



ELETRIFICAÇÃO DA FROTA TERRESTRE DA FORÇA AÉREA BRASILEIRA: AVALIAÇÃO AMBIENTAL E DE CUSTOS

ELECTRIFICATION OF THE BRAZILIAN AIR FORCE'S GROUND VEHICLE FLEET: ENVIRONMENTAL AND COST ASSESSMENT

Mariane Camargos de Figueiredo¹
Rita de Cássia Silva²
Augusto César de Mendonça Brasil³

RESUMO

Este artigo avalia os impactos ambientais e os custos associados à eletrificação da frota terrestre de veículos leves da Força Aérea Brasileira (FAB). Para isso, o escopo de aplicação abrange os veículos a combustão (ICEV), os veículos híbridos (HEV) e os veículos elétricos a bateria (BEV), com a utilização de etanol ou gasolina. Nesse contexto, foi aplicada a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, para quantificar as emissões de CO₂eq durante as fases de produção e uso dos veículos. Além disso, foi realizada uma análise econômica que considera os custos de aquisição, manutenção e operação dos veículos. Os resultados indicam que o uso do etanol, especialmente em veículos híbridos, pode reduzir significativamente as emissões, com variações regionais nos impactos ambientais devido às diferenças na matriz energética. O trabalho contribui para decisões estratégicas de renovação da frota por meio de uma abordagem integrada que considera os benefícios ambientais e financeiros, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência operacional da Força Aérea.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; etanol; variações regionais; Força Aérea Brasileira.

¹ Graduação em Engenharia Industrial Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2010). Pós-graduação em Gestão de Projetos pela Fundação Dom Cabral (2011), Pós-graduação em Logística Empresarial pelo Centro Universitário do Sul de Minas (2018), Curso de Especialização em Logística (CESLOG) pelo Instituto Logístico da Aeronáutica (2018), mestrado em Engenharia de Transportes pela Universidade de Brasília (2024). E-mail: mcamargos.figueiredo@gmail.com

² Professora Associada Nível IV da Universidade de Brasília, vinculada à Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, no campus Gama/DF, e professora credenciada no Programa de Pós-Graduação em Transportes. É graduada em Engenharia Civil e doutora em Confiabilidade Estrutural pela École Nationale des Ponts et Chaussées. E-mail: ritasilva@unb.br

³ Professor Titular da Universidade de Brasília. Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1988), mestrado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (1992), doutorado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa (2000) e dois períodos de Pós Doutorado, um no Instituto Superior Técnico na área de Consumo Energético e Emissão de Poluentes de Veículos de Transportes, e outro na Universidade Federal do Pará na área de Desenvolvimento de Modelo de Sustentabilidade do uso de Recursos Naturais Energéticos na Amazônia. E-mail: ambrasil@unb.br

ABSTRACT

This article assesses the environmental impacts and costs associated with the electrification of the light vehicle fleet of the Brazilian Air Force (FAB). To this end, the scope of application encompassed Internal Combustion Engine Vehicles (ICEV), Hybrids Vehicles (HEV), and Battery Electric Vehicles (BEV), using ethanol or gasoline. In this context, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology was applied, in accordance with the NBR ISO 14040 and NBR ISO 14044 standards, to quantify CO₂eq emissions during the production and use phases of the vehicles. Additionally, an economic analysis was carried out, considering the acquisition, maintenance, and operational costs of the vehicles. The results indicate that the use of ethanol, especially in hybrid vehicles, can significantly reduce emissions, with regional variations in environmental impacts due to differences in the energy matrix. The study contributes to strategic decisions on fleet renewal through an integrated approach that considers both environmental and financial benefits, contributing to the sustainability and operational efficiency of the Air Force.

Keywords: Life Cycle Assessment; ethanol; regional variations; Brazilian Air Force.

INTRODUÇÃO

O estilo de vida moderno e a industrialização demandam um crescente uso de recursos energéticos, o que, por sua vez, eleva as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o aquecimento global (Wang *et al.*, 2020). As mudanças climáticas decorrentes dessas emissões representam uma preocupação mundial, impulsionando a criação de acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, que estabelecem metas para conter o aumento da temperatura mundial e promover a conscientização pública acerca do tema.

Do total de emissões de dióxido de carbono mundial, 16,2% estão relacionados ao setor de transportes e, mais especificamente, 11,9% estão vinculadas ao transporte terrestre (Ritchie, 2023). Por isso, torna-se crucial a adoção de tecnologias de baixa emissão, a fim de mitigar os impactos ambientais. Assim, a eletrificação da frota, em conjunto com a geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, é apontada como a solução mais promissora para a descarbonização do setor (Fan *et al.*, 2020).

No Brasil, cerca de 84% da geração de energia elétrica é proveniente de fontes renováveis, tornando a energia elétrica do país uma das mais limpas do mundo (EPE, 2024). No setor de transportes, a matriz energética é composta por aproximadamente 25% de fontes renováveis, devido à participação dos biocombustíveis, sendo o etanol da cana-de-açúcar o principal destaque, abastecendo cerca de 43% dos veículos leves (EPE, 2023). Por outro lado, existem desafios no uso dos veículos elétricos (EV), entre eles estão a falta de disseminação

de infraestruturas de postos de recarga, além de questões de mercado que afetam o custo final dos veículos e a limitação da variedade de modelos disponíveis (SEBRAE, 2023).

O Ministério do Meio Ambiente lidera as iniciativas do país voltadas às mudanças climáticas e atualmente possui a meta de reduzir em 50% as emissões de gases de efeito estufa até 2030, em comparação a 2021 (Brasil, 2021). Diante desses aspectos, há um movimento para que as instituições públicas e privadas tomem decisões não só baseadas em custos, mas também em soluções ambientalmente sustentáveis.

A Força Aérea Brasileira (FAB), como instituição estratégica do país, está alinhada a essas exigências globais e, em 2021, assinou um Acordo de Colaboração com a maioria das forças aéreas mundiais. O acordo tem como objetivo o compromisso dos países signatários em reduzir os impactos ambientais que contribuem para as mudanças climáticas.

Além do fator ambiental, a questão energética está fortemente relacionada à defesa nacional, resiliência, defesa territorial e segurança energética (Wither, 2020), aspectos fundamentais para qualquer Força Armada. Nesse contexto, a implementação de veículos elétricos apresenta a vantagem de melhorar a eficiência operacional. Além disso, a eletrificação da frota pode servir como um exemplo, promovendo uma imagem de responsabilidade ambiental e inovação, pois alinha as práticas da instituição com tendências globais de sustentabilidade e desenvolvimento econômico.

Esse estudo tem como objetivo avaliar os impactos ambientais e econômicos da eletrificação da frota terrestre de veículos leves da FAB, por meio de uma análise comparativa entre os veículos elétricos, híbridos e movidos a combustíveis fósseis (gasolina e etanol), considerando a matriz energética regional brasileira e os custos de uso, operação e manutenção. Para isso, foram realizadas três etapas principais: (1) identificar os impactos nas emissões de gases de efeito estufa, considerando os subsistemas regionais da matriz de energia elétrica brasileira, por meio de uma ACV para comparar as emissões e modelo ASIF (*Activity, Structure, Intensity, Fuel*) para estimar as emissões veiculares com base na idade da frota, quilometragem anual e fatores de emissão específicos; (2) identificar os impactos de custos na escolha do combustível (etanol ou gasolina) a nível estadual; (3) desenvolver um modelo de inventário para renovação da frota com tecnologias de eletromobidade.

O sequenciamento das três etapas foi definido com base em uma abordagem sistemática e progressiva, que permite avaliar os impactos ambientais e econômicos da eletrificação da frota de forma abrangente. A primeira etapa foca na análise ambiental, utilizando a ACV para quantificar as emissões de GEE e identificar os benefícios da

eletrificação em diferentes regiões do Brasil. A segunda etapa aborda a análise econômica, comparando os custos de operação e manutenção entre veículos elétricos e a combustão, considerando as particularidades de cada estado. Por fim, a terceira etapa propõe um modelo de transição para a frota da FAB, integrando os resultados das etapas anteriores e estabelecendo diretrizes para a adoção de veículos elétricos.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

A eletrificação das frotas terrestres tem ganhado destaque no cenário global como uma estratégia para a redução de emissões de gases de efeito estufa e diminuição da dependência dos combustíveis fósseis. A demanda por baterias de íon-lítio cresceu de 330 GWh, em 2021, para 550 GWh, em 2022, representando um aumento de mais de 65%. O principal fator para esse incremento foi o aumento do número de registros de veículos elétricos. Nesse mercado, a China se destaca com o refino e produção de, aproximadamente, 65% das células de baterias e 80% dos cátodos (IEA, 2023). Em anos anteriores, o mercado cresceu em capacidade de 29,6 GWh, em 2010, para 217 GWh, em 2019, representando um aumento de mais de sete vezes a capacidade (Melin *et al.*, 2021).

A velocidade com que o mercado de baterias tem amadurecido implica desafios a serem superados, como a definição dos impactos ambientais ao longo da vida útil dos componentes, soluções para a melhoria de custos e aspectos ambientais na sua produção, definição de estratégia de reciclagem no fim de vida, entre outros. Na avaliação dos veículos elétricos, duas etapas do ciclo de vida da bateria são especialmente importantes, devido às altas emissões CO₂ e às oportunidades de melhoria no processo, visando menor impacto e melhor aproveitamento dos recursos minerais: a produção dos componentes e a reciclagem.

Segundo Rajaeifar *et al.* (2022), algumas bases de dados utilizadas na ACV das baterias informam dados de inventário de apenas algumas minas, não havendo uma investigação que forneça resultados abrangentes e confiáveis. Em Schenker, Oberschelp e Pfister, (2022), os autores realizaram uma ACV do processo de extração de Li_2CO_3 a partir de salmouras no Chile, Argentina e China, e demonstraram que as literaturas disponíveis subestimam o impacto em 19%, quando comparadas aos resultados encontrados.

Nesse mesmo contexto, Yang, Yue *et al.*, (2021) apresentam uma revisão bibliográfica sobre os desafios decorrentes da eletrificação do transporte e do aumento do uso de baterias íon-lítio nos EV. Destaca-se, ainda, que o impacto da produção, utilização e fim da vida útil

desse componente na ACV não foi totalmente compreendido. Além disso, evidencia-se que todos os setores da sociedade têm um papel fundamental no desenvolvimento sustentável das baterias: a política, por meio da facilitação da aplicação de soluções e da educação do público em geral sobre a importância da reciclagem; a indústria, pela busca da economia circular do componente; e o usuário, por meio de sua contribuição no fim de vida.

Globalmente, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre a Mudança do Clima (IPCC). O IPCC tem como objetivo fornecer avaliações científicas regulares sobre a mudança climática, possíveis implicações e riscos futuros, além de propor ações de adaptação e mitigação, visando subsidiar os formuladores de políticas. É formado por 195 países membros, entre eles o Brasil (IPCC, 2024). Por meio de suas publicações, são disponibilizados os métodos de cálculo de inventários de diversas fontes de emissão de gases de efeito estufa.

No Brasil, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) é responsável pela elaboração das estimativas de emissão nacional. Para o setor de transportes, a abordagem utilizada é do tipo *top-down*, baseada no consumo de combustíveis fósseis, conforme apresentado no Balanço Energético Nacional (BEN). Além disso, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) elabora inventários anuais de emissões, com base na caracterização da frota circulante e nos dados de vendas e vistoria dos veículos.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é o método quantitativo mais utilizado e com maior potencial para avaliar os impactos associados ao ciclo de vida de um produto (Li *et al.*, 2016). Sua aplicação é padronizada pelas normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que tratam, respectivamente, dos princípios e estruturas, e dos requisitos e orientações para a realização de uma ACV. Baseados nesses documentos, no Brasil, existem as normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009.

Esse método é aplicado em diversos estudos de avaliação da eletrificação da frota (Carvalho; Brasil Júnior; Brasil, 2023; Souza *et al.*, 2018; Gauto *et al.*, 2023; Onat; Kucukvar; Tatari, 2015), dos impactos das baterias (Lai *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2020), na análise da influência da matriz elétrica nos resultados (Koroma *et al.*, 2022; YANG, Lai *et al.*, 2021), na aplicação de cenários futuros (Mendoza Beltran *et al.*, 2020), entre outros.

2 ANÁLISE DE DADOS

Os cenários de renovação da frota terrestre da Força Aérea foram avaliados sob dois aspectos: ambiental e financeiro. Para a avaliação do impacto ambiental, foi aplicada uma ACV seguindo as orientações das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), a fim de definir e comparar as emissões de CO₂eq para cada tipo de veículo. Essa escolha se justifica por sua capacidade de quantificar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a produção até o descarte. No contexto da eletrificação da frota terrestre da FAB, a ACV permite comparar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre veículos elétricos e veículos a combustão, considerando a matriz energética regional brasileira.

Para a fase de uso da ACV, foi realizada uma análise de inventário de emissões veiculares do tipo *bottom-up* (de baixo para cima). Essa abordagem faz uso do modelo ASIF, que considera a idade dos veículos, a quilometragem percorrida por ano e a emissão da categoria (EPA, 2004). Essa abordagem é particularmente útil para análises detalhadas em nível institucional, permitindo uma avaliação precisa dos impactos ambientais e a identificação de oportunidades de redução de emissões. Para a análise dos custos das soluções propostas, foi feito um levantamento do valor de mercado dos veículos e custos de manutenção programada, dos combustíveis e de energia elétrica.

Esta pesquisa pode ser classificada como aplicada e exploratória. É aplicada porque busca gerar conhecimentos práticos para a tomada de decisão na FAB, especificamente no que diz respeito à eletrificação da frota terrestre. É exploratória porque investiga um tema relativamente novo no contexto brasileiro, com o objetivo de identificar impactos ambientais e econômicos, bem como propor diretrizes para a transição para veículos elétricos.

Além disso, a pesquisa possui caráter quantitativo, uma vez que utiliza métodos como a ACV e o modelo ASIF para quantificar emissões de GEE e custos operacionais. Também possui elementos de pesquisa documental, pois se baseia em dados oficiais da FAB, do INMETRO, da CETESB e de outras fontes secundárias, como relatórios e publicações científicas.

2.1 MATERIAIS

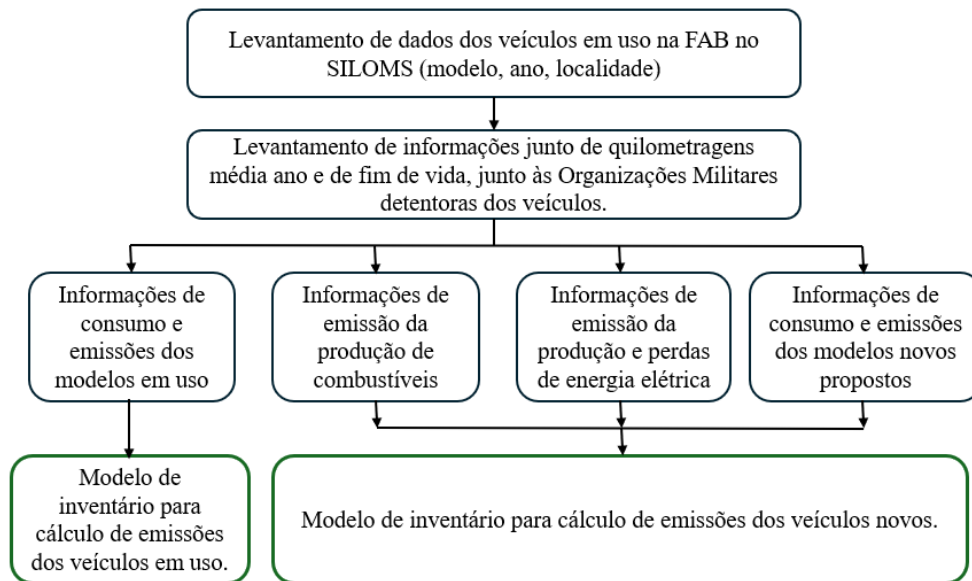
O Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços (SILOMS) é responsável por propiciar o planejamento e o controle das atividades logísticas da Força Aérea. Os dados da frota da FAB foram obtidos por meio dessa ferramenta que fornece informações sobre modelos, anos de fabricação e localidade de uso. Dados complementares de quilometragem média utilizada anualmente e a quilometragem média de fim de vida, por localidade, foram levantadas diretamente com os chefes dos setores de garagem de cada localidade.

Como a base de dados das viaturas em uso continha informações sobre modelo e ano, os dados de consumo (km/l) e emissões (g/km) foram obtidos, prioritariamente, do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Entretanto, as informações disponíveis nesse banco de dados estão disponíveis a partir de 2009 e, ao longo dos anos, houve um aumento na quantidade de modelos avaliados e disponibilidade de informações. Contudo, os primeiros relatórios do INMETRO não fornecem dados sobre emissões veiculares.

Para suprir a falta de dados, especificamente para o consumo, foi utilizado o valor do relatório mais próximo ao ano e modelo do veículo e, quando a diferença entre o ano do relatório e do veículo ultrapassava 15 anos, foram coletados dados na internet referentes ao veículo. Essa escolha foi feita porque os dados encontrados na internet eram mais conservadores do que os do PBE.

Já para os dados de fator de emissão, o PBE iniciou a apresentação dessas informações a partir do relatório de 2013. Portanto, para anos anteriores, foram utilizados os dados disponíveis nas publicações de emissão veicular da CETESB, que fornecem resultados de acordo com o ano veicular, mas não desagregados por modelo de veículo. Uma vantagem dos dados do PBE, em relação aos da CETESB, é que os valores de fator de emissão são decompostos para os modelos e anos específicos dos veículos, sendo assim, mais precisos.

O fluxograma do modelo de inventário, desenvolvido e adaptado especificamente para este trabalho, utilizado para o cálculo das emissões de veículos novos e em uso, é apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma de criação dos modelos de inventário de emissões

Fonte: Elaboração própria.

2.2 ETAPAS DA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

2.2.1 Definição do objetivo e escopo da ACV

O objetivo da ACV é avaliar os impactos ambientais decorrentes da substituição da frota de veículos terrestres leves da FAB, com motores a combustão, por veículos com propulsão elétrica. A análise foi limitada aos modelos *hatch*, utilizados no transporte de pessoas, materiais ou equipamentos de pequeno porte, e *sedan*, destinados ao transporte de autoridades e comandantes de organizações militares. Essa avaliação subsidiar a tomada de decisão, pois, aliada à análise econômica, a avaliação ambiental é essencial nos processos de aquisição, considerando o panorama climático atual.

A análise compreendeu as fases de produção e uso das tecnologias dos veículos descritos abaixo. A fase de fim de vida não foi incluída devido às incertezas relacionadas à destinação.

- Sistema 1: Veículo à combustão interna, movido à gasolina (ICEVg);
- Sistema 2: Veículo à combustão interna, movido à etanol (ICEVe);
- Sistema 3: Veículo elétrico híbrido, movido à gasolina (HEVg);
- Sistema 4: Veículo elétrico híbrido, movido à etanol (HEVe); e,
- Sistema 5: Veículo elétrico à bateria (BEV).

Os veículos híbridos com plug-in (PHEV) não foram incluídos, pois não possuem mercado entre os *hatches* e *sedans*. Para a escolha do modelo a ser aplicado, foram considerados os mais vendidos no mercado nacional, segundo as revistas Autoesporte e Quatro Rodas, e, dentre eles, os que apresentaram menor custo. Essa escolha visa garantir que as peças necessárias, em caso de manutenção, estejam disponíveis no mercado. Além disso, não foram encontrados modelos HEV *hatch* no mercado brasileiro; nesse caso, não foi realizado estudo para essa tecnologia.

Os modelos *hatch* avaliados foram: Renault Kwid e BYD Dolphin. Já para os *sedans*, foram avaliados o Nissan Versa, Toyota Corolla Altis e BYD Seal.

2.2.2 Unidade Funcional (FU)

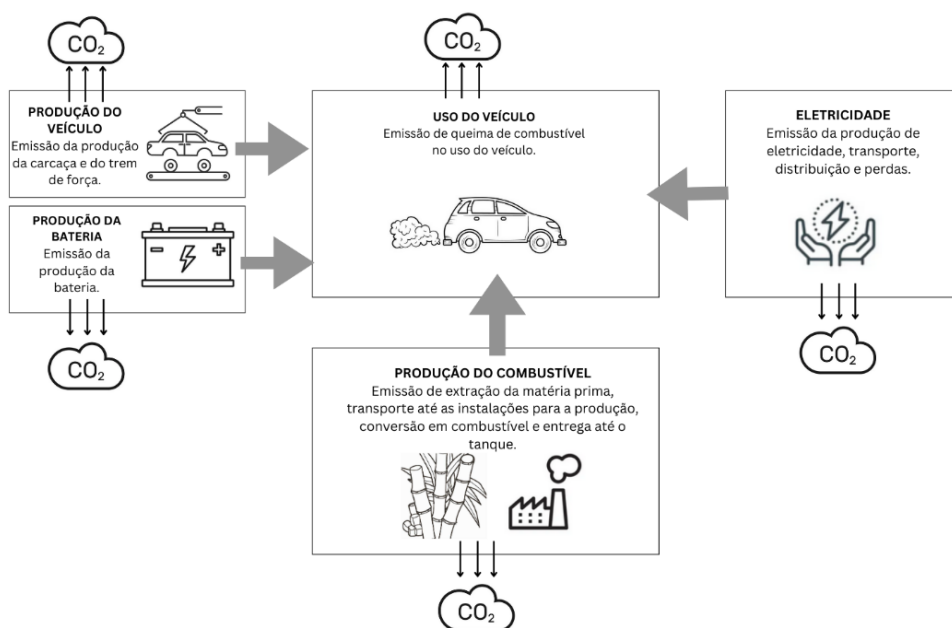
A unidade funcional (FU) é definida como um ciclo de vida do veículo, ou seja, é especificada pela quilometragem total percorrida (Nordelöf *et al.*, 2014). Para isso, frequentemente, uma distância comum é estipulada. Para a pesquisa em questão, a quilometragem total para a ACV foi determinada com base na frota da FAB. Além disso, a FU estabelecida foi a de 1 km, de forma a facilitar a comparação entre os veículos.

O Comando da Aeronáutica estabelece, por meio do detalhamento das atividades do Sistema de Transporte de Superfície do Comando da Aeronáutica, os procedimentos relacionados à gestão da frota. Dessa forma, as organizações militares devem criar um plano de alienação de viaturas com base no período de utilização dos veículos (10 anos para veículos a diesel e equipamentos, e 5 anos para demais), no estado de conservação, no consumo de combustível e nos custos de manutenção (Brasil, 2020).

Quanto à escolha da distância total percorrida, como dado de fim de vida, esta foi definida com base na análise da quilometragem dos carros existentes na FAB, desagregada por cidade. Para isso, foi realizada uma análise estatística, que estabeleceu que a renovação ocorreria com 240.000km ou 15 anos, o que ocorrer primeiro.

2.2.3 Fronteiras do sistema

Os dados de emissões considerados na modelagem do ciclo de vida e os limites do sistema estão sumarizados na Figura 2, compreendendo as fases de produção e uso.

Figura 2 - Esquema das fronteiras do escopo da ACV

Fonte: Elaboração própria.

2.3 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

2.3.1 Produção dos veículos e baterias

A crescente demanda pela eletromobilidade foi acompanhada pelo aumento na quantidade de pesquisas que focam na avaliação e comparação desses tipos de veículos. Uma simplificação e comparação dos componentes de veículos EV e ICEV foi apresentada por Hawkins *et al.* (2013) e serviu como base para diversas pesquisas posteriores.

Dentre os estudos que avaliam e comparam a emissão do ciclo de vida de acordo com o tipo de propulsão, destacam-se as referências apresentadas na Tabela 1, na qual são mostrados os valores referentes à manufatura dos automóveis.

Tabela 1 - Referencial de emissão para a produção de automóveis por tipo de propulsão

Referência	ICEV (kg CO ₂ eq)	HEV (kg CO ₂ eq)	BEV (kg CO ₂ eq)
(Hawkins et al., 2013)	6.450	-	13.050 – 14.250
(QIAO et al., 2017)	9.172	-	14.642 – 14.746
(Karaaslan; Zhao; Tatari, 2018)	15.500	24.500	30.200
(Kawamoto et al., 2019)	5.493	-	12.267
(Koroma et al., 2020)	7.350	9.600	10.350

(Hill, 2020)	7.200	-	6.500 (sem bateria)
--------------	-------	---	---------------------

Fonte: Elaboração própria.

As emissões consideradas para a produção das baterias dos veículos elétricos foram de 114,5kg CO₂eq/kWh de capacidade da bateria (ICCT, 2021). Com base nessa premissa, a emissão de produção da bateria do BYD Dolphin foi de 5,15 tCO₂eq e do BYD Seal foi de 9,45 tCO₂eq. As montadoras de veículos escolhidas têm adotado uma política de garantia das baterias de 8 anos. Entretanto, como não se sabe como será a troca desses dispositivos, qual será a vantagem em realizar a substituição ou qual o tempo médio de vida, optou-se por não considerar a troca das baterias na vida útil dos veículos analisados no presente estudo.

Em resumo, foram utilizados os dados para as emissões de produção dos veículos e baterias descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Base de dados de emissões da produção de veículos

ICEV (kg CO ₂ eq)		HEV (kg CO ₂ eq)		BEV (kg CO ₂ eq)	
Hatch	Sedan	Hatch	Sedan	Hatch	Sedan
5.493	9.172	9.600	9.600	11.650	15.950

Fonte: Kawamoto *et al.*, 2019; Qiao *et al.*, 2017; Koroma *et al.*, 2020; ICCT, 2021; Hill, 2020.

As baterias dos veículos não são fabricadas no Brasil, portanto, a não contabilização das emissões de transporte, provenientes em grande parte da China, é uma limitação do presente trabalho. Em contrapartida, neste estudo foram utilizados valores superiores aos encontrados em Qiao *et al.* (2017) para os *sedans*. Neste trabalho, os autores realizam uma ACV da produção de veículos na China, o que torna os valores utilizados coerentes.

2.3.2 Combustíveis (*well-to-tank*)

Quanto à produção de combustível, foram consideradas as etapas: (1) extração da matéria-prima ou cultivo e colheita; (2) transporte até as instalações de produção; (3) conversão da matéria-prima em combustível; e (4) entrega até o tanque de combustível.

Para o etanol, Liu *et al.* (2023) analisaram dados de 67 usinas de cana-de-açúcar submetidas ao RenovaBio e avaliaram as emissões até o uso nos Estados Unidos. Os resultados, 27,5 gCO₂eq/MJ, foram comparados com Seabra *et al.* (2011), que consideram o

uso no Brasil, com 21,3 gCO₂eq/MJ. Os autores concluíram que os resultados são semelhantes ao excluir as emissões de transporte até os EUA, motivo pelo qual os dados de Seabra *et al.* (2011) foram adotados.

As emissões decorrentes da mudança do uso da terra não foram incluídas, pois o Renovabio exige comprovação de que os biocombustíveis são provenientes de áreas não desmatadas (Brasil, 2018). Em 2023, 95% do etanol vendido no Brasil possuía certificação Renovabio (UNICA, 2024).

Para a produção da gasolina, evidencia-se que, no Brasil, a gasolina comercializada contém uma parcela de etanol anidro que deve variar entre 18% e 27% (Velandia Vargas *et al.*, 2019). As principais referências que tratam das emissões, utilizando estudos brasileiros, estão apresentados na Tabela 3. A referência utilizada está destacada.

Tabela 3 - Estudos de emissões da produção da gasolina no Brasil

Referência	Gasolina (kg CO ₂ eq/ MJ)
(Cavalett <i>et al.</i> , 2013)	0,0720
(Glensor; Muñoz, 2019)	0,0138
(Edwards <i>et al.</i> , 2011)	0,0142
(Wang <i>et al.</i> , 2012)	0,0200

Fonte: Elaboração própria.

Considerando as características dos combustíveis brasileiros, os dados médios do ano de 2022 e apresentados na Tabela 4 foram utilizados na simulação.

Tabela 4 - Características dos combustíveis brasileiros

Combustível	Unidade comercial	Densidade (kg/m ³)	Poder Calorífico (MJ/kg)
Etanol	M ³	791	28,26
Gasolina C	M ³	754	39,36

Fonte: ANP, 2023.

A emissão *well-to-tank* dos combustíveis é calculada com base no consumo em litros, nos dados de emissão, do poder calorífico e da densidade do combustível.

2.3.3 Uso do veículo

As distâncias adotadas foram as informadas pelas organizações que detêm os veículos, o que, em conjunto com o modelo do carro, possibilitou uma busca precisa do consumo e da quantidade de litros consumidos durante o ano. Para os BEV, as emissões de CO₂eq, no uso, são advindas da geração da energia elétrica da matriz elétrica.

Quanto às emissões de CO₂eq provenientes da geração de energia elétrica no Brasil, o ano de 2023 apresentou um total de 38,9 milhões de toneladas de CO₂eq (MtCO₂eq), sendo 16,7 MtCO₂eq provenientes do Sistema Interligado Nacional (SIN). Considerando que a maioria das unidades está conectada ao SIN, foi utilizada a premissa das informações de emissão desse sistema (EPE, 2024), o que representa uma emissão de 55 kgCO₂eq/MWh.

Além das emissões de geração, as perdas de energia que ocorrem desde a geração, transmissão, distribuição e nos equipamentos de recarga devem ser consideradas. No Brasil, em 2023, foram reportados valores de perdas de 4% na rede básica e 7,5% de perdas técnicas na distribuição (ANEEL, 2023). O percentual de perdas não técnicas (furtos de energia, ligações provisórias, entre outros) não foi utilizado, pois não influencia a análise ambiental.

As perdas nos equipamentos de recarga podem variar muito com o tipo do carregador, a potência e o tempo de recarga. Para o presente estudo, foi utilizada uma perda de 15%, em concordância com estudos anteriores (Apostolaki-Iosifidou; Codani; Kempton, 2017; Gauto *et al.*, 2023; Kostopoulos; Spyropoulos; Kaldellis, 2020; Sears; Roberts; Glitman, 2014).

Os modelos elétricos escolhidos foram o Dolphin e o Seal, da marca BYD. Utilizando os dados de capacidade da bateria e de autonomia é possível calcular o kWh/km e, com isso, determinar a necessidade de geração.

2.3.3.1 Matriz regional

Considerando que o fornecimento de energia da matriz regional tem impacto nos resultados do BEV, foi realizada uma avaliação com base nos quatro subsistemas apontados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS): Norte, Nordeste, Sudeste/ Centro-Oeste e Sul.

Para determinar as emissões por subsistema, utilizou-se os dados de geração e emissões das térmicas conectadas ao SIN em 2020 e suas emissões em gCO₂eq/kWh (IEMA, 2022). Em conjunto com os dados de geração para o ano de 2023, os resultados de emissões por subsistema estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de emissões de geração por subsistema

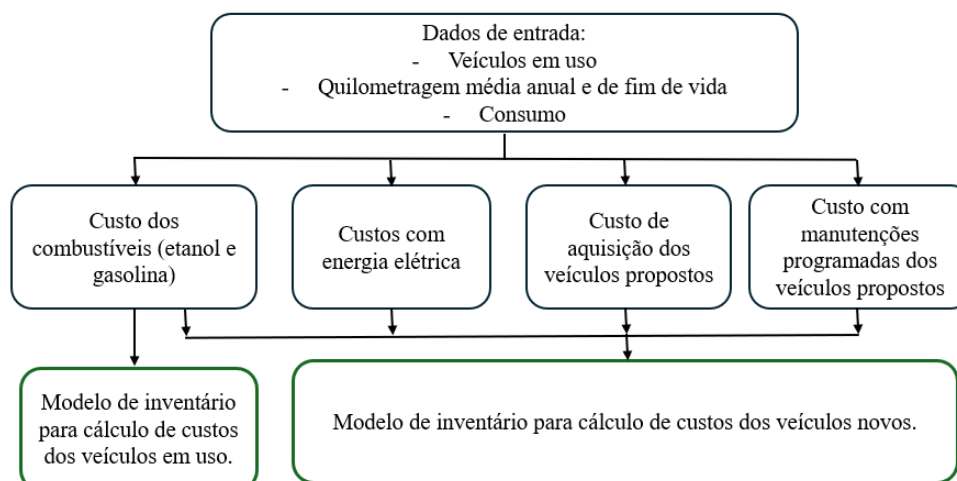
Subsistema	Emissões das térmicas (kgCO ₂ e/MWh)	Emissões do subsistema (kgCO ₂ e/MWh)
Norte	504,56	72,66
Nordeste	655,43	24,68
Sudeste/ Centro-Oeste	492,22	53,05
Sul	981,50	42,90

Fonte: Elaboração própria.

Os dados apresentados por subsistema, quando calculado para o nível Brasil, a partir de uma média ponderada entre as emissões de cada subsistema e a quantidade gerada por ele, resultam em um valor de 54,5 kgCO₂eq/MWh, muito próximo de 55 kgCO₂eq/MWh (EPE, 2024).

2.4 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Para a análise dos custos dos modelos propostos, foram considerados três aspectos principais no ciclo de vida de um veículo: (1) custo de aquisição; (2) custo de manutenção programada; e (3) custo com combustíveis. O Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) não foi incluído, pois veículos pertencentes à União são isentos desse tributo. O fluxograma do modelo utilizado para desenvolver o inventário de custos está apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma de criação do modelo de inventário de custos

Fonte: Elaboração própria.

Os custos médios por estado da Gasolina C Comum e do Etanol Hidratado Comum, de junho de 2024, foram utilizados como base para a simulação (ANP, 2024). Para a energia elétrica, considerando que a maioria das instalações do COMAER são alimentadas em alta tensão, foi aplicado um filtro para a faixa de tensão Grupo A4, a classe de consumo Poder Público e o ano de 2024. (ANEEL, 2024).

Os custos de aquisição foram consultados no site das montadoras (Byd, 2024a, 2024b; Nissan, 2024; Renault, 2024; Toyota, 2024a, 2024b). Os custos de manutenção referem-se às manutenções programadas e contratadas nas montadoras, com valores disponíveis até 140.000 km, obtidos nos sites das empresas.

Uma possibilidade de lucro financeiro com a redução das emissões dos gases de efeito estufa é por meio dos créditos de carbono. Para cada tonelada de CO₂ evitada, é emitido um crédito de carbono. A Fundação Getúlio Vargas (FGV) disponibiliza dados sobre o mercado de carbono, países participantes e valores. Em 2021, os preços por escopo do *Carbon Offsetting and Reduction Scheme* (CORSIA) foram de U\$\$ 2,52 por crédito de carbono para os sistemas de eficiência energética e combustíveis (FGV, 2024). Esse mercado foi escolhido por sua proximidade com as atividades da FAB. Com o dólar médio de R\$ 4,995 em 2023, o custo da tonelada de dióxido de carbono equivalente é de R\$ 12,59 (IPEA, 2023).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados indicaram que a frota *hatch* é mais numerosa, com 267 unidades, enquanto a de *sedans* tem 260. Além disso, viaturas *hatch* percorrem quilometragens anuais mais altas e apresentam maior dispersão de dados. Quanto ao fim de vida, a média da quilometragem dos *hatches* é superior à dos *sedans*, com maior concentração entre 120 e 160 mil quilômetros, enquanto nos *sedans* varia entre 120 e 200 mil quilômetros. Foi adotada uma quilometragem de fim de vida de 240.000 km, abrangendo cerca de 90% dos carros alienados. A amostra pequena impactou os resultados, que apresentaram um amplo intervalo.

3.1 FROTA ATUAL E IMPACTOS CORRELACIONADOS

Atualmente, as organizações militares da Força Aérea possuem postos de combustíveis internos, essenciais para aumentar o nível de segurança de suas operações, abastecidos com óleo diesel e gasolina. Os resultados de emissões calculados para os veículos

existentes, abastecidos com gasolina, para os modelos *hatch* e *sedan*, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Emissões da frota atual

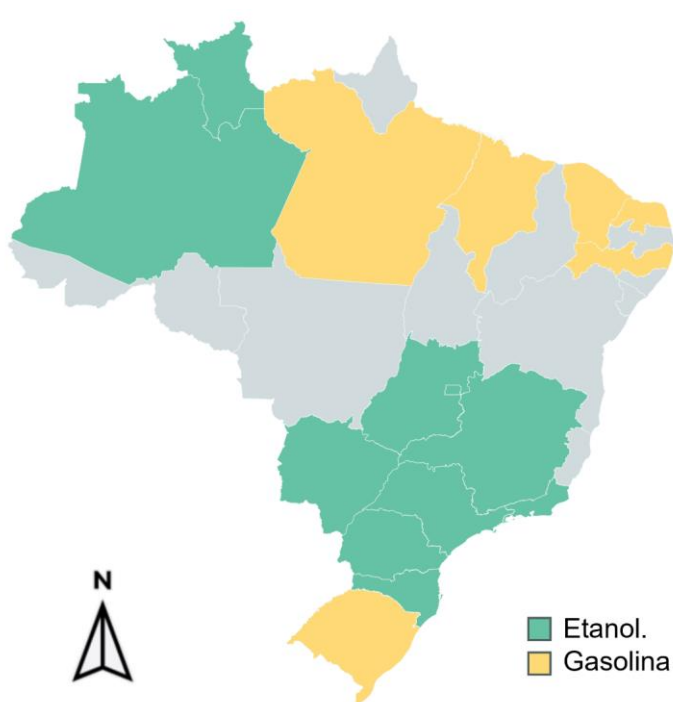
Tipo de veículos	Qtde de Veículos	Well to tank (tCO ₂ eq/ano)	Emissões de uso (tCO ₂ eq/ano)	Emissões totais (tCO ₂ eq/ano)
<i>Hatch</i>	267	162,80	446,26	609,06
<i>Sedan</i>	260	117,08	284,59	401,67

Fonte: Elaboração própria.

3.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS E EMISSÕES DA FROTA *HATCH*

A análise estadual dos custos com combustíveis, combinada à matriz energética por subsistema, identificou melhorias tanto na substituição quanto no uso atual da frota. Sobre o custo do uso da frota existente, o custo anual com a gasolina é de R\$ 1.392.082,04. Tem potencial de redução em cerca de 5% (R\$ 1.321.231,37) com o uso do etanol. Em nível estadual, o custo seria de R\$ 1.309.687,92 (6% de redução). A Figura 4 mostra os estados onde o etanol foi mais vantajoso e onde a gasolina se mostrou mais atrativa.

Figura 4 - Estados com custos mais baixos para o etanol (verde) ou gasolina (amarelo)



Fonte: Elaboração própria.

Outro aspecto importante na avaliação financeira é que os veículos analisados, fabricados entre 1996 e 2021, incluem 205 unidades anteriores a 2014, que apresentam maior consumo. O custo anual dos veículos fabricados até 2014, abastecidos a gasolina, é de R\$ 1.095.862,85, enquanto para o modelo escolhido, esse valor cai para R\$ 800.333,08, representando uma redução de 27% ou R\$ 295.529,77 por ano. Essa economia é atribuída à melhoria na eficiência dos veículos.

Na análise do custo de vida, foram consideradas as despesas de aquisição, manutenção e operação. Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que o ICEVg foi mais vantajoso apenas na região Nordeste, enquanto o ICEVe teve melhor desempenho nas demais regiões. Apesar do custo operacional mais baixo dos BEV, seu alto custo de aquisição ainda inviabiliza a aplicação da tecnologia. Em alguns estados, a isenção do IPVA é oferecida como incentivo, porém, esse benefício não se aplica ao Poder Público, que já é isento.

Tabela 7 - Custo do ciclo de vida da frota *hatch*

Região	ICEVg (R\$)	ICEVe (R\$)	BEV (R\$)
Norte (23)	2.680.783,27	2.625.604,09	3.835.195,58
Nordeste (29)	4.210.308,30	4.302.898,39	5.228.598,82
Sul (22)	3.039.219,41	2.957.606,10	3.897.174,35
Sudeste/ Centro-Oeste (193)	28.860.051,92	27.773.669,10	35.286.592,86

Fonte: Elaboração própria.

Na análise ambiental, esta pesquisa se destaca por incluir a análise regional das emissões, conforme resultados apresentados na Tabela 8. Na região Nordeste, os *hatches* BEV emitiram menos que os veículos a etanol, diferindo dos resultados da literatura que avaliam o contexto nacional. As demais regiões apresentaram resultados melhores com o ICEVe.

Tabela 8 - Emissões de CO₂eq da frota *hatch*, por região

Região	ICEVg (tCO ₂)	ICEVe (tCO ₂)	BEV (tCO ₂)
Norte (23)	371,05	214,20	296,28
Nordeste (29)	802,28	397,19	386,00
Sul (22)	560,32	285,67	308,88
Sudeste/ Centro-Oeste (193)	5.772,14	2.825,82	2.881,57

Fonte: Elaboração própria.

O mercado de carbono é adotado mundialmente para incentivar decisões ambientalmente amigáveis. Utilizando o valor de R\$ 12,59 por crédito de carbono, o lucro estimado com a substituição dos veículos a gasolina pelos modelos escolhidos está apresentado na Tabela 9, por região. Os resultados mostram que o valor do mercado não é suficiente para influenciar a decisão.

Tabela 9 - Precificação das emissões de CO₂ no mercado de carbono

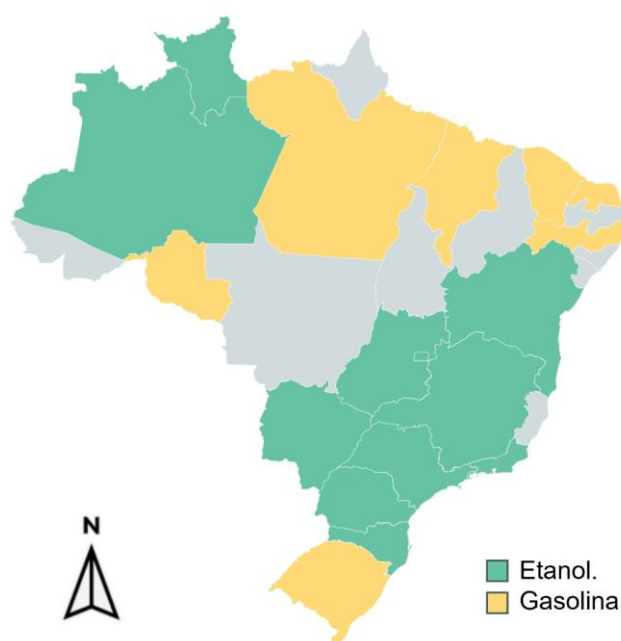
Região	ICEVe (R\$/ano)	BEV (R\$/ano)
Norte (23)	188,85	239,21
Nordeste (29)	566,55	730,20
Sul (22)	365,11	478,42
Sudeste/ Centro-Oeste (193)	4.746,43	5.803,99

Fonte: Elaboração própria.

3.3 ESTIMATIVA DE EMISSÕES E CUSTOS DA FROTA SEDAN

Para os veículos *sedan*, o custo anual de utilização atual é de R\$ 997.350,99. Abastecidos com álcool, o custo reduziria para R\$ 951.756,10, cerca de 5% a menos. Para a análise em nível estadual, o valor seria de R\$ 946.243,19, uma economia de R\$ 51.107,80 por ano. O mapa da Figura 5 destaca os estados onde o etanol foi mais atrativo e onde a gasolina foi mais vantajosa.

Figura 5 - Estados com custos mais baixos para o etanol (azul) ou gasolina (amarelo)



Fonte: Elaboração própria.

Na avaliação financeira da substituição dos veículos antigos, por modelos novos, considerando a melhoria da eficiência dos veículos ao longo dos anos, os *sedans* apresentaram resultados menos expressivos que os *hatches*. Para o sedan, a diferença no desempenho foi evidente para veículos fabricados até 2013. O custo anual de operação à gasolina da frota atual, com 152 unidades fabricadas até 2013, totaliza R\$ 598.238,57, enquanto, para os novos modelos, reduz para R\$ 466.883,37, uma economia de 22% ou R\$ 131.355,21 por ano.

Na análise do custo de vida, foram consideradas as despesas de aquisição, manutenção e operação, incluindo da tecnologia híbrida para os *sedans*. Os resultados regionais estão apresentados na Tabela 10. Apenas na região Nordeste o ICEVg foi mais vantajoso, nas demais regiões o ICEVe teve menor custo. O BEV apresentou valores muito superiores às demais tecnologias, especialmente devido ao custo de aquisição elevado.

Tabela 10 - Custo do ciclo de vida da frota *sedan*

Região	ICEVg (R\$)	ICEVe (R\$)	HEVg (R\$)	HEVe (R\$)	BEV (R\$)
Norte (12)	1.771.619,37	1.762.818,92	2.639.171,18	2.631.787,18	3.847.169,77
Nordeste (13)	2.470.502,22	2.525.678,00	3.210.708,89	3.240.888,39	4.450.332,73
Sul (09)	1.541.267,29	1.532.058,78	2.114.952,58	2.106.695,95	2.997.647,99
Sudeste/ Centro-Oeste (226)	37.157.554,61	36.452.428,88	52.123.107,72	51.623.657,08	74.494.673,94

Fonte: Elaboração própria.

Também para os *sedans*, foi realizada uma análise de emissões do ciclo de vida por região, apresentada na Tabela 11. Os resultados encontrados demonstram que os veículos HEVe são os menores emissores para todas as regiões brasileiras.

Tabela 11 - Emissões de CO₂ da frota *sedan*, por região

Região	ICEVg(tCO ₂)	ICEVe(tCO ₂)	HEVg(tCO ₂)	HEVe(tCO ₂)	BEV(tCO ₂)
Norte (12)	229,39	156,12	199,10	144,34	207,37
Nordeste (13)	447,87	246,08	355,87	205,07	222,29
Sul (09)	253,52	148,53	206,61	128,16	157,06
Sudeste/ Centro-Oeste (226)	5.869,88	3.549,63	4.845,61	3.111,70	4.005,85

Fonte: Elaboração própria.

Os preços do crédito de carbono foram aplicados para análise lucrativa, com resultados regionais apresentados na Tabela 12. Esses resultados mostram que o valor do mercado não é suficiente para influenciar a decisão.

Tabela 12 - Precificação das emissões de CO₂ no mercado de carbono (*sedan*)

Região	ICEVe (R\$/ano)	HEVg(R\$/ano)	HEVe(R\$/ano)	BEV (R\$/ano)
Norte (12)	88,13	50,36	100,72	113,31
Nordeste (13)	251,80	163,67	302,16	352,52
Sul (09)	113,31	75,54	138,49	163,67
Sudeste/ Centro-Oeste (226)	3.147,50	2.140,30	3.600,74	4.053,98

Fonte: Elaboração própria.

3.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o objetivo de comparar as emissões das tecnologias em nível nacional, inclusive para fins de comparação com estudos anteriores, a Tabela 13 apresenta os dados de emissão em gCO₂eq/km.

Tabela 13 - Emissões em gCO₂eq/km

Região	ICEVg	ICEVe	HEVg	HEVe	BEV
<i>Hatch</i>	157,13	78,42	-	-	83,57
<i>Sedan</i>	209,63	116,11	167,08	97,20	115,12

Fonte: Elaboração própria.

Os dados indicam que a combinação de eletrificação com biocombustíveis tem o maior potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Resultados semelhantes foram reportados por Gauto *et al.* (2023), que avaliaram modelos da categoria *sedan* e registraram: 269,3 gCO₂eq/km para o ICEVg, 120,9 gCO₂eq/km para o ICEVe, 77,6 gCO₂eq/km para o HEVe e 98,36 gCO₂eq/km para o BEV. Assim como neste estudo, os híbridos a etanol destacaram-se como a melhor opção ambiental, reforçando o potencial dessa combinação. Estudos adicionais confirmaram resultados semelhantes (Andersson; Börjesson, 2021; Carvalho; Brasil Júnior; Brasil, 2023).

Souza *et al.* (2018) avaliaram um modelo compacto no contexto brasileiro e identificaram que o ICEVe apresentou as menores emissões de CO₂eq/km, seguido pelo BEV. Resultado semelhante foi observado neste estudo na avaliação dos *hatches*.

Esta pesquisa se diferencia por incluir a avaliação regional no Brasil. Para os *hatches*, a ausência de modelos HEV contribuiu para que, na análise regional, a região Nordeste, com a matriz energética mais limpa do país, registrasse os melhores resultados ambientais para o modelo BEV. Não foram encontrados estudos anteriores que avaliam os impactos regionalmente no Brasil, apenas para os Estados Unidos (Onat; Kucukvar; Tatari, 2015).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou o impacto da eletrificação do transporte leve (*hatch* e *sedan*) da Força Aérea Brasileira, com foco nos aspectos ambientais e econômicos. Com base na revisão bibliográfica sobre emissões e nos dados dos veículos em uso, foi desenvolvido um modelo de inventário para calcular as emissões de veículos existentes ou novos, no caso de aquisições.

Tendo em vista que os resultados são afetados pelas características locais, foi realizada uma avaliação regional da matriz elétrica e uma análise estadual dos custos de energia e combustível. Essa avaliação se tornou um diferencial em relação a estudos anteriores, que não consideram a regionalização. Os modelos foram aplicados à renovação da frota de veículos *hatch* e *sedan* da Força Aérea Brasileira, a fim de gerar resultados claros para discussão e evidência.

Sob o aspecto ambiental, os resultados para a frota *hatch* indicaram que o ICEVe apresenta menor impacto em todas as regiões do país, exceto no Nordeste, onde o BEV se tornou mais atrativo. A diferenciação regional da matriz de energia elétrica permitiu um resultado diferenciado aos estudos anteriores, específico para a matriz de energia mais limpa do país, a do Nordeste. Outro fator que contribuiu para esse resultado é a ausência, no mercado nacional, de híbridos do tipo *hatch*. Para os *sedans*, a presença de modelos HEVe permitiram que, em todas as regiões, essa tecnologia apresentasse os menores impactos ao meio ambiente, conforme apontado pela literatura disponível.

Do ponto de vista de custos, a avaliação mostrou que a eletrificação não é viável, pois os altos custos de aquisição dos veículos superam os dos ICEV. Caso o governo tenha interesse na eletrificação das frotas públicas, será necessária a implementação de políticas de

incentivo efetivas para esse setor, já que o mercado de carbono não se tornou viável. Duas medidas se destacam na redução dos custos atuais: a adoção do etanol em diversos estados e a substituição dos veículos antigos e menos eficientes. Destaca-se que os modelos de inventários desenvolvidos possuem um diferencial por serem precisos para o modelo e consumo do veículo, tornando-se uma ferramenta eficiente de apoio à tomada de decisão.

De forma geral, a busca pela transição energética e a necessidade de diversificação de fontes de energia, evidenciam dois aspectos importantes. O primeiro é a necessidade de incentivo para soluções de fim de vida das baterias, como a reciclagem, visto que esse componente representa o principal desafio ambiental dos carros elétricos. O segundo é que as características do setor de transportes brasileiro, com ampla participação de biocombustíveis na matriz, fazem do bioetanol uma solução favorável à promoção da transição energética (Carvalho; Brasil Júnior; Brasil, 2023).

Como limitações, o trabalho não considerou os aspectos relacionados ao fim de vida. Existe a necessidade de definir políticas e ações nesse sentido para o contexto nacional. Além disso, não foram consideradas as emissões e os custos das infraestruturas necessárias para adequações à implementação do álcool e dos veículos elétricos.

Sugere-se que, futuramente, sejam incluídos os impactos relacionados ao fim de vida, além de se avaliar o histórico de custos dos combustíveis dos veículos, visto que o estudo utilizou dados de um mês específico. Além disso, a partir de 2025, as organizações militares passarão a adquirir energia por meio do Mercado Livre, e não mais no Mercado Cativo, como os dados utilizados neste trabalho. Estima-se que ocorra uma redução de aproximadamente 30% no valor da tarifa de energia. Uma avaliação com esses valores é necessária.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Perdas de energia**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia> . Acesso em: 21 jul. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Sistema de Acompanhamento de Informações de Mercado para Regulação Econômica – SAMP**, 2024. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/cativo> . Acesso em: 8 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023> . Acesso em: 11 jul. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Preços de distribuição de combustíveis**, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-combustiveis> . Acesso em: 9 ago. 2024.

ANDERSSON, Ö.; BÖRJESSON, P. The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. **Applied Energy**, v. 289, p. 116621, 2021.

APOSTOLAKI-IOFIDOU, E.; CODANI, P.; KEMPTON, W. Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. **Energy**, v. 127, p. 730-742, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Diretoria da Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis. Resolução nº 758, de 23 de novembro de 2018. Regulamenta a certificação da produção ou importação eficiente de biocombustíveis de que trata o art. 18 da Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e o credenciamento de firmas inspetoras. **Diário Oficial da União**: Seção 1, [Brasília], n. 227, p. 54, 27 nov. 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/resolucaoanp-758-2018.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2024.

BYD Dolphin: divertido, pop e 100% elétrico. **BYD**. Disponível em: <https://www.byd.com/br/car/dolphin> . Acesso em: 8 ago. 2024a.

BYD seal: configure o seu BYD. **BYD**. Disponível em: <https://www.byd.com/br/order-seal> . Acesso em: 10 ago. 2024b.

CARVALHO, E. N.; BRASIL JÚNIOR, A. C. P.; BRASIL, A.C.M. Impact of electric vehicle emissions in the Brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol. **Energy Reports**, v. 10, p. 2582-2596, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.045> . Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723012908> . Acesso em: 10 ago. 2024.

CAVALETT, Otávio *et al.* Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 647-658, 2013.

EDWARDS, R. *et al.* Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context. **JRC Scientific and Technical Reports**, [S.l.] Version 3c, 2011. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1cffb832-f2bc-42df-9dc2-59db08e24eee/language-en> . Acesso em: 10 ago. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**: ano base 2023, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet-2024.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEN: Balanço Energético Nacional**, 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br> . Acesso em: 16 ago. 2024.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – UNITED STATES. MOVES 2004. **Energy and Emission Inputs**. Draft Report. Washington, DC. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1001DAQ.txt?ZyActionD=ZyDocument&Client=EP&Index=2000%20Thru%202005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&UseQField=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C00THRU05%5CTXT%5C00000016%5CP1001DAQ.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=R&results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=2> . Acesso em: 22 ago. 2024.

FAN, E. *et al.* Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects. **Chemical reviews**, v. 120, n. 14, p. 7020-7063, 2020.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Dashboard Precificação de Carbono**, 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNTZkNjc0NTAtYTVjMi00OTc1LWJhZTEtYWQxY2M0YzdjMGm0IiwidCI6ImRlNGNlMThtLTUyMTQtdDA2OS04MTg4LTFiOGZiNDJlM2NjZSJ9&pageName=ReportSection8563bbab36110c9ec008> . Acesso em: 22 ago. 2024.

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

GLENSOR, K.; MUÑOZ B, M. R. Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p. 6332, 2019.

HAWKINS, T. R. *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. **Journal of industrial ecology**, v. 17, n. 1, p. 53-64, 2013.

HILL, N. Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through Life Cycle Assessment. **Retrieved October**, v. 17, p. 2022, 2020.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas**, 2022. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/inventario-de-emissoes-atmosfericas-em-usinas-termelétricas> . Acesso em: 02 ago. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E APLICADA. **Taxa de Câmbio - R\$ / US\$ - Comercial – Venda – Média**, 2023. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=31924> . Acesso em: 22 ago. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **About the IPCC**, 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/> . Acesso em: 2 set. 2024.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars**, 2021. Disponível em: <https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/> . Acesso em: 15 abr. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2023 – Catching up with climate ambitions**. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf> . Acesso em: 28 jul. 2024.

KARAASLAN, E.; ZHAO, Y.; TATARI, O. Comparative life cycle assessment of sport utility vehicles with different fuel options. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 333-347, 2018.

KAWAMOTO, R. *et al.* Estimation of CO2 emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. **Sustainability**, v. 11, n. 9, p. 2690, 2019.

KOROMA, M. S. *et al.* Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management. **Science of the Total Environment**, v. 831, p. 154859, 2022.

KOROMA, M. S. *et al.* Prospective environmental impacts of passenger cars under different energy and steel production scenarios. **Energies**, v. 13, n. 23, p. 6236, 2020.

KOSTOPOULOS, E. D.; SPYROPOULOS, G. C.; KALDELLIS, J. K. Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. **Energy Reports**, v. 6, p. 418-426, 2020.

LAI, X. *et al.* Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. **Etransportation**, v. 12, p. 100169, 2022.

LI, W. *et al.* Life cycle assessment of end-of-life vehicle recycling processes in China—take Corolla taxis for example. **Journal of cleaner production**, v. 117, p. 176-187, 2016.

LIU, X. *et al.* Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Brazilian Sugar Cane Ethanol Evaluated with the GREET Model Using Data Submitted to RenovaBio. **Environmental Science & Technology**, v. 57, n. 32, p. 11814-11822, 2023.

MELIN, H. E. *et al.* Global implications of the EU battery regulation. **Science**, v. 373, n. 6553, p. 384-387, 2021.

MENDOZA BELTRAN, A. *et al.* When the background matters: using scenarios from integrated assessment models in prospective life cycle assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 64-79, 2020.

MINISTÉRIO DA DEFESA. Diretoria de Administração da Aeronáutica. Manual de Comando da Aeronáutica (MCA) 75-1E. Manual de Transporte de Superfície. **Boletim do Comando da Aeronáutica**, Brasília, DF, n. 62, 14 abr. 2020. Brasília, DF: Comando da Aeronáutica, 2020.

NISSAN. **Nissan Versa**: desafiamos o seu conceito, 2024. Disponível em: <https://www.nissan.com.br/veiculos/modelos/novo-versa.html> . Acesso em: 10 ago. 2024.

NORDELÖF, A. *et al.* Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 1866-1890, 2014.

ONAT, N. C.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. **Applied Energy**, v. 150, p. 36-49, 2015.

PLANALTO (Brasil). **Em nova meta, Brasil irá reduzir emissões de carbono em 50% até 2030**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2021/10/em-nova-meta-brasil-ira-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030> . Acesso em: 16 ago. 2024.

QIAO, Q. *et al.* Comparative study on life cycle CO2 emissions from the production of electric and conventional vehicles in China. **Energy Procedia**, v. 105, p. 3584-3595, 2017.

RAJAEIFAR, M. A. *et al.* Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106144, 2022.

RENAULT. **Renault KWID**: versões e Preços, 2024. Disponível em: https://www.renault.com.br/veiculos-de-passeio/kwid/versoes-e-precos.html?gradeCode=ENS_MDL2P1SERIELIM4%2F1000 . Acesso em: 8 ago. 2024.

RITCHIE, H. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? Our World in Data. Disponível em: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector> . Acesso em: 16 out. 2023.

SCHENKER, V.; OBERSCHELP, C.; PFISTER, S. Regionalized life cycle assessment of present and future lithium production for Li-ion batteries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 187, p. 106611, 2022.

SEABRA, J. *et al.* Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 5, p. 519-532, 2011.

SEARS, J.; ROBERTS, D.; GLITMAN, K. A comparison of electric vehicle Level 1 and Level 2 charging efficiency. In: **2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)**. IEEE, 2014. p. 255-258.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Carros elétricos: desafios e oportunidades no Brasil**, 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/carros-eletricos-desafios-e-oportunidades-no-brasil,6d088e029bf28810VgnVCM1000001b00320aRCRD#:~:text=Desafios%20%C3%A0%20populariza%C3%A7%C3%A3o%20dos%20carros,ainda%20%C3%A9%20limitada%20no%20pa%C3%ADs> . Acesso em: 16 ago. 2024.

SOUZA, L. L. P. *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 203, p. 444-468, 2018.

SUN, X. *et al.* Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 123006, 2020.

TOYOTA. **Corolla – Um ícone com tudo que te move. Conheça as versões**, 2024b. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/modelos/corolla-hybrid> . Acesso em: 10 ago. 2024.

TOYOTA. **Corolla Cross – Dirigir um SUV com a qualidade Toyota não tem volta**, 2024a. Conheça as versões. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/modelos/corolla-cross> . Acesso em: 8 ago. 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR E BIOENERGIA. **Observatório da cana e bioenergia, volume comercializado por unidades certificadas**, 2024. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=110> . Acesso em: 19 jul. 2024.

VELANDIA VARGAS, J. E. *et al.* Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, p. 1878-1897, 2019.

WANG, M. *et al.* Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for US use. **Environmental research letters**, v. 7, n. 4, p. 045905, 2012.

WANG, Y. *et al.* Energy saving, GHG abatement and industrial growth in OECD countries: A green productivity approach. **Energy**, v. 194, p. 116833, 2020.

WITHER, J. K. Back to the future? Nordic total defence concepts. **Defence studies**, v. 20, n. 1, p. 61-81, 2020.

YANG, L. *et al.* Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124899, 2021.

YANG, Y. *et al.* On the sustainability of lithium ion battery industry—A review and perspective. **Energy Storage Materials**, v. 36, p. 186-212, 2021.