica urbana, o tempo gasto na busca por novos clientes ou no reposicionamento do veículo pode representar entre 35,8% e 44,8% da distância total percorrida (Cramer; Krueger, 2016). Esse tempo ocioso aumenta o total de quilômetros percorridos, o que pode contribuir para maior circulação de veículos nas vias.

A substituição desses veículos por modelos elétricos surge como uma alternativa para mitigar tais impactos. Priorizar a transição energética nesse segmento pode ainda se mostrar mais viável do que promover a reforma de todo o sistema de transporte do país. Este estudo analisa os impactos da substituição de veículos a combustão por modelos elétricos utilizados nos serviços de transporte por aplicativo. As cidades de Florianópolis e Porto Alegre são utilizadas apenas como estudo de caso para demonstrar a aplicação da análise. O foco principal da pesquisa é compreender como a eletrificação do *ride-hailing* pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar os impactos da substituição da frota convencional de veículos a combustão utilizada no *ride-hailing* por veículos elétricos.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Identificar a composição da frota de veículos no *ride-hailing* em Florianópolis e Porto Alegre.
- b) Identificar o padrão de utilização destes veículos no *ride-hailing* de Florianópolis e Porto Alegre;
- c) Identificar os padrões de emissões por tecnologia veicular, dado o perfil de uso;
- d) Quantificar as emissões de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) no cenário atual de Florianópolis e Porto Alegre;
- e) Quantificar a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa ($\text{CO}_{2\text{eq}}$) ao substituir a frota circulante no *ride-hailing* em Florianópolis e Porto Alegre.
- f) Avaliar o impacto das políticas de incentivo necessárias para viabilizar e acelerar essa transição no contexto das cidades brasileiras.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil assumiu o compromisso de reduzir suas emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ em 53% até 2030, em comparação aos níveis de 2005, uma meta que representa um corte total de 1,2 Gt $\text{CO}_{2\text{eq}}$ (Observatório do Clima, 2024). Para alcançar esse objetivo, é fundamental priorizar a análise de setores que concentram grande volume de emissões, como o de transportes. Com o intuito de mitigar as emissões de carbono e eliminar a poluição do escapamento, os veículos elétricos surgem como uma estratégia para a diminuição das emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. A adoção de carros elétricos em plataformas de transporte por aplicativo, em particular, oferece um benefício ampliado, já que esses veículos percorrem distâncias muito maiores que os de uso particular (Jenn, 2019). Consequentemente, a substituição de um veículo de plataforma por um elétrico resulta em mais quilômetros rodados com energia de fontes renováveis do que a troca de um carro particular. Portanto, incentivar o aumento da quilometragem elétrica no transporte por aplicativo é uma medida estratégica para a sustentabilidade (Jenn, 2019). Além disso, eletrificar uma modalidade, como o *ride-hailing*, é mais prático e rápido do que transformar todo o sistema de transporte. Como exemplo, Shenzhen, na China, eletrificou integralmente sua frota de ônibus até 2017 e alcançou 99,06% de eletrificação da frota de táxis em 2020, demonstrando o potencial de programas direcionados para frotas específicas (Liu et al., 2022).

A transição para frotas de *ride-hailing* elétricas tem sido uma prioridade para diversos governos, que implementam medidas regulatórias e incentivos financeiros para acelerar essa mudança. Um exemplo notável vem da Califórnia, nos Estados Unidos, que em 2021 instituiu a regulamentação de “milhas limpas”. Essa norma exige que uma porcentagem mínima das milhas totais percorridas por veículos de aplicativos seja realizada por veículos de zero emissão (California Air Resources Board, 2021). Segundo a regulamentação, a meta para 2023 era que 2% das milhas no transporte por aplicativo fossem percorridas por veículos elétricos, resultando em 252 gCO₂ por milha por passageiro. A meta aumenta gradualmente, de modo que, em 2029, 80% das milhas deverão ser percorridas por veículos elétricos, com uma emissão de apenas 30 g CO₂ por milha por passageiro. O programa espera obter uma redução cumulativa em todo o estado, no período de 2023 a 2030, de 298 toneladas de NOx e 1,81 milhão de toneladas métricas de gases de efeito estufa (California Air Resources Board, 2021).

No Brasil, iniciativas como o programa Mover 2030 indicam a intenção de descarbonizar progressivamente as frotas nacionais, reforçando a relevância da eletrificação como política pública. Nesse cenário, a substituição de veículos a combustão por elétricos no setor de transporte por aplicativo se mostra particularmente promissora, não apenas pela mitigação direta das emissões, mas também por favorecer a formação de comunidades de usuários pioneiros, os chamados primeiros adotantes (*early adopters*) (Rondani; Levy, 2024). Esse movimento, caracterizado pela formação de comunidades de usuários pioneiros, favorece a disseminação da tecnologia, acelera a aceitação social e estimula a criação de novas oportunidades de mercado ligadas a produtos, serviços e inovações associados à mobilidade elétrica (Rondani; Levy, 2024).

A análise dos compromissos climáticos do Brasil e das estratégias supracitadas de descarbonização globais indica que o setor de transportes pode constituir uma alternativa efetiva para a mudança. A eletrificação das frotas de *ride-hailing*, conforme os casos da Califórnia e de cidades chinesas acima citados, surge como uma possível estratégia para mitigar as emissões de GEE em centros urbanos.

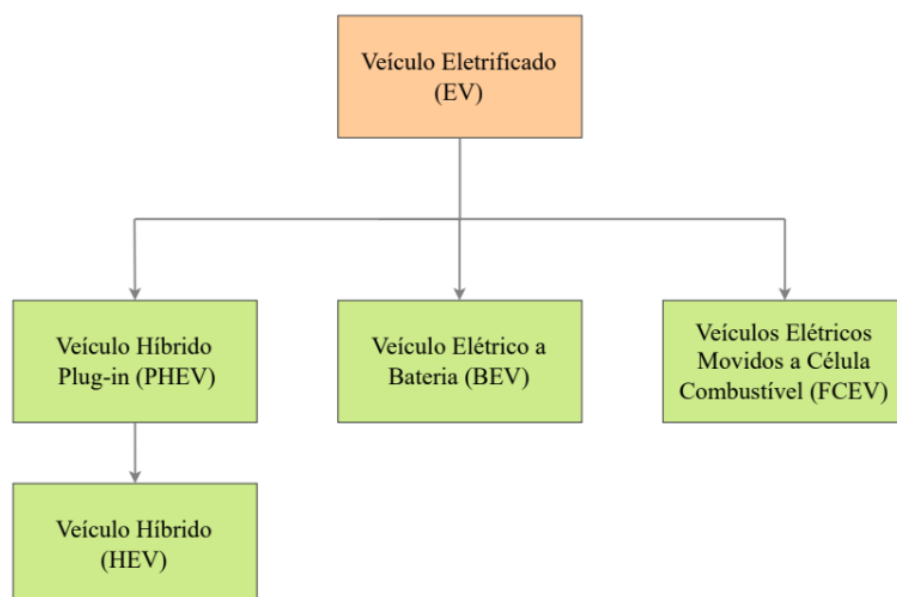
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar o embasamento teórico que sustenta a presente pesquisa, reunindo conceitos, estudos e referências relevantes para a compreensão aprofundada do tema. A fundamentação busca contextualizar as emissões de dióxido de carbono associadas ao uso de veículos a combustão e o potencial da eletrificação do transporte por aplicativo como medida para mitigar essas emissões. Serão explorados os principais conceitos e discussões que permeiam a transição para um sistema de transporte mais eficiente e menos poluente, com foco na aplicação dessas transformações no contexto do transporte por aplicativo.

2.1 TECNOLOGIAS VEICULARES

O cenário automotivo global encontra-se em um processo de transição, passando da dependência dos motores a combustão interna para um futuro orientado por sistemas de propulsão, como a mobilidade elétrica, sendo esperado que essa transformação gere impactos em todo o ecossistema automotivo (Dombrowski; Engel, 2014). Os três principais tipos de sistemas de propulsão dos veículos elétricos são: os híbridos, os elétricos a bateria e os elétricos a célula de combustível.

Figura 1 — Sistemas de Propulsão



Fonte: Elaborada pelo autor com base em Doutor-ie (2024).

2.1.1 Propulsão híbrida

O sistema de propulsão híbrida funciona por meio da combinação de um motor a combustão e um motor elétrico, que trabalham em conjunto para movimentar o veículo de forma mais eficiente. Em situações de baixa velocidade ou pouca exigência de potência, o motor elétrico assume a tração, utilizando a energia armazenada na bateria (Goel; Sharma; Rathore, 2021). Quando há necessidade de maior desempenho, o motor a combustão entra em ação, podendo atuar sozinho ou em parceria com o motor elétrico. Durante as frenagens e desacelerações, parte da energia que seria desperdiçada é convertida em eletricidade e armazenada novamente na bateria, processo conhecido como frenagem regenerativa (Goel; Sharma; Rathore, 2021). Essa integração reduz o consumo de combustível e as emissões de poluentes em comparação com veículos exclusivamente a combustão.

Os veículos híbridos podem ser divididos em duas categorias principais, os HEV (*Hybrid Electric Vehicles*) e os PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*). Nos modelos HEV, todo o processo de geração e recarga de energia acontece de forma automática, sem a necessidade de ligação a uma fonte externa (Jyotheeswara Reddy; Natarajan, 2018). O sistema aproveita o funcionamento do motor a combustão para gerar eletricidade e também recupera parte da energia durante as frenagens regenerativas, armazenando-a novamente na bateria. Nos modelos PHEV, por sua vez, há a possibilidade de recarregar a bateria tanto durante o uso quanto por meio da ligação a uma fonte externa de energia, como uma tomada residencial ou estação de recarga (Jyotheeswara Reddy; Natarajan, 2018). Dessa forma, esses veículos podem operar predominantemente em modo elétrico até que a carga da bateria seja reduzida, contribuindo para a diminuição do consumo de combustível e das emissões de poluentes.

Nos últimos anos, observa-se um crescimento na adoção de veículos híbridos, impulsionado por características como maior eficiência energética, menor consumo de combustível e redução das emissões associadas ao uso veicular (Nayak; Satpathy, 2025). No contexto brasileiro, esse movimento ganha cada vez mais força. Em 2021, o país registrou a venda de 56.143 unidades de veículos híbridos convencionais (HEV) e 18.930 híbridos plug-in (PHEV). Apenas quatro anos depois, em 2025, esses números cresceram de forma expressiva, alcançando 216.663 unidades de HEV e 162.598 de PHEV (NeoCharge, 2025). Esses dados indicam aumento na adoção de

tecnologias híbridas, que funcionam como opção intermediária entre veículos a combustão e totalmente elétricos.

Do ponto de vista das emissões, os híbridos também apresentam vantagens relevantes. Quando associados ao uso de combustíveis como o biometano, os HEV podem alcançar uma média de 59,5 gCO₂e/km, enquanto os PHEV apresentam cerca de 85,8 gCO₂e/km. Em comparação, um veículo convencional a gasolina emite, em média, 269,3 gCO₂e/km (Gauto et al., 2023). Com base nesses valores, a substituição dos veículos tradicionais por modelos híbridos pode reduzir as emissões em mais de 65%, contribuindo de forma relevante para a diminuição das emissões do setor de transportes.

2.1.2 Propulsão elétrica a bateria (BEV)

Os Veículos Elétricos a Bateria (BEVs), definidos como automóveis integralmente elétricos, distinguem-se dos veículos híbridos pela ausência de um motor a combustão interna. Toda a tração é fornecida por um ou mais motores elétricos alimentados pela energia armazenada em um conjunto de baterias, o que caracteriza um sistema de propulsão baseado exclusivamente em eletricidade (Ntombela; Musasa; Moloj, 2023). Esses motores apresentam taxas de conversão elevadas quando comparadas às dos motores a combustão interna, utilizando entre 70% e 90% da energia disponível na bateria para a tração, enquanto sistemas convencionais as combustões convertem cerca de 25% da energia do combustível devido às perdas associadas ao calor e ao atrito (Jyotheeswara Reddy; Natarajan, 2018; Togun et al., 2025).

As emissões associadas aos Veículos Elétricos a Bateria (BEVs) resultam de duas etapas principais, que são a produção das baterias e a geração da eletricidade utilizada no carregamento (Mera et al., 2023). Avaliações de ciclo de vida indicam que a fabricação das baterias envolve processos com elevado consumo energético e uso de matérias-primas, o que contribui para o total de emissões do veículo ao longo da vida útil (Mera et al., 2023). No estágio de uso, as emissões dependem da intensidade de carbono da matriz elétrica, pois diferentes tecnologias de geração apresentam fatores específicos de emissão por kWh produzido (Mera et al., 2023). Essa relação ocorre porque cada fonte de energia, como hidrelétrica, eólica, solar ou termelétrica,

possui uma quantidade distinta de CO₂ incorporada na produção de eletricidade, o que faz com que o carbono associado à recarga do veículo varie conforme a composição da matriz (Mera et al., 2023). Considerando os fatores que caracterizam o sistema elétrico brasileiro, estima-se que um BEV do segmento médio apresente aproximadamente 52 gCO₂e por quilômetro rodado, valor que reflete diretamente o perfil de emissões da eletricidade utilizada no país (Mera et al., 2023).

A adoção de BEVs é influenciada por fatores como tempo de recarga, autonomia e disponibilidade de infraestrutura. O tempo de recarga ainda representa uma limitação em comparação ao abastecimento de veículos convencionais, podendo variar de várias horas em carregadores residenciais a menos de 30 minutos em estações de carregamento rápido. Outro aspecto relevante é a autonomia, que atualmente pode variar de aproximadamente 160 km a mais de 640 km por carga, dependendo do modelo e da capacidade da bateria. Embora os avanços tecnológicos tenham ampliado significativamente essa autonomia, ela ainda pode representar uma preocupação para usuários que realizam viagens de longa distância, especialmente quando comparada à autonomia e à rapidez de reabastecimento observadas em veículos elétricos a célula de combustível (Togun et al., 2025).

No contexto brasileiro, observa-se um crescimento expressivo da participação dos Veículos Elétricos a Bateria (BEVs) nos últimos anos. Em 2022, foram registradas 10.993 unidades, correspondentes a aproximadamente 9,1% do total de 121.129 veículos eletrificados existentes no país (NeoCharge, 2025). Em 2025, o volume de BEVs alcançou 137.619 unidades, equivalente a 25,1% da frota eletrificada nacional (NeoCharge, 2025).

2.1.3 Propulsão por célula combustível a hidrogênio

Os Veículos Elétricos de Célula a Combustível (FCEVs) utilizam um sistema de propulsão elétrica alimentado por hidrogênio. Nesses veículos, a eletricidade necessária para movimentar o motor é gerada internamente por meio de uma reação eletroquímica entre o hidrogênio e o oxigênio em uma célula combustível (Togun et al., 2025). Essa célula combustível produz energia elétrica, água e calor como subprodutos, e a energia gerada é então utilizada para carregar a bateria de alta tensão. Como não emitem gases de efeito estufa durante a operação, os FCEVs reduzem emissões diretas, embora o impacto total dependa da forma de obtenção do

hidrogênio. Apesar de os veículos a célula de combustível emitirem apenas vapor d'água durante a operação, a produção de hidrogênio pode ser intensiva em carbono quando realizada a partir do gás natural (Togun et al., 2025). Apesar do desafio relacionado a produção, o potencial de redução de emissões é significativo. Estudos indicam que, considerando todo o ciclo de vida, os veículos a célula de combustível podem emitir de 31% a 80% menos gases poluentes e consumir menos energia em comparação com os veículos tradicionais (Halder et al., 2024). Portanto, para que se tornem uma opção de redução das emissões, a produção de hidrogênio deve ser realizada por meio de fontes renováveis, como a eletrólise da água com energia solar ou eólica.

Contudo, a adoção em larga escala permanece limitada por alguns fatores. O custo de produção dos veículos, aliado aos desafios logísticos de transporte e armazenamento do hidrogênio, influencia o ritmo de expansão dessa tecnologia. Somado a isso, a infraestrutura de postos de abastecimento ainda é limitada e está em seu estágio inicial de desenvolvimento (Halder et al., 2024). Consequentemente, a disponibilidade comercial desses veículos concentra-se, atualmente, em mercados específicos, como o dos Estados Unidos (NeoCharge, s.d.).

2.1.4 Comparação das Tecnologias de Propulsão

A comparação entre as diferentes tecnologias veiculares híbrida, elétrica a bateria (BEV) e célula de combustível (FCEV), exige a consideração de aspectos como impacto ambiental, desempenho e viabilidade econômica. Cada tecnologia apresenta vantagens e limitações específicas que influenciam o seu potencial de aplicação no processo de transição para sistemas de transporte de baixa emissão.

Do ponto de vista ambiental, a avaliação pode ser conduzida por meio de diferentes abordagens. A primeira é a análise Tanque à Roda (Tank to Wheel – T2W), que considera apenas as emissões diretas geradas durante a operação do veículo. Já a análise Poço à Roda (Well to Wheel – W2W) amplia essa perspectiva ao incluir as emissões associadas à produção e ao fornecimento do combustível ou da eletricidade utilizados pelo veículo (Nandola et al., 2025). Uma abordagem ainda mais abrangente é a Análise do Ciclo de Vida (ACV), que incorpora também as emissões decorrentes da fabricação, manutenção e descarte dos veículos, além daquelas relacionadas à produção de energia. Dessa forma, a ACV permite avaliar o impacto ambiental total

das diferentes tecnologias veiculares ao longo de toda sua vida útil (Mera et al., 2023). Os resultados dessas análises variam conforme o país estudado, uma vez que dependem da composição da matriz energética e das características de uso predominantes em cada região (Nandola et al., 2025).

No aspecto do desempenho operacional, fatores como autonomia e tempo de reabastecimento exercem influência direta sobre a adequação das tecnologias veiculares a diferentes tipos de uso. Os veículos híbridos e aqueles movidos a célula de combustível apresentam características intermediárias nesses quesitos. Os FCEVs se mostram particularmente adequados para aplicações que exigem longas distâncias, pois combinam grande alcance e reabastecimento rápido, com tempos similares aos dos veículos a combustão (Togun et al., 2025). Já os híbridos representam uma solução de transição, por integrarem o motor elétrico e o motor a combustão, oferecendo eficiência energética sem depender totalmente de infraestrutura de recarga (Veza et al., 2023).

Sob a ótica econômica, dois fatores se destacam: o custo de aquisição dos veículos e o investimento necessário em infraestrutura. As tecnologias elétricas, sejam BEV, PHEV ou FCEV, ainda apresentam valores iniciais mais elevados em razão do preço das baterias e dos sistemas de armazenamento de energia (Togun et al., 2025; Veza et al., 2023). Além disso, exigem infraestrutura específica para operação, como estações de recarga elétrica ou de abastecimento de hidrogênio. Em contrapartida, os veículos híbridos convencionais demandam menor investimento em infraestrutura externa. Dessa forma, em uma etapa intermediária do processo de transição para tecnologias de menor emissão, a adoção de veículos híbridos constitui uma alternativa viável (Togun et al., 2025; Veza et al., 2023).

O Quadro 1 apresenta a comparação entre as principais tecnologias veiculares, sintetizando os aspectos ambientais, técnicos e econômicos de cada uma delas.

Quadro 1 — Avaliação comparativa das principais tecnologias veiculares.

	ICE	HEV	PHEV	BEV	FCEV
T2W (Tanque à Roda)	Ruim	Moderado	Bom	Excelente	Excelente
W2W (Poço à Roda)	Ruim	Ruim	Bom	Bom	Bom
ACV (Análise de Ciclo de Vida)	Ruim	Ruim	Bom	Excelente	Bom
Alcance	Excelente	Excelente	Excelente	Moderado	Bom
Tempo de reabastecimento	Excelente	Excelente	Moderado	Ruim	Bom
Preço	Excelente	Bom	Moderado	Ruim	Ruim
Custo de Infraestrutura	Excelente	Excelente	Bom	Ruim	Moderado

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cornet et al. (s.d.), Mera et al. (2023).

Embora o Quadro 1 indique desempenho semelhante entre PHEVs, BEVs e FCEVs nas análises W2W, estudos baseados em Análise do Ciclo de Vida (ACV) apontam diferenças mais significativas entre essas tecnologias. Para o contexto brasileiro, Mera et al. (2023) verificaram que os veículos elétricos a bateria apresentam as menores emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida, superando veículos híbridos, híbridos plug-in e veículos movidos a célula de combustível abastecidos com hidrogênio produzido a partir de combustíveis fósseis.

2.2 TRANSPORTE POR APLICATIVO

O transporte por aplicativo, também conhecido como *ride-hailing*, consiste em um modelo de mobilidade urbana que utiliza plataformas digitais para conectar motoristas e passageiros de forma imediata. Essas plataformas funcionam como intermediárias, facilitando a comunicação e a realização das viagens por meio de aplicativos móveis (Teixeira; Paraizo, 2020). Nessa modalidade de transporte, o passageiro solicita uma carona diretamente pelo aplicativo, que identifica e envia a solicitação aos motoristas disponíveis mais próximos, os quais podem aceitar ou recusar a corrida (Rayle et al., 2016). Esse sistema funciona de forma semelhante ao táxi, mas oferece maior conveniência, ao permitir que o usuário solicite uma viagem em tempo real pelo celular, com informações sobre o trajeto, o motorista e o valor estimado da corrida. Além disso, o uso de algoritmos que equilibram a oferta e a demanda torna o serviço mais dinâmico e acessível (Rayle et al., 2016).

Em 2009, a empresa Uber, fundada em São Francisco, nos Estados Unidos, introduziu uma proposta inovadora que possibilitava aos passageiros requisitar viagens com poucos toques no celular, eliminando a necessidade de procurar táxis nas ruas ou contatar centrais de atendimento (Uber, 2026). A partir de 2010, esse formato de serviço de transporte começou a ganhar projeção e se estabeleceu como uma nova alternativa para a mobilidade urbana. Seu avanço foi impulsionado pelo progresso das tecnologias digitais, especialmente pela disseminação dos smartphones com acesso à internet e pela integração de sistemas de geoposicionamento, elementos importantes para a operação dessas plataformas (Haddad et al., 2019).

O sucesso do modelo criado pela Uber impulsionou o surgimento de diversas empresas semelhantes em diferentes partes do mundo. Plataformas como Lyft, Ola e

DiDi Chuxing, consolidaram-se como algumas das principais representantes do setor, oferecendo serviços que vão além do transporte individual, abrangendo também modalidades de mobilidade como entregas e transporte compartilhado (Gil; Abe, 2025). No contexto brasileiro, um levantamento de Oliveira (2021) revelou que, em agosto de 2020, as duas maiores operadoras de ride-hailing, Uber e 99, estavam presentes em 1.123 municípios do país. Contudo, apesar de essas cidades cobrirem a totalidade dos municípios com mais de 500 mil habitantes e 80% daqueles com população entre 100 mil e 500 mil habitantes, a cobertura em cidades menores era significativamente mais limitada. Para municípios com população entre 20 mil e 50 mil habitantes, a presença era de aproximadamente 22%, e para aqueles com menos de 20 mil moradores, a cobertura era de apenas 12%.

2.2.1 Eletrificação das Frotas

As plataformas de transporte por aplicativo têm demonstrado interesse na eletrificação de suas frotas, buscando reduzir as emissões de gases poluentes e o impacto ambiental de suas operações. A Uber, por exemplo, estabeleceu metas ambiciosas, prevendo alcançar uma frota composta integralmente por veículos elétricos no Canadá, nos Estados Unidos e na Europa até 2030, além de expandir esse objetivo para o restante do mundo até 2040 (Uber, s.d.). Para atingir esses resultados, a empresa desenvolve iniciativas como o programa “Juntos no Caminho para Zero Emissões”, implementado nos Estados Unidos, que oferece incentivos financeiros para estimular a adoção de veículos elétricos por motoristas parceiros. Entre as medidas adotadas, destaca-se a parceria com a plataforma *TrueCar*, por meio da qual motoristas que realizam a transição para veículos elétricos podem receber um incentivo financeiro de US\$ 1.000, além de benefícios adicionais de até US\$ 2.000 após a aquisição do veículo (Xu *et al.*, 2024). Além disso, a Uber destinou £5 milhões em Londres para a instalação de estações de recarga, facilitando o acesso dos motoristas à infraestrutura necessária para operar veículos elétricos (Xu *et al.*, 2024). Essas medidas evidenciam o esforço da empresa em promover a transição para uma frota com menor emissão de dióxido de carbono.

Assim como a Uber, a DiDi Chuxing, principal empresa chinesa de mobilidade, também tem investido na eletrificação de sua frota e na redução das emissões de gases de efeito estufa. A companhia lançou, em 2020, cerca de 1 milhão de veículos

elétricos (EVs) em operação em seus serviços de transporte por aplicativo, consolidando-se como uma das pioneiras na adoção de tecnologias de mobilidade com menores emissões em larga escala (Zhang et al., 2025). A meta da empresa é expandir esse número para 10 milhões de veículos elétricos até 2028, reforçando seu compromisso com a transição energética e a redução de impactos ambientais (Zhang et al., 2025).

A DiDi Chuxing destaca-se entre as empresas que vêm promovendo a eletrificação dos serviços de transporte por aplicativo. De acordo com seu Relatório de Sustentabilidade de 2024, a empresa possuía mais de 6 milhões de veículos de nova energia cadastrados em sua plataforma na China, sendo que aproximadamente 68% da quilometragem percorrida nas viagens já era realizada por veículos elétricos. Como resultado dessas iniciativas, a mobilidade de baixa emissão promovida pela plataforma contribuiu para evitar cerca de 7,94 milhões de toneladas de CO₂. Além da ampliação da participação de veículos eletrificados, a empresa também investe em infraestrutura de recarga, parcerias estratégicas e soluções baseadas em análise de dados para aumentar a eficiência operacional e apoiar a transição para sistemas de transporte mais sustentáveis (DiDi Global Inc., 2025).

2.3 ESTUDOS E PROJETOS SOBRE ELETRIFICAÇÃO DO RIDE-HAILING

A eletrificação do *ride-hailing* tem sido objeto de pesquisas em diferentes contextos urbanos. Esses estudos procuram avaliar os impactos ambientais da substituição de veículos movidos a combustão por elétricos, com foco principal na redução das emissões de gases de efeito estufa. Embora apresentem metodologias variadas, essas investigações geralmente buscam estimar o potencial de mitigação das emissões a partir da adoção de frotas eletrificadas, considerando as especificidades de cada sistema de transporte e as condições locais de operação.

Entre os trabalhos recentes, destaca-se o estudo realizado em Toronto entre os anos de 2020 e 2023. Segundo Bazzo, Saleh e Hatzopoulou (2025), a pesquisa analisou a evolução das emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor de transporte por aplicativo utilizando uma base de dados composta por 179 milhões de viagens registradas no período, além de 157 milhões de deslocamentos sem passageiros e informações detalhadas sobre a frota de veículos cadastrados nas plataformas, incluindo modelo, ano e tipo de combustível. O cálculo das emissões foi

realizado a partir da distância percorrida e da velocidade média dos trajetos, utilizando fatores de emissão fornecidos pelo simulador de emissões de veículos motorizados MOVES, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2023). O modelo considerou as condições reais de tráfego urbano e a composição veicular da província de Ontário, permitindo estimar as emissões totais e projetar cenários alternativos de eletrificação. Além disso, a comparação entre o cenário atual, caracterizado pela predominância de veículos a gasolina e híbridos, e diferentes estratégias de adoção de veículos elétricos possibilitou quantificar o potencial de redução das emissões do setor.

Outro estudo de destaque foi conduzido na China e propôs um quadro analítico baseado em dados empíricos provenientes de três fontes distintas. Segundo Zhang et al. (2025), a pesquisa utilizou medições em tempo real das emissões de veículos a combustão obtidas por meio de equipamentos portáteis (PEMS), registros de consumo energético de veículos elétricos disponibilizados por um centro público de monitoramento em Xangai e trajetórias de viagens extraídas da base de dados da plataforma Didi Chuxing. Para estimar as emissões de CO₂, os autores aplicaram modelos de aprendizado profundo do tipo LSTM (*Long Short-Term Memory*), uma arquitetura de rede neural recorrente capaz de identificar padrões e dependências temporais em séries de dados. No caso dos veículos a combustão, o modelo utilizou variáveis como velocidade média, aceleração, tempo de marcha lenta e potência específica do motor para prever as emissões diretas. Já para os veículos elétricos, o consumo de energia por quilômetro foi estimado e convertido em emissões de CO₂ com base nos fatores médios da matriz elétrica de cada região. De acordo com Zhang et al. (2025), essa abordagem permitiu uma comparação direta entre as emissões de CO₂ associadas a uma mesma viagem quando realizada por um veículo convencional e por um veículo elétrico, evidenciando o potencial de redução das emissões alcançado pela eletrificação das frotas de ride-hailing.

Na Universidade da Califórnia, em Davis, foi desenvolvido um estudo no qual a emissão de gases de efeito estufa associadas a veículos elétricos foram calculadas a partir de dados reais de recarga e da intensidade de emissões da rede elétrica da Califórnia. Segundo Jenn (2019), o trabalho utilizou um conjunto de informações composto por mais de 12 milhões de eventos de carregamento registrados entre 2014 e 2018. As emissões foram estimadas individualmente para cada evento de recarga por meio do produto entre a energia consumida (kWh) e o fator de emissão da rede

elétrica (kgCO₂/kWh) correspondente à hora em que o carregamento ocorreu. Esse fator foi obtido a partir de dados do *California Independent System Operator* (CAISO), que disponibiliza registros horários da carga elétrica e das emissões associadas à geração de energia no estado.

O cálculo considerou a variação temporal da intensidade de carbono da matriz elétrica, uma vez que as emissões da rede são menores durante o dia, quando há maior participação da energia solar, e mais elevadas à noite, devido ao aumento da geração termelétrica. Assim, os valores oscilaram entre 150 e 200 gCO₂/kWh durante o período diurno e 270 a 350 gCO₂/kWh no período noturno (Jenn, 2019). Além disso, o estudo estimou um cenário contrário, calculando as emissões que seriam geradas caso os mesmos veículos utilizados nos serviços de transporte por aplicativo fossem movidos a gasolina. Para isso, foi adotada uma eficiência média de 29,4 milhas por galão (MPG), representativa dos veículos comumente empregados por motoristas dessas plataformas, e um fator de emissão de 8,887 kg CO₂ por galão de combustível, conforme valores estabelecidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (Jenn, 2019). Essa metodologia permitiu comparar diretamente as emissões reais provenientes da eletricidade com aquelas que seriam emitidas pela combustão de gasolina, possibilitando quantificar o potencial de redução de emissões obtido pela eletrificação da frota de transporte por aplicativo.

Os resultados obtidos nos estudos sobre a eletrificação de frotas de *ride-hailing* demonstram reduções nas emissões de CO₂. De modo geral, constatou-se que a substituição de veículos a combustão por elétricos nesse setor gera benefícios ambientais maiores do que na frota particular. A eletrificação de um veículo utilizado em serviços de transporte por aplicativo reduz as emissões de CO₂ quase três vezes mais do que a eletrificação de um veículo de uso privado. Em média, cada veículo elétrico de *ride-hailing* evitou cerca de 38,7 kg de CO₂ por dia, totalizando 1.142 toneladas de CO₂ economizadas entre 2017 e 2018 (Jenn, 2019). Outro estudo apontou que eletrificar 20% da frota de veículos de transporte por aplicativo, desde que pertencentes aos motoristas que percorrem as maiores distâncias, pode reduzir até 43% das emissões totais. Em contraste, eletrificar 20% dos veículos dos motoristas que rodam menos gera apenas 5,1% de redução (Bazzo; Saleh; Hatzopoulou, 2025).

As análises também evidenciam diferenças entre cidades. Em Chengdu, praticamente todas as viagens resultaram em menores emissões, com uma média de

239 toneladas de CO₂ evitadas por dia. Já em Xi'an, a média diária de emissões evitadas foi de aproximadamente 135 toneladas de CO₂ (Zhang et al., 2025). No caso de Xi'an, como a matriz energética é mais dependente de combustíveis fósseis, 98,6% das viagens apresentaram reduções de emissões, embora alguns casos tenham mostrado aumento. Isso ocorreu devido à composição mais poluente da matriz energética local e às maiores velocidades médias de condução, que reduzem a eficiência e, consequentemente, as reduções de emissões (Zhang et al., 2025).

2.3.1 Emissões dos veículos

2.3.1.1 Emissões dos veículos a combustão

O cálculo das emissões é realizado de diferentes formas nos estudos analisados. No estudo desenvolvido em Toronto, as emissões de gases de efeito estufa (E_{GHG}) a partir da distância percorrida pelos veículos (*Vehicle Kilometers Traveled* – VKT), da velocidade média e de fatores de emissão específicos (*Emission Factors* – EF) (Bazzo; Saleh; Hatzopoulou, 2025). Nesse procedimento, as emissões são obtidas pelo produto entre a distância total percorrida e o fator de emissão correspondente à faixa de velocidade média do veículo, conforme apresentado na Equação 1.

$$E_{GHG} = VKT * EF(Speed) \quad (1)$$

Onde:

VKT = *Vehicle Kilometers Traveled*;

EF(Speed) = *Fator de emissão de gases de efeito estufa (gCO₂e/km)*.

Os fatores de emissão utilizados no estudo são derivados do modelo *Motor Vehicle Emission Simulator* (MOVES), considerando condições típicas de vias urbanas de Toronto e a distribuição etária da frota de automóveis da província de Ontário (Bazzo; Saleh; Hatzopoulou, 2025).

Já no estudo da Califórnia, as emissões dos veículos a combustão foram estimadas a partir da relação entre a distância percorrida pelos motoristas e o fator de emissão da gasolina (Jenn, 2019). Para isso, a distância total percorrida (*Vehicle Miles Traveled* – VMT) foi determinada e inserida em uma expressão que calcula o volume

de combustível que um veículo convencional consumiria ao percorrer essa mesma quilometragem. Adotou-se a eficiência média dos veículos utilizados em serviços de ride-hailing na Califórnia, equivalente a 29,4 milhas por galão (MPG) (Jenn, 2019). A partir desse consumo estimado, as emissões foram calculadas multiplicando-se o volume de gasolina requerido pelo fator de emissão estabelecido pela EPA, igual a 8.887 g de CO₂ por galão de combustível queimado (Jenn, 2019). Esse processo é representado pela Equação 2:

$$Emissions_j^{ordgas} = \frac{em.rate^{gas} * VMT_j}{MPG} \quad (2)$$

Onde:

VMT = Vehicle Miles Traveled;

MPG = Miles per gallon;

em.rate = Fator de emissões de dióxido;

j = índice associado a cada observação de viagem.

Assim, o estudo quantificou as emissões atribuídas ao uso de veículos movidos a combustão com base no percurso realizado e nas características médias de consumo dos automóveis utilizados nos serviços analisados.

2.3.1.2 Emissões dos veículos elétricos

No estudo da Califórnia, as emissões associadas aos veículos elétricos foram calculadas a partir da energia demandada em cada evento de recarga e do fator horário de emissões da rede elétrica. Para cada carregamento, o relatório utilizou o valor de energia consumida (kWh), registrado pelos provedores de infraestrutura de recarga, e o multiplicou pelo fator de emissão correspondente ao horário específico em que a recarga ocorreu (Jenn, 2019). Esses fatores foram obtidos a partir dos dados horários do *California Independent System Operator* (CAISO), que disponibiliza a intensidade média de carbono da rede elétrica ao longo do dia. De acordo com esses dados, a intensidade de emissões varia substancialmente entre períodos diurnos e noturnos, apresentando valores mais baixos entre 6h e 18h devido à elevada participação de geração solar, e valores mais altos durante a noite (Jenn, 2019). A Equação 3 relaciona a energia elétrica consumida durante a recarga do veículo com

o fator horário de emissão da rede elétrica, permitindo estimar as emissões de dióxido de carbono associadas ao processo de carregamento. Dessa forma, as emissões variam conforme a quantidade de energia utilizada e a intensidade de carbono da matriz elétrica no instante da recarga.

$$emissions_i = kWh_{it} \times gridEmissions_t \quad (3)$$

Onde:

kWh_t = Energia elétrica consumida no evento de recarga (kWh);

gridEmissions = fator horário de emissão da rede elétrica (kgCO₂/kWh);

i = índice correspondente a cada evento individual de recarga;

t = índice temporal associado ao horário da recarga.

Esse procedimento permitiu capturar a variação temporal da intensidade de carbono da matriz elétrica da Califórnia, resultando em uma estimativa das emissões associadas ao uso de veículos elétricos ao longo do período analisado, considerando simultaneamente a demanda energética de cada recarga e a intensidade de emissões da rede elétrica no respectivo horário.

2.4 POLÍTICAS DE INCENTIVO À ELETRIFICAÇÃO DO *RIDE-HAILING*

A eletrificação do setor de *ride-hailing* depende da criação de políticas públicas que reduzam barreiras de entrada e estimulem motoristas e empresas a adotarem veículos elétricos. Experiências internacionais mostram que subsídios financeiros, incentivos fiscais, regulamentações específicas e investimentos em infraestrutura têm sido associados ao avanço desse processo de transição (Du et al., 2020).

Na China, desde 2009, o governo promove medidas de apoio à aquisição e ao uso de veículos elétricos, como subsídios diretos, isenção de taxas de compra e expansão da rede de recarga. Esse conjunto de políticas contribuiu para acelerar a eletrificação das frotas de táxis e veículos de aplicativo em cidades como Shenzhen (Zhou et al., 2021). A experiência também apresentou desafios, já que a imposição de regras excessivamente rígidas, sem considerar a viabilidade econômica dos motoristas, gerou preocupações relacionadas à viabilidade econômica da atividade e aumentou a intenção de abandono entre parte dos motoristas (Du et al., 2020). Dessa forma, observa-se que a implementação de políticas públicas tem o potencial de

impulsionar a eletrificação do *ride-hailing*, mas pode igualmente gerar barreiras quando não leva em conta as condições financeiras dos motoristas.

Além dos subsídios diretos, a regulação exerce influência no processo de eletrificação. Evidências indicam que a intenção de adoção por parte dos motoristas está diretamente associada à percepção de valor econômico das políticas públicas (Zhou et al., 2021). A isenção de impostos de compra para veículos elétricos abaixo de aproximadamente R\$ 225 mil, somada a subsídios médios em torno de R\$ 14 mil por veículo em 2020, reduziu de forma significativa o custo operacional em relação aos veículos a combustão. Essa diferença resultou em economias de até 62,5% nos gastos mensais com energia quando comparados ao combustível fóssil, o que torna a eletrificação especialmente vantajosa para motoristas de aplicativos que percorrem grandes distâncias diariamente (Zhou et al., 2021).

A infraestrutura de carregamento exerce influência direta sobre o ritmo de eletrificação do setor de transporte, sendo que a disponibilidade de pontos de recarga é citada como um fator para a expansão dessa tecnologia. Políticas que associam o incentivo à compra de veículos elétricos e expansão da rede de carregamento alcançam resultados mais consistentes, pois reduzem os riscos percebidos pelos motoristas e fortalecem a confiança na tecnologia (Du et al., 2020).

Em Florianópolis, começam a surgir iniciativas alinhadas às experiências internacionais de promoção da mobilidade elétrica. Nesse contexto, destaca-se o Projeto de Lei nº 19.597/2025, que propõe a criação de uma Política Municipal de Mobilidade Elétrica voltada à estruturação da transição para sistemas de transporte mais sustentáveis (Florianópolis, 2025). Entre as medidas previstas, estão a ampliação da infraestrutura de recarga em áreas estratégicas da cidade e a organização de informações relacionadas a esses equipamentos, contribuindo para o planejamento urbano e para o desenvolvimento ordenado da mobilidade elétrica no município (Florianópolis, 2025).

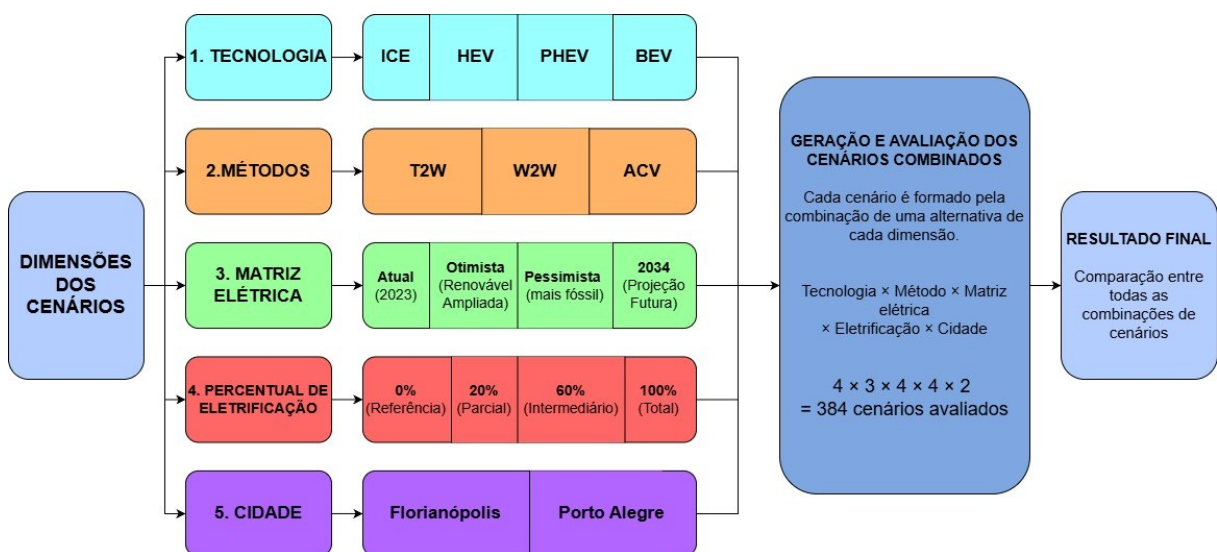
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, de abordagem quantitativa e com objetivos exploratórios. Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de um estudo de caso sobre a eletrificação de frotas no setor de transporte por aplicativo. A pesquisa foi realizada com base em dados primários e secundários. Os dados primários foram obtidos por meio da aplicação de questionários aos motoristas de transporte por aplicativo, enquanto os dados secundários foram coletados em estudos e relatórios relacionados à eletrificação de frotas e às emissões do setor de transporte.

3.1 CENÁRIOS ANALISADOS

Para avaliar os impactos da substituição dos veículos a combustão utilizados no transporte por aplicativo por modelos eletrificados, foram definidos cinco cenários distintos, cada um representando condições específicas relacionadas tanto ao perfil da frota quanto à composição da matriz energética brasileira. A comparação entre esses cenários permite compreender como diferentes combinações de fatores influenciam o potencial de redução de emissões de dióxido de carbono equivalente. A Figura 2 apresenta a estrutura geral dos cenários considerados neste estudo, bem como as variáveis utilizadas para a construção das combinações analisadas.

Figura 2 — Cenários analisados



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O primeiro cenário tem como objetivo avaliar quais tecnologias veiculares são mais adequadas para substituir os veículos ICE no *ride-hailing*. Para isso, são consideradas diferentes opções de motorização, incluindo HEV, PHEV e veículos BEV. Considerar tecnologias além dos veículos totalmente elétricos permite ampliar a análise para soluções intermediárias de eletrificação, como os veículos híbridos, que demandam menor infraestrutura de recarga e apresentam menor barreira de adoção no curto prazo. Dessa forma, o cenário possibilita avaliar se a redução de emissões proporcionada por essas tecnologias intermediárias é suficiente para justificar sua adoção como etapa de transição ou se a eletrificação total da frota representa a alternativa mais eficaz, ou mesmo a única, para a mitigação das emissões no setor de *ride-hailing*. Abordagens semelhantes já foram exploradas na literatura. Jenn (2019) avalia os benefícios da adoção de veículos BEVs em serviços de *ride-hailing*, enquanto Bazzo, Saleh e Hatzopoulou (2025) analisam diferentes tecnologias veiculares, incluindo veículos híbridos e elétricos.

O segundo cenário está relacionado à metodologia de contabilização das emissões associadas aos veículos, uma vez que os resultados obtidos dependem diretamente do método adotado na análise. Nesse contexto, destacam-se as abordagens T2W, W2W e ACV que se diferenciam pelas etapas do ciclo energético consideradas na estimativa das emissões de CO₂.

O método T2W considera exclusivamente as emissões diretas associadas à fase de operação dos veículos, ou seja, aquelas geradas durante o seu uso nas vias. Nessa abordagem, os veículos a combustão interna apresentam emissões decorrentes da queima do combustível no motor, liberadas pelo sistema de escapamento, principalmente na forma de dióxido de carbono. Em contraste, os veículos 100% elétricos são considerados livres de emissões durante a operação, uma vez que não ocorre combustão de combustível nem há a presença de sistema de escapamento, resultando em emissões diretas nulas (Nandola et al., 2025). No entanto, ao restringir a análise à fase operacional, o método T2W desconsidera as emissões associadas às etapas anteriores da cadeia energética, como a produção dos combustíveis ou a geração da eletricidade utilizada na recarga. Essa limitação é reconhecida por Bazzo, Saleh e Hatzopoulou (2025), cuja análise se restringe às emissões de escapamento, não contemplando todo o ciclo energético.

Com o objetivo de ampliar o escopo da avaliação e representar de forma mais abrangente as emissões associadas, este trabalho adota, além da abordagem T2W,

a abordagem W2W. Esse método considera as emissões de CO₂ ao longo da cadeia energética, desde a obtenção dos insumos até o uso final da energia (Nandola et al., 2025). Dessa forma, no caso dos combustíveis líquidos, são incorporadas as emissões provenientes da extração do petróleo, refino, transporte e combustão final. Para os veículos elétricos, incluem-se as emissões relacionadas à geração da eletricidade, perdas de transmissão e consumo no veículo. Para a operacionalização desta etapa, serão realizadas adaptações metodológicas com base em Jenn (2019), adequando os fatores de emissão ao contexto e aos cenários analisados neste estudo.

Por fim, visando conferir maior robustez analítica e realismo às estimativas ambientais, será empregada também uma ACV. Diferentemente das abordagens anteriores, a ACV incorpora não apenas as emissões operacionais e energéticas, mas também aquelas associadas à fabricação dos veículos, produção de baterias, manufatura de componentes, produção dos combustíveis e geração da eletricidade (Mera et al., 2023). Neste trabalho, a ACV será estruturada a partir da integração dos resultados obtidos nas metodologias T2W e W2W com dados secundários disponibilizados pelo *International Council on Clean Transportation* (ICCT), especialmente referentes à fabricação veicular, produção de baterias e etapas industriais correlatas (Mera et al., 2023). Assim, será possível estimar as emissões totais em termos de CO₂eq, proporcionando uma comparação mais completa entre as tecnologias analisadas.

O terceiro cenário considera diferentes perfis de matriz elétrica, uma vez que as emissões associadas aos veículos eletrificados estão diretamente relacionadas à produção da eletricidade utilizada em sua recarga. Segundo Zhang et al. (2025), a eletrificação do transporte por aplicativo pode resultar tanto em redução quanto em aumento das emissões de dióxido de carbono, a depender do fator de emissão da rede elétrica local. Dessa forma, os resultados obtidos não dependem apenas da eficiência energética dos veículos, mas também da composição da matriz elétrica que os alimenta (Zhang et al., 2025).

Nesse contexto da dependência das emissões dos veículos elétricos em relação à matriz elétrica, a análise contempla inicialmente o cenário atual brasileiro, caracterizado por uma matriz elétrica predominantemente renovável, com aproximadamente 89% de participação de fontes como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), essa

configuração resulta em um fator médio de emissão de 49 kgCO₂eq/MWh, valor inferior ao observado em países cuja geração elétrica é majoritariamente baseada em carvão ou gás natural (EPE, 2024). Esse cenário permite avaliar as emissões dos veículos eletrificados em um contexto realista e representativo da realidade nacional.

Adicionalmente, são considerados cenários otimista e pessimista com base em variações históricas do fator de emissão da matriz elétrica brasileira. O cenário otimista é representado pelo menor valor de emissão registrado nos últimos anos, correspondente ao ano de 2011, no qual o fator médio foi de aproximadamente 0,0292 kgCO₂/kWh, conforme dados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (Brasil, 2024). Esse cenário reflete condições favoráveis do sistema elétrico, com elevada participação de fontes renováveis e reduzida necessidade de despacho de usinas termelétricas.

Por outro lado, o cenário pessimista é definido a partir de um período com maior intensidade de emissões, sendo adotado o valor médio observado no ano de 2014, de aproximadamente 0,1355 kgCO₂/kWh (Brasil, 2024). Esse tipo de cenário é particularmente relevante para representar situações em que o sistema elétrico enfrenta condições hidrológicas desfavoráveis, como períodos de seca, que reduzem a geração hidrelétrica e exigem maior acionamento de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Como consequência, há um aumento na intensidade de carbono da eletricidade gerada.

Ressalta-se que os dados históricos obtidos no Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), conforme informações do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brasil, 2024), são originalmente apresentados em kgCO₂/kWh, enquanto os valores mais recentes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024) utilizam a métrica kgCO₂eq/kWh. Para fins de padronização metodológica e comparação entre cenários, os valores do SIRENE foram considerados equivalentes em CO₂eq, assumindo-se participação relativamente reduzida de outros gases de efeito estufa na composição das emissões do setor elétrico brasileiro.

A consideração desses cenários permite delimitar os limites inferior e superior das emissões associadas à recarga de veículos elétricos, além de incorporar situações críticas do sistema elétrico brasileiro na análise. Dessa forma, torna-se possível avaliar não apenas as condições médias de operação, mas também cenários adversos, nos quais os benefícios ambientais da eletrificação podem ser reduzidos.

Além desses cenários, a análise incorpora uma perspectiva de médio prazo a partir das projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética. Esse relatório apresenta diretrizes e estimativas para a evolução da matriz elétrica brasileira ao longo de um horizonte de dez anos, permitindo avaliar possíveis mudanças na composição das fontes de geração. Conforme apresentado na Tabela 1, observa-se a manutenção da elevada participação de fontes renováveis, com crescimento das capacidades instaladas de energia eólica e solar, estabilidade da biomassa e expansão moderada da geração nuclear, enquanto a capacidade termelétrica permanece constante (EPE, 2024).

Tabela 1 — Plano Decenal EPE

FONTE	Cap. Instalada 2024 (GW)	Cap. Instalada 2034 (GW)
Hidráulica	110	115
Térmelétrica	22	22
Éolica	32	36
Solar	16	20
Nuclear	2	3
Biomassa	17	17

Fonte: Elaborada pelo autor com base em EPE (2024).

Nesse contexto das projeções do planejamento decenal, observa-se uma leve redução na participação de fontes renováveis na matriz elétrica, passando de aproximadamente 89% em 2024 para cerca de 86% em 2034. Apesar dessa diminuição relativa, a matriz brasileira permanece majoritariamente renovável. Em paralelo, projeta-se um aumento nas emissões associadas à geração de eletricidade, atingindo cerca de 54,3 kg CO₂eq/MWh em 2034, refletindo a maior participação relativa de fontes não renováveis no sistema (EPE, 2024).

A consideração desse cenário prospectivo possibilita a comparação dos resultados obtidos no cenário atual com aqueles esperados para a matriz elétrica brasileira no horizonte de 2034. Dessa forma, torna-se possível avaliar se os padrões de emissões associados à eletrificação do transporte por aplicativo se mantêm ao longo do tempo, bem como analisar a sensibilidade dos resultados às transformações previstas no setor elétrico nacional

A Tabela 2 apresenta os valores de EF_{elet} para os diferentes cenários propostos, considerando as emissões associadas à matriz energética brasileira atual,

à matriz projetada pelo Plano Decenal da EPE para o ano de 2034 e a um cenário pessimista e otimista.

Tabela 2 — Valor de EF em diferentes cenários

Cenário	Descrição	EF_{elet} (kg CO ₂ eq/MWh)	EF_{elet} (kg CO ₂ eq/kWh)	Fonte
Atual (2024)	Matriz elétrica real	49,0	0,049	EPE (2024)
Otimista (2011)	Matriz elétrica projetada	29,2	0,029	Brasil (2024)
Pessimista (2014)	Matriz elétrica projetada	135,5	0,135	Brasil (2024)
Projetada (2034)	Matriz elétrica projetada	54,3	0,054	EPE (2024)

Fonte: Elaborada pelo autor com base em EPE (2024) e Brasil (2024).

O quarto cenário avalia diferentes níveis de eletrificação das viagens realizadas no serviço de transporte por aplicativo, com o objetivo de estimar os impactos dessa transição sobre as emissões de CO₂ do sistema. Inicialmente, considera-se um cenário de referência, no qual nenhuma viagem é realizada por veículos elétricos (0%), representando a situação atual do sistema. A partir desse referencial, são simulados níveis progressivos de eletrificação das viagens, correspondentes a 20%, 60% e 100% do total de viagens realizadas por veículos elétricos. Além da análise baseada na proporção de viagens eletrificadas, realiza-se uma análise de eletrificação direcionada. Nessa etapa, a substituição por veículos elétricos é concentrada em grupos específicos de motoristas selecionados de acordo com suas características operacionais. São avaliados cenários nos quais aproximadamente 8%, 17% e 25% dos motoristas passam a utilizar veículos elétricos. O objetivo é verificar se a priorização de motoristas com maior participação na atividade pode produzir reduções de emissões mais expressivas do que aquelas obtidas por estratégias não direcionadas. Essa abordagem encontra respaldo na literatura recente. Bazzo, Saleh e Hatzopoulou (2025), ao analisarem o sistema de transporte por aplicativo da cidade de Toronto, demonstram que a eletrificação dos motoristas com maior intensidade de uso do veículo é capaz de gerar reduções desproporcionalmente elevadas das emissões totais do sistema. Os resultados evidenciam que o perfil operacional dos motoristas exerce papel determinante no potencial de mitigação das emissões e reforçam a importância de estratégias de eletrificação direcionadas para maximizar os benefícios ambientais.

O quinto cenário avalia como as características operacionais das viagens por transporte por aplicativo influenciam o potencial de eletrificação da atividade. A análise considera que a distância percorrida, o horário das viagens e a distribuição semanal da demanda variam entre cidades e entre perfis de operação. As diferenças entre cidades são relevantes porque determinam o volume diário de deslocamentos e, consequentemente, a autonomia necessária, o consumo de energia e a viabilidade de substituição de veículos convencionais por elétricos. Em Porto Alegre, a extensão média das viagens é de aproximadamente 5,1 km (Cassel, 2018), enquanto no Rio de Janeiro esse valor é de cerca de 7,9 km (Alves, 2021). Esses valores indicam diferenças nos padrões de deslocamento entre os centros urbanos analisados.

O horário também altera o perfil das viagens. No Rio de Janeiro, as viagens realizadas durante a madrugada registram distância média de aproximadamente 10,2 km. No pico da tarde, a distância média das viagens é de cerca de 7,2 km (Alves, 2021). Essas variações indicam que a distância e o tempo de viagem não permanecem constantes ao longo do dia, o que pode influenciar a demanda de energia e a autonomia necessária para a operação de veículos elétricos. Os dados apresentados na Tabela 3 evidenciam a distribuição das viagens por período do dia, bem como as respectivas distâncias e tempos médios de viagem, indicando variações desses indicadores ao longo do dia.

Tabela 3 — Distribuição das viagens por horário do dia no Rio de Janeiro

Horário	Percentual das viagens	Distância média percorrida (em metros)	Tempo médio de viagem (em minutos)
Madrugada	5,10%	10.247	16
Pico da manhã	15,40%	8.871	19
Entre picos	33,80%	7.780	18
Pico da tarde	26,30%	7.227	23
Noite	19,40%	7.780	16

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Alves (2021).

Adicionalmente, o número de viagens realizadas por transporte por aplicativo varia também de acordo com o dia da semana, refletindo diferenças nos padrões de deslocamento ao longo do período semanal. No caso do município de Porto Alegre, conforme apresentado na Tabela 4, observa-se que o maior número de viagens ocorre

na sexta-feira, enquanto o menor é registrado no domingo, ao passo que os demais dias apresentam valores intermediários (Cassel, 2018).

Tabela 4 — Distribuição das viagens por dia em Porto Alegre

Dia	Número de Viagens
Domingo	1621
Segunda-feira	2034
Terça-feira	2063
Quarta-feira	2017
Quinta-feira	2316
Sexta-feira	2720
Sábado	2143

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cassel (2018).

A partir da distribuição semanal das viagens, contabilizou-se um total de 14.914 viagens na amostra analisada. Considerando uma distância média de 5,1 km por viagem, o volume total percorrido foi estimado em aproximadamente 75.899,87 km (Cassel, 2018). A Tabela 5 sintetiza os principais parâmetros operacionais utilizados na análise.

Tabela 5 — Dados operacionais do cenário de Porto Alegre

Parâmetro	Valor	Unidade
VKT médio por viagem	5,1	km
VKT total da amostra	75.899,87	km
Total de viagens analisadas	14.914	viagens

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cassel (2018).

Diante das diferenças observadas nos padrões de viagem e na disponibilidade de dados, foram definidos dois contextos complementares para a análise. O primeiro corresponde a Florianópolis, em que foram utilizados dados primários obtidos por meio de questionários aplicados a motoristas de transporte por aplicativo. Nesse contexto, a análise teve como foco a avaliação de estratégias de eletrificação direcionadas a perfis específicos de condutores e a seus padrões individuais de operação.

O segundo contexto de análise é Porto Alegre, para o qual são utilizados dados secundários de Cassel (2018). Por abranger uma amostra mais ampla de motoristas e viagens realizadas ao longo de uma semana, essa base permite representar a operação em escala de frota e projetar os efeitos da eletrificação para um período anual. Os parâmetros operacionais empregados nessa análise, como a distância

média por viagem, o VKT total da amostra e o número de viagens analisadas, estão sintetizados na Tabela 5. O Quadro 2 apresenta, de forma comparativa, as características dos dois contextos de análise.

Quadro 2 - Comparação dos contextos de análise por cidade

Cidade	Fonte dos dados	Unidade de análise	Finalidade da análise
Florianópolis	Dados primários, obtidos por questionários com motoristas de transporte por aplicativo	Perfis individuais de motoristas e seus padrões de operação	Avaliar estratégias de eletrificação direcionadas a diferentes perfis de condutores
Porto Alegre	Dados secundários de Cassel (2018), com registros de motoristas e viagens ao longo de uma semana	Frota observada, com maior volume de viagens	Estimar os impactos anuais da eletrificação em uma operação próxima à escala de frota real

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Assim, Florianópolis permite analisar decisões no nível do motorista, enquanto Porto Alegre permite estimar efeitos agregados para uma frota com maior volume operacional.

3.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES

Para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa associadas aos veículos utilizados no transporte por aplicativo, foram consideradas as abordagens T2W, W2W e ACV, de acordo com a tecnologia veicular analisada.

3.2.1 Método T2W

3.2.1.1 Veículos ICE e HEV

A estimativa das emissões dos veículos ICE e HEV foi realizada a partir de uma adaptação da Equação 2 proposta por Jenn (2019), originalmente desenvolvida para estimar as emissões associadas ao consumo de combustível em veículos convencionais. Para aplicação no contexto brasileiro, foram realizadas conversões

nas unidades utilizadas no modelo original, resultando na Equação 4, utilizada para estimar as emissões dos veículos a combustão no presente estudo.

$$E_{comb} = \frac{VKT}{FE} * EF_{comb} \quad (4)$$

Onde:

VKT = distância percorrida (km);

FE = eficiência energética (km/L);

EFcomb= fator de emissão do combustível (g CO₂e/L).

Na abordagem T2W, que considera exclusivamente as emissões diretas decorrentes da combustão durante a operação do veículo, adotou-se como referência um EF_{comb} de 2,23 kg CO₂/L para a gasolina tipo A, conforme o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (Brasil, 2025). Contudo, este valor representa a gasolina fóssil pura, o que difere da composição da gasolina comercializada no Brasil em 2024, que é a E27 (73% gasolina A e 27% etanol anidro). Para assegurar a representatividade dos dados em relação à realidade nacional e a compatibilidade com o inventário, considerou-se apenas a fração fóssil da mistura na análise T2W. Essa abordagem se justifica porque o dióxido de carbono proveniente da combustão do etanol é classificado como carbono biogênico em metodologias de inventário climático. Isso significa que o carbono foi previamente absorvido da atmosfera pela biomassa durante seu crescimento, via fotossíntese. Assim, apesar da emissão de CO₂ pelo escapamento, este carbono não contribui para um acréscimo líquido de carbono fóssil na atmosfera durante a fase operacional, sendo contabilizado separadamente das emissões de origem fóssil (EPE, 2007; Mera et al., 2023).

Dessa forma, como a gasolina comercializada no Brasil em 2024 contém 73% de gasolina A, e considerando apenas as emissões da fração fóssil, o valor adotado para EF_{comb} na análise T2W foi de 1627,9 g CO₂/L, obtido a partir de 73% do fator de emissão da gasolina A. Embora este fator esteja expresso em CO₂, sua utilização como aproximação em termos de CO₂eq é adequada para este estudo, visto que o dióxido de carbono representa cerca de 97% das emissões totais de gases de efeito estufa do transporte rodoviário em 2024, com CH₄ e N₂O contribuindo com

aproximadamente 3%, conforme o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (Brasil, 2025).

Além disso, para o FE dos veículos ICE foi fixado em 12,19 km/L. Este valor representa a média dos cinco registros mais recentes disponíveis para veículos leves do ciclo Otto, extraídos do mesmo inventário (Brasil, 2025). A fim de mitigar potenciais distorções decorrentes de variações na composição da frota, valores considerados discrepantes foram excluídos, assegurando um valor médio mais representativo das condições operacionais atuais. Além disso, esse índice de eficiência também é compatível com os dados do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), disponibilizados pelo Inmetro, que indicam consumos típicos entre 11 e 13 km/L para veículos leves em ambiente urbano, reforçando a adequação do parâmetro adotado (Inmetro, 2024).

A determinação do FE para veículos HEV considerou a composição da frota de veículos híbridos em Florianópolis, que totaliza 2298 veículos (NeoCharge, 2025). A Tabela 6 detalha os modelos mais representativos dessa frota, garantindo que o valor de FE seja representativo da realidade analisada.

Tabela 6 — Veículos HEV mais vendidos em Florianópolis

Fabricante	Modelo	Tipo	Quantidade	Participação (%)
Toyota	Corolla Cross	Híbrido	543	23,63%
Toyota	Corolla	Híbrido	240	10,44%
GWM	Haval H6 Premium	Híbrido	200	8,70%
Toyota	RAV4	Híbrido	199	8,66%
Toyota	Prius	Híbrido	98	4,26%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em NeoCharge (2025).

Observa-se que os cinco modelos apresentados concentram uma parcela significativa da frota total, destacando-se os modelos Toyota Corolla Cross e Toyota Corolla, que, em conjunto, representam aproximadamente 34% dos veículos híbridos analisados. Dessa forma, justifica-se a adoção de um valor de eficiência energética representativo desses modelos para a estimativa das emissões. De acordo com dados do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, conduzido pelo INMETRO, o modelo Toyota Corolla Cross apresenta eficiência energética de aproximadamente 16,6 km/L em ciclo urbano (Inmetro, 2024). Considerando que o perfil de operação analisado

neste estudo é predominantemente urbano, esse valor foi adotado como o FE dos veículos HEV.

As emissões específicas por quilômetro foram obtidas pela aplicação da Equação 4 aos valores de EF_{comb} e FE adotados para ambas as tecnologias, a Tabela 7 apresenta as emissões do tipo T2W estimadas para as tecnologias veiculares analisadas.

Tabela 7 — Emissões T2W por tecnologia veicular

Tecnologia	EF_{comb} (g CO ₂ /L)	FE (km/L)	Emissão total (gCO ₂ eq/km)
ICE	1627,9	12,19	133,5
HEV	1627,9	16,6	98,1

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.2.1.2 Veículo PHEV

Os PHEV demandam uma abordagem de avaliação de emissões distinta dos ICE e HEV devido à capacidade de operar em modo totalmente elétrico, a combustão ou em regime híbrido. Essa versatilidade decorre do uso de duas fontes de energia, combustível e eletricidade da rede, o que torna as emissões dependentes da proporção de uso de cada modo durante a condução. Consequentemente, o desempenho do veículo está atrelado às condições reais de uso, como a distância percorrida e os hábitos de recarga. A avaliação das emissões de CO₂ deve considerar a participação dos modos elétrico e a combustão durante a operação do veículo, conforme discutido por Dauphin et al. (2023).

A quantificação das emissões totais para PHEV é realizada pela Equação 5, que combina as emissões do consumo de combustível e do uso de eletricidade, ponderadas pela participação de cada modo na distância percorrida:

$$E_{PHEV} = VKT * \left(\alpha * \frac{EF_{comb}}{FE_{phev}} \right) + (1 - \alpha) * (C_{phev} * EF_{phev}) \quad (5)$$

Onde:

VKT = Distância Percorrida (km);

α = Fração da Distância Percorrida Utilizando o Motor a Combustão ;

EF_{comb} = Fator da Emissão do Combustível (g CO₂eq /L);

FE_{phev} = Eficiência Energética (km/L);

C_{phev} = Consumo Elétrico do PHEV (kWh/km);

EF_{elet} = Fator de Emissão da Eletricidade (g CO₂eq /kWh).

Nessa equação, α representa a fração da distância percorrida utilizando o motor a combustão, enquanto $(1 - \alpha)$ corresponde à fração percorrida em modo elétrico. Dessa forma, a equação expressa as emissões totais como a soma ponderada das contribuições dos modos a combustão e elétrico.

Na análise T2W, que contabiliza apenas as emissões de escapamento, a parcela elétrica é considerada nula, e restam apenas as emissões da combustão. Para esse cálculo, adotou-se o valor de 1627,9 g CO₂eq/L para a gasolina tipo C, conforme Tabela 7. Diante disso, torna-se necessário definir o valor de FE_{phev} específico para esses veículos. Atualmente, a frota de PHEV em Florianópolis soma 2.952 unidades conforme NeoCharge (2025), cujos modelos mais representativos constam na Tabela 8.

Tabela 8 — Veículos PHEV mais vendidos em Florianópolis

Fabricante	Modelo	Quantidade	Participação (%)
BYD	Song Plus GS DM	601	20,36%
BYD	Song Pro GS DM	351	11,89%
GWM	Haval H6 GT	193	6,54%
Volvo	XC60 T8	185	6,27%
GWM	Haval H6 Prem PHEV	183	6,20%

Fonte: Elaborada pelo autor com base em NeoCharge (2025).

O valor de FE_{phev} para os PHEV adotou como referência o modelo BYD Song Plus, devido à sua representatividade no mercado de Florianópolis. Segundo dados do PBEV, esse modelo apresenta eficiência energética de aproximadamente 14,9 km/L em ciclo urbano (Inmetro, 2024). Contudo, a tradução dessa eficiência em emissões reais depende diretamente do comportamento do usuário e da interação com a infraestrutura disponível. Conforme discutido no Quadro 1, a baixa dependência de infraestrutura pública de recarga é um diferencial desta tecnologia. Nesse sentido,

o presente estudo assume a premissa de que as recargas ocorrem exclusivamente em ambiente residencial. Tal condição implica em uma maior utilização do motor a combustão interna, justificando a adoção de um fator de utilidade α igual a 0,8. Este índice pressupõe que o veículo opera majoritariamente em modo térmico, realizando apenas uma recarga diária. Os parâmetros utilizados e as emissões resultantes estão consolidados na Tabela 9.

Tabela 9 — Estimativa das emissões T2W dos veículos PHEV

Parâmetro	Símbolo	Valor adotado	Unidade
Fator de emissão do combustível	EF_{comb}	1627,9	g CO ₂ eq/L
Eficiência energética em modo combustão	FE_{phev}	14,9	km/L
Fração percorrida em modo combustão	α	0,8	-
Emissão total		87,4	g CO ₂ eq/km

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.2.2 Método W2W

3.2.2.1 Veículo ICE e HEV

Já para a abordagem W2W, que considera as emissões associadas a todo o ciclo do combustível, desde sua produção e distribuição até o consumo no veículo, torna-se necessário utilizar um fator de emissão do combustível EF_{comb} capaz de representar todas essas etapas do ciclo de vida. Assim, um novo valor de EF_{comb} foi calculado conforme apresentado na Equação 6.

$$EF_{comb} = WTT + T2W \quad (6)$$

Onde:

WTT = Poço ao Tanque (g CO₂eq/L);

$T2W$ = Tanque à Roda (g CO₂eq/L).

Em que T2W representa o valor já calculado de 1627,8 g CO₂eq/L corresponde às emissões diretas resultantes da combustão no veículo, enquanto WTT representa as emissões geradas nas etapas anteriores ao uso do combustível, como extração de matérias-primas, processamento, refino, transporte e distribuição. Para a gasolina tipo

C, o ICCT apresenta valor de 21,3 g CO₂eq/MJ referente à produção do combustível e 2,7 g CO₂eq/MJ relacionados à mudança indireta do uso da terra. Considerando o poder calorífico da gasolina C de 29,5 MJ/L, é possível converter esses fatores para a unidade gCO₂eq/L (Mera et al., 2023). Esses valores são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 — Fatores de emissão WTT da gasolina C convertidos para gCO₂eq/L

Componente	Fator original (gCO₂eq/MJ)	Poder calorífico (MJ/L)	Emissões (gCO₂eq/L)
Produção do combustível	21,3	29,5	628,3
Mudança indireta do uso da terra	2,7	29,5	79,7
Total WTT	-	-	708

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

A intensidade total WTT para a gasolina tipo C resultou em 708 g CO₂eq/L. Ao integrar o valor de 1627,9 g CO₂eq/L da análise T2W na Equação 6, estabeleceu-se um novo EF_{comb} de 2335,9 g CO₂eq/L. Este parâmetro permite o cálculo das emissões associadas aos veículos ICE e HEV, cujos resultados estão consolidados na Tabela 11.

Tabela 11 — Emissões por quilômetro de veículos ICE e HEV considerando o ciclo W2W

Tecnologia	Fator de emissão total (g CO₂eq/L)	Eficiência energética (km/L)	Emissão final (g CO₂eq/km)
ICE	2335,9	12,19	191,62
HEV	2335,9	16,6	140,71

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

3.2.2.2 Veículos PHEV

A aplicação da Equação 5 aos veículos PHEV requer a consideração simultânea das parcelas de emissão associadas ao consumo de combustível e ao consumo de eletricidade. Para a parcela de combustão, foi adotado o fator de emissão W2W da gasolina tipo C de 2335,9 g CO₂eq/L, previamente determinado para os veículos ICE e HEV e apresentado na Tabela 11. Considerando ainda a eficiência

energética de 14,9 km/L para o modo combustão, a contribuição dessa parcela foi obtida pela razão entre o fator de emissão do combustível e a eficiência energética do veículo, resultando em uma emissão específica de 156,77 g CO₂eq/km. Os parâmetros adotados e o resultado obtido encontram-se apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 — Estimativa das emissões W2W da gasolina tipo C dos veículos PHEV

Parâmetro	Símbolo	Valor adotado	Unidade
Fator de emissão do combustível	EF_{comb}	2335,9	g CO ₂ eq/L
Eficiência energética em modo combustão	FE_{phev}	14,9	km/L
Emissão total		156,77	g CO ₂ eq/km

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

A parcela elétrica foi estimada a partir do consumo específico de energia do veículo e do fator de emissão da eletricidade adotado para cada cenário analisado. O consumo foi definido com base em condições reais de operação, onde PHEV de porte médio apresentam demanda energética de 14,2 kWh a cada 100 km. Conforme proposto por Mera et al. (2023), esse valor foi convertido para 0,142 kWh/km, servindo como parâmetro representativo para o modo elétrico na formulação adotada.

Quanto ao fator de emissão da eletricidade, foram considerados os diferentes cenários de intensidade de carbono da matriz elétrica analisados neste estudo. Dessa forma, para cada cenário foi adotado um fator de emissão específico, refletindo as variações na composição da geração elétrica e seus respectivos impactos sobre as emissões associadas ao consumo de energia pelos veículos PHEV. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 — Estimativa das emissões W2W da eletricidade dos veículos PHEV

Cenário	Emissão da eletricidade (gCO ₂ eq/kWh)	Consumo elétrico (kWh/km)	Emissão resultante (gCO ₂ eq/km)
Atual (2024)	49	0,142	6,96
Otimista	29,2	0,142	4,14
Pessimista	135	0,142	19,17
Projetada (2034)	54,3	0,142	7,71

Fonte: Elaborada pelo autor com base em EPE (2024) e Brasil (2024).

As emissões totais dos veículos PHEV foram obtidas pela aplicação do fator de utilidade $\alpha = 0,8$ às parcelas de combustão e eletricidade calculadas anteriormente. Dessa forma, a emissão da parcela de combustão (156,77 g CO₂eq/km) foi multiplicada por 0,8, resultando em uma contribuição de 125,42 g CO₂eq/km. De forma análoga, as emissões da parcela elétrica apresentadas na Tabela 13 foram multiplicadas por 0,2, correspondendo à fração percorrida em modo elétrico. A soma dessas contribuições resultou nas emissões totais apresentadas na Tabela 14 para cada cenário da matriz elétrica.

Tabela 14 — Emissões totais W2W dos veículos PHEV em diferentes cenários da matriz elétrica

Cenário	Gasolina (80%)	Eletricidade (20%)	Emissão total (gCO ₂ eq/km)
Atual (2024)	125,42	1,39	126,81
Otimista	125,42	0,83	126,25
Pessimista	125,42	3,85	129,27
Projetada (2034)	125,42	1,54	126,96

Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.2.2.3 Veículos BEV

Pela perspectiva T2W dos BEVs, as emissões são consideradas nulas devido à ausência de combustão durante a operação. Para a análise W2W, que abrange as emissões da geração elétrica, utilizou-se como base a equação 3 formulada por Jenn (2019). Embora a proposta original incorpore variações horárias no fator de emissão da rede, este estudo optou por uma simplificação metodológica.

No presente estudo, essa dependência temporal foi desconsiderada, em razão da elevada variabilidade do fator de emissão ao longo do tempo e entre diferentes localidades. Além disso, como o objetivo é a estimativa das emissões médias associadas ao uso dos veículos elétricos, e não a análise horária do processo de recarga, optou-se pela utilização de um fator de emissão médio da rede elétrica (EF_{elet}). Dessa forma, a equação foi simplificada, resultando na Equação 5:

$$E_{EV} = VKT * C_{bev} * EF_{elet} \quad (5)$$

Onde:

VKT = Distância percorrida (km);

C_{BEV} = Consumo Elétrico do BEV (kWh/km);

EF_{elet} = Fator de Emissão da Eletricidade (gCO₂eq/km).

O consumo de eletricidade adotado para os BEVs foi de 0,229 kWh/km. Esses índices derivam do PBEV (Inmetro) e incluem fatores de correção para refletir o desempenho de veículos do segmento médio no contexto brasileiro, conforme validado por Mera et al. (2023). As emissões resultantes variam conforme o cenário da matriz elétrica, conforme detalhado na Tabela 15.

Tabela 15 — Emissões totais W2W dos veículos BEV em diferentes cenários da matriz elétrica.

Cenário	Fator de emissão da eletricidade (gCO ₂ eq/kWh)	Consumo elétrico (kWh/km)	Emissão resultante (gCO ₂ eq/km)
Atual (2024)	49	0,229	11,22
Otimista	29,2	0,229	6,69
Pessimista	135	0,229	31,03
Projetada (2034)	54,3	0,229	12,43

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

3.2.3 Método ACV

3.2.3.1 Veículo ICE e HEV

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a metodologia utilizada para mensurar os impactos ambientais de um produto desde a extração de matérias-primas até sua destinação final. Neste estudo, adotou-se como referência a abordagem proposta por Mera et al. (2023), adaptada com os valores de emissões obtidos nas etapas anteriores. A análise abrange cinco componentes principais: fabricação, manutenção, consumo de combustível, produção do combustível e mudança indireta do uso da terra.

Para o consumo de combustível, adotou-se 133,5 gCO₂eq/km para ICE e 98,1 gCO₂eq/km para HEV, conforme a Tabela 7. Já as parcelas de produção do combustível e mudança indireta do uso da terra, cujos valores em gCO₂eq/L constam

na Tabela 10, foram combinadas ao consumo das tecnologias para conversão em gCO₂eq/km. Esse cruzamento de dados, consolidado na Tabela 16, permite a mensuração das emissões por distância percorrida para ICE e HEV.

Tabela 16 — Emissões da parcela de combustível para ICE e HEV convertidas para gCO₂eq/km

Categoria	Tecnologia	Emissões (gCO₂eq/L)	Consumo (km/L)	Emissões finais (gCO₂eq/km)
Produção do combustível	ICE	628,3	12,19	51,55
Produção do combustível	HEV	628,3	16,6	37,85
Mudança indireta no uso da terra	ICE	79,7	12,19	6,54
Mudança indireta no uso da terra	HEV	79,7	16,6	4,8

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

Além das emissões operacionais, a ACV considera os impactos associados à fabricação e à manutenção dos veículos. Para incorporar as emissões da fabricação à unidade funcional adotada neste estudo, utilizou-se a mesma premissa de vida útil empregada por Mera et al. (2023). Os autores consideram uma vida útil média de 22 anos para veículos de passeio no Brasil, baseada em dados oficiais de sucateamento da frota nacional. A combinação dessa vida útil com a quilometragem anual média dos veículos resulta em uma quilometragem acumulada de 288.000 km ao longo da operação do veículo. Assim, as emissões totais de fabricação foram distribuídas pela quilometragem de vida útil. A produção de um veículo médio ICE gera aproximadamente 5,8 tCO₂eq, enquanto a fabricação de um veículo HEV resulta em 7,7 tCO₂eq, valor superior devido à presença de componentes eletrificados adicionais. Após a normalização, obtêm-se intensidades de emissão de 20,14 gCO₂eq/km para o ICE e 26,74 gCO₂eq/km para o HEV (Mera et al., 2023). Por fim, foram incorporadas as emissões associadas à manutenção, estimadas em 4,7 gCO₂eq/km para o ICE e 5,2 gCO₂eq/km para o HEV (Mera et al., 2023). A soma de todas as parcelas resulta nas emissões totais do ciclo de vida apresentadas na Tabela 17.

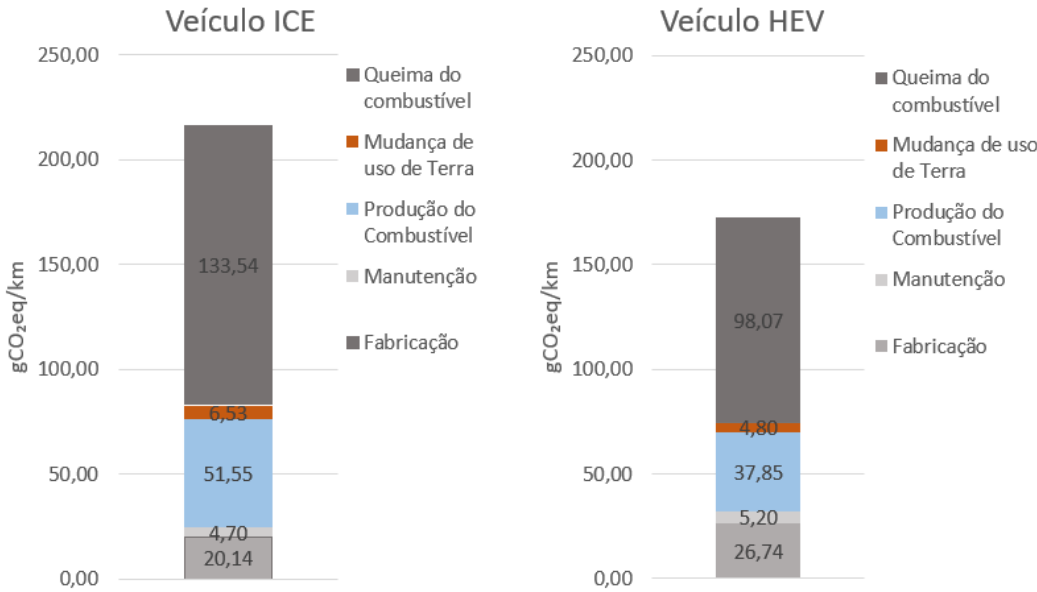
Tabela 17 — Emissões do ciclo de vida para veículos ICE e HEV (gCO₂eq/km)

Tecnologia	Fab.	Manuten.	Produção do combustível	Uso da terra	Combustão	Total
ICE	20,14	4,7	51,55	6,54	133,54	216,46
HEV	26,74	5,2	37,85	4,8	98,07	172,65

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

A representação gráfica desses resultados permite visualizar a participação de cada etapa no impacto total de cada tecnologia. A análise evidencia que a fase de uso, vinculada à queima do combustível, concentra a maior parcela das emissões, seguida pela produção do combustível e pela fabricação do veículo. Essa distribuição detalhada pode ser observada na Figura 1, que ilustra a predominância das emissões operacionais sobre as demais fases do ciclo de vida.

Figura 3 — Emissões do ciclo de vida para veículos ICE e HEV



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

3.2.3.2 Veículo PHEV

O ciclo de vida dos PHEV contempla sete componentes principais: fabricação do veículo, manutenção, consumo de combustível, produção do combustível,

mudança indireta do uso da terra, produção da eletricidade e fabricação da bateria. Para a estrutura do veículo, adotou-se o valor de 7,2 tCO₂eq, enquanto a fabricação da bateria responde por 0,7 tCO₂eq. Assim como nas demais tecnologias avaliadas, esses valores foram distribuídos ao longo da vida útil de 288.000 km, resultando em intensidades de emissão de 25,00 gCO₂eq/km para a fabricação do veículo e 2,43 gCO₂eq/km para a bateria. Para a manutenção, adotou-se o fator de 5,2 gCO₂eq/km, conforme proposto por Mera et al. (2023).

As emissões associadas ao combustível foram calculadas a partir dos fatores de produção de 628,3 gCO₂eq/L e de mudança indireta do uso da terra de 79,7 gCO₂eq/L. Considerando a eficiência energética de 14,9 km/L para os veículos PHEV, obtêm-se inicialmente valores de 42,17 gCO₂eq/km para a produção do combustível e 5,34 gCO₂eq/km para a mudança indireta do uso da terra. Entretanto, como os veículos PHEV operam parte do tempo em modo elétrico, apenas uma fração da distância percorrida está associada ao consumo direto de combustível. Dessa forma, aplicou-se o fator $\alpha = 0,8$, que representa a participação da operação em modo combustão no ciclo de utilização considerado. Após esse ajuste, as contribuições efetivas dessas parcelas foram reduzidas para 33,73 gCO₂eq/km e 4,28 gCO₂eq/km, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 — Emissões da parcela de combustível para PHEV convertidas para gCO₂eq/km

Componente	Emissões (gCO₂eq/L)	Consumo (km/L)	Alpha ($\alpha = 0,8$)	Total (gCO₂eq/km)
Produção do combustível	628,3	14,9	0,8	33,73
Mudança indireta no uso da terra	79,7	14,9	0,8	4,28

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

A componente associada à produção de eletricidade foi estimada com base nos fatores de emissão apresentados na Tabela 13 para cada cenário de matriz elétrica analisado. Como o PHEV utiliza simultaneamente energia elétrica e combustível líquido, as emissões totais da fase operacional resultam da combinação dessas duas fontes energéticas. Assim, as emissões associadas à eletricidade variam conforme a

intensidade carbônica de cada cenário, enquanto as parcelas relacionadas ao combustível permanecem constantes.

Os resultados consolidados das emissões do ciclo de vida do PHEV para cada cenário elétrico são apresentados na Tabela 19.

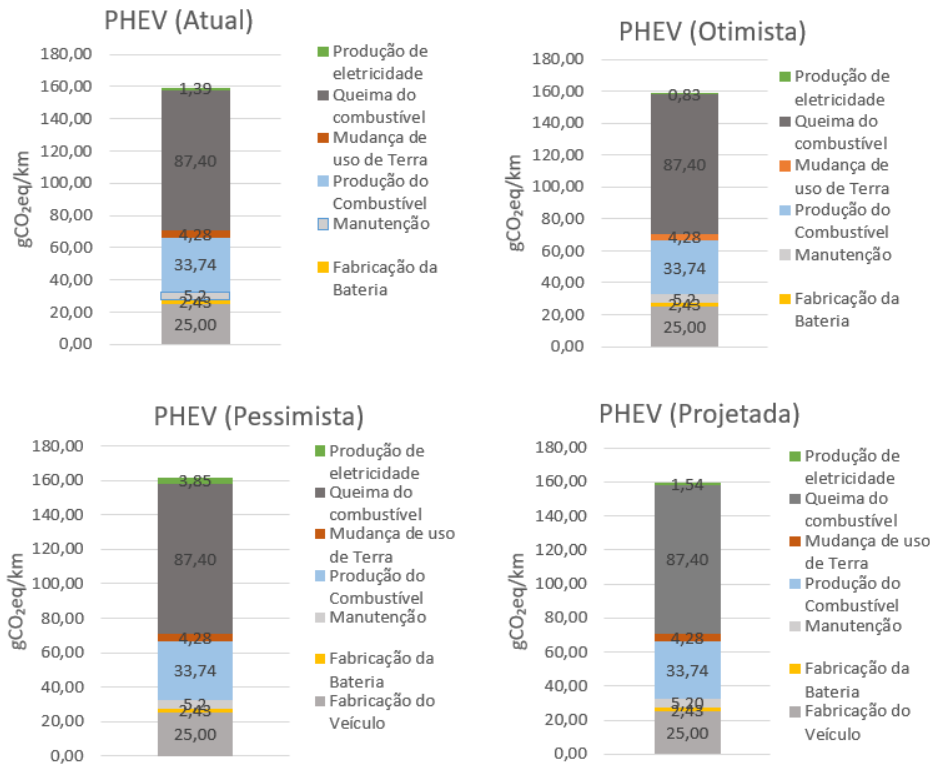
Tabela 19 — Emissões do ciclo de vida para veículos PHEV

Etapas	Atual (2024)	Otimista	Pessimista	Projetada (2034)
Fabricação do veículo	25	25	25	25
Manutenção	5,2	5,2	5,2	5,2
Produção do combustível	33,74	33,74	33,74	33,74
Mudança indireta no uso da terra	4,28	4,28	4,28	4,28
Uso do veículo (T2W)	87,4	87,4	87,4	87,4
Fabricação da bateria	2,43	2,43	2,43	2,43
Produção de eletricidade	1,39	0,83	3,85	1,54
Total (gCO ₂ eq)/km	159,43	158,87	161,89	159,58

Fonte: Elaborada pelo autor com base em Mera et al. (2023).

A distribuição das emissões ao longo do ciclo de vida dos PHEV pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 — Emissões do ciclo de vida para veículos PHEV para diferentes matrizes elétricas



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

3.2.3.3 Veículo BEV

Para a análise do ciclo de vida dos veículos BEVs, utilizou-se como referência a metodologia proposta por Mera et al. (2023), combinada com os resultados obtidos anteriormente na etapa W2W para a produção da eletricidade consumida pelo veículo. Neste caso, foram considerados quatro componentes principais de emissão: fabricação do veículo, fabricação da bateria, manutenção e produção da eletricidade utilizada durante a fase de uso.

A fabricação do BEV compacto e de sua bateria gera, respectivamente, 5,8 tCO₂eq e 2,7 tCO₂eq. Para converter essas emissões para a unidade funcional adotada neste estudo, utilizou-se a mesma premissa de vida útil considerada por Mera et al. (2023), correspondente a 288.000 km percorridos ao longo da operação do veículo. Dessa forma, os valores de fabricação correspondem a emissões de 20,14 gCO₂eq/km para o veículo e 9,38 gCO₂eq/km para a bateria. Além disso, foi considerado o impacto das atividades de manutenção, estimado em 3,6 gCO₂eq/km (Mera et al., 2023).

Diferentemente das tecnologias ICE, HEV e PHEV, os veículos BEV não apresentam emissões associadas ao consumo direto de combustível durante a operação. Assim, a única parcela operacional considerada corresponde à produção da eletricidade necessária para o carregamento da bateria. Às emissões anteriores soma-se, portanto, a contribuição referente à produção de eletricidade, obtida a partir da análise W2W apresentada na Tabela 15, a qual varia conforme o cenário da matriz elétrica adotada. Dessa forma, as emissões totais do ciclo de vida do veículo elétrico dependem diretamente do fator de emissão da eletricidade. A Tabela 20 apresenta a composição das emissões do BEV para cada cenário analisado.

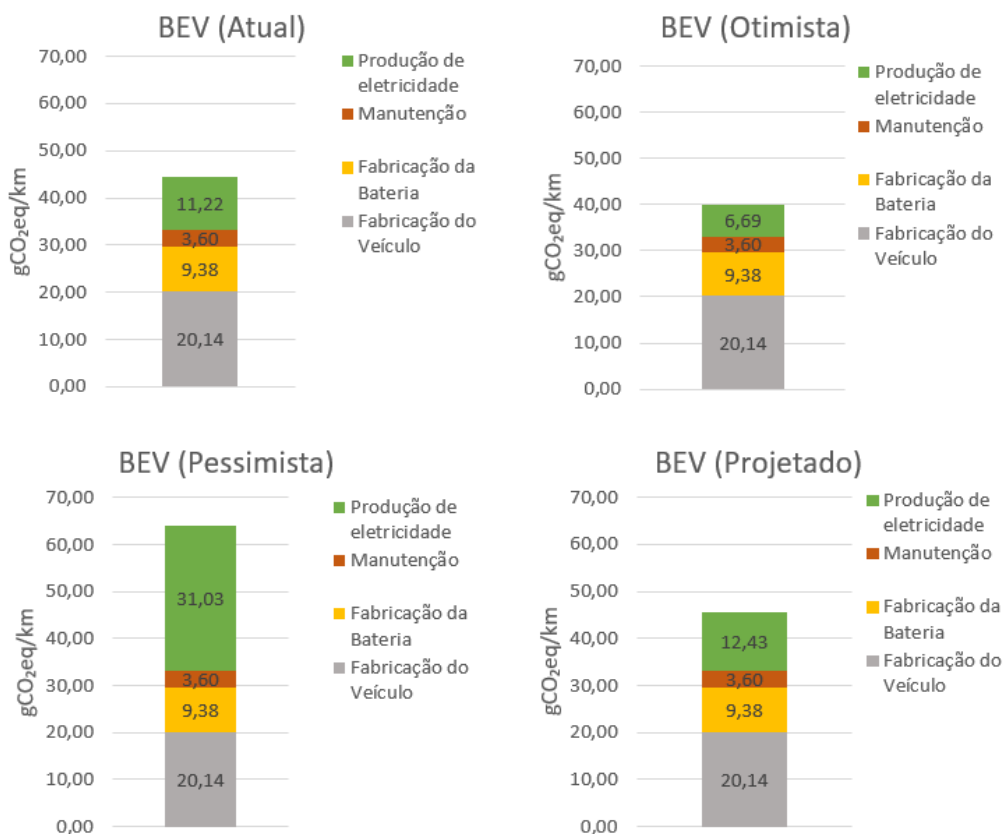
Tabela 20 — Emissões por etapa do ciclo de vida de um BEV (gCO₂eq/km)

Etapa	Atual (2024)	Otimista	Pessimista	Projetada (2034)
Fabricação do veículo	20,14	20,14	20,14	20,14
Manutenção	3,6	3,6	3,6	3,6
Fabricação da bateria	9,38	9,38	9,38	9,38
Produção de eletricidade	11,22	6,69	31,03	12,43
Total	44,34	39,76	64,14	45,55

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Com esses valores, pode-se elaborar a Figura 5, permitindo uma melhor visualização da participação de cada etapa nas emissões totais do veículo elétrico.

Figura 5 — Emissões do ciclo de vida para veículos BEV para cada matriz elétrica



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os valores encontrados neste estudo para o ciclo de vida de um veículo BEV de 46,75 $\text{gCO}_2\text{eq/km}$ foram inferiores aos apresentados pelo ICCT de 55 $\text{gCO}_2\text{eq/km}$. Essa diferença ocorre principalmente porque a matriz elétrica considerada na etapa W2W apresentou fator de emissão menor do que o utilizado pelo ICCT. Entretanto, a análise de ciclo de vida dos veículos elétricos pode apresentar valores mais elevados caso sejam adotados cenários com maior intensidade de carbono na geração de eletricidade. Assim, no cenário pessimista considerado neste estudo, as emissões totais do LCA dessa tecnologia tendem a aumentar, embora ainda permaneçam inferiores às observadas para veículos a combustão.

3.3 PERFIL DE VIAGENS EM FLORIANÓPOLIS

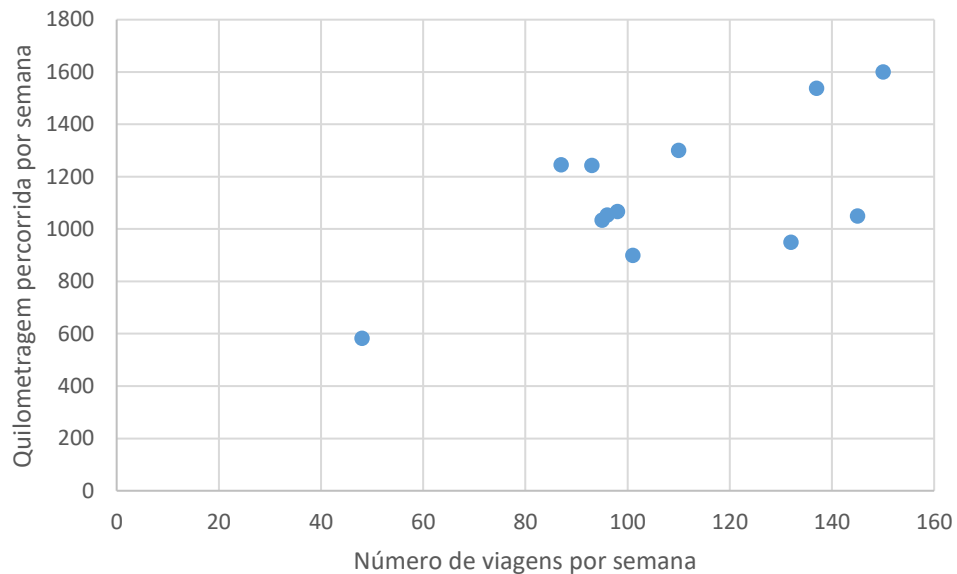
A caracterização do perfil de deslocamentos em Florianópolis enfrentou obstáculos, especialmente quanto ao acesso a registros detalhados das plataformas de transporte por aplicativo. Inicialmente, buscou-se contato direto com as empresas do setor para obter métricas como o volume de corridas e a quilometragem percorrida. Contudo, identificou-se uma restrição a esses indicadores, que anteriormente eram mais acessíveis. As solicitações não foram atendidas, sobretudo devido ao alto nível de detalhamento exigido para a análise.

Diante dessa limitação, os dados foram coletados por meio de um questionário aplicado a motoristas de transporte por aplicativo atuantes em Florianópolis. A divulgação ocorreu em um grupo de comunicação voltado a motoristas da categoria, mediante autorização de um participante do grupo. O questionário foi composto por duas perguntas objetivas: o número de viagens realizadas e a quilometragem percorrida na semana anterior à resposta. A escolha dessas variáveis considerou a disponibilidade de relatórios semanais emitidos pela Uber aos motoristas. Esses relatórios apresentam informações operacionais, como o número de viagens realizadas e a quilometragem percorrida no período. Dessa forma, buscou-se reduzir a dependência de estimativas pessoais, uma vez que os participantes poderiam consultar os dados registrados pela plataforma antes de responder ao questionário.

Foram recebidas 14 respostas e, após a verificação de consistência das informações fornecidas, duas foram excluídas por apresentarem dados incompatíveis com as variáveis analisadas, resultando em uma amostra final composta por 12 respostas válidas. Embora a adesão ao questionário tenha sido limitada, os dados obtidos permitiram identificar diferentes padrões de deslocamento entre os motoristas participantes e subsidiar a definição dos cenários analisados. Considerando as 12 respostas válidas obtidas, verificou-se um total agregado de 1.292 viagens semanais e 13.557,2 km percorridos com passageiros. Ressalta-se que essa quilometragem se refere exclusivamente aos deslocamentos realizados com passageiros embarcados, não incluindo trajetos de reposicionamento, espera ou busca por novas corridas.

A relação entre o número de viagens semanais e a quilometragem percorrida por semana é apresentada na Figura 6, evidenciando diferenças relevantes entre os padrões operacionais observados entre os motoristas.

Figura 6 — Relação entre número de viagens semanais e quilometragem percorrida por semana



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise dos dados revelou uma variação expressiva na distância média percorrida, o que indica a coexistência de distintos padrões operacionais entre os motoristas. A distância média observada foi calculada pela relação entre a quilometragem total percorrida com passageiros e o número total de viagens realizadas, resultando em aproximadamente 10,5 km por viagem. Esse valor foi adotado como cenário intermediário de VKT, por representar diretamente a média identificada nos dados coletados em Florianópolis. Entretanto, a amostra analisada foi composta por 12 respostas válidas, o que pode limitar a representatividade desse valor para o conjunto dos motoristas de transporte por aplicativo do município. Além disso, levantamentos realizados em outras cidades brasileiras apontam distâncias médias por viagem inferiores, como em Porto Alegre, onde foi identificado o valor de 5,1 km por viagem (Cassel, 2018). Dessa forma, não se pode afirmar que a média de 10,5 km por viagem represente integralmente o comportamento de todos os motoristas de Florianópolis.

Para incorporar essa incerteza, foi realizada uma análise de sensibilidade com três cenários de distância média por viagem. O cenário conservador adotou o valor de 7 km por viagem, representando uma condição de menor distância média e mais próxima dos valores observados em outros contextos urbanos. O cenário intermediário utilizou 10,5 km por viagem, correspondente à média obtida na pesquisa.

Por fim, o cenário intensivo adotou 13 km por viagem, representando uma condição de maior distância média, compatível com motoristas que realizam viagens mais longas ou operam em áreas com maiores deslocamentos.

A utilização desses três cenários permite avaliar como diferentes valores de distância média por viagem influenciam os resultados do estudo. Assim, em vez de depender exclusivamente de um único valor estimado a partir de uma amostra limitada, a análise considera uma faixa de variação plausível para o VKT dos motoristas de transporte por aplicativo em Florianópolis. Os parâmetros detalhados para o cenário de Florianópolis, incluindo o número total de viagens e a quilometragem acumulada, estão consolidados na Tabela 21.

Tabela 21 — Parâmetros utilizados no cenário de Florianópolis

Categoria	Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Dados operacionais	Número de viagens analisadas	1292	viagens	Dados da pesquisa
	Distância total percorrida	13.557,40	km	Dados da pesquisa
Cenários de VKT	VKT conservador	7	km	Dados da pesquisa
	VKT intermediário	10,5	km	Dados da pesquisa
	VKT intensivo	13	km	Dados da pesquisa

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

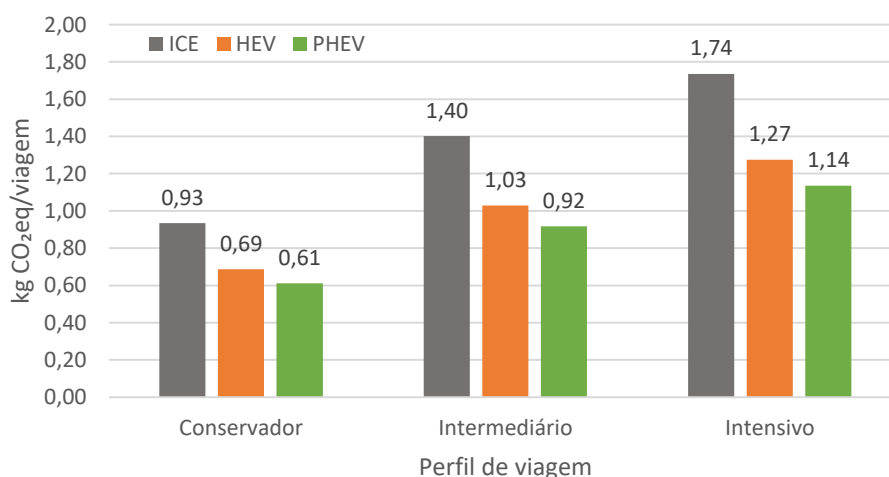
Este capítulo dedica-se à análise dos resultados obtidos pelos métodos T2W, W2W e ACV nas cidades de Florianópolis e Porto Alegre. A investigação abrange diferentes perfis de viagens, o que possibilita comparar a redução de emissões e avaliar o desempenho das tecnologias de eletrificação. O objetivo é verificar o comportamento dessas soluções frente à mitigação de impactos ambientais nos contextos estudados.

4.1 EMISSÕES DE CO₂EQ EM FLORIANÓPOLIS.

4.1.1 Emissões de CO₂eq em Florianópolis pelo método T2W

As emissões em Florianópolis foram calculadas com base nos parâmetros da Tabela 21. A análise abrangeu três cenários de viagem (conservador, intermediário e intensivo), nos quais a distância variou conforme o perfil. A Figura 7 detalha as emissões médias por viagem, em kgCO₂eq, cruzando os diferentes perfis de deslocamento com as tecnologias veiculares estudadas.

Figura 7 — Emissões T2W por tecnologia veicular para diferentes cenários de distância média em Florianópolis

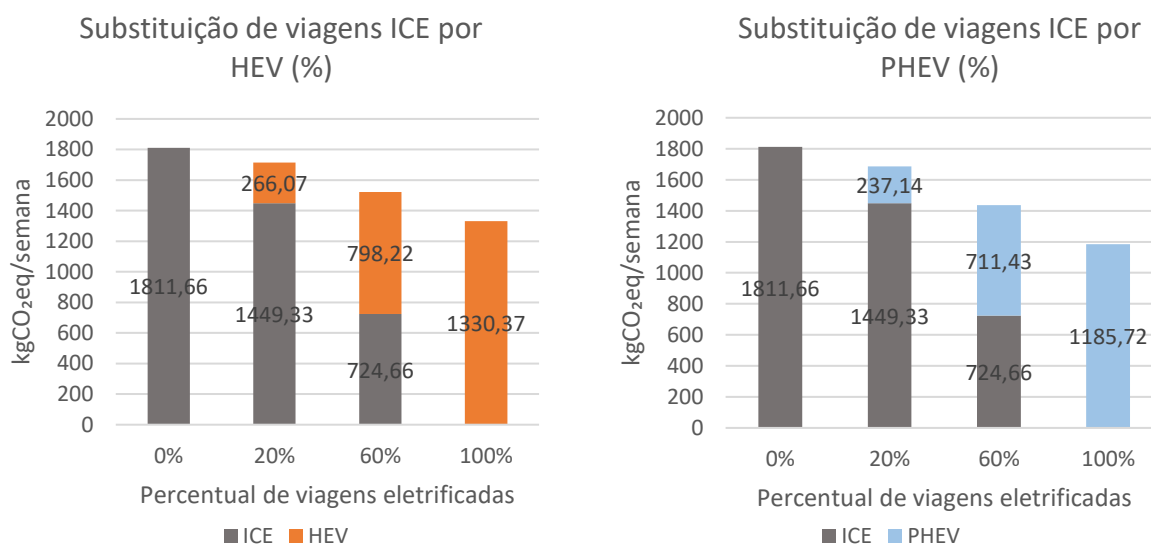


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir dos valores de emissões por viagem apresentados, foi possível estimar as emissões semanais por tecnologia veicular. Considerando que, no período

analisado, os motoristas realizaram um total de 1.292 viagens na semana, calcularam-se as emissões correspondentes a esse volume de deslocamentos para diferentes cenários de eletrificação da frota. Para essa estimativa, utilizou-se o valor de emissão referente ao perfil intermediário de viagem de cada tecnologia, por representar uma condição média de deslocamento. Com base nesse procedimento, a Figura 8 apresenta os resultados da substituição gradual de viagens realizadas por veículos ICE por alternativas HEV e PHEV, considerando níveis de eletrificação de 0%, 20%, 60% e 100%.

Figura 8 - Emissões semanais de CO₂eq pelo método T2W em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Florianópolis



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Inicialmente, o cenário sem eletrificação das viagens apresentou emissões semanais de 1811,66 kgCO₂eq. À medida que o percentual de viagens eletrificadas aumenta, observa-se redução progressiva das emissões em ambos os cenários analisados. Para 100% de viagens eletrificadas, o cenário PHEV apresentou emissões semanais de 1185,72 kgCO₂eq, enquanto no cenário HEV as emissões foram de 1330,37 kgCO₂eq. Os percentuais de redução das emissões para cada nível de eletrificação analisado em Florianópolis são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método T2W em Florianópolis

Percentual de viagens eletrificadas	Redução HEV (kg CO₂eq)	Redução HEV (%)	Redução PHEV (kg CO₂eq)	Redução PHEV (%)
20%	96,26	5,31%	125,19	6,91%
60%	288,77	15,94%	375,56	20,73%
100%	481,29	26,57%	625,93	34,55%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Nessa análise do percentual de viagens eletrificadas, o potencial máximo de redução das emissões foi de 26,57% para o cenário HEV e 34,55% para o cenário PHEV. Entretanto, os resultados apresentados até então baseiam-se em uma eletrificação distribuída de forma uniforme entre as viagens, assumindo contribuições equivalentes a partir da utilização de distâncias médias. Contudo, a heterogeneidade nos padrões de deslocamento indica que determinados condutores possuem maior participação na quilometragem total e, conseqüentemente, no volume de emissões geradas.

Diante da heterogeneidade nos padrões de deslocamento da frota, a mitigação das emissões foi analisada por meio de uma estratégia de eletrificação direcionada, priorizando condutores localizados nos extremos de utilização da frota, ou seja, aqueles com maior e menor quilometragem semanal. O objetivo dessa abordagem é avaliar como diferentes perfis de uso influenciam o potencial de redução das emissões. Para isso, foram selecionados os três motoristas com maiores distâncias percorridas no período e os três com menores valores de quilometragem, apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 — Motoristas com maior e menor quilometragem semanal

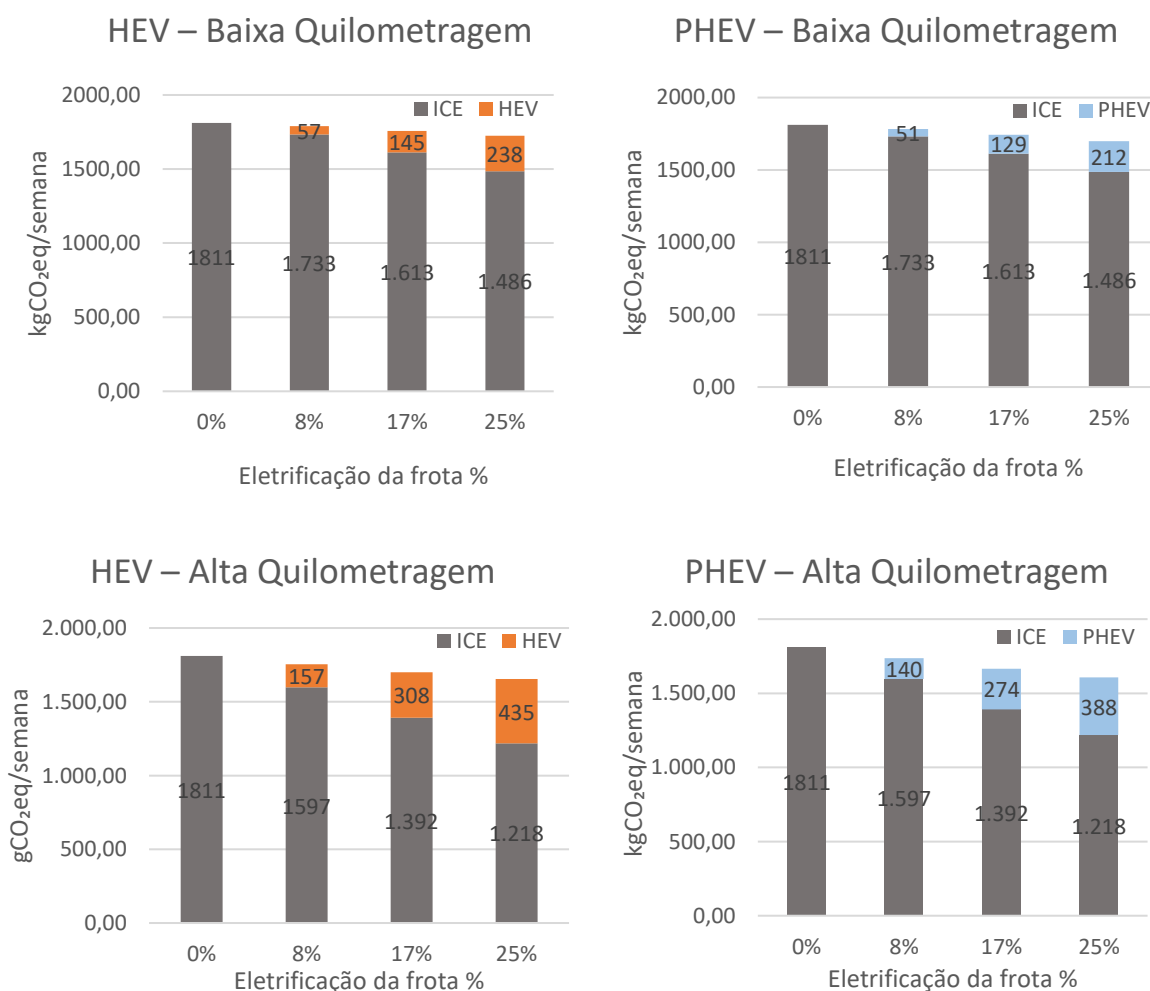
Grupo	Motorista	Quilometragem semanal (km)
Menor quilometragem	M1	582
Menor quilometragem	M2	899
Menor quilometragem	M3	950
Maior quilometragem	M4	1300
Maior quilometragem	M5	1537
Maior quilometragem	M6	1600

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Com base nessa seleção, foram construídos cenários progressivos de eletrificação, considerando separadamente os grupos de menor e de maior utilização.

No grupo de menor quilometragem, a substituição iniciou-se pelo motorista com a menor distância percorrida (M1), seguida pela inclusão gradual de M2 e M3. De forma análoga, no grupo de maior utilização, a eletrificação foi iniciada pelo motorista com maior quilometragem semanal (M6), seguida pelos condutores M5 e M4. Dessa forma, os cenários representam a substituição de um, dois e três motoristas, equivalentes a 8%, 17% e 25% da frota amostral, respectivamente. Essa metodologia permite avaliar a sensibilidade das emissões semanais quando a eletrificação é aplicada prioritariamente a diferentes intensidades de uso. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 9.

Figura 9 — Emissões T2W nos cenários de eletrificação direcionada



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

O comportamento das emissões semanais frente à eletrificação direcionada da frota indica que os condutores com maior quilometragem semanal apresentam maiores reduções de emissões. No cenário HEV, para 25% de eletrificação, os

condutores com menores deslocamentos apresentaram emissões de 1724 kgCO₂eq/semana, enquanto os de maior quilometragem apresentaram 1653 kgCO₂eq/semana. De forma semelhante, no cenário PHEV, as emissões foram de 1698 kgCO₂eq/semana para os condutores com menor quilometragem e 1606 kgCO₂eq/semana para aqueles com maiores deslocamentos semanais. Os percentuais de redução para cada cenário, em relação ao cenário base 100% ICE, são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 — Redução das emissões pelo método T2W nos cenários de eletrificação direcionada

Eletrificação da frota	HEV – Menor quilometragem	PHEV – Menor quilometragem	HEV – Maior quilometragem	PHEV – Maior quilometragem
1 Motorista	1,14%	1,48%	3,14%	4,08%
2 Motoristas	2,90%	3,77%	6,15%	7,99%
3 Motoristas	4,76%	6,19%	8,69%	11,31%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A eletrificação direcionada aos motoristas com maior quilometragem apresentou maiores potenciais de mitigação das emissões de CO₂eq. A maior redução observada foi de 11,31%, obtida com a eletrificação dos três condutores com maiores distâncias percorridas utilizando tecnologia PHEV. Em contrapartida, a eletrificação dos três motoristas com menores quilometragens resultou em redução de 6,19%, evidenciando a influência do perfil de utilização da frota no potencial de redução das emissões.

Entretanto, os resultados apresentados até o momento restringem-se às distâncias percorridas durante viagens com passageiros. Na operação real dos motoristas de aplicativo, existem deslocamentos adicionais sem passageiros, realizados para busca de novas corridas e reposicionamento do veículo. Essa quilometragem adicional, denominada *deadheading*, possui impacto direto no inventário de emissões. Segundo Cramer e Krueger (2016), esse deslocamento excedente pode representar um acréscimo entre 35,8% e 44,8% na quilometragem total percorrida. Dessa forma, visando conferir maior abrangência às estimativas de impacto ambiental, a quilometragem semanal da frota foi recalculada a partir da aplicação desses fatores, conforme apresentado na Tabela 25.

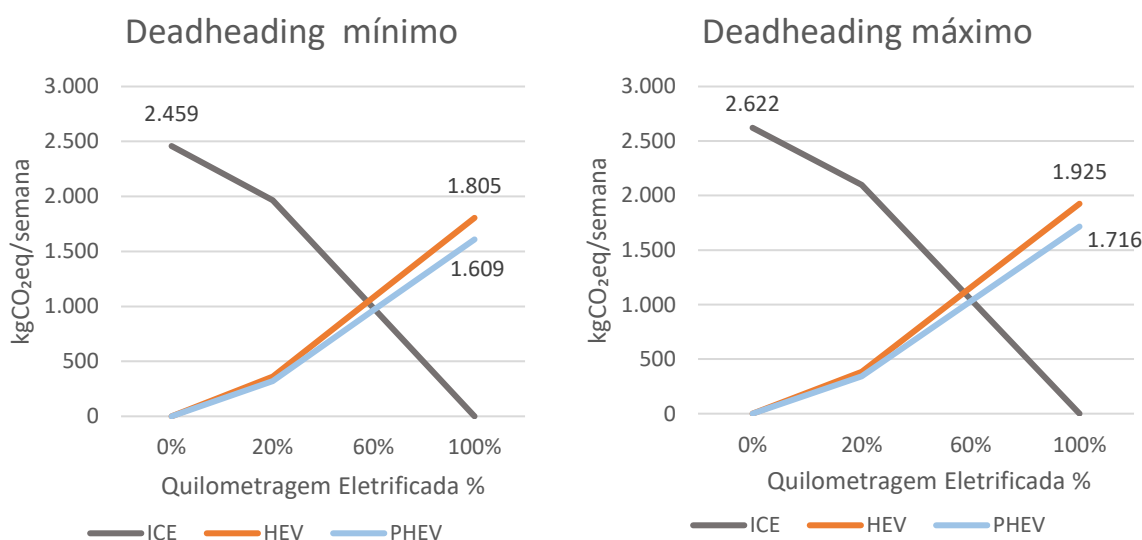
Tabela 25 — Quilometragem semanal da frota considerando a inclusão de *deadheading* em Florianópolis

Cenário	Fator aplicado	Quilometragem semanal (km)
Sem <i>deadheading</i>	1	13.557,20
Com <i>deadheading</i> (mín.)	1,358	18.410,68
Com <i>deadheading</i> (máx.)	1,448	19.630,83

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A inclusão dos fatores mínimos e máximos de *deadheading* resultou em novos cenários de emissões para diferentes níveis de eletrificação da frota. Os resultados apresentados na Figura 10 permitem avaliar a influência dos deslocamentos sem passageiros no potencial de mitigação das emissões para veículos HEV e PHEV.

Figura 10 — Emissões semanais T2W em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando *deadheading* em Florianópolis



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A inclusão do *deadheading* resultou em aumento das emissões semanais de CO₂eq em todos os cenários analisados. No cenário sem eletrificação, as emissões passaram de 1811,66 kgCO₂eq/sem para aproximadamente 2459 kgCO₂eq/sem no cenário de *deadheading* mínimo e 2622 kgCO₂eq/sem no cenário máximo. Apesar do aumento nos valores absolutos de emissões, os percentuais de redução observados nos cenários com eletrificação permaneceram semelhantes aos obtidos na análise sem consideração dos deslocamentos adicionais sem passageiros. A Tabela 26 apresenta os valores de redução em kgCO₂eq para cada nível de eletrificação em relação ao cenário base ICE de cada análise.

Tabela 26 — Redução das emissões T2W em cenários com inclusão de deadheading em Florianópolis

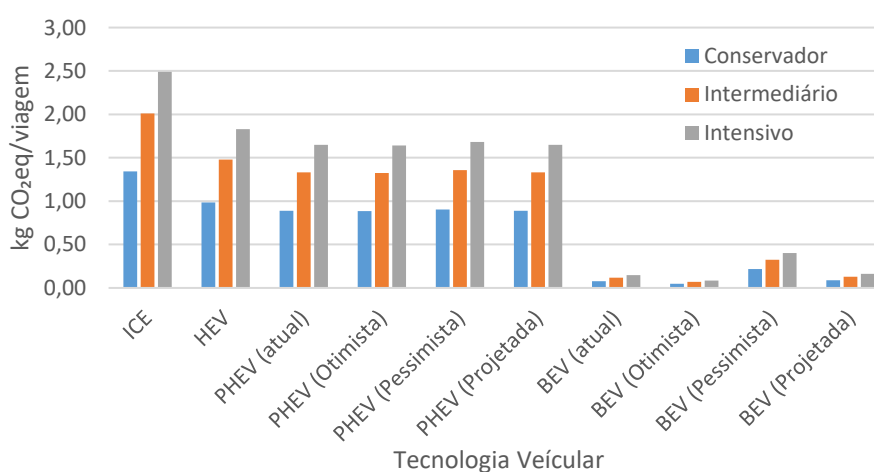
Cenário	Quilometragem eletrificada	Redução HEV (kg CO ₂ eq)	Redução PHEV (kg CO ₂ eq)
Deadheading mínimo	20%	131	170
Deadheading mínimo	60%	392	510
Deadheading mínimo	100%	653	849
Deadheading máximo	20%	139	181
Deadheading máximo	60%	418	543
Deadheading máximo	100%	696	906

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.1.2 Emissões de CO₂eq em Florianópolis pelo método W2W

Nesta etapa, as análises anteriormente realizadas para o método T2W em Florianópolis foram reproduzidas utilizando os valores de emissão obtidos pela abordagem W2W. Adicionalmente, foram incorporados os veículos elétricos a bateria (BEV) entre as tecnologias avaliadas. A Figura 11 apresenta os valores de emissão por viagem para cada tecnologia considerando as distâncias médias dos cenários conservador, intermediário e intensivo definidos na Tabela 20.

Figura 11 — Emissões W2W por tecnologia veicular para diferentes cenários de distância média em Florianópolis

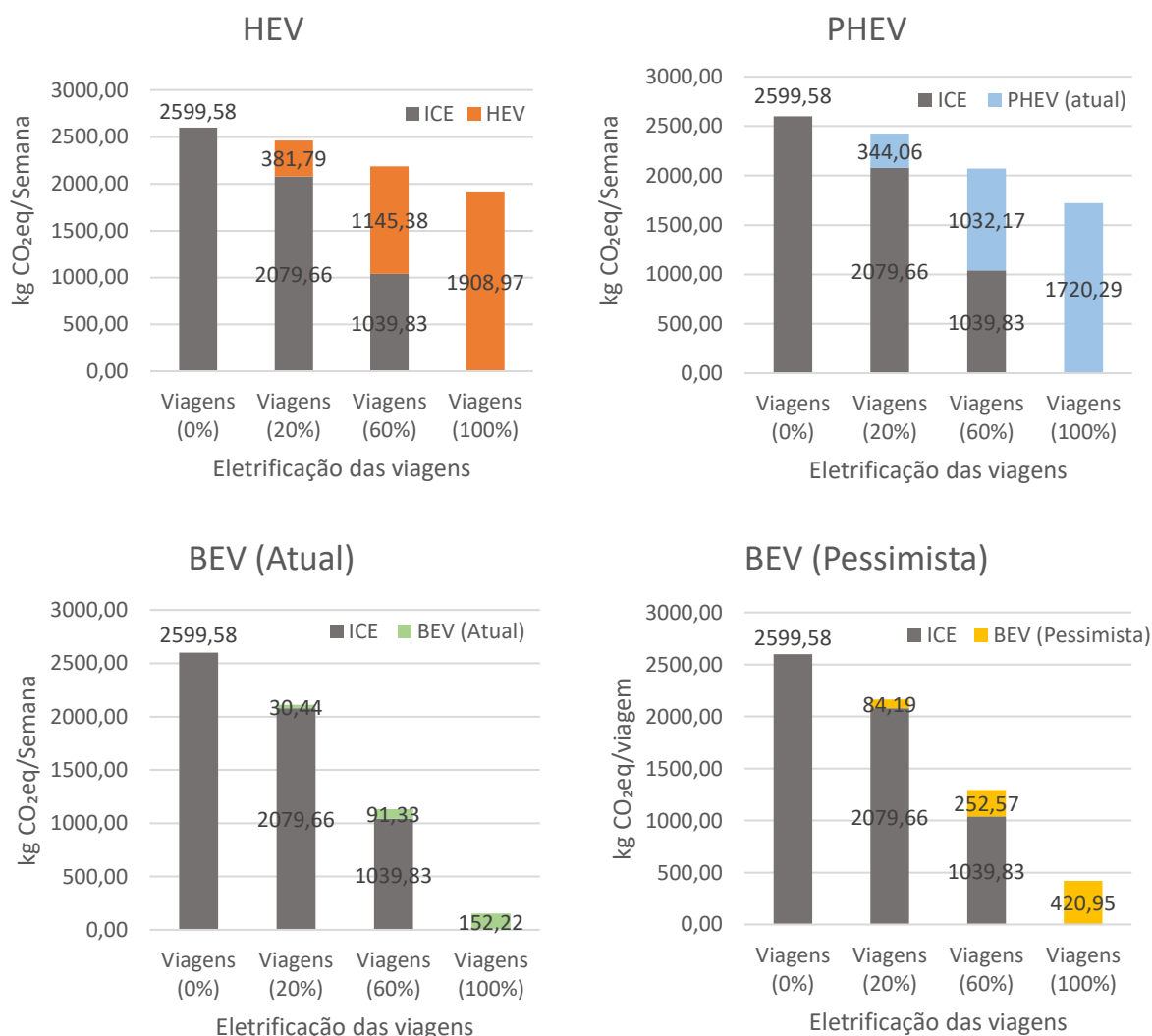


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir dos valores de emissão em kgCO₂eq por viagem, foram estimadas as emissões semanais da frota para diferentes níveis de eletrificação, conforme

apresentado na Figura 12. Para os cenários com PHEV, adotou-se o valor correspondente à matriz elétrica atual, devido à baixa sensibilidade dessa tecnologia às variações da matriz energética. Já para os veículos BEV, a análise contemplou os cenários de matriz elétrica atual e pessimista, em função da maior sensibilidade observada entre essas condições. Em todas as projeções, utilizou-se o perfil intermediário de deslocamento como referência.

Figura 12 — Emissões semanais de CO₂eq pelo método W2W em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Florianópolis



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Na análise W2W, o cenário sem eletrificação apresentou emissões semanais da frota próximas de 2600 kgCO₂eq. As maiores reduções foram observadas nos cenários com veículos BEV, tanto para a matriz elétrica atual quanto para a pessimista. No cenário atual, as emissões semanais foram reduzidas para 152,22

kgCO₂eq, enquanto no cenário pessimista o valor obtido foi de 420,95 kgCO₂eq. A Tabela 27 apresenta os valores absolutos e percentuais de redução das emissões para cada tecnologia e nível de eletrificação analisado.

Tabela 27 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método W2W em Florianópolis

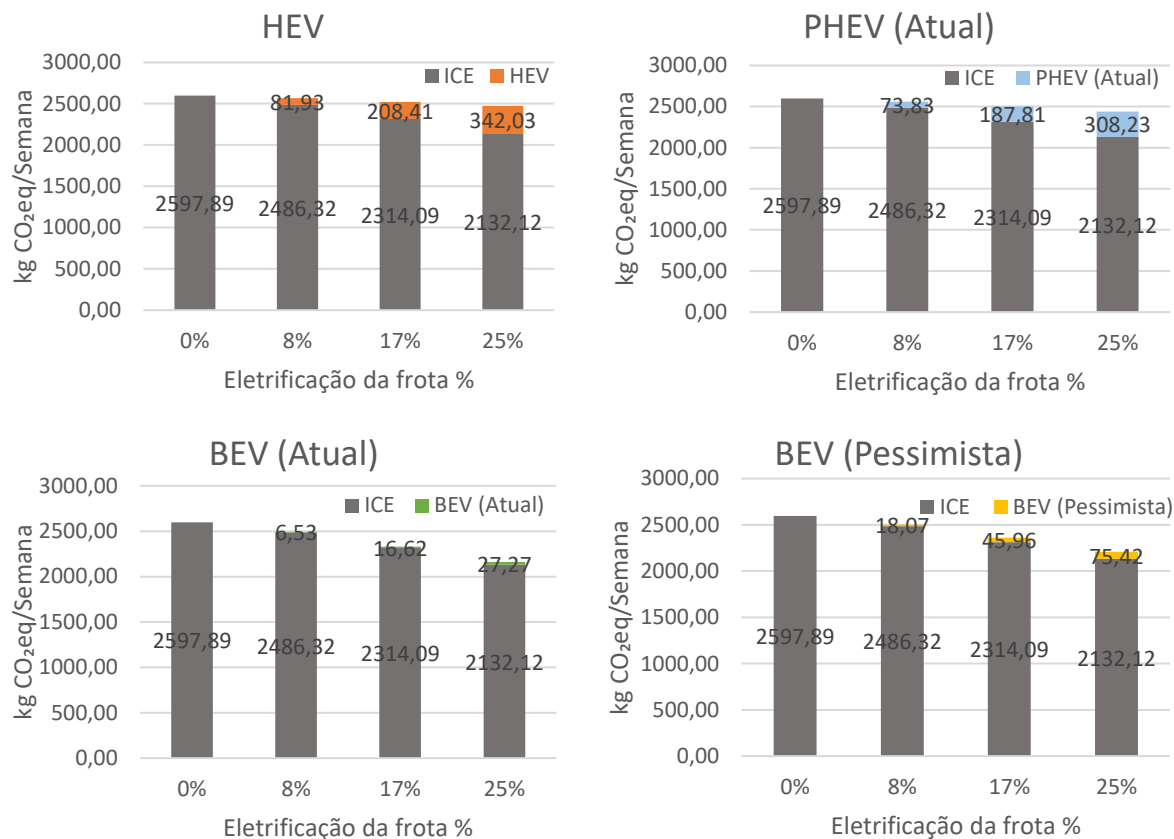
Cenário	Viagens eletrificadas	Emissão total (kg CO₂eq)	Redução absoluta (kg CO₂eq)	Redução (%)
HEV	20%	2461,45	138,12	5,31%
HEV	60%	2185,21	414,37	15,94%
HEV	100%	1908,97	690,61	26,57%
PHEV (Atual)	20%	2423,72	175,86	6,76%
PHEV (Atual)	60%	2072,00	527,57	20,29%
PHEV (Atual)	100%	1720,29	879,28	33,82%
BEV (Atual)	20%	2110,10	489,47	18,83%
BEV (Atual)	60%	1131,16	1468,41	56,49%
BEV (Atual)	100%	152,22	2447,35	94,14%
BEV (Pessimista)	20%	2163,85	435,73	16,76%
BEV (Pessimista)	60%	1292,40	1307,18	50,28%
BEV (Pessimista)	100%	420,95	2178,63	83,81%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise dos diferentes níveis de eletrificação das viagens demonstrou que, para o cenário de 100% de eletrificação da frota, os veículos BEV apresentaram o maior potencial de mitigação das emissões, alcançando redução de 94,14% no cenário de matriz elétrica atual. Já os veículos HEV apresentaram o menor potencial de redução, com mitigação de 26,57% em relação ao cenário base ICE.

Agora, considerando uma estratégia de eletrificação direcionada aos motoristas com maior e menor quilometragem semanal, apresentados na Tabela 23, torna-se possível avaliar o impacto da substituição veicular em diferentes perfis de utilização da frota na análise W2W. Nesse contexto, a Figura 13 apresenta os resultados do cenário de eletrificação aplicado aos motoristas com menor quilometragem semanal, permitindo analisar o potencial de mitigação das emissões associado a esse grupo de condutores.

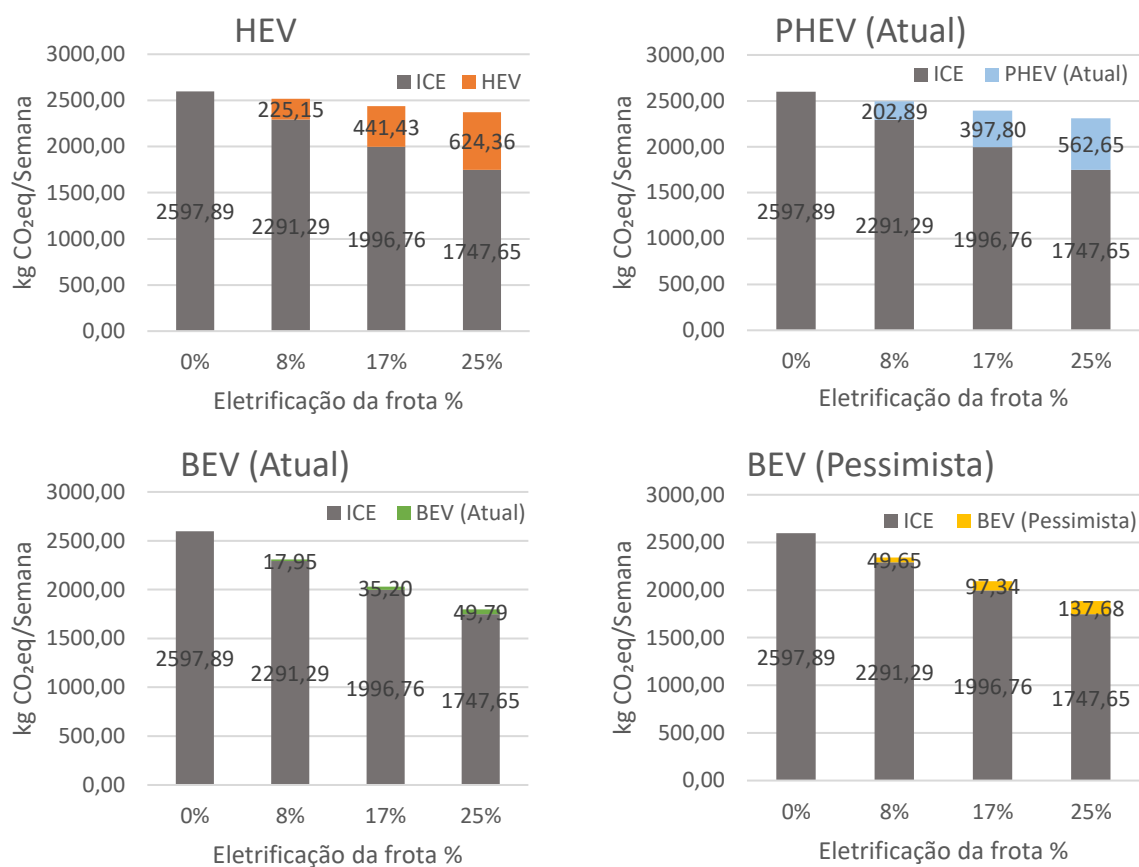
Figura 13 — Emissões W2W em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de menor quilometragem



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Realizando a mesma análise para os motoristas com maior quilometragem semanal, obtêm-se os resultados apresentados na Figura 14. Nesse cenário, a estratégia de eletrificação direcionada é aplicada aos condutores com maior intensidade de uso da frota, permitindo avaliar o potencial adicional de mitigação das emissões quando a substituição veicular prioriza os usuários responsáveis pelas maiores distâncias percorridas.

Figura 14 — Emissões W2W em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de alta quilometragem



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Após a apresentação dos cenários de eletrificação direcionada para 25% da frota nas Figuras 13 e 14, a Tabela 28 consolida os resultados obtidos em termos de emissões W2W, redução absoluta e mitigação percentual das emissões, permitindo comparar o desempenho das diferentes tecnologias quando aplicadas ao grupo de motoristas com menor e maior quilometragem semanal.

Tabela 28 — Redução das emissões pelo método W2W nos cenários de eletrificação direcionada

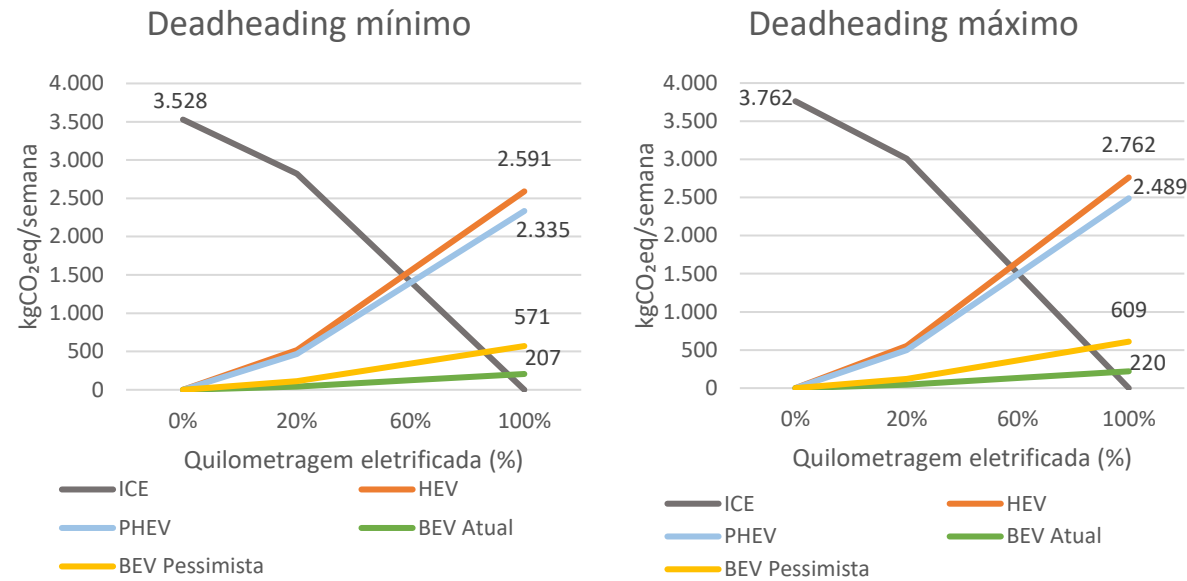
Cenário	Perfil de uso	Emissão total (kg CO ₂ eq)	Redução absoluta (kg CO ₂ eq)	Redução
HEV	Menor quilometragem	2474,13	123,76	4,76%
HEV	Maior quilometragem	2372,01	225,88	8,69%
PHEV	Menor quilometragem	2440,32	157,57	6,07%
PHEV	Maior quilometragem	2310,30	287,59	11,07%
BEV Atual	Menor quilometragem	2159,32	438,56	16,88%
BEV Atual	Maior quilometragem	1797,44	800,45	30,81%
BEV Pessimista	Menor quilometragem	2207,48	390,41	15,03%
BEV Pessimista	Maior quilometragem	1885,33	712,56	27,43%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Mesmo considerando a eletrificação direcionada de apenas 25% da frota, observou-se potencial de mitigação das emissões em todos os cenários analisados. Os maiores percentuais de redução foram obtidos para os veículos BEV no cenário de matriz elétrica atual, alcançando 30,81% de mitigação quando aplicados aos condutores com maior quilometragem semanal. Já no cenário pessimista de matriz elétrica, a redução observada para os veículos BEV foi de 27,43% para os motoristas de maior quilometragem. Em contrapartida, os menores percentuais de redução foram observados nos cenários com veículos HEV, variando entre 4,76% para motoristas de menor quilometragem e 8,69% para os de maior utilização da frota.

Como as análises anteriores consideraram apenas as distâncias percorridas com passageiros, realizou-se uma nova avaliação incorporando o efeito do deadheading. Para isso, foram estimadas as emissões semanais considerando limites mínimo e máximo de deadheading, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 25. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 15, que demonstra a variação das emissões totais e do potencial de mitigação para diferentes níveis de quilometragem eletrificada.

Figura 15 — Emissões semanais W2W em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando deadheading em Florianópolis



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A inclusão dos cenários de deadheading mínimo e máximo resultou em aumento das emissões semanais em todas as tecnologias analisadas. No cenário sem eletrificação, as emissões da frota passaram para aproximadamente 3528 kgCO₂eq/sem no caso de *deadheading* mínimo e 3762 kgCO₂eq/sem no cenário máximo. Mesmo com o aumento das emissões absolutas, os veículos BEV mantiveram os maiores potenciais de mitigação das emissões. No cenário de matriz elétrica atual e 100% de eletrificação da quilometragem, as emissões foram reduzidas para aproximadamente 207 kgCO₂eq/sem no cenário de deadheading mínimo e 220 kgCO₂eq/sem no cenário máximo. Já os veículos BEV no cenário pessimista apresentaram emissões de 571 kgCO₂eq/sem e 609 kgCO₂eq/sem, respectivamente. A Tabela 29 apresenta os valores absolutos de redução das emissões W2W para cada nível de eletrificação da quilometragem, considerando os cenários de *deadheading* mínimo e máximo em Florianópolis.

Tabela 29 — Redução das emissões W2W em cenários com inclusão de deadheading em Florianópolis

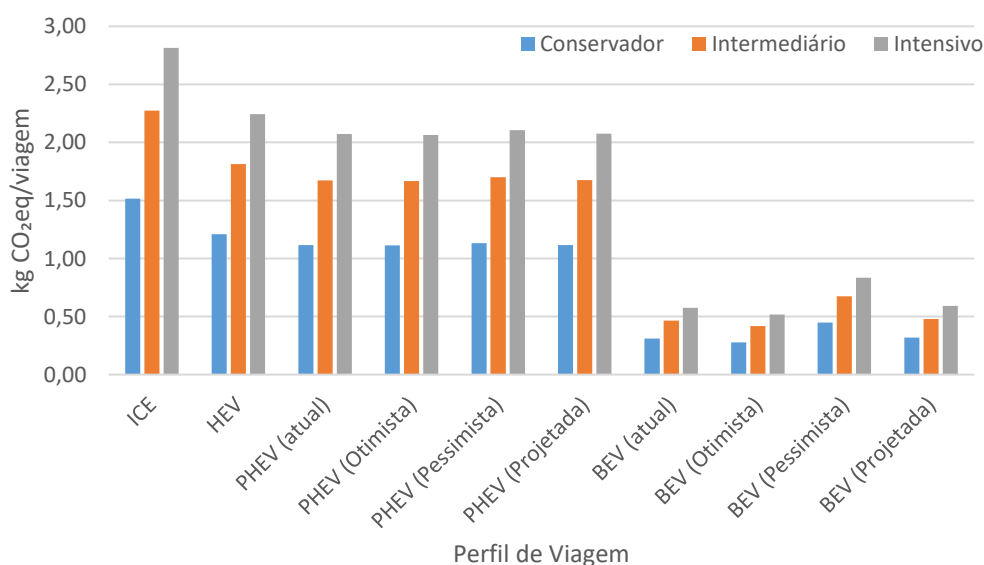
Cenário	Quilometragem eletrificada	HEV	PHEV (Atual)	BEV (Atual)	BEV (Pessimista)
Mínimo	20%	187	239	664	591,33
Mínimo	60%	562	716	1.993	1.774,00
Mínimo	100%	937	937	3.321	2.956,66
Máximo	20%	200	254	708	631
Máximo	60%	600	763	2.125	1.892
Máximo	100%	999	1.272	3.541	3.153

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.1.3 Emissões de CO₂eq em Florianópolis pelo método ACV

Nesta etapa, as análises anteriormente aplicadas aos métodos T2W e W2W são reproduzidas considerando as emissões associadas ao ciclo de vida completo dos veículos. Para Florianópolis, a análise ACV utiliza os parâmetros apresentados na Tabela 21, contemplando diferentes perfis de deslocamento e os fatores de emissão das tecnologias avaliadas. A Figura 16 apresenta as emissões de CO₂eq por viagem para deslocamentos de 7 km, 10,5 km e 13 km.

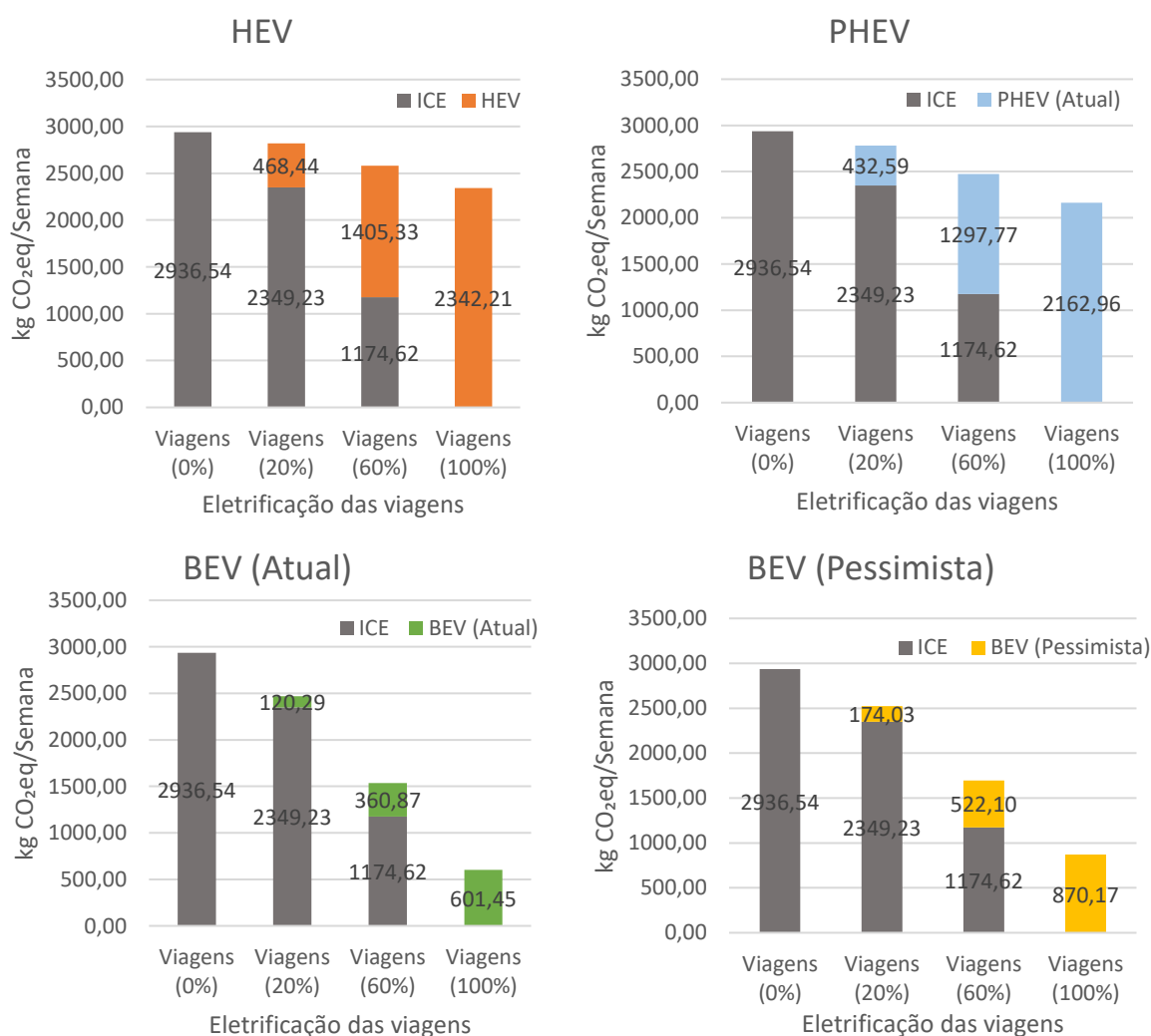
Figura 16 — Emissões ACV por tecnologia veicular para diferentes cenários de distância média em Florianópolis



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir dos valores de emissão por viagem obtidos anteriormente, foram estimadas as emissões semanais de CO₂eq para diferentes níveis de eletrificação das viagens da frota analisada. A Figura 17 apresenta os resultados para os cenários com 20%, 60% e 100% de eletrificação utilizando as tecnologias HEV, PHEV e BEV.

Figura 17 — Emissões semanais de CO₂eq pelo método ACV em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Florianópolis



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

No cenário sem eletrificação, a frota apresentou emissões semanais de aproximadamente 2936,54 kgCO₂eq. Entre as tecnologias analisadas, os veículos BEV apresentaram os maiores potenciais de mitigação das emissões. No cenário de matriz elétrica atual e 100% de eletrificação das viagens, as emissões foram reduzidas para aproximadamente 601,45 kgCO₂eq/semana, enquanto no cenário pessimista o valor obtido foi de 870,17 kgCO₂eq/semana. Já os veículos PHEV apresentaram

emissões de 2162,96 kgCO₂eq/semana para eletrificação total das viagens, enquanto os HEV atingiram 2342,21 kgCO₂eq/semana.

Os percentuais de redução das emissões para cada tecnologia e nível de eletrificação são apresentados na Tabela 30.

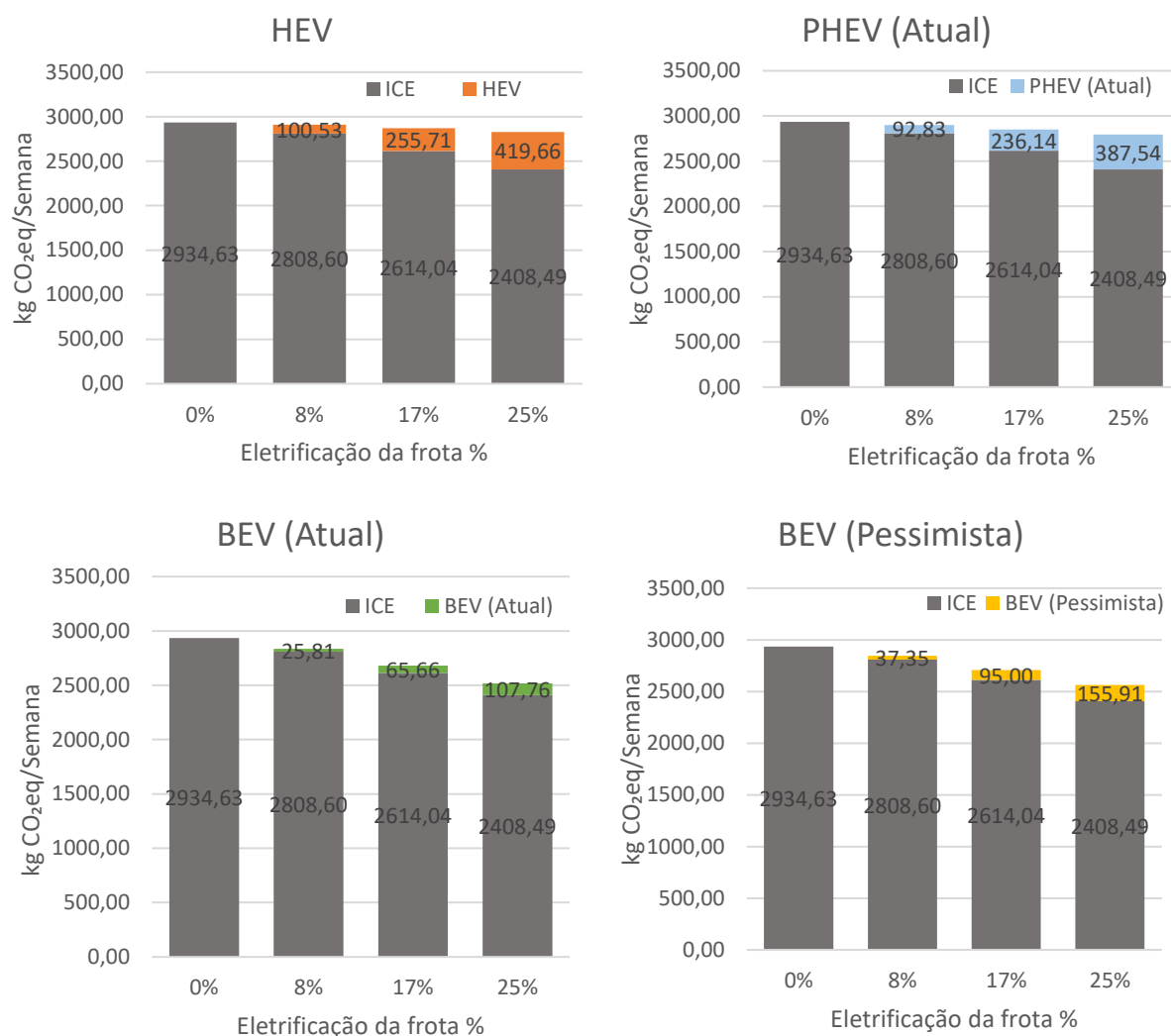
Tabela 30 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV em Florianópolis

Cenário	Viagens eletrificadas	Emissão total (kg CO ₂ eq)	Redução absoluta (kg CO ₂ eq)	Redução (%)
ICE	0%	2936,54	—	—
HEV	20%	2817,67	118,87	4,05%
HEV	60%	2579,94	356,60	12,14%
HEV	100%	2342,21	594,33	20,24%
PHEV	20%	2781,82	154,72	5,27%
PHEV	60%	2472,39	464,15	15,81%
PHEV	100%	2162,96	773,58	26,34%
BEV (Atual)	20%	2469,52	467,02	15,90%
BEV (Atual)	60%	1535,48	1401,06	47,71%
BEV (Atual)	100%	601,45	2335,09	79,52%
BEV (Pessimista)	20%	2523,27	413,27	14,07%
BEV (Pessimista)	60%	1696,72	1239,82	42,22%
BEV (Pessimista)	100%	870,17	2066,37	70,37%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir desses resultados, torna-se possível avaliar não apenas os cenários de eletrificação total da frota, mas também estratégias de eletrificação direcionada para perfis específicos de utilização. Com base nos dados apresentados na Tabela 23, foi realizada uma análise voltada aos motoristas com menores distâncias percorridas. Inicialmente, considerou-se a eletrificação do condutor com menor quilometragem semanal, seguida dos dois e, posteriormente, dos três motoristas com menores distâncias percorridas. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 18, permitindo avaliar o impacto da substituição gradual desses perfis nas emissões de CO₂eq da frota.

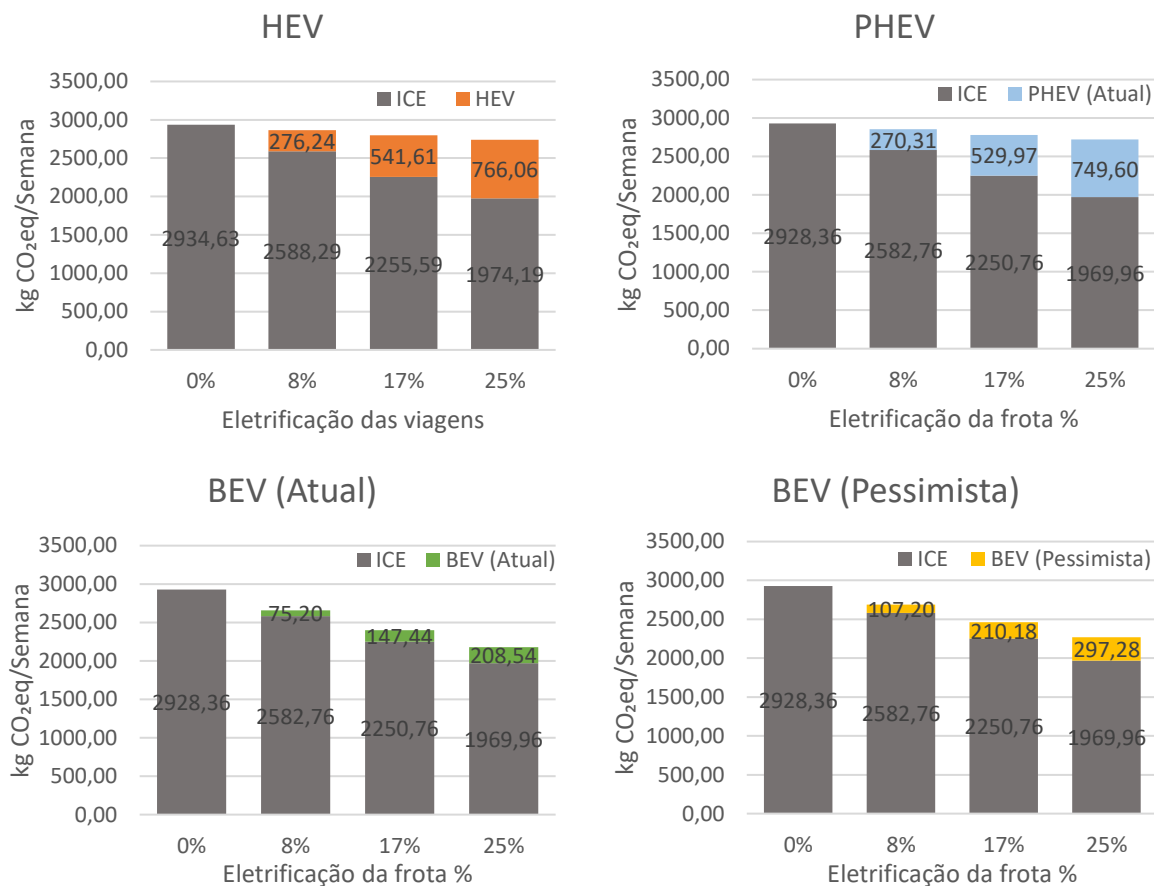
Figura 18 — Emissões ACV em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de menor quilometragem



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Para fins comparativos, será realizada a análise da eletrificação direcionada aos motoristas com maiores distâncias percorridas. As emissões resultantes desses cenários são apresentadas na Figura 19.

Figura 19 — Emissões ACV em cenários de eletrificação direcionada para motoristas de maior quilometragem



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

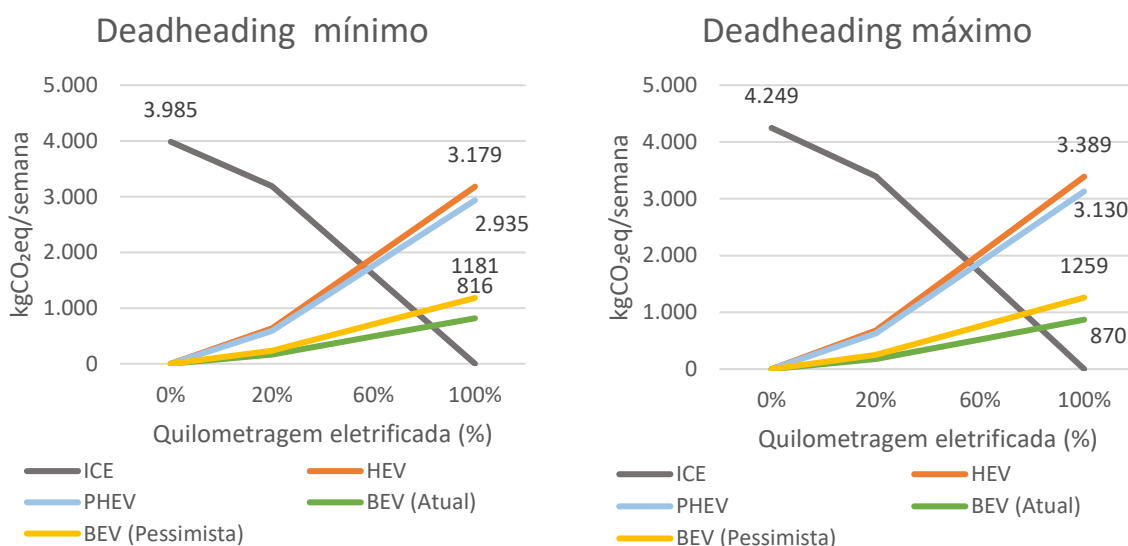
Por fim, a Tabela 31 apresenta a comparação da redução das emissões de CO₂eq obtida a partir da eletrificação dos dois grupos de motoristas analisados: aqueles com menores distâncias percorridas e aqueles com maiores quilômetros rodados. Essa comparação permite avaliar a sensibilidade das emissões em relação ao perfil de utilização da frota, evidenciando o impacto da quilometragem percorrida no potencial de redução proporcionado pela eletrificação.

Tabela 31 — Redução das emissões pelo método ACV nos cenários de eletrificação direcionada

Cenário	Perfil de uso	Emissão total (kg CO ₂ eq)	Redução absoluta (kg CO ₂ eq)	Redução (%)
HEV	Menor quilometragem	2828,13	106,50	3,63%
HEV	Maior quilometragem	2740,24	194,39	6,62%
PHEV	Menor quilometragem	2796,01	138,62	4,72%
PHEV	Maior quilometragem	2681,62	253,01	8,62%
BEV Atual	Menor quilometragem	2516,19	418,44	14,26%
BEV Atual	Maior quilometragem	2170,90	763,73	26,02%
BEV Pessimista	Menor quilometragem	2564,34	370,29	12,62%
BEV Pessimista	Maior quilometragem	2258,79	675,84	23,03%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As reduções apresentadas anteriormente consideram apenas as viagens realizadas com passageiros. A partir da inclusão dos valores de *deadheading* apresentados na Tabela 25, foi realizada a estimativa da redução das emissões totais no método ACV. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 32.

Tabela 32 — Emissões semanais ACV em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando *deadheading* em Florianópolis

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A inclusão dos cenários de *deadheading* mínimo e máximo resultou em aumento das emissões totais em todas as tecnologias analisadas, mesmo nos cenários com elevados níveis de eletrificação da frota. Ainda assim, os veículos BEV

mantiveram os maiores potenciais de mitigação das emissões na análise ACV, apresentando os menores valores absolutos de emissões entre as tecnologias avaliadas. A Tabela 33 consolida os valores absolutos de redução das emissões para cada tecnologia considerando os cenários de *deadheading* mínimo e máximo.

Tabela 33 — Redução das emissões ACV em cenários com inclusão de *deadheading* em Florianópolis

Cenário	Quilometragem eletrificada	HEV	PHEV (Atual)	BEV (Atual)	BEV (Pessimista)
Deadheading mín.	20%	161	210	634	561
Deadheading mín.	60%	484	630	1.901	1683
Deadheading mín.	100%	807	1.050	3.169	2804
Deadheading máx.	20%	172	224	676	598
Deadheading máx.	60%	516	672	2027	1794
Deadheading máx.	100%	860	1.119	3379	2990

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.1.4 Considerações sobre Florianópolis

A comparação entre os métodos T2W, W2W e ACV demonstra que a eletrificação do transporte por aplicativo em Florianópolis apresenta potencial significativo de mitigação das emissões de CO₂eq, independentemente da abordagem metodológica adotada. Entretanto, os resultados variam conforme a tecnologia veicular analisada e o escopo de emissões considerado em cada método.

Conforme apresentado na Tabela 34, os veículos BEV apresentaram os maiores percentuais de redução das emissões em todos os cenários analisados, com resultados mais expressivos à medida que aumentava o percentual de viagens eletrificadas. No cenário de 100% das viagens realizadas por veículos BEV considerando a matriz elétrica atual, observou-se redução de 94,14% no método W2W e de 79,52% na análise ACV. Mesmo no cenário pessimista da matriz elétrica, os veículos totalmente elétricos mantiveram reduções elevadas, alcançando 83,81% no método W2W e 70,37% na ACV.

Tabela 34 — Redução das emissões nos cenários de eletrificação das viagens em Florianópolis

Tecnologia	Eletrificação	T2W (%)	W2W (%)	ACV (%)
HEV	20%	5,31%	5,31%	4,05%
HEV	60%	15,94%	15,94%	12,14%
HEV	100%	26,57%	26,57%	20,24%
PHEV	20%	6,91%	6,76%	5,27%
PHEV	60%	20,73%	20,29%	15,81%
PHEV	100%	34,55%	33,82%	26,34%
BEV (Atual)	20%	-	18,83%	15,90%
BEV (Atual)	60%	-	56,49%	47,71%
BEV (Atual)	100%	-	94,14%	79,52%
BEV (Pessimista)	20%	-	16,76%	14,07%
BEV (Pessimista)	60%	-	50,28%	42,22%
BEV (Pessimista)	100%	-	83,81%	70,37%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise ACV apresentou os menores percentuais de redução das emissões entre os métodos avaliados. Isso ocorre porque essa abordagem considera não apenas as emissões operacionais dos veículos, mas também aquelas associadas à fabricação dos componentes veiculares, especialmente das baterias utilizadas nos veículos eletrificados. Dessa forma, os veículos BEV passam a incorporar emissões adicionais relacionadas à produção, transporte e manufatura das baterias, reduzindo parcialmente as reduções das emissões observados nas análises operacionais.

Por outro lado, o método W2W apresentou resultados particularmente favoráveis para os veículos BEV. Como as emissões desses veículos estão associadas principalmente à geração da eletricidade utilizada na recarga, o desempenho ambiental depende diretamente da intensidade de carbono da matriz elétrica. No contexto brasileiro, caracterizado por elevada participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica, as emissões associadas ao consumo de eletricidade tornam-se relativamente baixas, favorecendo os resultados obtidos para os veículos totalmente elétricos.

Além da análise do percentual de viagens eletrificadas, os cenários de eletrificação direcionada demonstraram que a priorização dos motoristas com maior quilometragem percorrida resulta em reduções de emissões superiores em todos os métodos analisados. Conforme apresentado na Tabela 35, a eletrificação dos motoristas que percorrem maiores distâncias produziu reduções de emissões

substancialmente superiores quando comparada aos motoristas de menor quilometragem, mesmo representando aproximadamente 25% da frota total analisada.

Tabela 35 — Redução das emissões nos cenários de eletrificação direcionada

Tecnologia	Perfil de uso	T2W (%)	W2W (%)	ACV (%)
HEV	Menor quilometragem	4,76%	4,76%	3,63%
HEV	Maior quilometragem	8,69%	8,69%	6,62%
PHEV	Menor quilometragem	6,19%	6,07%	4,72%
PHEV	Maior quilometragem	11,31%	11,07%	8,62%
BEV (Atual)	Menor quilometragem	-	16,88%	14,26%
BEV (Atual)	Maior quilometragem	-	30,81%	26,02%
BEV (Pessimista)	Menor quilometragem	-	15,03%	12,62%
BEV (Pessimista)	Maior quilometragem	-	27,43%	23,03%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados obtidos chamam atenção especialmente nos cenários com veículos BEV. Considerando a matriz elétrica atual, a eletrificação direcionada dos motoristas de maior quilometragem resultou em redução de 30,81% das emissões no método W2W e 26,02% na ACV, mesmo eletrificando apenas uma parcela da frota.

Esses resultados indicam que a quilometragem percorrida pelos veículos exerce influência significativa sobre o potencial de mitigação das emissões, tornando estratégias de eletrificação direcionada potencialmente mais eficientes do que abordagens uniformes de substituição da frota. Além disso, mesmo considerando o cenário pessimista da matriz elétrica brasileira, os veículos BEV continuaram apresentando os maiores percentuais de redução das emissões em comparação às demais tecnologias analisadas.

Quando adicionamos no valor de *deadheading* nas corridas, podemos ver a redução em kg CO₂eq por semana, apresentados na tabela 36.

Tabela 36 — Redução das emissões em cenários com inclusão de *deadheading* em Florianópolis

Tecnologia	Cenário	Eletrificação	T2W (kg CO ₂ eq)	W2W (kg CO ₂ eq)	ACV (kg CO ₂ eq)
HEV	Deadheading mín	20%	131	187	161
HEV	Deadheading mín	60%	392	562	484
HEV	Deadheading mín	100%	653	937	807
HEV	Deadheading máx	20%	139	200	172
HEV	Deadheading máx	60%	418	600	516
HEV	Deadheading máx	100%	696	999	860
PHEV	Deadheading mín	20%	170	239	210
PHEV	Deadheading mín	60%	510	716	630
PHEV	Deadheading mín	100%	849	937	1050
PHEV	Deadheading máx	20%	181	254	224
PHEV	Deadheading máx	60%	543	763	672
PHEV	Deadheading máx	100%	906	1272	1119
BEV-A	Deadheading mín	20%	—	664	634
BEV-A	Deadheading mín	60%	—	1993	1901
BEV-A	Deadheading mín	100%	—	3321	3169
BEV-A	Deadheading máx	20%	—	708	676
BEV-A	Deadheading máx	60%	—	2125	2027
BEV-A	Deadheading máx	100%	—	3541	3379
BEV-P	Deadheading mín	20%	—	591	561
BEV-P	Deadheading mín	60%	—	1774	1683
BEV-P	Deadheading mín	100%	—	2956	2804
BEV-P	Deadheading máx	20%	—	631	598
BEV-P	Deadheading máx	60%	—	1892	1794
BEV-P	Deadheading máx	100%	—	3153	2990

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados demonstram que esse efeito é observado em todas as tecnologias analisadas, porém de forma mais expressiva nos veículos BEV. Considerando o cenário de matriz elétrica atual e eletrificação de 100% das viagens, os veículos totalmente elétricos apresentaram redução de até 3541 kg CO₂eq/semana no método W2W e 3379 kg CO₂eq/semana na análise ACV no cenário de *deadheading* máximo. Se considerarmos que uma viagem média de um veículo ICE emite 2,28 kg CO₂eq pelo método ACV. Esses valores correspondem, aproximadamente, às emissões geradas por 1587 e 1487 viagens realizadas por veículos ICE, respectivamente. Mesmo no cenário pessimista da matriz elétrica brasileira, os veículos BEV mantiveram os maiores potenciais de mitigação das emissões, alcançando reduções de 3153 kg CO₂eq/semana no método W2W e 2990 kg CO₂eq/semana na ACV.

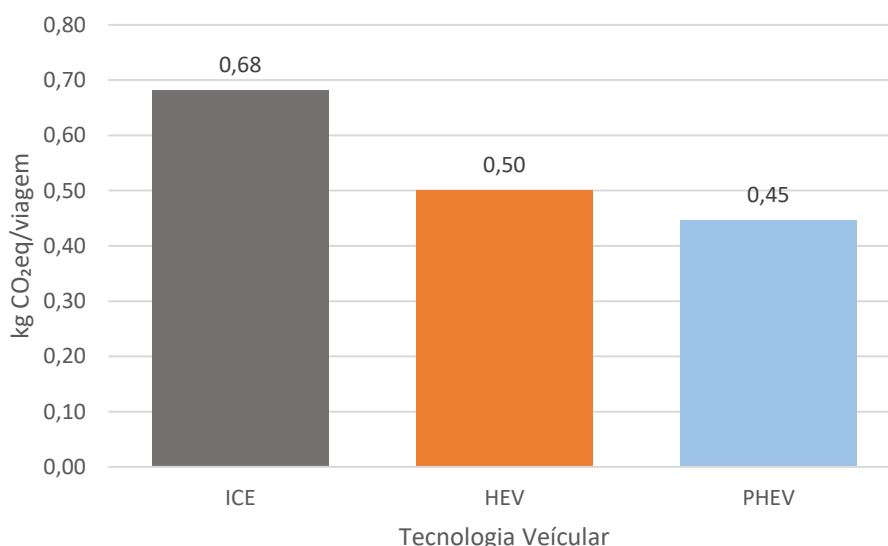
No contexto de Florianópolis, a discussão torna-se particularmente relevante devido à elevada distância média das viagens realizadas por transporte por aplicativo. Enquanto em cidades como Porto Alegre a distância média observada é de aproximadamente 5,1 km por viagem (CASSEI, 2018), em Florianópolis esse valor alcança cerca de 10,5 km por deslocamento. Esse fator contribui para o aumento da quilometragem operacional dos veículos de ride-hailing e, consequentemente, amplia tanto as emissões totais do sistema quanto o potencial de mitigação associado à eletrificação das viagens. Dessa forma, a eletrificação associada à redução da quilometragem ociosa pode representar uma estratégia relevante para mitigação das emissões urbanas no município.

4.2 EMISSÕES DE CO₂EQ EM PORTO ALEGRE

4.2.1 Emissões de CO₂eq em Porto Alegre pelo método T2W

Para o cálculo das emissões T2W no cenário de Porto Alegre, foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 5. Os resultados obtidos para as emissões médias por viagem são apresentados na Figura 20.

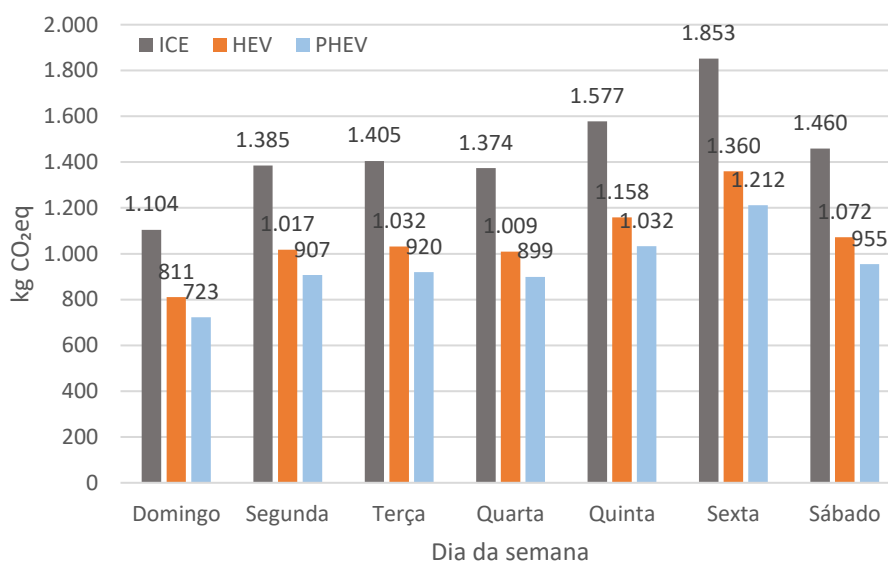
Figura 20 — Emissões médias por viagem em Porto Alegre pelo Método T2W



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Ao combinar os valores de emissão por viagem com a distribuição do número de viagens por dia da semana apresentada na Tabela 4, torna-se possível estimar as emissões diárias de CO₂eq associadas ao transporte por aplicativo para cada tecnologia veicular analisada. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 21.

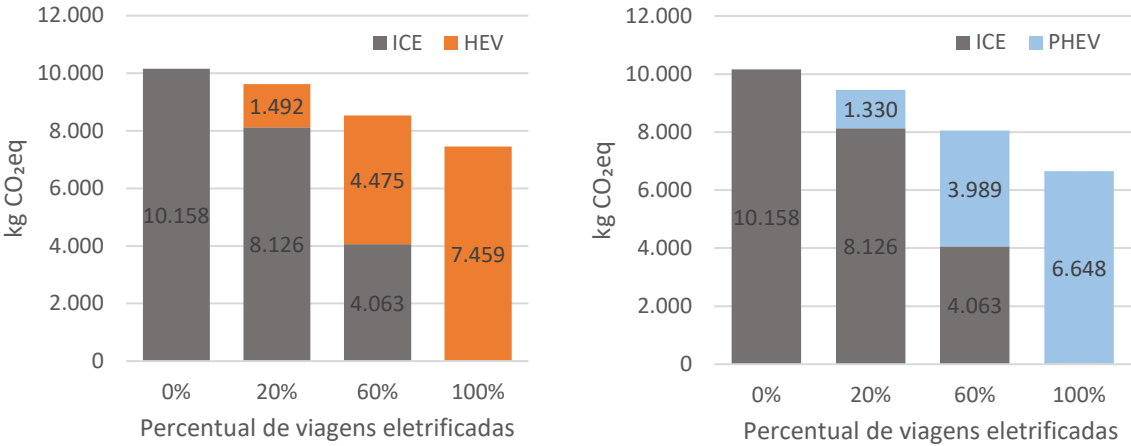
Figura 21 — Emissões diárias de CO₂ eq pelo método T2W em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os dados analisados refletem a variação da demanda semanal, totalizando uma amostra de 14.914 deslocamentos. Em substituição à análise das emissões diárias, utilizou-se o volume semanal consolidado para avaliar as emissões de CO₂eq e seu potencial de redução frente ao aumento da eletrificação das viagens. A partir dessa consolidação, foram projetadas as emissões totais para diferentes níveis de eletrificação dos deslocamentos, considerando cenários em que parte da demanda é atendida por veículos HEV ou PHEV, enquanto os deslocamentos remanescentes continuam a ser realizados por veículos ICE. Os resultados dessas projeções são apresentados na Figura 22.

Figura 22 — Emissões semanais de CO₂eq pelo método T2W em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Complementarmente, a Tabela 37 detalha as reduções nas emissões semanais de CO₂eq para os cenários de eletrificação das viagens com as tecnologias HEV e PHEV, tomando como referência o cenário composto integralmente por veículos ICE sob a ótica do método T2W.

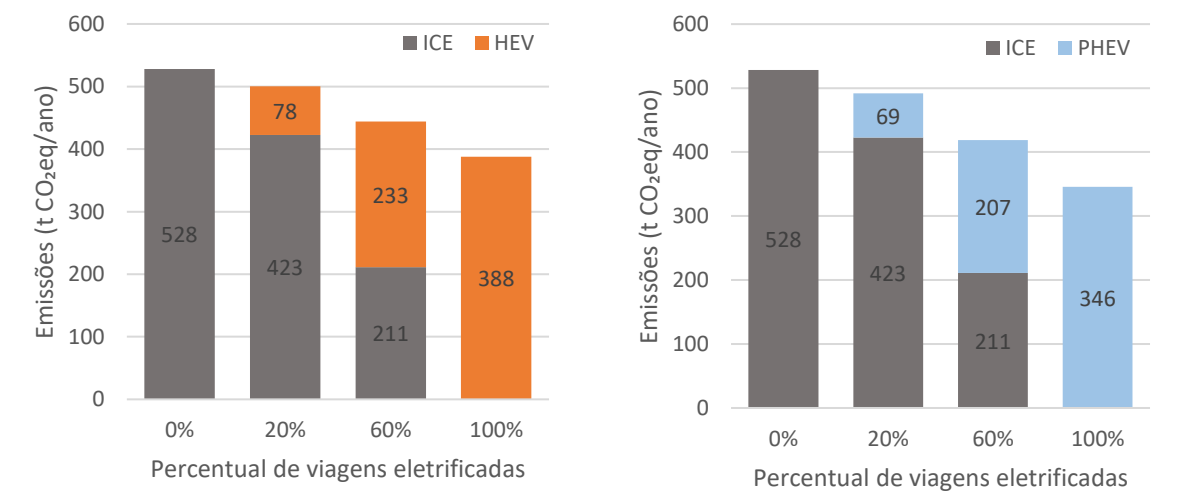
Tabela 37 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método T2W em Porto Alegre

Percentual de viagens eletrificadas	Redução HEV (kg CO ₂ eq)	Redução HEV (%)	Redução PHEV (kg CO ₂ eq)	Redução PHEV (%)
20%	540	5,31%	702	6,91%
60%	1.619	15,94%	2.106	20,73%
100%	2.698	26,57%	3.509	34,55%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As reduções apresentadas indicam que a substituição gradual de viagens realizadas por veículos ICE por tecnologias HEV e PHEV pode reduzir as emissões semanais de CO₂eq em até 2.698 kg e 3.509 kg, respectivamente, no cenário de eletrificação total das viagens analisadas. Embora a análise semanal permita avaliar os impactos imediatos da eletrificação da frota, a ampliação do horizonte temporal possibilita uma melhor compreensão do potencial acumulado de mitigação de emissões. Dessa forma, considerando um período de 52 semanas, correspondente a um ano de operação, foram estimadas as emissões anuais de CO₂eq para os diferentes cenários analisados, permitindo expressar os resultados em toneladas de CO₂eq evitadas por ano, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 — Emissões anuais de CO₂eq pelo método T2W em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

As emissões anuais de CO₂eq para os níveis de eletrificação das viagens analisados pelo método T2W evidenciam o impacto da inserção de veículos HEV e PHEV. A Tabela 38 consolida as reduções anuais absolutas dessas emissões em comparação ao cenário composto integralmente por veículos ICE.

Tabela 38 — Redução anual das emissões de CO₂eq em relação ao cenário ICE, pelo método T2W, em Porto Alegre

Percentual de viagens eletrificadas	Emissões HEV (t CO ₂ eq)	Redução HEV (t CO ₂ eq)	Emissões PHEV (t CO ₂ eq)	Redução PHEV (t CO ₂ eq)
20%	501	27	492	36
60%	444	84	418	110
100%	388	140	346	182

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados apresentados indicam que a eletrificação gradual da frota de veículos utilizados no transporte por aplicativo pode proporcionar reduções expressivas nas emissões anuais de CO₂eq, alcançando até 182 t CO₂eq/ano no cenário de substituição integral das viagens por veículos PHEV. Contudo, as estimativas realizadas até esta etapa consideram exclusivamente a quilometragem associada às viagens com passageiros, desconsiderando os deslocamentos

operacionais realizados pelos motoristas entre corridas, como o trajeto até o próximo embarque ou períodos de circulação sem passageiros.

Esses deslocamentos sem passageiros, conhecidos na literatura como *deadheading*, representam uma parcela relevante da quilometragem total percorrida por veículos de transporte por aplicativo. Segundo Cramer e Krueger, essa distância adicional pode corresponder a um acréscimo entre 35,8% e 44,8% sobre a quilometragem total percorrida. Considerando que a amostra analisada apresentou 75.899,87 km percorridos ao longo de uma semana, a extrapolação para um período anual de 52 semanas resulta em 3.946.793,24 km. A partir desse valor, foram aplicados fatores de correção associados ao *deadheading*, permitindo estimar a quilometragem anual efetivamente percorrida pela frota nos cenários mínimo e máximo analisados, conforme apresentado na Tabela 39.

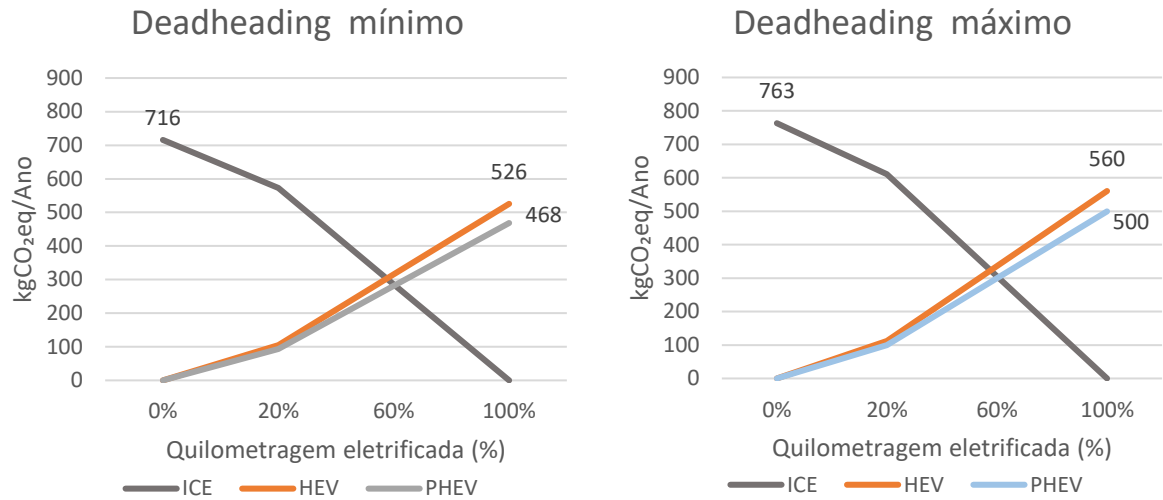
Tabela 39 — Quilometragem anual da frota considerando a inclusão de *deadheading* em Porto Alegre

Cenário	Fator aplicado	Quilometragem anual (km)
Sem <i>deadheading</i>	1	3.946.793,24
Com <i>deadheading</i> (mín.)	1,358	5.359.745,22
Com <i>deadheading</i> (máx.)	1,448	5.714.956,61

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Considerando os fatores de *deadheading* mínimo e máximo, foram estimadas as emissões anuais de CO₂eq para os diferentes níveis de eletrificação da frota e tecnologias veiculares analisadas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 24.

Figura 24 — Emissões anuais T2W em diferentes níveis de quilometragem eletrificada considerando *deadheading* em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Ao incorporar os cenários de *deadheading* mínimo e máximo, a Figura 24 evidencia que a inclusão dos deslocamentos operacionais sem passageiros eleva as emissões anuais de CO₂eq em todas as tecnologias avaliadas. Com base nas emissões anuais estimadas, a Tabela 40 apresenta as reduções absolutas de CO₂eq em relação ao cenário composto integralmente por veículos ICE para os diferentes cenários analisados.

Tabela 40 — Redução anual das emissões de t CO₂eq considerando cenários de *deadheading* em Porto Alegre

Cenário	Quilometragem eletrificada	Redução HEV (t CO ₂ eq)	Redução PHEV (t CO ₂ eq)
Deadheading mínimo	20%	38	49
Deadheading mínimo	60%	114	148
Deadheading mínimo	100%	190	247
Deadheading máximo	20%	41	53
Deadheading máximo	60%	122	158
Deadheading máximo	100%	203	264

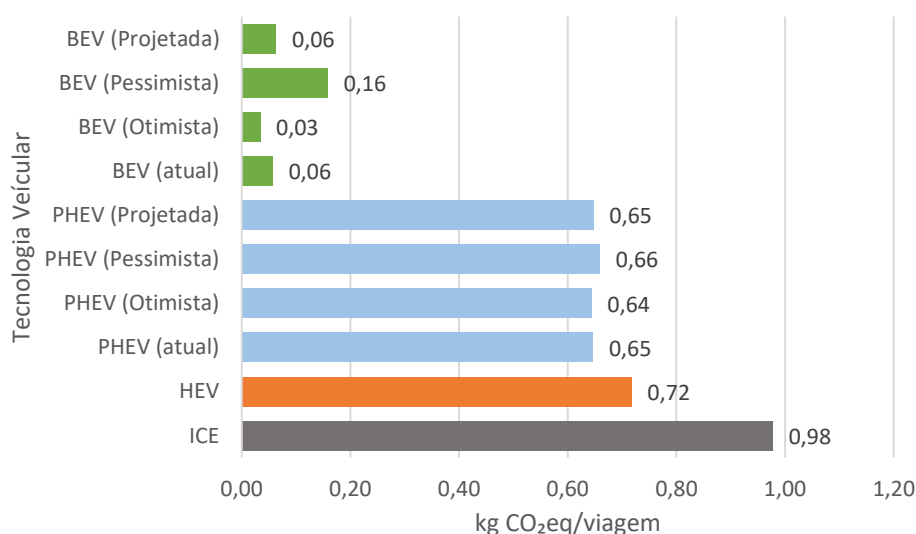
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.2.2 Emissões de CO₂eq em Porto Alegre pelo método W2W

Em complemento às análises realizadas pelo método T2W, proceder-se-á à avaliação das emissões de CO₂eq utilizando a metodologia W2W. Para o cálculo

dessas emissões no cenário específico de Porto Alegre, foram empregados os parâmetros detalhados na Tabela 5. Subsequentemente, a Figura 25 ilustra as emissões médias por viagem, considerando uma distância percorrida de 5,1 km, para as tecnologias ICE, HEV, PHEV e BEV sob distintos cenários de matriz elétrica. Esta abordagem permite uma comparação abrangente do desempenho das emissões dessas alternativas sob distintas condições de fornecimento energético.

Figura 25 — Emissões médias por viagem em Porto Alegre pelo Método W2W



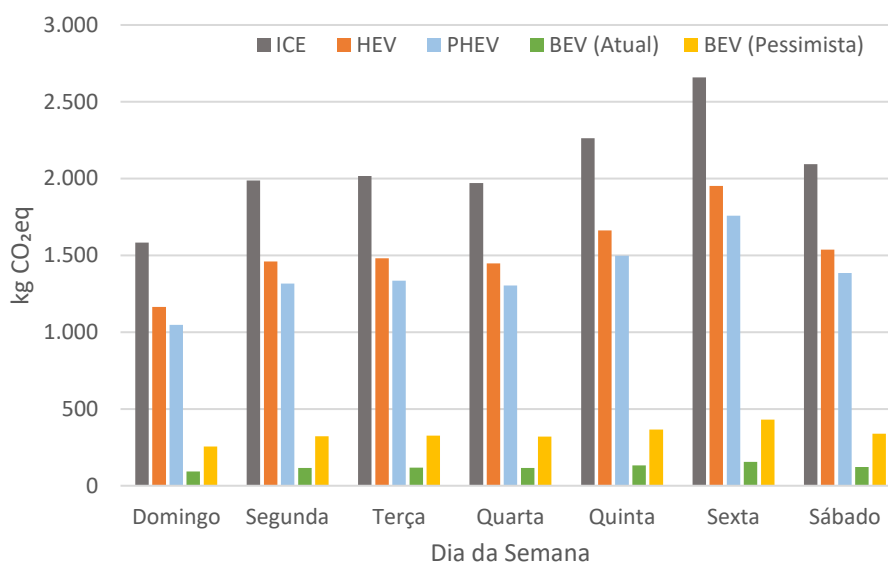
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os veículos PHEV não apresentaram elevada sensibilidade ao tipo de matriz elétrica, devido ao fato de que, nesta análise, operam majoritariamente em modo a combustão. Dessa forma, para as etapas subsequentes da análise, será considerado apenas o cenário de PHEV associado à matriz elétrica atual. Por outro lado, os veículos BEV demonstraram maior sensibilidade às emissões provenientes da matriz elétrica, no cenário atual, observou-se uma emissão média de 0,06 kg CO₂eq por viagem, enquanto no cenário pessimista esse valor aumentou para 0,16 kg CO₂eq por viagem. Assim, os dois cenários de matriz elétrica para os veículos BEV serão mantidos nas análises seguintes, de modo a avaliar o impacto dessa sensibilidade nos resultados obtidos.

Com base nos valores médios de emissão por viagem, utilizou-se a Tabela 4, que apresenta o número de viagens por dia da semana, para estimar as emissões associadas a um cenário hipotético em que todas as viagens fossem realizadas pelas

diferentes tecnologias avaliadas. Os resultados dessa análise são apresentados na Figura 26.

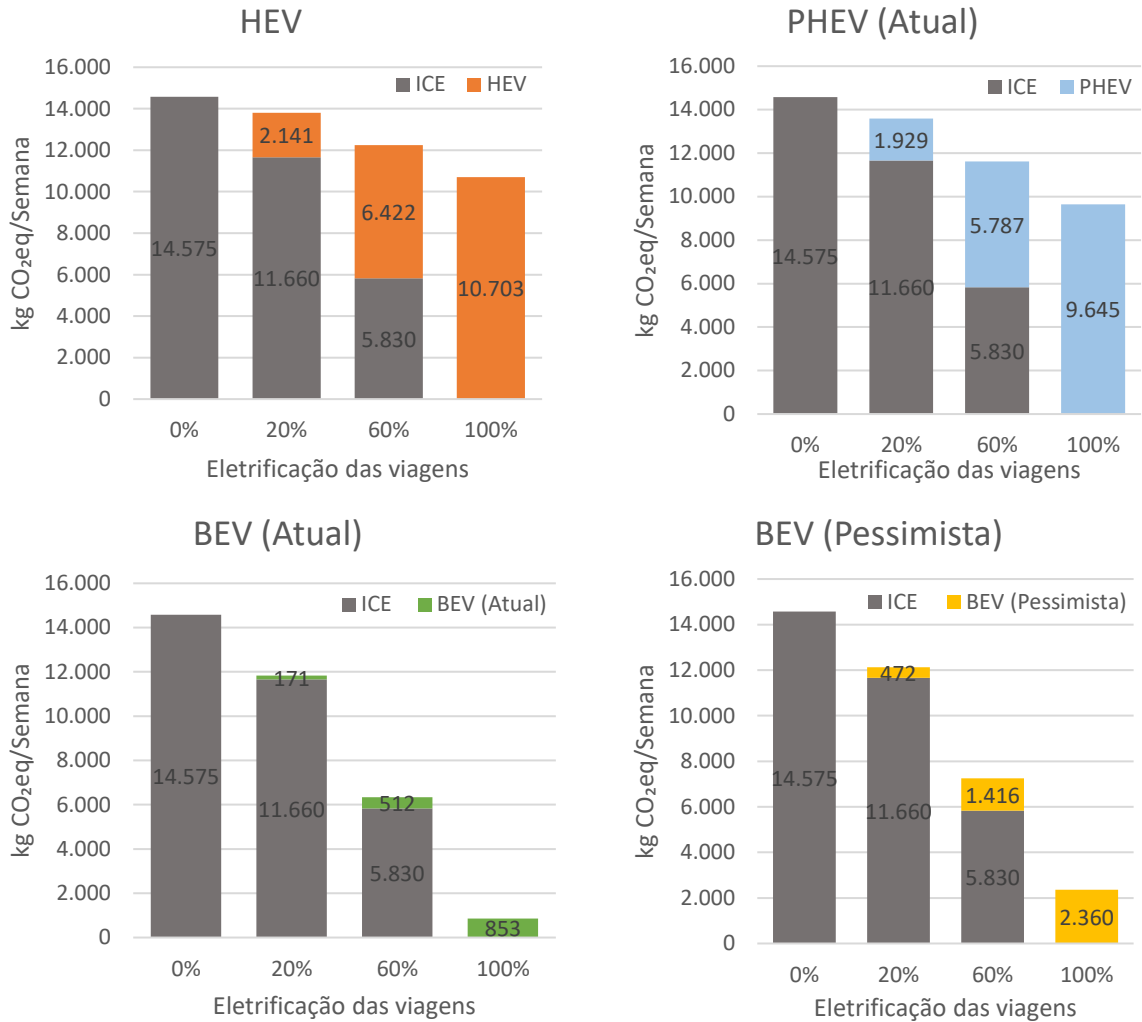
Figura 26 — Emissões diárias de CO₂ eq pelo método W2W em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Utilizando essa semana como base, foram consideradas 14.914 viagens realizadas ao longo do período analisado. A Figura 27 apresenta as emissões totais de CO₂eq para diferentes níveis de eletrificação das viagens, permitindo avaliar o impacto gradual da substituição de veículos convencionais por tecnologias eletrificadas.

Figura 27 — Emissões semanais de CO₂eq pelo método W2W em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os cenários com veículos HEV apresentaram reduções mais moderadas, enquanto os veículos BEV alcançaram os maiores ganhos de mitigação, mantendo emissões significativamente inferiores mesmo no cenário pessimista da matriz elétrica. Esses resultados evidenciam que o nível de eletrificação da propulsão exerce influência mais significativa sobre as emissões totais do que as variações consideradas para a matriz elétrica. A Tabela 41 apresenta quantitativamente as reduções obtidas em cada cenário analisado.

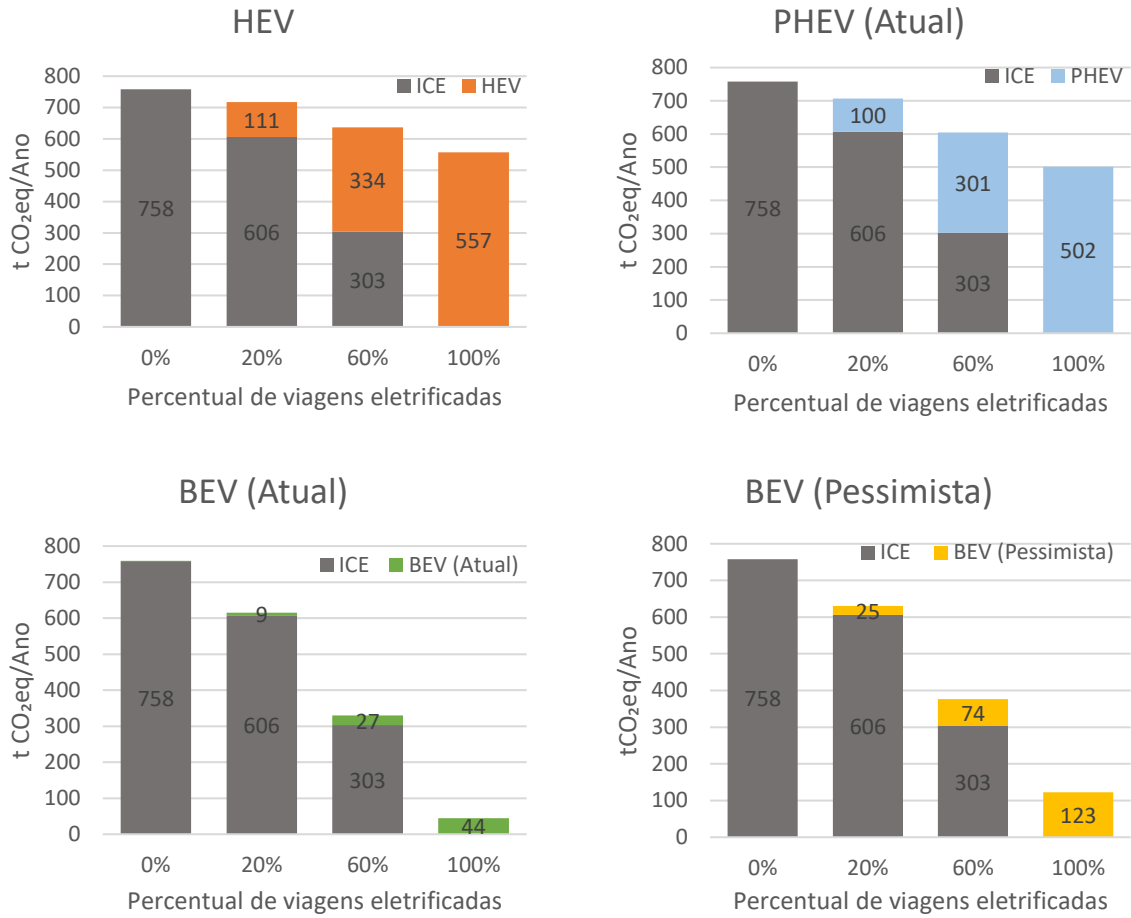
Tabela 41 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método W2W em Porto Alegre

Tecnologia	Eletrificação	Emissões (kg CO ₂ eq)	Redução (kg CO ₂ eq)	Redução (%)
ICE	0%	14.575	—	—
HEV	20%	13.801	774	5,31%
HEV	60%	12.252	2.323	15,94%
HEV	100%	10.703	3.872	26,57%
PHEV (Atual)	20%	13.589	986	6,76%
PHEV (Atual)	60%	11.617	2.958	20,29%
PHEV (Atual)	100%	9.645	4.930	33,82%
BEV (Atual)	20%	11.831	2.744	18,83%
BEV (Atual)	60%	6.342	8.233	56,49%
BEV (Atual)	100%	853	13.722	94,14%
BEV (Pessimista)	20%	12.132	2.443	16,76%
BEV (Pessimista)	60%	7.246	7.329	50,28%
BEV (Pessimista)	100%	2.360	12.215	83,81%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A análise das emissões semanais pelo método W2W revelou que o cenário operado exclusivamente por veículos ICE emite 14.575 kg CO₂eq. As reduções alcançadas nos cenários de eletrificação das viagens situaram-se entre o mínimo de 774 kg CO₂eq e o máximo de 13.722 kg CO₂eq. Para proporcionar uma visão mais abrangente do impacto ambiental, realizou-se a projeção desses valores para um período anual equivalente a 52 semanas. O expressivo potencial de descarbonização resultante é detalhado na Figura 28, que quantifica as reduções anuais em toneladas de CO₂eq para cada nível de eletrificação.

Figura 28 — Emissões anuais de CO₂eq pelo método W2W em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A Tabela 42 apresenta de forma quantitativa as reduções absolutas e percentuais das emissões anuais para os diferentes cenários analisados.

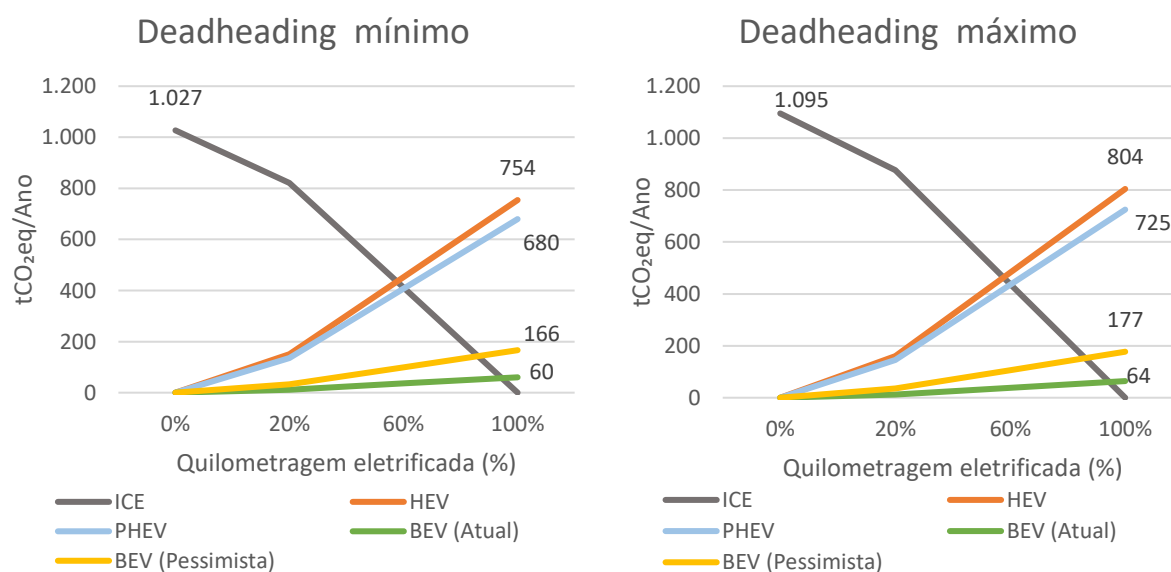
Tabela 42 — Redução anual das emissões de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método W2W

Tecnologia	Eletrificação	Emissões anuais (t CO ₂ eq)	Redução absoluta (t CO ₂ eq)	Redução (%)
ICE	0%	758	—	—
HEV	20%	718	40	5,31%
HEV	60%	637	121	15,94%
HEV	100%	557	201	26,57%
PHEV (Atual)	20%	707	51	6,76%
PHEV (Atual)	60%	604	154	20,29%
PHEV (Atual)	100%	502	256	33,82%
BEV (Atual)	20%	615	143	18,83%
BEV (Atual)	60%	330	428	56,49%
BEV (Atual)	100%	44	714	94,14%
BEV (Pessimista)	20%	631	127	16,76%
BEV (Pessimista)	60%	377	381	50,28%
BEV (Pessimista)	100%	123	635	83,81%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Entretanto, as análises anteriores não consideram as emissões adicionais associadas ao *deadheading* dos motoristas, apresentado na Tabela 39. Dessa forma, a Figura 29 apresenta as emissões anuais de CO₂eq considerando os cenários de *deadheading* mínimo e máximo obtidos pelo método T2W para os diferentes níveis de eletrificação da frota em Porto Alegre.

Figura 29 — Emissões anuais de CO₂eq considerando cenários de *deadheading* mínimo e máximo em Porto Alegre pelo método W2W



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Mesmo considerando os cenários de *deadheading* mínimo e máximo, os BEV apresentam os menores níveis de emissão anual de CO₂eq entre as tecnologias avaliadas. No cenário de *deadheading* máximo, os veículos ICE ultrapassam 1.000 t CO₂eq/ano, enquanto os BEV associados à matriz elétrica atual permanecem abaixo de 100 t CO₂eq/ano. Esses resultados indicam que o aumento da quilometragem percorrida sem passageiros não compromete de forma significativa o potencial de redução de emissões proporcionado pelas tecnologias totalmente elétricas. A Tabela 43 apresenta, de forma quantitativa, as reduções anuais obtidas em relação ao cenário ICE.

Tabela 43 — Redução anual das emissões de CO₂eq em relação ao cenário ICE considerando diferentes cenários de *deadheading*

Cenário	Eletrificação	HEV (t CO ₂ eq)	PHEV (t CO ₂ eq)	BEV A. (t CO ₂ eq)	BEV P. (t CO ₂ eq)
Deadheading mín	20%	55	69	193	172
Deadheading mín	60%	164	208	580	516
Deadheading mín	100%	273	347	967	861
Deadheading máx	20%	58	74	206	184
Deadheading máx	60%	175	222	619	551
Deadheading máx	100%	291	370	1.031	918

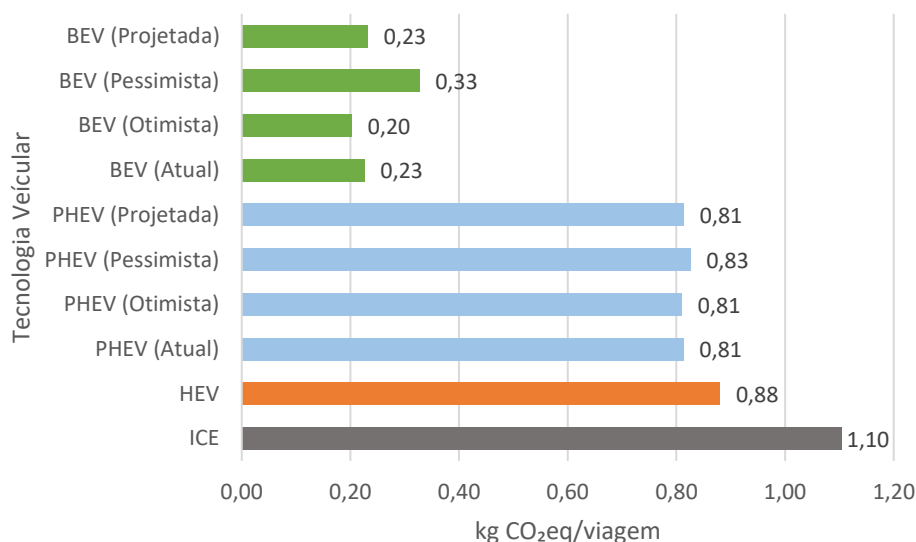
Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.2.3 Emissões de CO₂eq em Porto Alegre pelo método ACV

A análise ACV foi realizada para a frota de Porto Alegre utilizando os parâmetros previamente apresentados na Tabela 5. Diferentemente das abordagens T2W e W2W, a ACV incorpora emissões associadas às etapas de fabricação dos veículos, incluindo a produção das baterias dos veículos BEV, permitindo uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais das tecnologias analisadas.

A Figura 30 apresenta as emissões de CO₂eq por viagem média para cada tecnologia veicular considerando diferentes cenários de matriz elétrica.

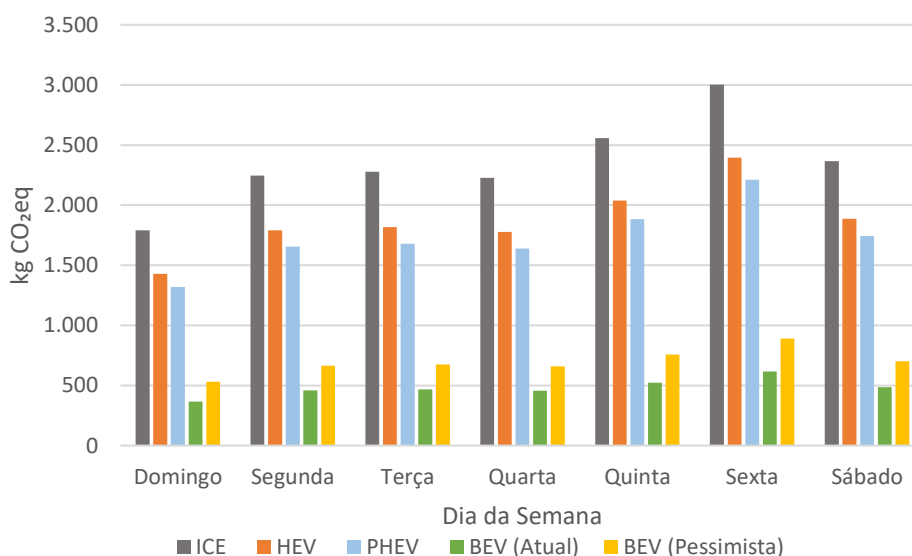
Figura 30 — Emissões de CO₂ por viagem média em Porto Alegre pelo método ACV



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Com os valores de emissão por viagem calculados, foi possível estimar as emissões diárias pelo método ACV a partir da distribuição de viagens apresentada na Tabela 4, que descreve a variação da demanda ao longo dos dias da semana. A Figura 31 ilustra as emissões diárias associadas a cada tecnologia veicular analisada.

Figura 31 — Emissões diárias de CO₂ eq pelo método ACV em Porto Alegre

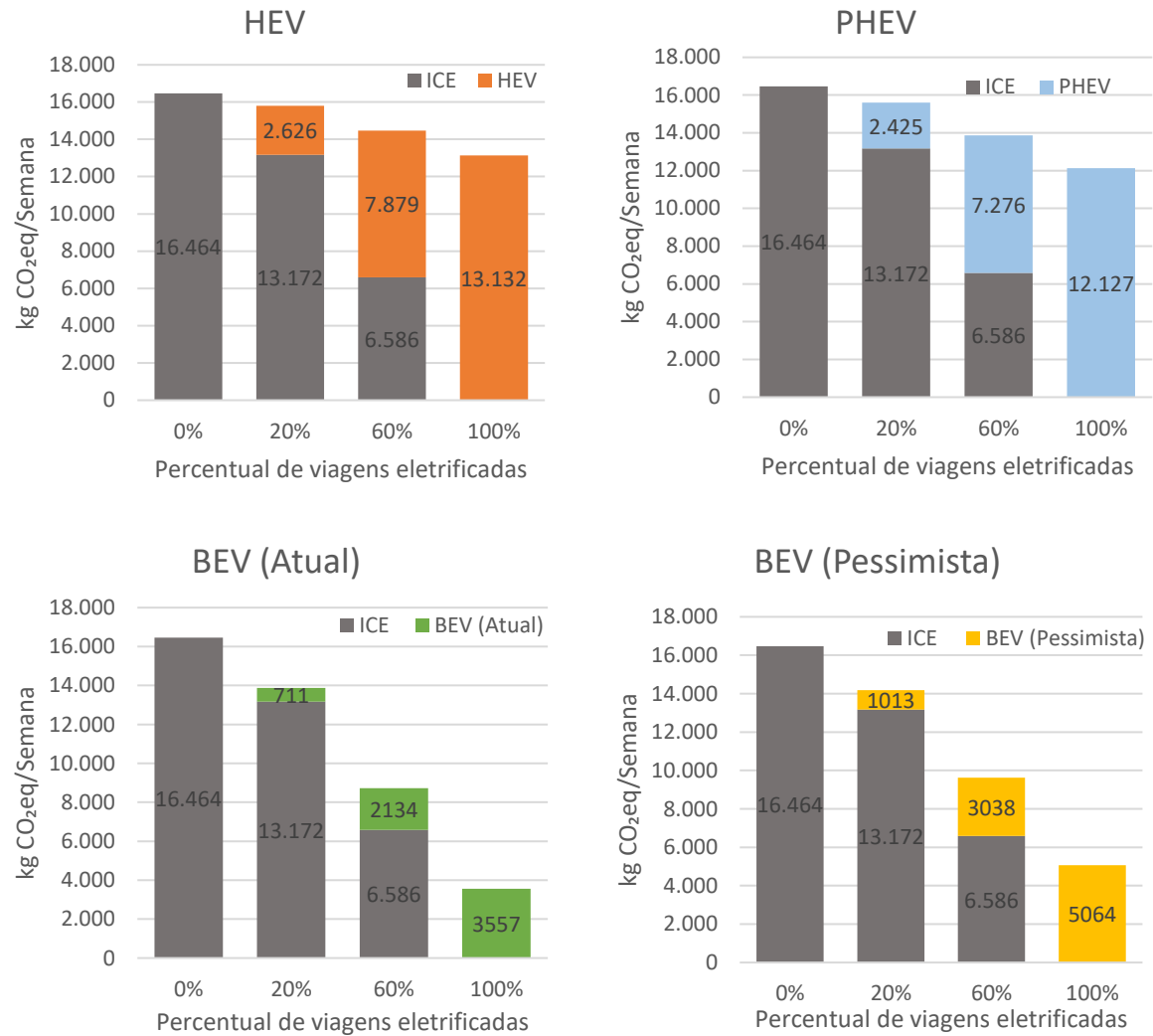


Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A partir da análise diária das emissões apresentada anteriormente, torna-se possível avaliar o comportamento acumulado das emissões ao longo da semana para os diferentes níveis de eletrificação das viagens. A Figura 32 apresenta a comparação

das emissões semanais de CO₂eq considerando os cenários de substituição progressiva dos veículos convencionais por tecnologias HEV e PHEV no município de Porto Alegre.

Figura 32 — Emissões semanais de CO₂eq pelo método ACV em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados quantitativos da análise de substituição das viagens por tecnologias eletrificadas, considerando o método ACV, são apresentados na Tabela 44.

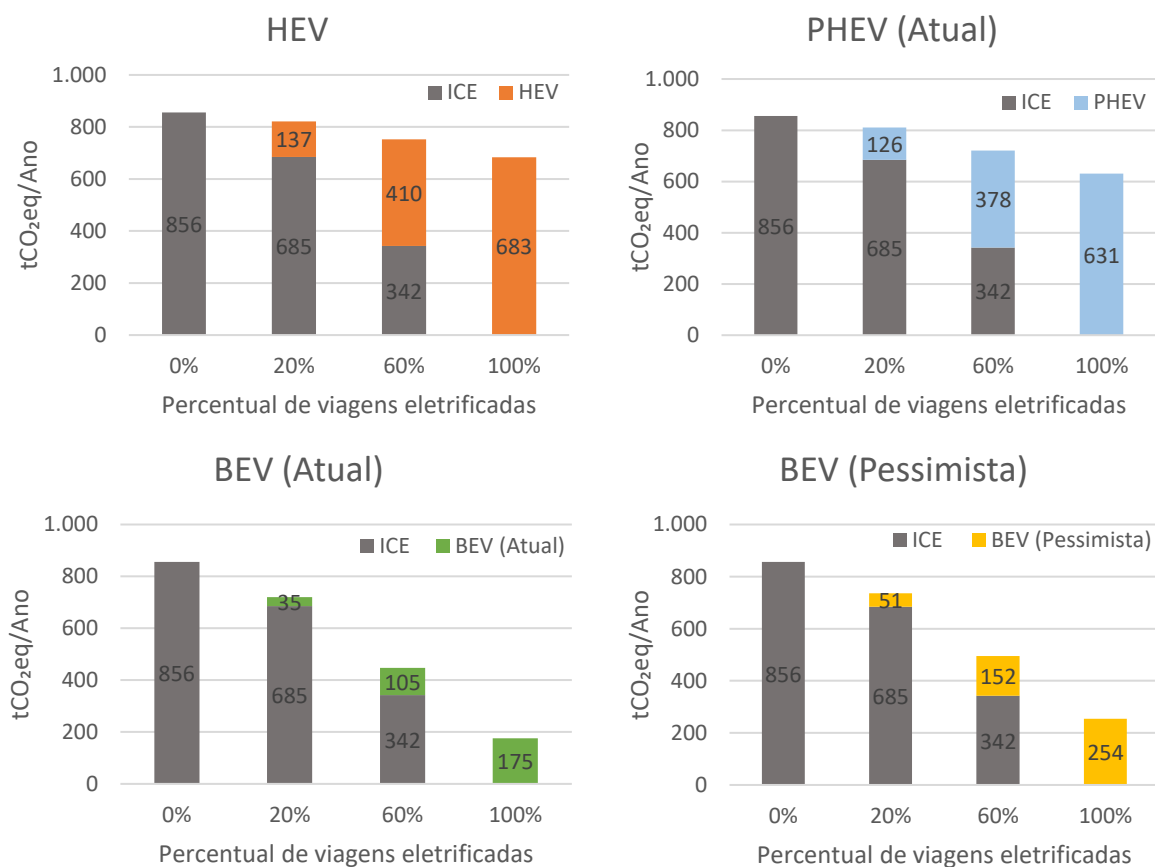
Tabela 44 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV

Tecnologia	Elettrificação (%)	Emissões (kg CO₂eq)	Redução absoluta (kg CO₂eq)	Redução (%)
ICE	0%	16.464	—	—
HEV	20%	15.798	666	4,05%
HEV	60%	14.465	1.999	12,14%
HEV	100%	13.132	3.332	20,24%
PHEV (Atual)	20%	15.597	867	5,27%
PHEV (Atual)	60%	13.862	2.602	15,81%
PHEV (Atual)	100%	12.127	4.337	26,34%
BEV (Atual)	20%	13.846	2.618	15,90%
BEV (Atual)	60%	8.609	7.855	47,71%
BEV (Atual)	100%	3.372	13.092	79,52%
BEV (Pessimista)	20%	14.147	2.317	14,07%
BEV (Pessimista)	60%	9.513	6.951	42,22%
BEV (Pessimista)	100%	4.879	11.586	70,37%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados obtidos nesta análise tornam-se ainda mais expressivos quando avaliados em um período superior a uma semana. Considerando um ano composto por 52 semanas, as emissões anuais estimadas são apresentadas na Figura 33.

Figura 33 — Emissões anuais de CO₂eq pelo método ACV em diferentes níveis de eletrificação das viagens em Porto Alegre



Fonte: Elaborada pelo autor (2026)

Os resultados das reduções anuais de emissões, em toneladas de CO₂eq, para cada nível de eletrificação das viagens são apresentados na Tabela 45.

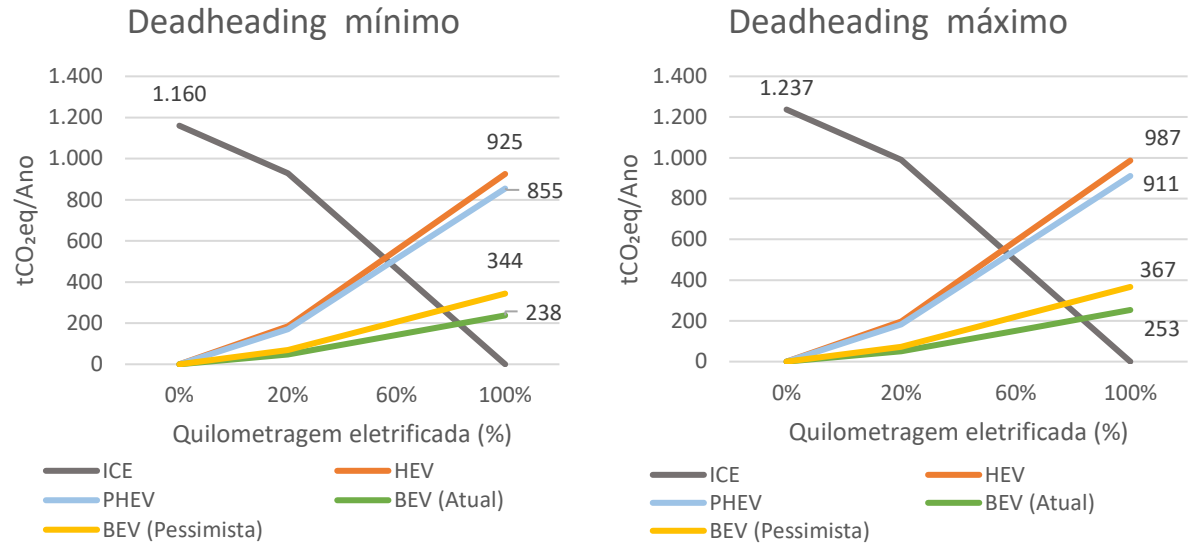
Tabela 45 — Redução das emissões anuais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV

Tecnologia	Nível de eletrificação	Emissão total (t CO ₂ eq)	Redução (t CO ₂ eq)	Redução (%)
ICE	0%	856	—	—
HEV	20%	821	35	4,05%
HEV	60%	752	104	12,14%
HEV	100%	683	173	20,24%
PHEV (Atual)	20%	811	45	5,27%
PHEV (Atual)	60%	721	135	15,81%
PHEV (Atual)	100%	631	225	26,34%
BEV (Atual)	20%	720	136	15,90%
BEV (Atual)	60%	448	408	47,71%
BEV (Atual)	100%	175	681	79,52%
BEV (Pessimista)	20%	736	120	14,07%
BEV (Pessimista)	60%	495	361	42,22%
BEV (Pessimista)	100%	254	602	70,37%

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A última análise considera a inclusão das distâncias percorridas sem passageiros, apresentadas na Tabela 39, permitindo uma estimativa mais representativa das emissões associadas à operação real dos veículos no transporte por aplicativo. Dessa forma, além das viagens efetivamente realizadas, a análise incorpora os deslocamentos necessários entre chamadas, busca por passageiros e reposicionamento dos veículos na malha urbana. A Figura 34 apresenta os cenários de *deadheading* mínimo e máximo considerados nesta etapa da análise, possibilitando avaliar a influência dessas distâncias adicionais nas emissões totais de CO₂eq.

Figura 34 — Emissões anuais de CO₂eq considerando cenários de *deadheading* mínimo e máximo em Porto Alegre pelo método ACV



Fonte: elaborada pelo autor (2026).

A redução das emissões associada aos diferentes cenários analisados é apresentada na Tabela 46, que quantifica a mitigação anual em toneladas de CO₂eq para cada nível de eletrificação considerado.

Tabela 46 — Redução das emissões semanais de CO₂eq em relação ao cenário ICE pelo método ACV

Cenário	Eletrificação (%)	HEV (t CO ₂ eq)	PHEV (t CO ₂ eq)	BEV A. (t CO ₂ eq)	BEV P. (t CO ₂ eq)
Deadheading mínimo	20%	47	61	185	163
Deadheading mínimo	60%	141	183	554	490
Deadheading mínimo	100%	235	306	923	816
Deadheading máximo	20%	50	65	197	174
Deadheading máximo	60%	150	196	590	522
Deadheading máximo	100%	250	326	984	871

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

4.2.4 Considerações sobre Porto Alegre

Diferentemente da análise realizada para Florianópolis, que teve como foco a avaliação comparativa dos cenários de eletrificação em escala semanal, a análise de Porto Alegre permitiu estimar o potencial anual de mitigação de emissões em uma operação de transporte por aplicativo mais representativa das condições reais de mercado. A utilização de uma base com 14.914 viagens semanais possibilitou converter os resultados em valores absolutos anuais de CO₂eq evitado, oferecendo uma dimensão mais concreta dos benefícios ambientais associados à eletrificação da frota, conforme apresentado na Tabela 47.

Tabela 47 — Redução das emissões anuais nos cenários de eletrificação aleatória em Porto Alegre

Tecnologia	Eletrificação	T2W (t CO₂eq)	W2W (t CO₂eq)	ACV (t CO₂eq)
HEV	20%	27	40	35
HEV	60%	84	121	104
HEV	100%	140	201	173
PHEV	20%	36	51	45
PHEV	60%	110	154	135
PHEV	100%	182	256	225
BEV (Atual)	20%	—	143	136
BEV (Atual)	60%	—	428	408
BEV (Atual)	100%	—	714	681
BEV (Pessimista)	20%	—	127	120
BEV (Pessimista)	60%	—	381	361
BEV (Pessimista)	100%	—	635	602

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Os resultados demonstram que o potencial de mitigação aumenta tanto com o nível de eletrificação da frota quanto com o grau de eletrificação da tecnologia adotada. Em todos os métodos de contabilização avaliados, os veículos BEV apresentaram os maiores benefícios ambientais, superando significativamente os cenários com HEV e PHEV. Mesmo considerando uma matriz elétrica menos favorável, os veículos totalmente elétricos mantiveram reduções substanciais de emissões, indicando que os benefícios da eletrificação permanecem robustos frente a variações na intensidade de carbono da geração elétrica.

Considerando que uma viagem média realizada por veículos ICE em Porto Alegre emite aproximadamente 1,10 kgCO₂eq, a mitigação observada nos diferentes cenários equivale às emissões geradas por aproximadamente 32 mil a 619 mil viagens anuais. Essa equivalência evidencia que mesmo níveis parciais de eletrificação podem representar uma redução expressiva das emissões do setor, enquanto cenários de eletrificação total possuem potencial para compensar as emissões associadas a centenas de milhares de viagens realizadas por veículos convencionais.

Quando os quilômetros percorridos sem passageiros (*deadheading*) são incorporados à análise, as reduções absolutas de emissões tornam-se ainda mais expressivas, conforme apresentado na Tabela 48. Isso ocorre porque esses deslocamentos representam uma parcela relevante da atividade operacional dos motoristas de aplicativo e contribuem significativamente para a quilometragem total percorrida ao longo do ano. Como consequência, a substituição de veículos convencionais por modelos eletrificados passa a reduzir não apenas as emissões associadas às viagens com passageiros, mas também aquelas geradas durante os deslocamentos necessários para posicionamento dos veículos e busca de novas corridas. Dessa forma, a consideração do *deadheading* evidencia que o potencial de mitigação da eletrificação está relacionado à totalidade da operação do serviço, e não apenas às viagens efetivamente realizadas com usuários.

Tabela 48 — Redução das emissões em cenários com inclusão de deadheading em Porto Alegre

Tecnologia	Cenário	Eletrificação	T2W (t CO ₂ eq)	W2W (t CO ₂ eq)	ACV (t CO ₂ eq)
HEV	Deadheading mín	20%	38	55	47
HEV	Deadheading mín	60%	114	164	141
HEV	Deadheading mín	100%	190	273	235
HEV	Deadheading máx	20%	41	58	50
HEV	Deadheading máx	60%	122	175	150
HEV	Deadheading máx	100%	203	291	250
PHEV	Deadheading mín	20%	49	69	61
PHEV	Deadheading mín	60%	148	208	183
PHEV	Deadheading mín	100%	247	347	306
PHEV	Deadheading máx	20%	53	74	65
PHEV	Deadheading máx	60%	158	222	196
PHEV	Deadheading máx	100%	264	370	326
BEV-A	Deadheading mín	20%	—	193	185
BEV-A	Deadheading mín	60%	—	580	554
BEV-A	Deadheading mín	100%	—	967	923
BEV-A	Deadheading máx	20%	—	206	197
BEV-A	Deadheading máx	60%	—	619	590
BEV-A	Deadheading máx	100%	—	1.031	984
BEV-P	Deadheading mín	20%	—	172	163
BEV-P	Deadheading mín	60%	—	516	490
BEV-P	Deadheading mín	100%	—	861	816
BEV-P	Deadheading máx	20%	—	184	174
BEV-P	Deadheading máx	60%	—	551	522
BEV-P	Deadheading máx	100%	—	918	871

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

A inclusão dos quilômetros percorridos sem passageiros evidencia uma característica estrutural do transporte por aplicativo frequentemente negligenciada em inventários de emissões. Embora essas distâncias não estejam diretamente associadas ao transporte de usuários, elas representam uma parcela relevante da atividade operacional dos motoristas e contribuem significativamente para as emissões totais do sistema. Consequentemente, os benefícios da eletrificação tornam-se ainda mais expressivos quando o *deadheading* é considerado, uma vez que a substituição de veículos convencionais reduz emissões tanto durante as viagens remuneradas quanto durante os deslocamentos necessários para posicionamento e busca de passageiros.

4.3 DISCUSSÃO

4.3.1 Influência da matriz elétrica e das baterias no ACV dos BEVs

Os BEVs apresentaram as maiores reduções de emissões entre as tecnologias analisadas, alcançando reduções máximas de 94% na análise W2W e de 79,55% na análise ACV, conforme apresentado na Tabela 47. A magnitude dessas reduções pode ser atribuída principalmente à combinação entre a baixa intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira e o elevado padrão de utilização dos veículos de *ride-hailing*. Esses fatores influenciam diretamente as emissões associadas ao consumo de eletricidade e à fabricação das baterias, aspectos frequentemente apontados na literatura como determinantes para os resultados de emissões dos veículos elétricos.

No caso brasileiro, a matriz elétrica constitui uma vantagem importante para a eletrificação do transporte. Nos cenários considerados neste estudo, sendo eles o atual, o projetado e o otimista, os fatores de emissão permaneceram inferiores a 0,06 kgCO₂eq/kWh, ampliando significativamente o potencial de redução das emissões decorrente da substituição de veículos ICE por BEVs, especialmente na análise W2W. Esses valores são compatíveis com aqueles encontrados na literatura nacional. Gauto et al. (2023), ao compararem diferentes tecnologias veiculares sob a perspectiva das emissões de ciclo de vida, adotaram um fator de emissão da eletricidade de 0,0996 kgCO₂eq/kWh. De forma semelhante, Mera et al. (2023), em uma comparação entre as emissões de ciclo de vida de veículos elétricos e veículos com motor a combustão no Brasil, utilizaram um valor de 0,083 kgCO₂eq/kWh. Embora existam diferenças entre os valores reportados, decorrentes principalmente dos anos de referência considerados e das variações temporais da matriz elétrica brasileira, todos apontam para uma intensidade de carbono relativamente baixa quando comparada a outros países.

A influência da matriz elétrica sobre o desempenho das emissões dos BEVs também foi evidenciada por Gauto et al. (2023). Em sua análise ACV, os autores estimaram emissões de aproximadamente 0,104 kgCO₂eq/km para um BEV operando no Brasil, enquanto um veículo equivalente na Europa apresentou emissões de 0,143 kgCO₂eq/km. Segundo os autores, a principal explicação para essa diferença está nas

emissões associadas à geração de eletricidade, estimadas em 0,024 kgCO₂eq/km no contexto brasileiro e em 0,065 kgCO₂eq/km no europeu. Esses resultados reforçam que uma das principais críticas direcionadas aos veículos elétricos, relacionada às emissões provenientes da geração de eletricidade, apresenta relevância reduzida no contexto brasileiro devido à elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica nacional.

Outro aspecto frequentemente apontado como limitação dos BEVs em termos de emissões do ciclo de vida refere-se às emissões associadas à fabricação das baterias de alta tensão. Entretanto, os resultados obtidos sugerem que esse impacto é relativamente reduzido quando distribuído ao longo da vida útil do veículo. Em Mera et al. (2023) estimaram que a produção da bateria de um BEV de porte médio gera aproximadamente 2,7 tCO₂eq. Considerando a quilometragem acumulada de 288 mil quilômetros adotada pelos autores para a vida útil dos veículos no Brasil, esse valor corresponde a aproximadamente 9,38 gCO₂eq/km. Mesmo utilizando o maior valor de emissões reportado por Mera et al. (2023) para baterias de veículos compactos, equivalente a 3,4 tCO₂eq, as emissões aumentam para aproximadamente 11,81 gCO₂eq/km. Dessa forma, a diferença entre os cenários representa um acréscimo de 2,43 gCO₂eq/km, indicando que as incertezas relacionadas à fabricação das baterias exercem influência limitada ao longo de toda a vida útil do veículo. Esse resultado sugere que variações nas emissões de produção das baterias não alteram substancialmente a superioridade dos BEVs na mitigação das emissões de CO₂eq observada neste estudo.

No contexto do *ride-hailing*, esse efeito torna-se ainda mais relevante. Os dados obtidos em Florianópolis indicaram uma média de 1.131 km percorridos por semana por motorista. Mantido esse padrão operacional, um veículo pode ultrapassar 325 mil quilômetros em aproximadamente seis anos de operação, valor superior à quilometragem total considerada por Mera et al. (2023) para a vida útil dos veículos analisados. Como as emissões associadas à fabricação da bateria representam uma parcela fixa das emissões totais do veículo, sua contribuição relativa diminui à medida que a quilometragem acumulada aumenta. Consequentemente, as emissões da bateria são diluídas mais rapidamente ao longo da operação do veículo, reduzindo seu impacto por quilômetro percorrido.

Assim, os achados indicam que os BEVs se beneficiam de duas condições particularmente favoráveis no cenário estudado. A primeira é estrutural, conectada à

baixa intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira, o que diminui significativamente as emissões associadas ao consumo de eletricidade durante a operação dos veículos. A segunda está ligada às características operacionais do setor de *ride-hailing*. Como os veículos dessa modalidade apresentam quilometragens anuais substancialmente superiores às observadas em veículos particulares, as emissões da produção das baterias são distribuídas por uma maior distância percorrida, reduzindo sua contribuição relativa para os poluentes por quilômetro. Desse modo, os dois principais fatores normalmente apontados como limitações ambientais dos BEVs apresentam impacto reduzido no contexto analisado. Essas condições ajudam a explicar as reduções observadas neste estudo, que alcançaram até 94% na análise W2W e 79,55% na análise ACV. Os resultados apontam que a combinação entre uma matriz elétrica de baixa intensidade de carbono e a elevada quilometragem operacional dos veículos de *ride-hailing* potencializa os benefícios ambientais da eletrificação, ampliando as reduções de emissões obtidas com a adoção dos BEVs.

Entretanto, um aspecto não contemplado nesta pesquisa refere-se à reciclagem e ao fim de vida das baterias, fatores que podem influenciar as emissões totais dos BEVs ao longo do ciclo de vida. Gauto et al. (2023) destacam que a reciclagem das baterias pode reduzir a necessidade de extração de matérias-primas críticas, como lítio, cobalto, cobre e alumínio, diminuindo parte dos impactos ambientais associados à mineração e à fabricação de novas baterias. Segundo os autores, a incorporação de materiais reciclados na produção de novas baterias pode reduzir as emissões de carbono entre 7% e 31%. Esse potencial de redução sugere que as emissões associadas aos BEVs podem ser ainda menores do que aquelas estimadas neste estudo, especialmente em cenários futuros de maior consolidação da economia circular no setor automotivo. Por outro lado, Gauto et al. (2023) também ressaltam que ainda existem incertezas relacionadas à escala futura da reciclagem, à eficiência dos processos de recuperação de materiais e aos impactos ambientais associados ao reaproveitamento e à disposição final das baterias. Como a eletrificação veicular ainda se encontra em processo de expansão e grande parte das baterias atualmente em circulação não atingiu o fim de sua vida útil, as evidências disponíveis sobre essas etapas permanecem limitadas. Apesar dessas incertezas, os resultados obtidos indicam que elas não são suficientes para alterar a tendência observada neste estudo. Assim, a combinação entre a baixa intensidade de carbono

da matriz elétrica brasileira e a elevada quilometragem dos veículos de *ride-hailing* faz com que os BEVs permaneçam como a alternativa de menor emissão entre as tecnologias avaliadas, mesmo quando consideradas as emissões associadas à fabricação das baterias.

4.3.2 Eletrificação direcionada

Os resultados indicam que a efetividade da eletrificação não depende exclusivamente da proporção de veículos elétricos na frota, mas, principalmente, da quantidade de quilômetros efetivamente eletrificados. Mesmo com apenas 25% da frota convertida para veículos elétricos, a priorização dos motoristas de maior VKT permitiu alcançar reduções de emissões superiores à participação desses veículos na frota. A eletrificação de apenas 25% dos motoristas que mais percorrem quilômetros com veículos BEV resultou em uma redução de 30,81% das emissões na análise W2W e aproximadamente 26% na análise ACV. Em contrapartida, a eletrificação da mesma proporção de motoristas com baixa quilometragem resultou em reduções de CO₂eq de 16,88% pelo método W2W e 14,26% pelo método ACV.

Esse comportamento está alinhado aos resultados observados por Bazzo, Saleh e Hatzopoulou (2025), que defendem a priorização de motoristas como estratégia para maximizar as reduções de emissões proporcionadas pela eletrificação. Os autores observaram reduções de emissões de 43,9% ao eletrificar os 20% dos motoristas que mais percorriam quilômetros, enquanto a eletrificação dos motoristas de menor quilometragem resultou em reduções de apenas 4,8%. De forma semelhante, Jenn (2019) demonstrou que a eletrificação de um único veículo de *ride-hailing* pode gerar benefícios ambientais equivalentes à eletrificação de aproximadamente três veículos particulares convencionais, devido à elevada intensidade de utilização observada nesse setor.

Além da substituição direta de combustíveis fósseis, os motoristas de alta quilometragem oferecem uma vantagem adicional. Como as emissões da fabricação de baterias são distribuídas pela vida útil do veículo, o foco em motoristas com maior VKT permite diluir essas emissões incorporadas em uma quilometragem superior. Isso reduz a intensidade de carbono por quilômetro rodado, ampliando os benefícios da mitigação de CO₂eq obtidos com a transição energética.

Os resultados também possuem implicações para o planejamento da infraestrutura de recarga. Jenn (2019) destaca que a expansão da eletrificação em serviços de *ride-hailing* deve considerar cuidadosamente a localização dos pontos de recarga, buscando minimizar o *deadheading* associado aos deslocamentos realizados sem passageiros para acessar a infraestrutura de carregamento. Nesse contexto de expansão limitada da infraestrutura, estratégias que priorizam motoristas de alta quilometragem podem aumentar a eficiência dos investimentos realizados, concentrando a utilização dos pontos de recarga em veículos responsáveis por uma parcela desproporcional dos quilômetros percorridos e das emissões evitadas.

A priorização dos motoristas de maior quilometragem permite maximizar simultaneamente a substituição de combustíveis fósseis, a diluição dos impactos associados à fabricação das baterias e a eficiência da infraestrutura de recarga. Assim, os resultados sugerem que a quilometragem eletrificada constitui um indicador mais relevante para a mitigação das emissões do que a simples participação de veículos elétricos na frota.

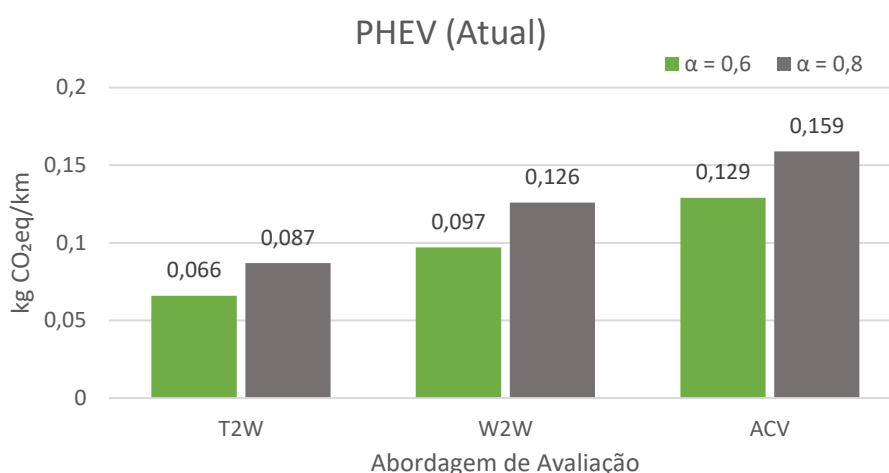
4.3.3 Viabilidade de tecnologias híbridas como transição

A eletrificação intermediária, representada pelos HEVs e PHEVs, apresentou desempenho inferior ao observado para os BEVs em todas as abordagens analisadas. Os HEVs alcançaram reduções máximas de 20,24% na análise ACV e 26,54% na análise W2W, enquanto os PHEVs apresentaram reduções máximas de 26,34% na análise ACV e 33,82% na análise W2W. Embora inferiores às reduções observadas para os BEVs, os resultados dos PHEVs demonstram potencial para reduções mais expressivas dependendo das condições de utilização da tecnologia.

Neste estudo, foi adotado um cenário de referência com fator α igual a 0,8, representando uma condição de uso mais conservadora, baseada predominantemente em recargas residenciais e menor utilização da infraestrutura pública de recarga. Nessa condição, o veículo mantém maior dependência do motor a combustão, refletindo uma utilização mais próxima daquela esperada para usuários que realizam apenas uma recarga diária. Como consequência, a participação do modo elétrico na operação do veículo permanece limitada, reduzindo o potencial de mitigação de emissões.

Os resultados apresentados na Figura 34 demonstram que a redução do fator α para 0,6 resultou em diminuições das emissões em todas as abordagens avaliadas. As emissões T2W foram reduzidas de 0,087 para 0,066 kgCO₂eq/km, enquanto as emissões W2W diminuíram de 0,126 para 0,097 kgCO₂eq/km e as emissões ACV passaram de 0,159 para 0,129 kgCO₂eq/km. Esses resultados evidenciam que o potencial de mitigação dos PHEVs depende fortemente da frequência de recarga e da participação efetiva do modo elétrico durante a operação do veículo.

Figura 35 — Influência do fator α nas emissões dos veículos PHEV



Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Esse comportamento também foi observado por Gauto et al. (2023), que avaliaram a influência do *Electric Drive Share* sobre as emissões dos PHEVs. Os autores verificaram que o aumento da participação do modo elétrico resulta em reduções consistentes das emissões, tanto para veículos abastecidos com gasolina quanto com etanol. Os resultados obtidos neste estudo corroboram a literatura ao indicar que o desempenho dos PHEVs em termos de emissões está diretamente associado ao grau de eletrificação efetivamente utilizado durante sua operação.

Entretanto, a proposta da eletrificação intermediária nunca esteve associada exclusivamente à maximização da redução das emissões. Conforme discutido no Quadro 1, uma das principais justificativas para a adoção de HEVs e PHEVs consiste justamente na menor dependência da infraestrutura de recarga e no menor custo de aquisição quando comparados aos BEVs. Nesse contexto, os híbridos foram historicamente apresentados como uma tecnologia de transição capaz de combinar parte dos benefícios da eletrificação com maior flexibilidade operacional.

Contudo, os resultados obtidos indicam a existência de um *trade-off* entre a flexibilidade operacional e o desempenho em termos de emissões dos PHEVs. Quanto maior a utilização do modo elétrico, menores são as emissões do veículo. Entretanto, essa condição exige maior frequência de recargas e maior dependência da infraestrutura elétrica. Em outras palavras, quanto mais um PHEV busca reduzir suas emissões, mais ele precisa se comportar como um BEV. Como consequência, parte da vantagem operacional historicamente associada à eletrificação intermediária tende a ser reduzida quando se busca maximizar o potencial de mitigação de emissões da tecnologia.

Além da questão operacional, a atratividade econômica da eletrificação intermediária também tem diminuído nos últimos anos. Historicamente, uma das principais justificativas para a adoção de HEVs e PHEVs era o menor custo de aquisição em comparação aos BEVs. Entretanto, a expansão da oferta de veículos elétricos e a entrada de fabricantes chineses no mercado brasileiro contribuíram para uma redução significativa dos preços dos BEVs. Os valores apresentados na Tabela 50 demonstram que modelos totalmente elétricos já são comercializados em faixas de preço próximas ou até inferiores às observadas para diversos modelos PHEV disponíveis no mercado nacional.

Tabela 49 — Comparação de preços entre veículos BEV e PHEV no mercado brasileiro

Tecnologia	Modelo	Preço aproximado (R\$)
BEV	Renault Kwid E-Tech	99.630
BEV	BYD Dolphin Mini	120.153
PHEV	BYD King	169.584
PHEV	BYD Song Pro	189.778

Fonte: Elaborado pelo autor com base em (NeoCharge, s.d.).

Nesse contexto, os resultados sugerem que a justificativa tradicional da eletrificação intermediária vem perdendo força. Quando utilizados com baixa frequência de recarga, os PHEVs apresentam reduções de emissões significativamente inferiores às observadas nos BEVs. Por outro lado, quando utilizados de forma mais eletrificada para ampliar seus benefícios de redução das emissões, passam a depender de uma infraestrutura de recarga mais próxima daquela exigida pelos veículos totalmente elétricos. Simultaneamente, a redução dos preços

dos BEVs enfraquece uma das principais vantagens econômicas historicamente associadas aos híbridos. Assim, os resultados indicam que os argumentos operacionais e econômicos que tradicionalmente sustentaram a eletrificação intermediária tendem a se tornar menos relevantes à medida que a infraestrutura de recarga se expande e os custos dos veículos elétricos continuam a diminuir.

4.3.4 Políticas de incentivo

A comparação entre as tecnologias avaliadas demonstrou que os veículos BEVs apresentaram o maior potencial de mitigação das emissões de CO₂eq em todas as abordagens analisadas, alcançando reduções substancialmente superiores às observadas para HEVs e PHEVs. Sob a perspectiva da mitigação de emissões, os programas de incentivo à eletrificação tendem a ser mais eficientes quando priorizam a adoção de BEVs. No contexto de Porto Alegre, os cenários avaliados indicaram reduções anuais de até 714 tCO₂eq pelo método W2W e 681 tCO₂eq pela abordagem de Avaliação ACV. Esses resultados são consistentes com os encontrados por Zhang et al. (2025), que identificaram reduções diárias médias de 239 toneladas de CO₂ em Chengdu e de 135 toneladas em Xi'an após a eletrificação de veículos de transporte por aplicativo, evidenciando o elevado potencial de mitigação associado à adoção de BEVs em sistemas urbanos de *ride-hailing*.

Entretanto, os resultados demonstram que a efetividade das políticas de eletrificação não depende exclusivamente da quantidade de veículos convertidos, a eletrificação direcionada aos motoristas com maior VKT produziu reduções de CO₂eq superiores às obtidas pela eletrificação da mesma proporção de condutores com menor utilização. Em alguns cenários, a eletrificação de apenas 25% da frota foi capaz de reduzir aproximadamente 26% das emissões totais avaliadas pela abordagem ACV. Esses resultados indicam que a quilometragem eletrificada constitui um indicador mais relevante para a redução das emissões do que o número absoluto de veículos eletrificados. Sob a perspectiva da alocação de recursos públicos, esse comportamento sugere uma oportunidade para aumentar a eficiência dos programas de incentivo. Considerando que os recursos destinados à eletrificação tendem a ser limitados, a priorização dos motoristas com maior VKT pode aumentar a quantidade de CO₂eq evitada por unidade de recurso investido. Dessa forma, a seleção dos

beneficiários dos programas torna-se tão relevante quanto a própria tecnologia incentivada, uma vez que a eletrificação dos condutores com maior utilização permite obter reduções mais expressivas de emissões sem a necessidade de ampliar proporcionalmente os recursos empregados.

Os efeitos da priorização dos motoristas com maior VKT não se limitam às emissões operacionais. Conforme discutido por Mera et al. (2023), parte relevante das emissões associadas aos BEVs está concentrada na etapa de fabricação das baterias. No contexto do *ride-hailing*, caracterizado por elevados níveis de utilização anual, essas emissões são distribuídas por uma quantidade significativamente maior de quilômetros percorridos ao longo da vida útil do veículo. Dessa forma, níveis elevados de VKT aceleram a diluição das emissões associadas à fabricação das baterias, reduzindo sua participação relativa nos resultados obtidos pela abordagem ACV. Apesar do potencial identificado, a implementação dessa estratégia encontra limitações práticas. Os motoristas com maior VKT representam, em teoria, os candidatos mais adequados para programas de eletrificação devido ao maior potencial de redução de CO₂eq. Entretanto, a efetividade dessa abordagem depende da capacidade desses condutores de adotarem a tecnologia. Conforme observado por Du et al. (2020), fatores econômicos e limitações relacionadas à infraestrutura de recarga influenciam significativamente a disposição dos motoristas de *ride-hailing* em migrar para veículos elétricos, nesse contexto, aspectos como o acesso a crédito, o custo de aquisição dos veículos, a disponibilidade de vagas para recarga residencial e o acesso à infraestrutura pública de carregamento podem limitar a participação justamente do grupo com maior potencial de redução das emissões. Dessa forma, programas direcionados aos motoristas de maior utilização devem ser acompanhados por mecanismos de financiamento ou subsídio e infraestrutura capazes de reduzir essas barreiras de adoção. Em Florianópolis, observa-se o surgimento de iniciativas voltadas a esse objetivo, como o Projeto de Lei nº 19.597/2025, que busca ampliar a disponibilidade de pontos de recarga para veículos elétricos no município (Florianópolis, 2025).

Considerando os cenários avaliados, a eletrificação do transporte por aplicativo apresenta maior potencial de redução de CO₂eq quando associada à adoção de BEVs, à priorização dos motoristas de maior VKT e à expansão estratégica da infraestrutura de recarga. Os resultados indicam que a maximização das reduções de emissões depende menos da quantidade total de veículos eletrificados e mais da

seleção dos usuários contemplados e da forma como a infraestrutura é distribuída para suportar essa transição.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar os impactos da substituição de veículos ICE por tecnologias eletrificadas no setor de *ride-hailing*, analisando o potencial de redução das emissões de CO₂eq sob diferentes tecnologias veiculares, métodos de avaliação e estratégias de eletrificação. A comparação entre os métodos de avaliação evidenciou a importância da ACV para a estimativa das emissões de CO₂eq. No caso dos BEVs, a abordagem W2W considera essencialmente as emissões associadas à geração da eletricidade utilizada para recarga, que são reduzidas devido à elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. A inclusão das emissões relacionadas à fabricação dos veículos e das baterias pela ACV resultou em estimativas mais representativas das emissões totais dessa tecnologia. Apesar das diferenças observadas entre os métodos, a classificação das tecnologias permaneceu inalterada.

Entre as tecnologias analisadas, os BEVs apresentaram os menores níveis de emissão em todas as abordagens avaliadas, alcançando reduções máximas de 94,00% na análise W2W e de 79,55% na ACV. Esses resultados superaram substancialmente os observados para os HEVs e PHEVs, cujas reduções de emissões não ultrapassaram 35% nos cenários avaliados. A combinação entre a baixa intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira e a elevada quilometragem observada no setor de *ride-hailing* mostrou-se determinante para esses resultados. Enquanto as emissões associadas à recarga permanecem reduzidas, mesmo nos cenários mais conservadores analisados, a elevada utilização dos veículos contribui para distribuir as emissões associadas à fabricação das baterias por uma maior quilometragem ao longo da vida útil. Como consequência, os ganhos obtidos com a eletrificação tornam-se mais expressivos em aplicações caracterizadas por elevada quilometragem anual.

Os resultados também demonstraram que reduções expressivas das emissões podem ser alcançadas mesmo com níveis parciais de eletrificação das viagens, representando centenas de toneladas de CO₂eq evitadas e alcançando reduções acumuladas de até 681 tCO₂eq nos cenários avaliados. Adicionalmente, a análise da eletrificação direcionada revelou que a quilometragem eletrificada exerce maior influência sobre a redução das emissões do que a quantidade de veículos eletrificados. A priorização de motoristas com maiores valores de VKT resultou em

reduções substancialmente superiores às obtidas pela eletrificação da mesma proporção de motoristas com menor utilização, indicando que estratégias de transição podem ser mais efetivas quando direcionadas aos veículos responsáveis pela maior parcela da quilometragem percorrida.

Além disso, embora o estudo tenha considerado os municípios de Florianópolis e Porto Alegre, os resultados podem variar em função das características específicas de cada localidade. Fatores como número de viagens realizadas, distância média percorrida, intensidade de congestionamentos, perfil operacional dos motoristas e participação do *deadheading* podem influenciar significativamente o potencial de redução das emissões associado à eletrificação. Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros ampliem a análise para outros municípios brasileiros, contemplando diferentes portes urbanos e padrões de mobilidade, de modo a avaliar a robustez dos resultados e identificar estratégias de eletrificação mais adequadas para diferentes contextos operacionais.

Como contribuição, este trabalho forneceu uma avaliação comparativa das emissões de CO₂eq associadas à eletrificação do transporte por aplicativo utilizando as abordagens T2W, W2W e ACV, permitindo uma compreensão mais abrangente dos impactos ambientais das diferentes tecnologias veiculares. Adicionalmente, os resultados evidenciaram que estratégias de eletrificação direcionadas a motoristas com maior quilometragem apresentam potencial superior de mitigação das emissões quando comparadas a abordagens não direcionadas, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas e programas de incentivo voltados à descarbonização do setor. Dessa forma, o estudo contribui para o avanço das discussões sobre mobilidade sustentável no contexto brasileiro e oferece uma base metodológica para futuras análises em outras cidades e modalidades de transporte.

Apesar dos resultados evidenciarem o potencial da eletrificação do setor de *ride-hailing* para a redução das emissões de CO₂eq, algumas limitações devem ser consideradas. O presente estudo não contemplou as etapas de reciclagem e fim de vida das baterias, nem realizou uma análise econômica detalhada das tecnologias avaliadas, aspectos que podem influenciar a viabilidade e os resultados associados à transição tecnológica. Dessa forma, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Realizar análises de custo-benefício e estudos de viabilidade econômica das diferentes tecnologias veiculares para motoristas de aplicativos, avaliando o

impacto ou necessidade de incentivos na forma de financiamentos ou subsídios;

- Incorporar as etapas de reciclagem, reutilização e fim de vida das baterias em avaliações de ciclo de vida mais abrangentes;
- Investigar o desempenho das emissões de CO₂eq de veículos híbridos operando com combustíveis de menor intensidade de carbono, incluindo misturas com maiores teores de etanol e outros biocombustíveis.

REFERÊNCIAS

- ADDAI, Kwaku *et al.* Assessing long run asymmetric effect of urbanization, fossil energy consumption and regulatory quality on environmental degradation in the Black Sea Region: A dynamic analysis. **World Development Sustainability**, v. 4, p. 100153, jun. 2024.
- ALVES, Guilherme Braga. *Quantas milhas? O uso de aplicativos de ride-hailing na periferia oeste do Rio de Janeiro*. In: CALLIL, Victor; COSTANZO, Daniela (org.). **Mobilidade por aplicativo: estudos em cidades brasileiras**. São Paulo: CEBRAP, 2021.
- AMOBITEC. **Cresce 35% o número de motoristas e 18% os entregadores que trabalham com apps no Brasil**, revela pesquisa do Cebap. 2025. Disponível em: <https://amobitec.org/cresce-35-o-numero-de-motoristas-e-18-os-entregadores-que-trabalham-com-apps-no-brasil-revela-cebap/>. Acesso em: 24 maio 2026.
- BAZZO, João Pedro; SALEH, Marc; HATZOPOULOU, Marianne. Greenhouse gas emissions trends and fleet renewal of ride-hailing in Toronto, Canada. **Journal of Cleaner Production**, v. 521, p. 146252, ago. 2025.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). **Fator de emissão de CO₂ na geração de energia elétrica no Brasil em 2023 é o menor em 12 anos**. Brasília, DF: MCTI, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/02/fator-de-emissao-de-co2-na-geracao-de-energia-eletrica-no-brasil-em-2023-e-o-menor-em-12-anos>. Acesso em: 24 maio 2026.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima; BRASIL. **Ministério dos Transportes. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: ano-base 2024**. Brasília: MMA; MT, 2025. Organização: Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA).
- CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD (CARB). **Clean Miles Standard**: About. Sacramento, 2021. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/clean-miles-standard/about>. Acesso em: 9 jun. 2026.
- CASSEL, Daniela Lichtler. **Caracterização dos serviços de ridesourcing e a relação com o transporte público coletivo**: estudo de caso em Porto Alegre. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- CORNET, Andreas *et al.* **Reboost: A comprehensive view on the changing powertrain component market and how suppliers can succeed**. [S.d.].
- CRAMER, Judd; KRUEGER, Alan B. **Disruptive Change in the Taxi Business: The Case of Uber**. [S.d.].
- DAUPHIN, Roland *et al.* Evaluation of plug-in hybrid vehicles in real-world conditions by simulation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 119, p. 103721, 2023.
- DIDI GLOBAL INC. **2024 Sustainability Report**. Beijing: DiDi Global Inc., 2025. Disponível em: <https://www.didiglobal.com>. Acesso em: 11 jul. 2025.
- DOMBROWSKI, Uwe; ENGEL, Christian. Impact of Electric Mobility on the after Sales Service in the Automotive Industry. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 152–157, 2014.
- DOUTOR-IE. **O que significam as siglas EV, MHEV, HEV, PHEV, BEV, BEVX e FCEV dos veículos eletrificados?** Doutor-ie, 2024. Disponível em: <https://blog.doutorie.com.br/o-que-significam-as-siglas-ev-mhev-hev-phev-bev-bevx-e-fcev-dos-veiculos-eletrificados/>. Acesso em: 30 jun. 2026.

DU, Mingyang *et al.* Acceptance of electric ride-hailing under the new policy in Shenzhen, China: Influence factors from the driver's perspective. **Sustainable Cities and Society**, v. 61, p. 102307, out. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Potencial de redução de emissões de CO₂ em projetos de produção e uso de biocombustíveis**. Brasília: EPE, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2024: Relatório Síntese – ano base 2023**. Rio de Janeiro, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 24 maio 2026.

ENSAIO ENERGÉTICO. **Cadeia do hidrogênio em foco: da produção às aplicações com enfoque na viabilidade econômica**. 2025. Disponível em: <https://ensaioenergetico.com.br/cadeia-do-hidrogenio-em-foco-da-producao-as-aplicacoes-com-enfoque-na-viabilidade-economica/>. Acesso em: 31 maio 2026.

FLORIANÓPOLIS. Câmara Municipal de Florianópolis. **Projeto de Lei n.º 19.597/2025**. Florianópolis, 2025. Disponível em: <https://www.cmf.sc.gov.br/proposicoes/pesquisa/0/2/0/106248>. Acesso em: 17 set. 2026.

GAUTO, Marcelo Antunes *et al.* Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. **Energy for Sustainable Development**, v. 76, p. 101261, out. 2023.

GIL, Marisa Adán; ABE, Maria Carolina. **Conheça as empresas que batem de frente com o Uber ao redor do mundo**. Época Negócios, 3 maio 2025. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/empresas/noticia/2025/05/conheca-as-empresas-que-batem-de-frente-com-o-uber-ao-redor-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 31 maio 2025.

GOEL, Sonali; SHARMA, Renu; RATHORE, Akshay Kumar. A review on barrier and challenges of electric vehicle in India and vehicle to grid optimisation. **Transportation Engineering**, v. 4, p. 100057, jun. 2021.

HADDAD, Eduardo Amaral *et al.* A socioeconomic analysis of ride-hailing emergence and expansion in São Paulo, Brazil. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 1, p. 100016, jun. 2019.

HALDER, Pobitra *et al.* Performance, emissions and economic analyses of hydrogen fuel cell vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 199, p. 114543, jul. 2024.

HAOUARI, Rajae *et al.* Analysing mobility and environmental impacts of automated ride-sharing services under mixed traffic. **Research in Transportation Business & Management**, v. 62, 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular: veículos leves 2024 – 16º ciclo**. Rio de Janeiro: Inmetro, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular/pbe-veicular-2024-1.pdf>. Acesso em: 27 maio 2026.

JENN, Alan. **Emissions Benefits of Electric Vehicles in Uber and Lyft Services**. 2019.

JIN, Jangik; RAFFERTY, Peter. Externalities of auto traffic congestion growth: Evidence from the residential property values in the US Great Lakes megaregion. **Journal of Transport Geography**, v. 70, p. 131–140, jun. 2018.

JYOTHEESWARA REDDY, K.; NATARAJAN, Sudhakar. Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications – A review. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 36, p. 17387–17408, set. 2018.

LIU, Z.; CHEN, Z.; YIN, Y.; XU, Z. Regulatory policies to electrify ridesourcing systems. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 141, p. 103743, 2022.

MERA, Zamir *et al.* **COMPARISON OF THE LIFE-CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF COMBUSTION ENGINE AND ELECTRIC PASSENGER CARS IN BRAZIL**. set. 2023.

MIYAKE, Raphael Guardini; BAZZO, Edson. **ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL PEM 15W**. 2006.

NANDOLA, Yash *et al.* Impact of electrification on two-wheelers in India from the perspective of well-to-wheel energy efficiency and CO2 emissions. **Energy**, v. 324, p. 135911, jun. 2025.

NAYAK, Professor Dr. Niranjana; SATPATHY, Mr. Anshuman. An Adaptive Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) Utilizing Real-Time Speed Profiles and Optimized Battery Discharge Levels. **Energy Storage and Saving**, p. S2772683524000621, jan. 2025.

NEOCHARGE. **Carro elétrico mais barato e mais caro do Brasil**. 2025. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/carro-eletrico-mais-barato-mais-caro>. Acesso em: 31 maio 2026

NEOCHARGE. **Frota de carros elétricos no Brasil**. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/carros-eletricos-brasil>. Acesso em: 24 maio 2026.

NEOCHARGE. **Tipos de veículos elétricos**. s.d. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Acesso em: 31 maio 2026.

NTOMBELA, Mlungisi; MUSASA, Kabeya; MOLOI, Katleho. A Comprehensive Review for Battery Electric Vehicles (BEV) Drive Circuits Technology, Operations, and Challenges. **World Electric Vehicle Journal**, v. 14, n. 7, p. 195, 22 jul. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2023**. São Paulo: Observatório do Clima, 2024.

OLIVEIRA, Bianca de. Quais fatores influenciam a inserção de transportes por aplicativo nas cidades pequenas brasileiras? In: CALLIL, Victor; COSTANZO, Daniela (org.). **Mobilidade por aplicativo: estudos em cidades brasileiras**. São Paulo: CEBRAP, 2021.

PORTO ALEGRE. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa de Porto Alegre**. Porto Alegre: Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2021.

RAYLE, Lisa *et al.* Just a better taxi? A survey-based comparison of taxis, transit, and ridesourcing services in San Francisco. **Transport Policy**, v. 45, p. 168–178, jan. 2016.

RONDANI, Bruno; LEVY, Rafael Rocha. A opção do consumidor por carros elétricos e a formação de um novo ecossistema de inovação. In: CONCEIÇÃO, Jefferson José da (org.). **Da bomba ao plug: o Brasil, a descarbonização e a indústria automotiva**. São Paulo: Papagaio, 2024. E-book.

SEEG – Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. **Florianópolis (SC)**. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/sc-florianopolis>. Acesso em: 4 jun. 2026.

TEIXEIRA, Luisa Da Cunha; PARAIZO, Rodrigo Cury. Plataformas digitais de mobilidade urbana: tipos e modos de atuação. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 15, n. 3, p. 19–33, 11 nov. 2020.

TOGUN, Hussein *et al.* Development and comparative analysis between battery electric vehicles (BEV) and fuel cell electric vehicles (FCEV). **Applied Energy**, v. 388, p. 125726, jun. 2025.

UBER. **Our Road to Zero Emissions**. Disponível em: <https://www.uber.com/us/en/about/sustainability/>. Acesso em: 24 maio 2026.

UBER. **Sustentabilidade: sua cidade, nosso compromisso**. Disponível em: <https://www.uber.com/br/pt-br/about/sustainability/>. Acesso em: 31 maio 2026

UBER. **Mais de 120 milhões de usuários e 5 milhões de parceiros: Uber revela dados inéditos sobre seu impacto no país**. Uber Newsroom, 23 maio 2024. Disponível em: <https://www.uber.com/br/pt-br/newsroom/mais-de-120-milhoes-de-usuarios-e-5-milhoes-de-parceiros-uber-revela-dados-ineditos-sobre-seu-impacto-no-pais/>. Acesso em: 24 maio 2026.

UBER. **Fatos e dados sobre a Uber**. Uber Newsroom, 20 mar. 2026. Disponível em: <https://www.uber.com/br/pt-br/newsroom/fatos-e-dados-sobre-uber/>. Acesso em: 24 maio 2026.

VEZA, Ibham *et al.* Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV. **Alexandria Engineering Journal**, v. 82, p. 459–467, nov. 2023.

XU, Yu *et al.* On-demand ride-hailing platforms under green mobility: Pricing strategies and government regulation. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 189, p. 103650, set. 2024.

ZHANG, Zhe *et al.* Carbon emission reduction benefits of ride-hailing vehicle electrification considering energy structure. **Applied Energy**, v. 377, p. 124548, jan. 2025.

ZHOU, Suyang *et al.* Electrification of Online Ride-Hailing Vehicles in China: Intention Modelling and Market Prediction. **Energies**, v. 14, n. 21, p. 7380, 5 nov. 2021.