



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

**MARIANE CAMARGOS DE FIGUEIREDO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

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

**MARIANE CAMARGOS DE FIGUEIREDO**

**ORIENTADORA: RITA DE CÁSSIA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**PUBLICAÇÃO: T.DM-004/2024  
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2024**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

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

**MARIANE CAMARGOS DE FIGUEIREDO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.**

**APROVADA POR:**

---

**PROFa.: RITA DE CÁSSIA SILVA, Dr<sup>a</sup>., (PPGT-UnB)  
(ORIENTADORA)**

---

**PROFa.: FABIANA SERRA DE ARRUDA, Dr<sup>a</sup>., (PPGT-UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**PROFa.: PATRÍCIA BITTENCOURT TAVARES DAS NEVES, Dr<sup>a</sup>., (UFPA)  
(EXAMINADORA EXTERNA)**

**BRASÍLIA/DF, 27 de NOVEMBRO de 2024.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FIGUEIREDO, MARIANE CAMARGOS DE

Eletrificação da frota terrestre da Força Aérea Brasileira: uma avaliação ambiental e de custos. Brasília, 2024. xiii, 105p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2024).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Avaliação do Ciclo de Vida

3 – Etanol

I – ENC/FT/UnB

2 – Força Aérea Brasileira

4 – Veículo elétrico

II – Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FIGUEIREDO, M. C. (2024). Eletrificação da frota terrestre da Força Aérea Brasileira: uma avaliação ambiental e de custos. Publicação T.DM-004/2024. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: MARIANE CAMARGOS DE FIGUEIREDO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Eletrificação da frota terrestre da Força Aérea Brasileira: uma avaliação ambiental e de custos.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Mariane Camargos de Figueiredo

mcamargos.figueiredo@gmail.com

Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília – DF, CEP 70910-900

## DEDICATÓRIA

*A Deus e família, pelo amor incondicional;  
A Força Aérea Brasileira, pela oportunidade;  
A Universidade de Brasília, pelo crescimento e experiência proporcionada.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por abençoar a minha vida, minha saúde e por sempre ser tão bom comigo. É no Seu exemplo que espero, por meio do meu trabalho, contribuir com resultados positivos na vida das pessoas.

Agradeço ao meu marido por sempre incentivar minhas escolhas e por me dar forças. Seu jeito questionador me faz refletir todo o meu trabalho, e certamente esses dois aspectos fazem com que todos os meus resultados sejam também seus. Ao meu filho, que nasceu no primeiro semestre deste mestrado e tornou o processo muito mais desafiador, o que me fez uma profissional e estudiosa ainda mais dedicada.

Aos meus pais, agradeço por serem minha base, especialmente à minha mãe, que sempre está disposta a me ouvir, aconselhar e ajudar. Que sorte a minha ter uma amiga assim em minha vida.

Agradeço à Força Aérea por me permitir realizar um grande sonho com este mestrado. Agradeço nominalmente aos Senhores Brigadeiro Intendente Alcides Roberto Nunes e Brigadeiro do Ar Alexandre Hoffmann por terem me incentivado a cursá-lo, orientando-me no processo e me apoiando ao longo do mestrado. Ao Senhor Coronel Aviador Josirley Brito de Sousa, agradeço o apoio e empatia em momentos cruciais, que foram decisivos para que eu não desistisse.

À minha orientadora Profa. Dra. Rita de Cássia, por ter aceitado me orientar nessa jornada. Ao Prof. Dr. Augusto Mendonça, agradeço o aprendizado, acolhimento e paciência.

Agradeço às Profas. Dra. Fabiana Arruda e Dra. Michelle Andrade por fazerem com que eu me apaixonasse pela pesquisa acadêmica. É tudo muito lindo mesmo!

Por fim, agradeço a todos os amigos e familiares que, de alguma forma, me ajudaram nesse processo. Foram dois anos desafiadores.

Obrigada!

## RESUMO

Esta dissertação apresenta uma avaliação ambiental e de custos da eletrificação da frota terrestre de veículos leves (*hatch* e *sedan*) da Força Aérea Brasileira (FAB). Para isso, o escopo de aplicação englobou os veículos a combustão (ICEV), os veículos híbridos (HEV) e os veículos elétricos à bateria (BEV), com a utilização de etanol ou gasolina. Nesse contexto, foi aplicada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme as normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, para quantificar as emissões de CO<sub>2</sub>eq 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. Um modelo de inventário para o cálculo de emissões foi criado, tanto para viaturas em uso, a partir de dados de ano e modelo de cada veículo, quanto para a aquisição de acordo com a tecnologia escolhida. Os achados sugerem que a participação do etanol é fundamental na redução das emissões e, para os *sedans*, combinados com a tecnologia híbrida, são alcançados os resultados mais sustentáveis. Para os *hatch*, tendo em vista a falta de modelos híbridos, o ICEV a etanol é o mais sustentável na maioria das regiões do país, com exceção da Nordeste, que devido à sua matriz limpa, em 15 anos o BEV obteve melhor desempenho ambiental. Os custos de aquisição dos veículos elétricos (EV) ainda são muito altos, quando comparados aos ICEV, o que sugere que são necessárias políticas de incentivo específicas ao poder público para viabilizar a aplicação. O trabalho visa a subsidiar decisões estratégicas sobre a renovação da frota, através de uma abordagem integrada que considere os benefícios ambientais e financeiros, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência operacional da Força Aérea.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida, Força Aérea Brasileira, Etanol, Veículo Elétrico.

## **ABSTRACT**

This dissertation presents an environmental and cost assessment of the electrification of the Brazilian Air Force's (FAB) fleet of light-duty vehicles. The scope of the study included Internal Combustion Engine Vehicles (ICEV), Hybrid Electric Vehicles (HEV), and Battery Electric Vehicles (BEV), using ethanol or gasoline. In this context, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology was applied, according to the NBR ISO 14040 and NBR ISO 14044 standards, to quantify CO<sub>2</sub>eq emissions during production and use phases of the vehicles. Additionally, an economic analysis was carried out, considering the acquisition, maintenance, and operational costs of the vehicles. An inventory model for emissions calculations was created for vehicles in use, based on the year and model data of each one, as well as for future acquisitions, depending on the chosen technology. The findings suggest that ethanol plays a key role in reducing emissions, and for sedans, combined with hybrid technology, the most sustainable results are achieved. For compacts, due to the lack of hybrid models, ethanol-powered ICEV are the most sustainable in most regions of the country, except in the Northeast, where, due to its clean energy matrix, BEV achieved better environmental performance over a 15-year period. The acquisition costs of electric vehicles (EV) remain very high compared to ICEV, suggesting that specific incentive policies for public institutions are necessary to make their adoption feasible. The study aims to support strategic decisions regarding 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, Brazilian Air Force, Ethanol, Electric Vehicle.

## ÍNDICE

|          |                                                                     |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | OBJETIVOS .....                                                     | 4         |
| 1.1.1    | Objetivo geral .....                                                | 4         |
| 1.1.2    | Objetivos específicos .....                                         | 4         |
| 1.2      | JUSTIFICATIVA .....                                                 | 4         |
| 1.3      | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....                                      | 5         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                  | <b>7</b>  |
| 2.1      | REVISÃO BIBLIOMÉTRICA .....                                         | 7         |
| 2.2      | EMISSIONES NO CONTEXTO MUNDIAL E NACIONAL .....                     | 9         |
| 2.3      | NORMATIZAÇÃO .....                                                  | 14        |
| 2.4      | DADOS PARA O INVENTÁRIO .....                                       | 15        |
| 2.4.1    | Produção dos veículos e baterias .....                              | 15        |
| 2.4.2    | Combustíveis ( <i>well-to-tank</i> ) .....                          | 17        |
| 2.4.3    | Fim de vida .....                                                   | 18        |
| 2.5      | O MERCADO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS .....                              | 19        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                    | <b>21</b> |
| 3.1      | ANÁLISE DO CICLO DE VIDA .....                                      | 22        |
| 3.1.1    | Definição de objetivo e escopo .....                                | 23        |
| 3.2      | DADOS PARA O INVENTÁRIO .....                                       | 28        |
| 3.2.1    | Produção dos veículos e baterias .....                              | 28        |
| 3.2.2    | Combustíveis ( <i>well-to-tank</i> ) .....                          | 29        |
| 3.2.3    | Uso do veículo .....                                                | 30        |
| 3.3      | AValiação DE CUSTOS .....                                           | 33        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS .....</b>                                             | <b>39</b> |
| 4.1      | ANÁLISES ESTATÍSTICAS DA FROTA .....                                | 39        |
| 4.1.1    | Frota <i>hatch</i> .....                                            | 39        |
| 4.1.2    | Frota <i>sedan</i> .....                                            | 42        |
| 4.1.3    | Análise comparativa entre a frota <i>hatch</i> e <i>sedan</i> ..... | 45        |
| 4.2      | FROTA ATUAL E IMPACTOS CORRELACIONADOS .....                        | 45        |
| 4.3      | IMPACTOS AMBIENTAIS NA SUBSTITUIÇÃO DA FROTA .....                  | 46        |
| 4.3.1    | Substituição da frota <i>hatch</i> .....                            | 46        |
| 4.3.2    | Substituição da frota <i>sedan</i> .....                            | 50        |
| 4.4      | IMPACTOS NA SUBSTITUIÇÃO REGIONAL DA FROTA <i>HATCH</i> .....       | 54        |
| 4.4.1    | Subsistema Norte .....                                              | 55        |
| 4.4.2    | Subsistema Nordeste .....                                           | 56        |
| 4.4.3    | Subsistema Sul .....                                                | 57        |

|       |                                                               |    |
|-------|---------------------------------------------------------------|----|
| 4.4.4 | Subsistema Sudeste e Centro-Oeste .....                       | 59 |
| 4.5   | IMPACTOS NA SUBSTITUIÇÃO REGIONAL DA FROTA <i>SEDAN</i> ..... | 60 |
| 4.5.1 | Subsistema Norte.....                                         | 61 |
| 4.5.2 | Subsistema Nordeste .....                                     | 62 |
| 4.5.3 | Subsistema Sul .....                                          | 63 |
| 4.5.4 | Subsistema Sudeste/ Centro-Oeste .....                        | 64 |
| 4.6   | AValiação DE CUSTOS DOS MODELOS PROPOSTOS.....                | 65 |
| 4.6.1 | Substituição da frota <i>hatch</i> .....                      | 65 |
| 4.6.2 | Substituição da frota <i>sedan</i> .....                      | 67 |
| 4.6.3 | Análise de custos de operação regional.....                   | 69 |
| 4.7   | PRECIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO .....                    | 70 |
| 5     | <b>DISCUSSÕES</b> .....                                       | 72 |
| 5.1   | CONTEXTO FORÇA AÉREA BRASILEIRA .....                         | 72 |
| 5.2   | ESTIMATIVA DE EMISSÕES E CUSTOS DA FROTA <i>HATCH</i> .....   | 73 |
| 5.3   | ESTIMATIVA DE EMISSÕES E CUSTOS DA FROTA <i>SEDAN</i> .....   | 76 |
| 5.4   | COMPARAÇÃO COM ESTUDOS ANTERIORES .....                       | 79 |
| 6     | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                       | 80 |
| 6.1   | LIMITAÇÕES DO TRABALHO .....                                  | 81 |
| 6.2   | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....                     | 82 |
|       | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                       | 83 |
|       | <b>APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA</b> .....   | 93 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1 Referencial de emissão para a produção de automóveis por tipo de propulsão .....         | 17 |
| Tabela 2.2 Dados técnicos e de emissão da produção das baterias.....                                | 17 |
| Tabela 2.3 Estudos de emissões da produção de gasolina no Brasil.....                               | 18 |
| Tabela 3.1 Modelos <i>hatch</i> utilizados no estudo .....                                          | 25 |
| Tabela 3.2 Modelos <i>sedan</i> utilizados no estudo.....                                           | 26 |
| Tabela 3.3 Base de dados de emissões da produção de veículos .....                                  | 28 |
| Tabela 3.4 Características dos combustíveis brasileiros .....                                       | 30 |
| Tabela 3.5 Sistema de energia elétrica no Brasil no ano de 2022 .....                               | 31 |
| Tabela 3.6 Geração de energia por fonte por subsistema.....                                         | 32 |
| Tabela 3.7 Dados de emissões de geração por subsistema .....                                        | 33 |
| Tabela 3.8 Preço da gasolina e do etanol por estado - junho de 2024 .....                           | 35 |
| Tabela 3.9 Custo da energia elétrica, por localidade.....                                           | 37 |
| Tabela 4.1 Dados estatísticos dos veículos <i>hatch</i> da frota .....                              | 39 |
| Tabela 4.2 Dados de distribuição das quilometragens .....                                           | 40 |
| Tabela 4.3 Dados de fim de vida em blocos e frequência <i>hatch</i> .....                           | 41 |
| Tabela 4.4 Dados estatísticos dos veículos <i>sedan</i> da frota.....                               | 42 |
| Tabela 4.5 Dados de distribuição das quilometragens .....                                           | 43 |
| Tabela 4.6 Dados de fim de vida em blocos e frequência <i>sedan</i> .....                           | 44 |
| Tabela 4.7 Emissões atuais da frota .....                                                           | 45 |
| Tabela 4.8 Quantidade de veículos adquiridos por ano ( <i>hatch</i> ).....                          | 48 |
| Tabela 4.9 Quantidade de veículos adquiridos por ano ( <i>sedan</i> ) .....                         | 52 |
| Tabela 4.10 Dados estatísticos <i>hatch</i> , por subsistema .....                                  | 55 |
| Tabela 4.11 Quantidade de veículos adquiridos por ano ( <i>hatch</i> ).....                         | 59 |
| Tabela 4.12 Dados estatísticos <i>sedan</i> , por subsistema.....                                   | 60 |
| Tabela 4.13 Custos no uso dos novos modelos escolhidos para simulação .....                         | 68 |
| Tabela 4.14 Custos de operação por região dos carros <i>hatch</i> .....                             | 70 |
| Tabela 4.15 Custos de operação por região dos carros <i>sedan</i> .....                             | 70 |
| Tabela 4.16 Análise do lucro com o mercado de carbono - <i>Hatch</i> .....                          | 70 |
| Tabela 4.17 Análise do lucro com o mercado de carbono - <i>Sedan</i> .....                          | 71 |
| Tabela 5.1 Custo do ciclo de vida da frota <i>hatch</i> .....                                       | 75 |
| Tabela 5.2 Emissões de CO <sub>2</sub> da frota <i>hatch</i> , por região.....                      | 75 |
| Tabela 5.3 Precificação das emissões de CO <sub>2</sub> no mercado de carbono.....                  | 76 |
| Tabela 5.4 Custo do ciclo de vida da frota <i>sedan</i> .....                                       | 78 |
| Tabela 5.5 Emissões de CO <sub>2</sub> da frota <i>sedan</i> , por região .....                     | 78 |
| Tabela 5.6 Precificação das emissões de CO <sub>2</sub> no mercado de carbono ( <i>sedan</i> )..... | 78 |
| Tabela 5.7 Emissões calculadas em gCO <sub>2</sub> eq/km .....                                      | 79 |
| Tabela A.0.1 Artigos mais citados .....                                                             | 95 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1.1 Percentual de emissão CO <sub>2</sub> equivalente por setor .....                                  | 2   |
| Figura 1.2 Licenciamento total de automóveis e comerciais leves - por combustível.....                        | 2   |
| Figura 2.1 Evolução temporal dos termos do tema de pesquisa (base de dados <i>Scopus</i> ) .....              | 8   |
| Figura 2.2 Fronteiras da ACV dos veículos .....                                                               | 15  |
| Figura 2.3 Estrutura de avaliação do ciclo de vida .....                                                      | 15  |
| Figura 3.1 Fluxograma para criação do modelo de inventário de emissões .....                                  | 23  |
| Figura 3.2 Proposta sumarizada do escopo e dos limites da análise do ciclo de vida.....                       | 27  |
| Figura 3.3 Fluxograma de criação do modelo de inventário de custos .....                                      | 34  |
| Figura 4.1 Histograma de frequência das quilometragens <i>hatch</i> .....                                     | 40  |
| Figura 4.2 Histograma dos dados de fim de vida dos <i>hatch</i> .....                                         | 41  |
| Figura 4.3 Histograma de frequência das quilometragens <i>sedan</i> .....                                     | 43  |
| Figura 4.4 Histograma dos dados de fim de vida <i>sedan</i> .....                                             | 44  |
| Figura 4.5 Emissão dos veículos <i>hatch</i> para quinze anos de operação .....                               | 47  |
| Figura 4.6 Emissões acumuladas ao longo de 15 anos de operação ( <i>hatch</i> ).....                          | 47  |
| Figura 4.7 Impacto anual de substituição gradual da frota <i>hatch</i> .....                                  | 49  |
| Figura 4.8 Dados de emissão acumulada para substituição gradual da frota <i>hatch</i> .....                   | 50  |
| Figura 4.9 Dados de emissão dos veículos <i>sedan</i> para quinze anos de operação .....                      | 51  |
| Figura 4.10 Dados acumulados de emissões ao longo de 15 anos de operação ( <i>sedan</i> ).....                | 51  |
| Figura 4.11 Impacto anual de substituição gradual da frota <i>sedan</i> .....                                 | 53  |
| Figura 4.12 Emissão acumulada para substituição gradual da frota <i>sedan</i> .....                           | 54  |
| Figura 4.13 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação no subsistema Norte.....                | 55  |
| Figura 4.14 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>hatch</i> no subsistema Norte .....                 | 56  |
| Figura 4.15 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação no subsistema Nordeste .....            | 57  |
| Figura 4.16 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>hatch</i> no subsistema Nordeste .....              | 57  |
| Figura 4.17 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação no subsistema Sul .....                 | 58  |
| Figura 4.18 Dados de emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>hatch</i> no subsistema Sul .....          | 58  |
| Figura 4.19 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação <i>hatch</i> - Sudeste/Centro-Oeste ... | 59  |
| Figura 4.20 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>hatch</i> no subsistema Sudeste/ Centro-Oeste.....  | 60  |
| Figura 4.21 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação <i>sedan</i> no subsistema Norte .....  | 61  |
| Figura 4.22 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>sedan</i> no subsistema Norte .....                 | 61  |
| Figura 4.23 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação <i>sedan</i> no subsistema Nordeste..   | 62  |
| Figura 4.24 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>sedan</i> no subsistema Nordeste.....               | 62  |
| Figura 4.25 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de operação <i>sedan</i> no subsistema Sul.....     | 63  |
| Figura 4.26 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>sedan</i> no subsistema Sul.....                    | 63  |
| Figura 4.27 Emissões (tCO <sub>2</sub> eq) de quinze anos de vida <i>sedan</i> - Sudeste/ Centro-Oeste .....  | 64  |
| Figura 4.28 Emissões acumuladas (tCO <sub>2</sub> ) de <i>sedan</i> no subsistema Sudeste / Centro-Oeste ...  | 64  |
| Figura 4.29 Custo (R\$) do ciclo de vida de 15 anos de operação da frota <i>hatch</i> nova.....               | 66  |
| Figura 4.30 Custos de uso para a substituição da frota por ICEVg ou ICEVe .....                               | 67  |
| Figura 4.31 Custo (R\$) do ciclo de vida de 15 anos de operação da frota <i>sedan</i> nova.....               | 68  |
| Figura 4.32 Custos (R\$) de renovação da frota <i>sedan</i> .....                                             | 69  |
| Figura 5.1 Custos mais baixos para o etanol (verde) ou para a gasolina (amarelo) - <i>hatch</i> .....         | 74  |
| Figura 5.2 Custos mais baixos para o etanol (verde) ou para a gasolina (amarelo) - <i>sedan</i> ....          | 77  |
| Figura A.0.1 Número de publicações por ano.....                                                               | 94  |
| Figura A.0.2 Número de publicações dos dez países que mais publicaram.....                                    | 94  |
| Figura A.0.3 Mapa dos termos mais relevantes .....                                                            | 98  |
| Figura A.0.4 Evolução temporal dos termos relacionados a ACV de veículos elétricos.....                       | 99  |
| Figura A.0.5 Mapa de acoplamento bibliográfico.....                                                           | 100 |
| Figura A.0.6 Mapa de co-autoria entre os países .....                                                         | 104 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

|                 |                                                                          |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                 |
| ACV             | Análise do Ciclo de Vida                                                 |
| ANEEL           | Agência Nacional de Energia Elétrica                                     |
| ANFAVEA         | Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores              |
| ANP             | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis              |
| BEN             | Balanço Energético Nacional                                              |
| BEV             | <i>Battery Electric Vehicle</i>                                          |
| BIL             | Baterias Íon-Lítio                                                       |
| CETESB          | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo                               |
| COMAER          | Comando da Aeronáutica                                                   |
| CORSIA          | <i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i> |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de Carbono                                                       |
| END             | Estratégia Nacional de Defesa                                            |
| EPE             | Empresa de Pesquisa Energética                                           |
| EUA             | Estados Unidos da América                                                |
| EV              | <i>Electric Vehicle</i>                                                  |
| FAB             | Força Aérea Brasileira                                                   |
| FGV             | Fundação Getúlio Vargas                                                  |
| FU              | Unidade Funcional                                                        |
| GWP             | <i>Global Warming Potential</i>                                          |
| HEV             | <i>Hybrid Electric Vehicle</i>                                           |
| ICE             | <i>Internal Combustion Engine</i>                                        |
| ICEV            | <i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>                                |
| IEMA            | Instituto de Energia e Meio Ambiente                                     |
| INMETRO         | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia                 |
| IPCC            | Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas                         |
| IPEA            | Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada                                 |
| ISO             | <i>International Organization for Standardization</i>                    |
| MCTI            | Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação                             |
| MMA             | Ministério do Meio Ambiente                                              |
| OMM             | Organização Meteorológica Mundial                                        |
| ONS             | Operador Nacional do Sistema                                             |
| PBEV            | Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular                              |
| PHEV            | <i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>                                   |
| SILOMS          | Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços                 |

## LISTA DE QUADROS

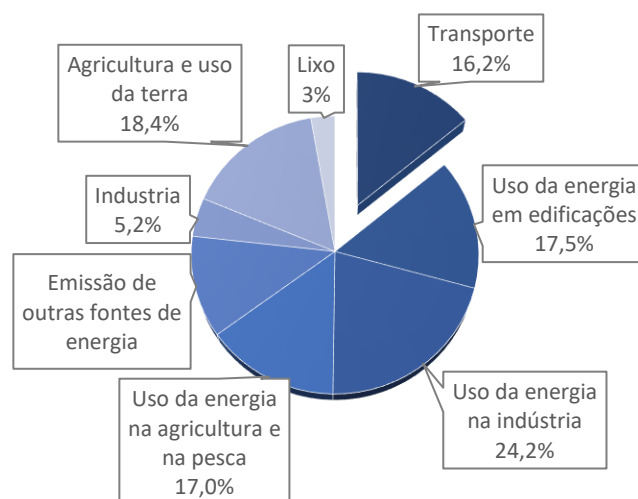
|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 2.1 Estudos de ACV para veículos no Brasil e no mundo ..... | 11 |
| Quadro 2.2 Componentes dos veículos .....                          | 16 |

# 1 INTRODUÇÃO

O estilo de vida moderno e a industrialização demandam um crescente uso dos recursos energéticos, o que, por sua vez, eleva as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de outros gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global (WANG *et al.*, 2020). As mudanças climáticas resultantes dessas emissões representam uma preocupação mundial, impulsionando a criação de acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, que definem metas para reduzir o aumento de temperatura mundial e promover a conscientização pública sobre o tema.

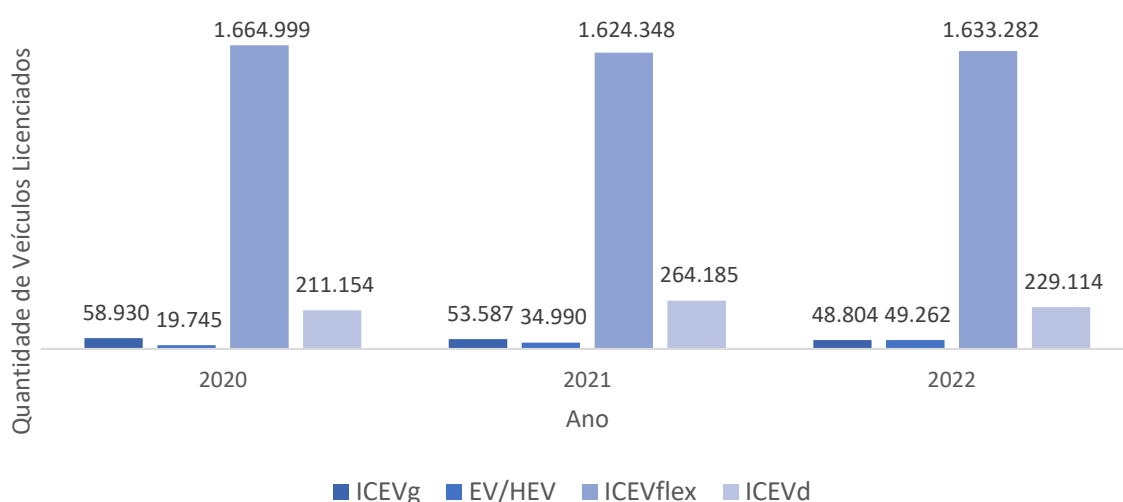
As ações do homem tiveram grandes impactos no aumento da temperatura terrestre, aproximadamente 1°C (entre 0.8°C e 1.2°C) desde o período pré-industrial até o ano de 2017 (IPCC, 2018). Essas alterações de temperatura impactam na vida humana, com o aumento dos níveis do mar, tempestades que acarretam mais inundações, interferindo na saúde pública, especialmente em países em desenvolvimento, que apresentam diversos desafios na entrega de saneamento a toda população. Portanto, nesse contexto, tornam-se cruciais a adoção de tecnologias de baixa emissão, a fim de mitigar os impactos ambientais.

Segundo Ritchie (2020) o mundo emite 50 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalentes. Essa medida é obtida a partir da soma do potencial de aquecimento global de cada gás comparado ao CO<sub>2</sub>, a fim de conseguir uma métrica única. Conforme a Figura 1.1, do total das emissões, 16,2% são referentes ao setor de transportes e, mais especificamente, 11,9% está relacionado ao transporte terrestre.



**Figura 1.1** Percentual de emissão CO<sub>2</sub> equivalente por setor  
Fonte: Ritchie (2020)

Como solução para o transporte terrestre, a eletrificação da frota, em conjunto com a geração de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, tem sido apontada como a mais promissora para a descarbonização do setor (FAN *et al.*, 2020). No Brasil, embora a penetração de veículos elétricos e híbridos ainda seja relativamente baixa, observa-se um crescimento gradual. Segundo a Anfavea (2023) a representatividade dessas tecnologias entre os automóveis e comerciais leves foram de 1% em 2020, 2% em 2021 e 3% em 2022, conforme apresenta a Figura 1.2.



**Figura 1.2** Licenciamento total de automóveis e comerciais leves - por combustível

Ainda existem diversos desafios no Brasil, entre eles o principal é a falta da disseminação de infraestrutura de postos de recarga, além de aspectos de mercado que afeta o custo final do veículo e a limitação da variedade de modelos disponíveis (SEBRAE, 2023). Nesse contexto,

destaca-se a importância da perspectiva no setor de transportes e o estabelecimento de métodos realistas que permita a tomada de decisão, monitorando as condições de mercado e as inovações tecnológicas.

Evidencia-se, ainda, que a efetividade da solução da eletromobilidade depende do mix de energia elétrica necessária para a fase de uso desse tipo de veículo. No Brasil, em torno de 84% da geração de energia elétrica é realizada por fontes renováveis. No setor de transportes, a matriz energética é composta por cerca de 25% de fontes renováveis, devido à participação de biocombustíveis, sendo que o etanol da cana-de-açúcar se destaca, representando cerca de 43% dos veículos leves (BEN, 2023). A utilização de biocombustíveis junto com a eletrificação dos veículos pode otimizar a redução das emissões, especialmente em áreas onde a infraestrutura para EVs ainda está se desenvolvendo.

Diante das características descritas, o Brasil possui potencial para liderar iniciativas de descarbonização no setor de transportes, combinando sua matriz energética renovável com o uso de biocombustíveis. No entanto, é necessário um planejamento estratégico para expandir a infraestrutura de EVs e integrar melhor os biocombustíveis na matriz de transportes.

O Ministério do Meio Ambiente conduz os trabalhos do país voltados às mudanças climáticas e, atualmente, possui uma meta de redução de 50% das emissões de gases de efeito estufa até 2030, em relação a 2021 (BRASIL, 2021). Diante de todos esses aspectos, há uma movimentação para que as instituições do poder público ou privado tomem decisões não só baseado em custos, como também em soluções ambientalmente amigáveis.

A Força Aérea Brasileira (FAB), como instituição estratégica do país, não está imune a essas exigências globais e, no ano de 2021, assinou um Acordo de Colaboração junto à maioria das forças aéreas mundiais. Como objetivo, os países signatários se comprometem a buscar a redução dos impactos ambientais que contribuem para as mudanças climáticas. Diante desse cenário, seria a modernização da frota terrestre, buscando tecnológicas de eletrificação, a fim de minimizar os impactos ambientais e, simultaneamente, melhorar a eficiência operacional, uma alternativa?

Caso favorável à mudança da frota, uma análise dos recursos financeiros necessários para essa medida deve ser avaliada, a fim de dar subsídios para uma tomada de decisão coerente.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar os impactos ambientais e de custos na eletrificação de uma frota terrestre de transporte leve (*hatch* e *sedan*) no contexto brasileiro.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Identificar os impactos nas emissões de gases de efeito estufa, considerando os subsistemas regionais da matriz de energia elétrica brasileira.
- Identificar os impactos de custos na escolha do combustível (etanol ou gasolina) em nível estadual.
- Desenvolver um modelo de inventário para cálculo de emissões dos veículos em uso.
- Desenvolver um modelo de inventário para os cálculos dos ganhos de emissões e custos de renovação da frota com tecnologias de eletromobilidade.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O transporte é apontado como o setor com maior potencial de descarbonização no balanço de emissões (IVANOVA *et al.* 2020). Entretanto, uma análise precisa dos impactos das emissões em todo o ciclo de vida faz-se necessária, pois existem características que influenciam no resultado de acordo com o objeto de aplicação.

A título de exemplo da importância da avaliação precisa, segundo o IEA (2023) a China tem liderado o uso e produção dos veículos no mercado mundial. Mas, quando comparado a aplicação dos EV, considerando as fases de produção, transporte e uso, com países como Estados Unidos, Reino Unido, Suécia, Noruega, Holanda, Coreia, Alemanha França e Canadá, a China apresenta os piores impactos Shafique & Luo (2022). Paralelo a esses fatores, no ano de 2022 em relação a 2021, a China apresentou o maior crescimento percentual de capacidade instalada de geração de energia elétrica renovável, entre os dez maiores do mundo (EPE, 2024).

Portanto, evidencia-se que a escolha da melhor tecnologia na busca da descarbonização deve ser avaliada de acordo com as características locais e de aplicação, incluindo o perfil do usuário. A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta que auxilia na análise dos impactos ambientais e, aliada a uma análise de custos, permite a tomada de decisão consciente sob dois aspectos necessários para a situação climática atual.

A avaliação deste trabalho é focada em uma força aérea. É natural que os maiores níveis de emissões da instituição se concentrem na queima de combustíveis fosseis para o funcionamento das aeronaves. Utilizando a média de consumo de combustíveis da frota de aeronaves, nos anos de 2020, 2021 e 2022, foi verificado, pela autora deste trabalho, que a FAB apresenta uma emissão de 240.613,82 tCO<sub>2</sub>/ano, calculado por meio de uma análise *top-down*. De acordo com os dados apresentados em Brasil (2020b), esse valor representa 1,99% da quantidade emitida pela aviação civil.

Entretanto, as medidas a serem tomadas para a redução de emissão na aviação, normalmente, apresentam um orçamento elevado, depende do desenvolvimento de tecnologias e, além disso, as aeronaves possuem uma vida útil longa, portanto, demoram a ser substituídas.

Em contrapartida, os veículos terrestres são renovados em uma recorrência muito maior, o que torna a solução de mais fácil aplicação. Além disso, a FAB tem adotado nas organizações militares a implementação de fontes de energia renováveis que, no caso de EV, podem permitir ainda melhores resultados à solução. Portanto, medidas voltadas para a implementação de tecnologias para o transporte terrestre que conduza a um menor impacto ambiental podem representar uma boa estratégia na descarbonização.

Além disso, a eletrificação da frota pode servir como um exemplo, promovendo uma imagem de responsabilidade ambiental e inovação. A adoção dessas tecnologias em complemento com as práticas da instituição de investimento em fontes de energia renováveis, alinham-se com as tendências globais de sustentabilidade e desenvolvimento econômico. Mudança que não apenas reforça o compromisso com a proteção ambiental, mas também coloca a instituição em posição de comprometimento com a transição energética do país.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação foi estruturada em cinco capítulos, conforme descrito abaixo.

**Capítulo 1:** Introdução. Contextualiza o tema da dissertação, os objetivos do trabalho, a justificativa e aspectos relevantes da pesquisa.

**Capítulo 2:** Revisão da literatura. Apresenta discussões de uma revisão bibliométrica realizada pela autora, visando entender como o assunto está se desenvolvendo no mundo, identificar desafios e lacunas. Além disso traz uma contextualização dos EV no Brasil e no mundo, bem como uma abordagem da avaliação do ciclo de vida e sua normatização.

**Capítulo 3:** Materiais e Método. Abrange todos os aspectos considerados na modelagem do problema bem como a base de dados utilizada.

**Capítulo 4:** Resultados. Análise dos resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos descritos no capítulo anterior.

**Capítulo 5:** Discussões. É apresentada uma contextualização das características brasileiras e da Força Aérea e são discutidos os principais resultados aplicados à instituição.

**Capítulo 6:** Conclusões. Apresentam as conclusões permitidas a partir da análise dos resultados e busca apresentar possibilidade de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Para o presente trabalho foi desenvolvido uma revisão da bibliografia, avaliando os artigos de periódicos e conferências, dos anos de 2020 a 2023, da base de dados da Scopus. Foi utilizado o software VOSViewer a fim de auxiliar no entendimento da teoria e do que tem acontecido na literatura a respeito do tema. O Apêndice A detalha os gráficos, mapas e informações da literatura.

Por meio da pesquisa realizada, foi possível identificar que o tema tem apresentado um crescimento gradual de publicações nos últimos anos, o que demonstra que várias pesquisas ainda estão sendo desenvolvidas sobre o assunto, o que permite interpretar que a ciência não está completamente consolidada.

A literatura mostra, a partir da análise de títulos e resumos dos artigos avaliados, que dentro do tema análise do ciclo de vida e veículos elétricos, a fonte de energia representa um grande desafio na transição dos EV. Nesse contexto, os biocombustíveis se apresentam como alternativas para certas aplicações. Além disso, as baterias ainda representam um desafio nas fases de produção e descarte e, com isso, na pesquisa bibliométrica apresentaram um aglomerado de pesquisas numerosas. A Figura 2.1 apresenta a evolução temporal dos termos de tema de pesquisa, na base de dados da *Scopus*, e evidencia que este componente apresentou as discussões mais recentes.



uma ACV do processo de extração de  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  a partir de salmouras no Chile, Argentina e China e demonstraram que as literaturas disponíveis subestimam o impacto em 19%, quando comparado com os resultados encontrados.

Nesse mesmo contexto, Yang *et al.* (2021) apresenta uma revisão bibliográfica sobre os desafios consequentes da eletrificação do transporte e aumento do uso das baterias íon lítio nos EV. Destaca, ainda, que não foi totalmente compreendido o impacto da produção, utilização e fim da vida útil desse componente na ACV. Além disso, evidencia que todos os componentes da sociedade têm um papel fundamental no desenvolvimento sustentável das baterias: a política por meio da facilitação da aplicação da solução e educação do público em geral quanto à importância da reciclagem, a indústria pela busca da economia circular do componente e o usuário quanto a contribuição no fim de vida.

Outro aspecto muito discutido é a questão do cenário de uso, que irá impactar os resultados. O fator mais analisado é o mix de energia elétrica que atende as frotas em uso. Países que dispõem de uma matriz elétrica mais renovável apresentam menores resultados de emissões no uso dos veículos elétricos. Como exemplo, a França, que possui um mix de energia mais renovável, produz resultados muito superiores que aqueles que possuem uma matriz suja, como a Polônia (FARIA *et al.*, 2013). Outro aspecto que podem influenciar os resultados também, o uso de biocombustíveis, o modo de operação do condutor do veículo, entre outros.

## **2.2 EMISSÕES NO CONTEXTO MUNDIAL E NACIONAL**

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criou em 1988 o Painel Intergovernamental sobre a Mudança do Clima (IPCC). O IPCC tem como o objetivo fornecer avaliações científicas regulares sobre a mudança climática, possíveis implicações e riscos futuros e propor ações de adaptação e mitigação, visando substanciar 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 e são geralmente utilizadas para cálculo dessas emissões.

Entretanto, destaca-se que a redução das emissões em níveis necessários para reduzir os incrementos da temperatura são desafiadores e diversos autores afirmam que a frota terrestre

tem grande potencial de descarbonização. A título de exemplo do desafio, Ivanova *et al.* (2020) avaliou os impactos de alterações para a frota terrestre e apontou que os melhores resultados estão em: viver sem carro, utilizar EV e aumentar o uso de transporte público. O estudo aponta ainda, a possibilidade de atingir a meta climática de temperatura.

Segundo Cox *et al.* (2020) o grau ideal de minimizar as emissões de GEE depende mais fortemente das emissões de matriz de energia elétrica e, em menor grau, da distância percorrida ao longo da vida útil, massa e tamanho da bateria e do carro. A análise foi feita para o ambiente europeu. No contexto brasileiro, que possui uma matriz renovável não só de energia elétrica, como de biocombustíveis, a avaliação apresenta resultados positivos para o ICEVe (DE SOUZA *et al.*, 2018), no caso do *hatch*, e HEVe para carros sedans (GAUTO *et al.*, 2023).

Fato é, que não existe uma solução única para o transporte terrestre na busca da descarbonização mundial. Cada cenário possui características específicas que devem ser consideradas. Nesse contexto e visando identificar a melhor tomada de decisão, a avaliação do ciclo de vida é altamente aplicada, pois considera todas as etapas de vida e possibilita a aplicação de panoramas futuros.

Enquanto este estudo foca nas características atuais de espaço, outros aspectos podem variar os resultados, como o comportamento e condições de direção, incertezas no uso de recarga, condições climáticas e mercado (KARABASOGLU & MICHALEK, 2013; RAYKIN *et al.*, 2012). A partir do Quadro 2.1 é possível identificar algumas literaturas disponíveis e como são avaliados os aspectos de emissão, sendo que as três primeiras referências tratam de avaliação no contexto brasileiro, as demais no contexto mundial.

**Quadro 2.1** Estudos de ACV para veículos no Brasil e no mundo

| <b>Título</b>                                                                                                                                                                                       | <b>Referência</b>          | <b>Objetivo e escopo</b>                                                                                                                                     | <b>Método</b>                                                                                                                                      | <b>Resultados</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>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</i> | (SOUZA et al., 2018)       | ACV do berço ao túmulo de veículos compactos, tecnologias: ICEV <sub>g</sub> ; ICEV <sub>f</sub> – 25% etanol e 75% gasolina; ICEV <sub>e</sub> ; PHEV; BEV. | Software: <i>SimaPro</i> 7.0.1.<br><br>Unidade funcional (FU): 1km<br><br>Limites da análise: produção, uso e fim de vida.                         | No aspecto da avaliação das emissões de CO <sub>2eq</sub> /km, o ICEV <sub>e</sub> apresentou o melhor resultado, seguido pelo BEV e PHEV, mesmo considerando todas as emissões da cadeia da cana-de-açúcar (emissões da fase agrícola, etapa de transporte da cana-de-açúcar e etapa industrial da produção de etanol). |
| <i>Impact of electric vehicle emissions in the Brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol</i>                                                                                    | (DE CARVALHO et al., 2023) | ACV englobando as fases de produção e uso das tecnologias (ICE), (HEV) e BEV, considerando os cenários brasileiros de                                        | Simulação a partir de dados históricos da frota, avaliação do perfil de velocidade, análise de intensidade do uso dos veículos, avaliação do ciclo | Os resultados indicam que investimentos voltados à expansão do uso do bioetanol é uma das mais favoráveis à transição energética para fontes renováveis. Além disso, entende-se que, como forma de diversificação de tecnologias, medidas de incentivo à participação de veículos                                        |

|                                                                                                             |                      |                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                             |                      | energia de longo prazo e uso do bioetanol.                                                                                            | de vida e cenários de inserção dos EV.                                                                                                                                                | puramente elétricos e híbridos com tecnologia flex também são positivas, sendo os principais desafios a redução de emissões no processo de fabricação de baterias.                                                                                                                                                           |
| <i>Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles</i>           | (GAUTO et al., 2023) | ACV para comparação dos BEV, HEV e ICEV, considerando as fases de produção e uso do veículo, bateria, combustível e energia elétrica. | Dados de inventários de estudos anteriores. Avaliação de carros compactos. Utilizada a quilometragem média de uso de 160.000 km, sem troca de bateria.                                | Os veículos híbridos (HEV e PHEV) com biocombustíveis apresentaram menores níveis de emissão no Brasil e na Europa. Os autores destacam que os veículos ICEV usuais no Brasil, alimentados com etanol, tem menor pegada de carbono que o BEV na Europa. Os melhores resultados foram para o HEV, seguidos pelo PHEV e o BEV. |
| <i>Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy</i> | (ONAT et al., 2015)  | Avaliação de emissões de carros compactos, com vida útil de 240.000 km, nos cinquenta estados do Estados Unidos.                      | A ACV contemplou as fases de produção e uso, para avaliação das emissões do ICV, HEV, PHEV e EV. Foram avaliados três cenários: mix de energia elétrica de 2009, estimativa para 2020 | Os resultados apontaram para variações por estado e por cenário. Baseado na avaliação dos cenários, o uso da fonte de energia para os EV e PHEV devem ser encorajados ambientalmente e financeiramente.                                                                                                                      |

|                                                                                                                            |                                 |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>footprint analysis in the United States</i>                                                                             |                                 |                                                                                                                                                         | e estações de recarga 100% elétricas.                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| <i>Estimation of CO<sub>2</sub> emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA</i> | (KAWAMOTO <i>et al.</i> , 2019) | Estudo das regiões Estados Unidos, União Europeia, Japão, China e Austrália, considerando características de energia e condições de direção do veículo. | ACV considerando as fases de produção, uso e fim de vida dos componentes. Ciclo de vida de 200.000 km. Avaliados ICEV (gasolina e diesel) e BEV.                                                                        | As emissões de CO <sub>2</sub> de ICEVs (gasolina e diesel) e BEVs dependem das regiões, assim como as emissões relacionadas à produção de baterias. Portanto, é importante que os fabricantes de automóveis introduzam tanto os ICEV quanto os BEV em cada região, considerando as combinações de fontes de eletricidade, entre outros fatores.                                                                                                      |
| <i>Prospective environmental impacts of passenger cars under different energy and steel production scenarios</i>           | (KOROMA <i>et al.</i> , 2020)   | Veículos avaliados foram ICEV, BEV e PHEV, no contexto europeu. Além disso, o estudo avalia os impactos nas mudanças da produção do aço.                | O banco de dados utilizado foi do <i>Ecoinvent</i> 3.4. Três cenários analisados: o referencial com dados de 2016, integração de fontes renováveis em 50% até 2050 e 85% de fontes limpas. Ciclo de vida de 150.000 km. | Os futuros BEV têm o potencial de apresentar uma redução de 36% a 53% nas emissões em comparação com os atuais. A mudança nas fontes de geração de eletricidade é responsável por 89% dessa redução ao longo do ciclo de vida dos veículos. A utilização de hidrogênio para a redução direta do ferro na produção de aço pode reduzir o GWP da produção de veículos em 17% em relação às tecnologias atuais, contribuindo com 9% das reduções totais. |

A partir do Quadro 2.1 é possível identificar as variações de análise, como os descritos abaixo:

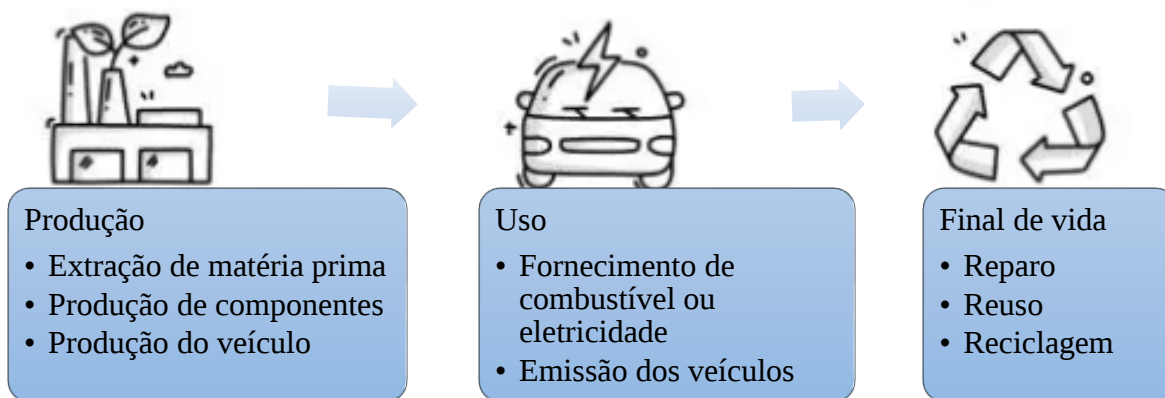
- Fases do ciclo de vida utilizados, se incluem, ou não, a fase de fim de vida;
- Vida útil dos veículos: 150.000, 200.000 ou 240.000 quilômetros, conforme mostrado, ou outros;
- Cenários futuros que identificam ações de planejamento;
- Base de dados utilizada, sendo o *GREET*, *SimaPro* e *Ecoinvent* muito utilizados.

No contexto brasileiro, o órgão nacional responsável pela elaboração das estimativas de emissão nacional é o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). 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, baseados na caracterização da frota circulante e nos dados de vendas e vistoria dos veículos.

## 2.3 NORMATIZAÇÃO

A ACV é o método quantitativo mais utilizado e com maior potencial de avaliação dos impactos associados ao ciclo de vida do produto (LI *et al.*, 2016). Sua aplicação é padronizada por meio das normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, que tratam dos princípios e estruturas e dos requisitos e orientações para realização de uma ACV. No Brasil, baseadas nessas normas internacionais, existem a ABNT NBR ISO 14040:2009 e NBR ISO 14044:2009.

Segundo a ABNT, (2009a) a ACV passa por todas as etapas da vida de um produto, desde a extração de matérias primas até a disposição final, ou seja, do berço ao túmulo. Assim, a análise do inventário de emissões divide-se em três fases distintas e detalhadas na Figura 2.2, chamada de fronteiras da ACV.



**Figura 2.2** Fronteiras da ACV dos veículos

Além disso, essas fases são iterativas, ou seja, o resultado de uma contribui com a outra, resultando em um processo completo e consistente, sendo estruturada nas etapas da Figura 2.3.



**Figura 2.3** Estrutura de avaliação do ciclo de vida

Essa metodologia foi adotada no presente trabalho, com exceção que não foram utilizados dados de final de vida, ou seja, a ACV se limitou às fases de produção e uso. As definições de objetivos escopo da ACV bem como os dados para o inventário estão descritos na seção que trata da análise do ciclo de vida e a avaliação dos impactos estão descritos nos resultados deste trabalho.

## 2.4 DADOS PARA O INVENTÁRIO

### 2.4.1 Produção dos veículos e baterias

A crescente demanda pela eletromobilidade foi acompanhado pelo aumento na quantidade de pesquisas que focam na avaliação e comparação desses tipos de veículos. Estes, que são compostos por diversos componentes, faz-se necessária uma simplificação daqueles principais

e que causam maiores impactos ambientais em sua produção. Em Hawkins *et al.* (2013), os autores fazem uma comparação entre os EV e os ICEV de todo o ciclo de vida. Para isso, eles utilizam as premissas apresentadas no Quadro 2.2 dos principais componentes, de acordo com a categoria, visando diferenciar a composição para a análise de cada veículo. Esse trabalho foi base para diversas pesquisas posteriores.

**Quadro 2.2** Componentes dos veículos

| <b>Categoria</b> | <b>Componente</b>          | <b>ICEV</b> | <b>EV</b> |
|------------------|----------------------------|-------------|-----------|
| Corpo do carro   | Carcaça e portas           | X           | X         |
|                  | Freios                     | X           | X         |
|                  | Montagem final             | X           | X         |
|                  | Interior e exterior        | X           | X         |
|                  | Pneus e rodas              | X           | X         |
| ICEV             | Motor                      | X           |           |
|                  | Fluidos                    | X           |           |
|                  | Trem de força              | X           |           |
|                  | Transmissão                | X           |           |
|                  | Baterias chumbo ácido      | X           |           |
| EV               | Motor, controle e inversor |             | X         |
|                  | Fluidos                    |             | X         |
|                  | Diferencial                |             | X         |
|                  | Baterias íon lítio         |             |           |

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 2.1, na qual são mostrados valores apenas para a manufatura dos automóveis.

**Tabela 2.1** Referencial de emissão para a produção de automóveis por tipo de propulsão

| Referência                     | ICEV (kg CO <sub>2</sub> eq) | HEV (kg CO <sub>2</sub> eq) | BEV (kg CO <sub>2</sub> eq) |
|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| HAWKINS <i>et al.</i> , 2013   | 6.450                        | -                           | 13.050 – 14.250             |
| QIAO <i>et al.</i> , 2017      | 9.172                        | -                           | 14.642 – 14.746             |
| KARAASLAN <i>et al.</i> , 2018 | 15.500                       | 24.500                      | 30.200                      |
| KAWAMOTO <i>et al.</i> , 2019  | 5.493                        | -                           | 12.267                      |
| KOROMA <i>et al.</i> , 2020    | 7.350                        | 9.600                       | 10.350                      |
| HILL, 2020                     | 7.200                        | -                           | 6.500 (sem bateria)         |

Os valores de emissão da produção das baterias dos veículos elétricos estão apresentados na Tabela 2.2, de acordo com a capacidade das baterias. Emissões de 114,5 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh de capacidade da bateria foi utilizado no modelo (ICCT, 2021). As montadoras de veículos escolhidas têm adotado uma política de garantia das baterias de 08 anos. Entretanto, como não se sabe como serão a troca desses dispositivos, qual vai ser a vantagem em fazer a troca ou qual o tempo médio de vida, optou-se em não considerar a troca das baterias na vida útil dos veículos do presente estudo.

**Tabela 2.2** Dados técnicos e de emissão da produção das baterias

| Modelo          | Capacidade da bateria (kWh) | Emissão (tCO <sub>2</sub> eq.) | Autonomia (km) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------|
| BYD Dolphin BEV | 45                          | 5,15                           | 291            |
| BYD Seal BEV    | 82,5                        | 9,45                           | 372            |

#### 2.4.2 Combustíveis (*well-to-tank*)

O estudo mais recente que avalia os potenciais de aquecimento global do etanol brasileiro, a partir de dados do RenovaBio dos anos de 2019 e 2020 está apresentado em Liu *et al.* (2023). Na pesquisa, foram utilizados dados de 67 usinas de cana-de-açúcar e, por meio do GREET (WANG *et al.*, 2024), avaliou as emissões WTW, para uso nos Estados Unidos. Os resultados encontrados, 27,5 gCO<sub>2</sub>eq/MJ, foram comparados com Seabra *et al.* (2011), que considera o uso final no mercado brasileiro, e resultou em 21,3 gCO<sub>2</sub>eq/MJ. Com isso os autores consideram os resultados muito semelhantes, quando retiram as emissões de transporte até o USA.

Para a produção da gasolina, evidencia-se que, no Brasil, a gasolina comercializada contém uma parcela de etanol anidro que deve ficar entre 18% e 27% (VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019). As principais referências que tratam das emissões utilizando estudos brasileiros estão apresentados na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** Estudos de emissões da produção de gasolina no Brasil

| Referência                    | Gasolina (kgCO <sub>2</sub> eq/ MJ) |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| CAVALETT <i>et al.</i> , 2013 | 0,0720                              |
| GLENSOR <i>et al.</i> , 2019  | 0,0138                              |
| EDWARDS <i>et al.</i> , 2011  | 0,0142                              |
| WANG <i>et al.</i> , 2015     | 0,0200                              |

### 2.4.3 Fim de vida

Quanto aos aspectos de fim de vida, a maior discrepância na avaliação dos EV em relação ao ICE está na destinação que será dada às baterias. Com a popularização da eletromobilidade, em breve um número elevado desses componentes estará na sua fase de fim de vida. A destinação que será dada é fundamental na melhoria dos resultados ambientais e econômicos. Muito avanços foram feitos sobre o tema, mas o campo das BIL e a reciclagem continuam desafiador. A pesquisa científica na exploração da eficiência, segurança, economia e impactos ambientais, no desenvolvimento das baterias, uso secundário e reciclagem, ainda deve muito ser explorada (FAN *et al.*, 2020).

Fato que muito ainda tem que ser explorado no campo das baterias, que estudos são realizados desde o estudo dos compostos químicos (HUGHES *et al.*, 2021; SILVESTRI *et al.*, 2020), da produção das baterias, e destaca-se que a matriz do local de produção tem forte influência nas emissões, e soluções para o fim de vida e economia circular (DUNN *et al.*, 2021; RAJAEIFAR *et al.*, 2021). Destaca-se ainda trabalhos de revisão da literatura de impactos das baterias que mostram a dificuldade em se comparar os resultados disponíveis (ARSHAD *et al.*, 2022), além da falta de transparência nas publicações, podendo gerar superestima ou subestima (AICHBERGER & JUNGMEIER, 2020).

Especificamente quanto ao fim de vida, no Brasil, existe um Projeto de Lei nº 2.327, de 2021, que foi remetida à Câmara dos Deputados em 13 de setembro de 2023 (BRASIL, 2023). A

proposta consta da alteração da Política Nacional de Resíduos Sólidos, descrita na Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, e sugere a inclusão, no artigo 33, que:

“São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de:” (...) (BRASIL, 2010)

“§ 9º A logística reversa de baterias de veículos elétricos priorizará sistemas de reciclagem dos materiais componentes, para seu reaproveitamento como insumo na fabricação de novas baterias.” (BRASIL, 2023)

Nesse contexto e aliado ao fato da tecnologia de veículos elétricos no Brasil ser recentemente implantada, sendo que os veículos, em sua maioria, estão no primeiro uso de vida, neste trabalho não foram utilizados dados de reciclagem, reuso ou segunda vida útil para as baterias. Outros estudos recentes, que fazem análise ACV desses tipos de veículos, no Brasil, adotam a mesma postura (DE CARVALHO *et al.*, 2023; GAUTO *et al.*, 2023).

## **2.5 O MERCADO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Embora o contexto atual de mudanças climáticas demanda ações focadas no menor impacto ambiental, a tomada de decisão sempre vem acompanhada da análise de custos e investimentos necessários. É natural que os veículos a combustão, por apresentarem maior tempo de disseminação no mercado, hoje, apresentam melhores custos totais de propriedade do que a tecnologia elétrica.

Entretanto, vários estudos demonstram que é esperado que os BEV tenham um menor custo no futuro (BEKEL & PAULIUK, 2019; HE *et al.*, 2019). Os principais fatores responsáveis por essa alteração são o desenvolvimento da bateria e dos custos dos combustíveis (AJANOVIC & HAAS, 2019; ELGOWAINY *et al.*, 2018).

Atualmente, o mercado de carbono foi implementado como um mecanismo para a regulamentação das emissões. Assim, as instituições que buscam atingir as metas de redução podem adquirir créditos daquelas que obtiveram sucesso, com emissões abaixo dos níveis estipulados (SANTOS *et al.*, 2024). Esse pode ser considerado um incentivo na tomada de decisões, quando avaliadas tecnologias de baixa emissão.

O mercado brasileiro de eletrificação dos veículos terrestres está em constante amadurecimento, inclusive durante a elaboração deste trabalho, que ocorreu a entrada de novos modelos no mercado e alteração de preços de aquisição. As tecnologias utilizadas nesse estudo apresentam os breves conceitos descritos abaixo (DENTON, 2020; ONAT *et al.*, 2015).

O Veículo Elétrico (BEV) tem como característica possuir um motor elétrico que é alimentado pela bateria, que por sua vez é carregada na rede de energia. Portanto, a capacidade da bateria é muito importante nas características do veículo. Possui como vantagens a eficiência energética, menor dependência do combustível e melhor performance. Por outro lado, têm desafios quanto a autonomia, tempo de recarga e aspectos específicos da bateria.

O Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (PHEV) pode ser carregado pela rede de energia, pois possuem bateria plug-in, ou pela combustão do motor a combustão interna (ICE). Funcionam com autonomia puramente elétrica e, quando se esgota, utiliza benefícios da capacidade totalmente híbrida.

Já, o Veículo Elétrico Híbrido (HEV) utiliza tanto o motor elétrico quanto o a combustão, dependendo da velocidade, carga do motor e da bateria. Pode ser configurado de acordo com diferentes objetivos, como economia de combustível, aumento de potência, entre outros.

E, por fim, o Veículo à Combustão Interna (ICEV) é movimentado pelo uso de motores à combustão que utilizam na operação combustíveis como a gasolina, o diesel ou alternativos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A renovação da frota terrestre da Força Aérea será avaliada sobre dois aspectos: ambiental e financeiro. Assim, são criados dois modelos de inventários, um para foco, que poderão se tornar ferramentas úteis de tomada de decisão para a Diretoria responsável pela aquisição da frota terrestre.

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 CO<sub>2</sub>eq para cada tipo de veículo. É realizada uma análise *bottom-up* (de baixo para cima), pois é considerada uma microescala. Essa abordagem faz uso do modelo ASIF, que utiliza idade dos veículos, quilometragem percorrida por ano e emissão da categoria (EPA, 2005).

Para a análise dos custos das soluções propostas, uma análise de valor de mercado dos veículos, manutenção programada, conforme dados das montadoras, combustíveis e de energia elétrica, são propostos. Os custos foram calculados de acordo com as tarifas vigentes.

Para o caso específico da FAB, o Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços (SILOMS) é responsável por propiciar o planejamento e controle de suas atividades logísticas, portanto, dentro do seu banco de dados estão as informações de recursos e materiais disponíveis. Essa ferramenta foi utilizada como fonte de base de dados dos veículos (modelo e ano de fabricação), situação e localidade de uso. As informações quanto à quilometragem média utilizada anualmente e a quilometragem média de fim de vida, por localidade, foi levantado diretamente com os chefes dos setores de garagem de cada localidade. Esse levantamento foi realizado a partir do preenchimento dos dados das viaturas de quilometragem média anual daquelas em uso e de informações de quilômetros de fim de vida, para as que já foram alienadas. A coleta foi feita via e-mail, por meio do preenchimento de planilhas.

A base de dados das viaturas, disponibilizada pelo SILOMS, contém informações de modelo e ano dos carros em uso. As informações de consumo (km/l) e emissões (g/km) dos veículos foram colhidas, prioritariamente, do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Entretanto, as

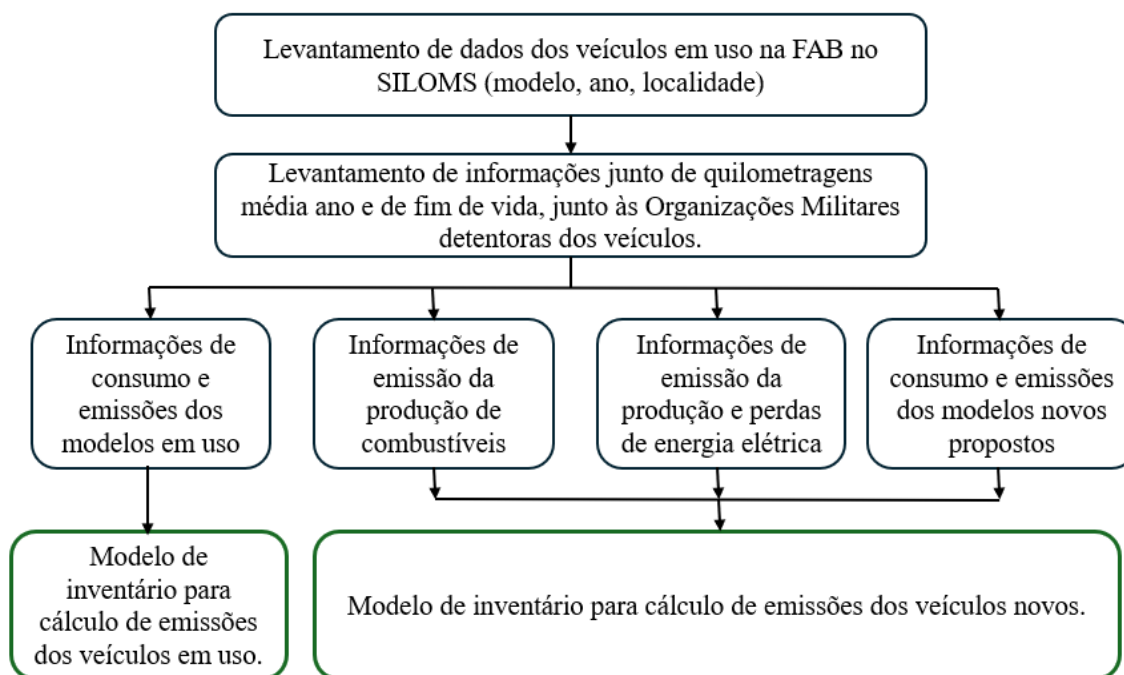
informações disponíveis no PBE datam dados a partir de 2009 e ao longo dos anos foram crescendo em quantidade de modelos avaliados e disponibilidade de informação. Os primeiros relatórios, por exemplo, não fornecem informações de emissão veicular.

Diante disso, especificamente para o consumo, foi utilizado o relatório mais próximo ao ano do veículo e, quando a diferença entre o ano do relatório e do veículo ultrapassava 15 anos, foram coletados dados na internet. Essa escolha se fez, pois os dados na internet foram mais conservadores do que o PBE, assim, a autora considerou a informação do INMETRO mais consistente, ainda que com a discrepância do ano.

Já para os dados de emissão, o PBE iniciou a apresentação dessas informações a partir do relatório de 2013, portanto, para anos anteriores foram utilizados os dados disponíveis nos relatórios e publicações de emissão veicular da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) que fornecem resultados, de acordo com o ano veicular, ou seja, um valor agregado para todos os modelos do mesmo ano. Uma vantagem da metodologia utilizada, em relação aos dados da CETESB, é que eles foram aplicados aos modelos e anos específicos dos veículos, sendo assim, com fontes mais precisas.

### **3.1 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA**

O método de análise seguirá os requisitos e orientações descritos em ABNT (2009b), por meio de: (1) definição objetivo e escopo, neste caso para a ACV específica; (2) análise de inventário; (3) avaliação de impacto, detalhado no capítulo de resultados; e, (4) interpretação. O fluxograma de dados e informações necessárias para a elaboração dos modelos de inventário, para cálculo de emissões dos veículos novos e em uso está mostrado na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1** Fluxograma para criação do modelo de inventário de emissões

### 3.1.1 Definição de objetivo e escopo

Nesse estudo, a avaliação do ciclo de vida tem como objetivo desenvolver uma avaliação, no aspecto ambiental, dos impactos decorrentes da substituição da frota de veículos terrestres leves de transporte da Força Aérea Brasileira, de motores à combustão para aqueles com propulsão elétrica.

Os veículos terrestres foram limitados a dois tipos. O primeiro é categorizado como de serviço, pois transporta pessoas e materiais ou equipamentos de pequeno porte, de forma geral são compostos por modelos *hatch*. O segundo trata dos veículos de representação ou especial, que transportam autoridades, comandantes de organizações militares e até mesmo o Comandante da Aeronáutica, geralmente são representados por veículos *sedans*.

Optou-se por não avaliar os ônibus, considerando que eles são usados, na maioria das vezes, apenas para deslocamento do efetivo ao início e fim do expediente, portanto, apresentam menor uso em quilometragem anual. Além disso, os investimentos iniciais na eletrificação demandam maior investimento. Diante disso, a avaliação limitou-se aos carros.

Tendo em vista que a FAB tem organizações militares em todo o território brasileiro, o que altera a matriz energética de cada localidade e a logística de abastecimento de combustíveis, uma ferramenta de ACV tem potencial para subsidiar, em conjunto com uma avaliação econômica, a tomada de decisões para a escolha do veículo a ser adquirido em nível estadual. Destaca-se que, considerando o esforço mundial em reduzir a emissão de gases de efeito estufa que impactam o meio ambiente, a avaliação ambiental em conjunto com a econômica é fundamental aos processos de aquisição.

Diante disso, pretende-se, com a avaliação do ciclo de vida, possibilitar a Diretoria responsável por adquirir os veículos terrestres realizar uma análise, sob o aspecto ambiental, das emissões de aquisições de acordo com a tecnologia escolhida. Os resultados obtidos serão divulgados externamente, pois podem ser replicados em outras forças armadas ou até mesmo organizações do poder público ou privado.

Nesta etapa também são definidos o sistema de produto, a unidade funcional, o fluxo de referência e as fronteiras do sistema.

#### *(a) Sistema de produto*

Uma análise do ciclo de vida, compreendendo as fases de produção e uso será realizada para os tipos de veículos e modelos, *hatch* e *sedan*, descritos abaixo. A fase de fim de vida não foi incluída devido às incertezas da destinação e resultados para a bateria.

- 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 modelos PHEV não foram incluídos pois não possuem mercado entre os *hatch* e *sedan*. Para a escolha do modelo a ser aplicado foram considerados aqueles mais

vendidos no mercado nacional, segundo as revistas Auto Esporte e Quatro Rodas, e, dentre eles, os que apresentaram menor custo. Essa escolha visa a garantir que as peças necessárias, em caso de manutenção, estejam disponíveis no mercado. A Tabela 3.1 apresentam os modelos de carro *hatch* utilizados.

Tabela 3.1 Modelos *hatch* utilizados no estudo

| Tecnologia | Modelo               | Ilustração                                                                          | Custo de Aquisição | Peso (kg) |
|------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|
| ICEV       | Renault Kwid         |    | R\$ 74.590,00      | 818-977   |
| HEV        | Toyota Corolla Cross |   | R\$ 190.290,00     | 1450      |
| BEV        | BYD Dolphin          |  | R\$ 149.800,00     | 1405      |

Fonte: Renault, 2024; Toyota, 2024a; BYD, 2024a.

Não foram encontrados HEV *hatch* no mercado brasileiro, portanto, não foi realizado estudo para o *hatch* e foi considerado o Toyota Corolla Cross, embora seja um SUV.

Os modelos sedans utilizados na modelagem estão descritos na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** Modelos *sedan* utilizados no estudo

| <b>Tecnologia</b> | <b>Modelo</b>        | <b>Ilustração</b>                                                                 | <b>Custo de Aquisição</b> | <b>Peso (kg)</b> |
|-------------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------|
| ICEV              | Nissan Versa         |  | R\$ 111.690,00            | 1098-1131        |
| HEV               | Toyota Corolla Altis |  | R\$ 187.790,00            | 1440             |
| BEV               | BYD Seal             |  | R\$ 299.800,00            | 2185             |

Fonte: Nissan, 2024; Toyota, 2024b; BYD, 2024b.

*(b) Unidade Funcional (FU)*

A Unidade Funcional (FU) é definida como um ciclo de vida do veículo, ou seja, é especificado 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 para a FU estabelecida será a de 1km, de forma a facilitar a comparação entre os veículos.

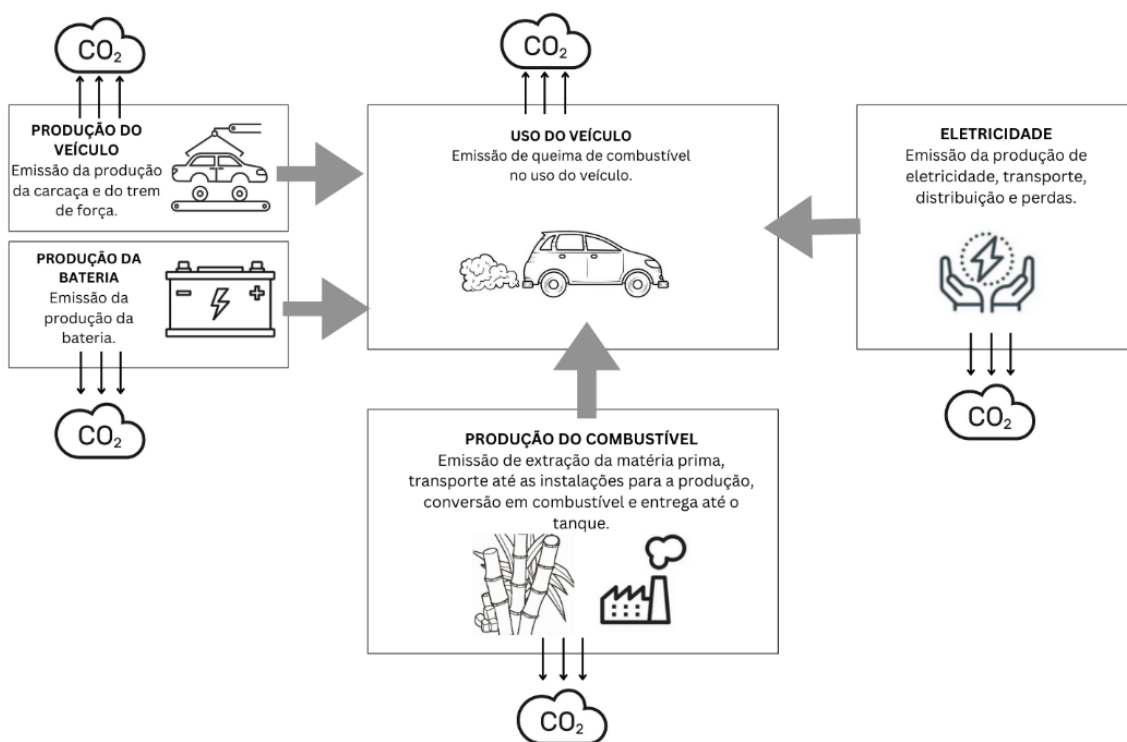
O Comando da Aeronáutica estabelece por meio de o detalhamento das atividades do Sistema de Transporte de Superfície do Comando da Aeronáutica e fixa os procedimentos relacionados à gestão da frota por meio do Brasil (2020a). Segundo o manual, as organizações militares devem criar um plano de alienação de viaturas com base no período de utilização dos veículos (10 anos para diesel e equipamentos e 5 anos para demais), estado de conservação, consumo de combustível e custos de manutenção. Em entrevista com os responsáveis dos setores, eles informaram que essas alienações ocorrem quando o custo de manutenção não viabiliza a continuidade do uso.

Foi realizado um levantamento da média de quilometragem anual girada por veículos de todas as organizações militares, diretamente com os chefes dos setores de garagem.

Quanto à escolha da distância total percorrida, como dado de fim de vida, foi realizada com base na análise da quilometragem dos carros existentes na FAB em cada cidade. Para isso, foi realizada uma análise estatística, descrita na Seção 4, e definida que a renovação ocorreria com 240.000 km ou 15 anos, o que ocorrer primeiro.

*(c) Definição das fronteiras do sistema*

Os dados de emissões considerados na modelagem do ciclo de vida e os limites do sistema estão sumarizados na Figura 3.2.



**Figura 3.2** Proposta sumarizada do escopo e dos limites da análise do ciclo de vida

## 3.2 DADOS PARA O INVENTÁRIO

### 3.2.1 Produção dos veículos e baterias

Os dados de emissão da produção de veículos e baterias foram buscados na literatura, buscando-se aplicar referências mais recentes, de aplicação em estudos brasileiros e que apresentam avaliação de veículos similares aos avaliados na presente pesquisa.

- (a) Para os veículos à combustão: para o modelo *hatch* foi utilizado 5.493 kgCO<sub>2eq</sub> (KAWAMOTO *et al.*, 2019) e para os *sedans* foi utilizado o valor de 9.172 kgCO<sub>2eq</sub> (QIAO *et al.*, 2017).
- (b) Para os veículos híbridos: ambos os modelos, foram utilizados os dados de emissão de 9.600 kgCO<sub>2eq</sub>, tendo em vista que os pesos dos veículos são muito semelhantes (KOROMA *et al.*, 2020)
- (c) Para os veículos puramente elétricos: foram adotados 11.650 kgCO<sub>2eq</sub> para os *hatch* e 15.950 kgCO<sub>2eq</sub> para os *sedans* (ICCT, 2021; HILL, 2020).

Os valores de emissão para cada modelo e tecnologia estão resumidos na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** Base de dados de emissões da produção de veículos

| ICEV (kg CO <sub>2eq</sub> ) |       | HEV (kg CO <sub>2eq</sub> ) |       | BEV (kg CO <sub>2eq</sub> ) |        |
|------------------------------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|--------|
| 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, que grande parte vem da China, são uma limitação do presente trabalho. Em contrapartida, no presente estudo foram utilizados valores acima dos resultados encontrados em Qiao *et al.* (2017) para o *sedan*. Neste trabalho, os autores fazem uma avaliação do ciclo de vida da produção dos veículos na China. Com isso, os valores utilizados se tornam mais coerentes.

Adicionalmente, destaca-se que os fabricantes de veículos elétricos vendem os carros com a garantia de oito anos da bateria. Considerando esse tempo e a vida útil dos veículos avaliados, possivelmente seria necessária uma troca desse componente. Entretanto, em contraponto aos aspectos positivos que não foram considerados no fim de vida, não foi considerada a troca de bateria, que implicaria negativamente nos resultados de emissão.

### 3.2.2 Combustíveis (*well-to-tank*)

Quanto aos aspectos de produção de combustível são considerados as etapas de: (1) extração da matéria-prima ou cultivo e colheita, (2) transporte da matéria prima até as instalações para a produção do combustível, (3) conversão da matéria-prima em combustível e (4) entrega até o tanque de combustível.

Para a produção do etanol, o potencial de aquecimento global utilizado foi de 21,3 gCO<sub>2</sub>eq/MJ (SEABRA *et al.*, 2011), calculado especificamente para o caso brasileiro e reavaliado no trabalho de Liu *et al.* (2023) onde faz um cálculo das emissões utilizando dados no RenovaBio e considera o transporte até os Estados Unidos.

As emissões devido à mudança do uso de terra, no caso do etanol, não foram consideradas, porque as regras do Renovabio só permitem a participação de produtores que comprovem que os biocombustíveis são de áreas não desmatadas (BRASIL, 2018). Além disso, o volume de etanol com a certificação Renovabio, vendido no Brasil, chegou a 95% do volume total, no ano de 2023 (UNICA, 2024).

Para a gasolina, foi considerado um potencial de aquecimento global de 0,02 kgCO<sub>2</sub>eq/MJ (WANG *et al.*, 2015), considerando ser um dado médio entre as referências utilizadas e descritas no Capítulo 2.

A fim de calcular as emissões, de acordo com as características do combustível brasileiro e o volume consumido, foram considerados os dados fornecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), para o ano de 2022 e apresentados na Tabela 3.4. (ANP, 2023).

**Tabela 3.4** Características dos combustíveis brasileiros

| Combustível | Unidade comercial | Densidade (kg/m³) | Poder Calorífico (MJ/kg) |
|-------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| Etanol      | M³                | 791               | 28,26                    |
| Gasolina C  | M³                | 754               | 39,36                    |

Fonte: ANP, 2023.

A emissão *well-to-tank* dos combustíveis são representadas pela Equação 3.1:

$$Emissão(kgCO_2) = V(litros) * GWP_{comb} \left( \frac{kgCO_2}{MJ} \right) * PC \left( \frac{MJ}{kg} \right) * D \left( \frac{kg}{litros} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

V = volume de combustível consumido

GWP<sub>comb</sub> = Potencial de Aquecimento Global do combustível

PC = Poder calorífico do combustível brasileiro

D = Densidade do combustível brasileiro.

### 3.2.3 Uso do veículo

As distâncias adotadas foram as informadas pelas organizações que detêm os veículos. Essa informação em conjunto com o modelo do carro utilizado possibilitou uma busca precisa do consumo, segundo PBEV, e, conseqüentemente, da quantidade de litros consumidos durante o ano. Para o cálculo das emissões dos veículos a etanol e a gasolina foram considerados a produção e a queima desses combustíveis, segundo dados de emissões do PBEV, preferencialmente.

Para os BEV, o fator principal de emissões, no uso, é advindo da geração da energia elétrica necessária. Segundo (EPE, 2024), no ano de 2023, as fontes de geração de energia elétrica no Brasil produziram um total de 708.120 GWh, sendo que a distribuição está detalhada na Tabela 3.5. Como é possível identificar, a matriz do Brasil conta com mais de 80% de renováveis.

**Tabela 3.5** Sistema de energia elétrica no Brasil no ano de 2022

| <b>Fonte de Energia</b> | <b>Percentual (%)</b> | <b>Energia (GWh)</b> |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Hidráulica              | 60,2                  | 425.996              |
| Eólica                  | 13,5                  | 95.801               |
| Biomassa                | 7,6                   | 53.854               |
| Solar                   | 7,2                   | 50.633               |
| Gás Natural             | 5,4                   | 38.589               |
| Nuclear                 | 2,0                   | 14.504               |
| Carvão                  | 1,2                   | 8.770                |
| Derivados de Petróleo   | 0,9                   | 6.041                |
| Outras                  | 2,0                   | 13.932               |

Fonte: EPE, 2024.

Quanto às emissões de CO<sub>2</sub> provenientes de geração de energia elétrica no Brasil, o ano de 2023 apresentou um total de 38,9 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (MtCO<sub>2</sub>), sendo 16,7 MtCO<sub>2</sub> do Sistema Interligado Nacional (SIN), 20 MtCO<sub>2</sub> de Autoprodução e 2,2 MtCO<sub>2</sub> do Sistema Isolado. Considerando que a maioria das unidades estão conectadas ao SIN, foi utilizada a premissa da informação de emissão desse sistema (EPE, 2024). A partir desses dados e da divisão da quantidade de gases emitidos pela quantidade gerada, temos uma emissão no Brasil de 55 kgCO<sub>2</sub>/MWh, em 2023.

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, a ANEEL é responsável por regular as transmissoras e distribuidoras na condução dos cálculos de perdas que, em 2023, apresentaram valores de 4% na rede básica e 7,5% de perdas técnicas na distribuição (ANEEL, 2023). O percentual de perdas não técnicas (furtos de energia, ligação provisória, entre outros) não foram utilizados, pois não influenciam a análise ambiental.

As perdas nos equipamentos de recarga podem variar muito, de acordo com o tipo do carregador, a potência e o tempo de recarga. Para o presente estudo, foi utilizada 15% de perda, em concordância com alguns estudos anteriores (APOSTOLAKI-IOSIFIDOU *et al.*, 2017; GAUTO *et al.*, 2023; KOSTOPOULOS *et al.*, 2020; SEARS *et al.*, 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 identificar o kWh/km e, com isso, identificar a necessidade de geração. A partir da Equação 3.2 é possível realizar esse cálculo.

$$CE = \frac{CB}{A} \quad (3.2)$$

Onde:

CE = consumo de energia em kWh/km

CB = capacidade da bateria em kWh

A = autonomia em km

A partir desses cálculos, foi encontrado para cada carro avaliado:

CE<sub>Dolphin</sub> = 154,64 Wh/km

CE<sub>Seal</sub> = 221,77 Wh/km

Tendo em vista que o fornecimento de energia tem impacto nos resultados do BEV, uma avaliação considerando as características regionais foi realizada. Os dados do Operador Nacional do Sistema (ONS) são divididos em quatro subsistemas, são eles: Norte, Nordeste, Sudeste/ Centro-Oeste e Sul. Os dados de geração, baseados no ano de 2023, estão descritos na Tabela 3.6.

**Tabela 3.6** Geração de energia por fonte por subsistema

| <b>Fonte de Energia</b> | <b>Norte – Geração (GWh)</b> | <b>Nordeste – Geração (GWh)</b> | <b>Sudeste/ Centro-Oeste – Geração (GWh)</b> | <b>Sul – Geração (GWh)</b> |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
| Hidráulica              | 70.118                       | 34.995                          | 251.497                                      | 82.471                     |
| Eólica                  | 1.824                        | 86.932                          | 61                                           | 5.628                      |
| Solar                   | 1.627                        | 16.049                          | 20.526                                       | 5.445                      |
| Térmica                 | 12.377                       | 5.399                           | 34.623                                       | 8.931                      |
| Nuclear                 | 0                            | 0                               | 14.517                                       | 0                          |

Fonte: ONS, 2024.

A fim de encontrar os dados de emissão, por subsistema, foram utilizados os dados de geração e de emissões das térmicas, por região, conectados ao SIN, para o ano de 2020. Com esses dados foi possível identificar a relação de emissões das térmicas por subsistema em

gCO<sub>2</sub>eq/kWh (IEMA, 2022). Em conjunto com os dados de geração da Tabela 3.6, os resultados de emissões encontrados, por subsistema, estão mostrados na Tabela 3.7.

**Tabela 3.7** Dados de emissões de geração por subsistema

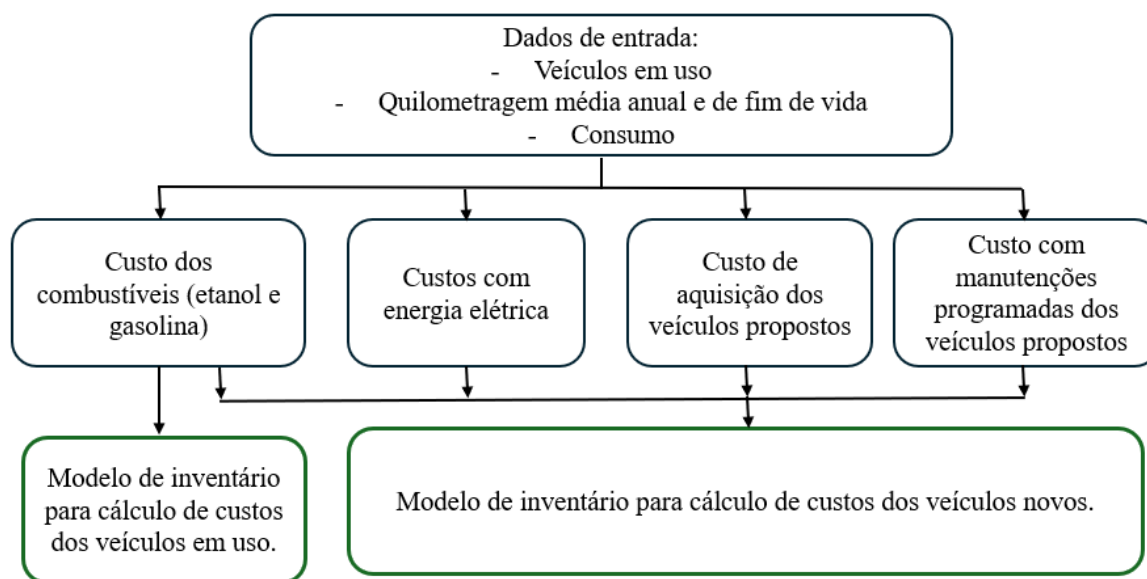
| <b>Subsistema</b>     | <b>Emissões das térmicas<br/>(kgCO<sub>2</sub>e/MWh)</b> | <b>Emissões do subsistema<br/>(kgCO<sub>2</sub>e/MWh)</b> |
|-----------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Norte   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

Esses resultados, 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, encontra-se um valor de 54,5 kgCO<sub>2</sub>/MWh, muito próximo ao valor da EPE para os dados de 2023 55 kgCO<sub>2</sub>/MWh. Portanto, essas emissões para os subsistemas foram consideradas como verdadeiras para os cálculos.

Os mesmos valores para as perdas de energia foram aplicados: 4% de perdas na rede básica e 7,5% de perdas técnicas na distribuição (ANEEL, 2023). Além da perda nos equipamentos de recarga, 15%.

### 3.3 AVALIAÇÃO DE CUSTOS

Para a análise dos custos dos modelos propostos, foram considerados três aspectos importantes no ciclo de vida de um veículo, são eles: (1) custo de aquisição; (2) custo de manutenção programada e (3) custo com os combustíveis necessários. O Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) não foi considerado, pois segundo o Código Tributário Nacional, em seu artigo nº 150, alínea ‘a’, os veículos pertencentes à União são isentos desse tributo. O fluxograma para elaboração do modelo de inventário de custos está mostrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** Fluxograma de criação do modelo de inventário de custos

Conforme as Resoluções ANP nº 729/2018 e 795/2019, a fim de dar transparência à formação de preços dos derivados de petróleo, a ANP, por meio de seus agentes regulados, informa os valores ao longo da cadeia. Com isso, os custos médios, por estado, da Gasolina C Comum e do Etanol Hidratado Comum, datado de junho de 2024, foram utilizados como base para a simulação (ANP, 2024). Os preços médios dos combustíveis estão detalhados na Tabela 3.8.

**Tabela 3.8** Preço da gasolina e do etanol por estado - junho de 2024

| <b>Estado</b>       | <b>Preço médio da gasolina<br/>(R\$/l)</b> | <b>Preço médio do etanol<br/>(R\$/l)</b> |
|---------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Acre                | 5,563                                      | 3,682                                    |
| Alagoas             | 5,242                                      | 3,907                                    |
| Amapá               | 5,368                                      | 4,400                                    |
| Amazonas            | 5,482                                      | 3,573                                    |
| Bahia               | 5,172                                      | 3,466                                    |
| Ceará               | 5,276                                      | 4,148                                    |
| Distrito Federal    | 5,149                                      | 3,216                                    |
| Espírito Santo      | 5,203                                      | 3,547                                    |
| Goiás               | 5,005                                      | 3,022                                    |
| Maranhão            | 5,096                                      | 3,878                                    |
| Mato Grosso         | 5,054                                      | 2,979                                    |
| Mato Grosso do Sul  | 5,183                                      | 3,117                                    |
| Minas Gerais        | 5,072                                      | 3,175                                    |
| Pará                | 5,208                                      | 3,708                                    |
| Paraíba             | 5,143                                      | 3,788                                    |
| Paraná              | 5,056                                      | 3,004                                    |
| Pernambuco          | 5,133                                      | 3,816                                    |
| Piauí               | 5,211                                      | 3,593                                    |
| Rio de Janeiro      | 5,104                                      | 3,435                                    |
| Rio Grande do Norte | 5,201                                      | 3,780                                    |
| Rio Grande do Sul   | 5,088                                      | 3,563                                    |
| Rondônia            | 5,365                                      | 3,841                                    |
| Roraima             | 5,498                                      | 3,401                                    |
| Santa Catarina      | 5,097                                      | 3,414                                    |
| São Paulo           | 4,904                                      | 3,047                                    |
| Sergipe             | 5,263                                      | 3,807                                    |
| Tocantins           | 5,202                                      | 3,362                                    |

Fonte: ANP, 2024.

Já para a energia elétrica, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regula o mercado de energia cativo no Brasil. Embora, em 2024, o COMAER esteja migrando para o mercado livre, na data de elaboração desse estudo, 100% das organizações militares são alimentados pelo mercado cativo. Além disso, como a maior parte das instalações do COMAER são advindos da alimentação em alta tensão, a base de busca teve como filtros a faixa de tensão Grupo A4, a classe de consumo Poder Público e o ano de 2024. Embora a classe Poder Público tenha isenção em alguns tributos, outros são aplicados. Portanto, como foi aplicado o filtro para essa classe, a análise foi feita com a “tarifa média de fornecimento com tributos” (ANEEL, 2024). Os valores das tarifas, por localidade atendida, estão apresentados na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9** Custo da energia elétrica, por localidade

| <b>Empresa</b>                                                         | <b>Localidade atendida</b>          | <b>Tarifa Média de Fornecimento com Tributos (R\$/MWh)</b> |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Eletropaulo - Eletropaulo Metropolitana Eletricidade De São Paulo S.A. | São Paulo                           | 595,70                                                     |
| CELESC-DIS - CELESC Distribuição S.A.                                  | Florianópolis                       | 684,02                                                     |
| ENEL CE - Companhia Energética do Ceará                                | Fortaleza                           | 689,82                                                     |
| EDP SP - EDP São Paulo Distribuição de Energia S.A.                    | Guaratinguetá e São José dos Campos | 703,08                                                     |
| Boa Vista - Roraima Energia S.A.                                       | Boa Vista                           | 703,53                                                     |
| EQUATORIAL GO - Equatorial Goiás Distribuidora de Energia S.A.         | Anápolis                            | 750,29                                                     |
| EQUATORIAL MA - Equatorial Maranhão Distribuidora de Energia S.A.      | Alcântara                           | 753,89                                                     |
| CERON - ENERGISA Rondônia - Distribuidora de Energia S.A.              | Porto Velho                         | 761,33                                                     |
| COPEL-DIS - COPEL Distribuição S.A.                                    | Curitiba                            | 762,63                                                     |
| AME - Amazonas Energia S.A.                                            | Manaus                              | 791,58                                                     |
| CEMIG-D - CEMIG Distribuição S.A.                                      | Barbacena e Lagoa Santa             | 802,84                                                     |
| CELPE - Companhia Energética de Pernambuco                             | Recife                              | 817,41                                                     |
| RGE SUL - RGE Sul Distribuidora de Energia S.A.                        | Canoas e Santa Maria                | 838,24                                                     |
| COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia                  | Salvador                            | 842,11                                                     |
| CEBDIS - Neoenergia Distribuição Brasília S.A.                         | Brasília                            | 856,74                                                     |
| COSERN - Companhia Energética do Rio Grande do Norte                   | Natal                               | 879,22                                                     |
| ELEKTRO - ELEKTRO Redes S.A.                                           | Pirassununga                        | 879,84                                                     |
| LIGHT SESA - LIGHT Serviços De Eletricidade S.A.                       | Rio de Janeiro                      | 883,62                                                     |
| EMS - Energisa Mato Grosso do Sul - Distribuidora de Energia S.A.      | Campo Grande                        | 894,09                                                     |
| EQUATORIAL PA - Equatorial Pará Distribuidora De Energia S.A.          | Belém                               | 1.104,82                                                   |

Fonte: ANEEL, 2024.

Os custos de aquisição dos veículos foram consultados no site das montadoras e estão descritos na Tabela 3.1 e Tabela 3.2 (BYD, 2024a, 2024b; NISSAN, 2024; RENAULT, 2024; TOYOTA, 2024a, 2024b). Especificamente para o *hatch*, considerando que os custos de aquisição e a

análise ambiental do HEV foram muito superiores, até mesmo por ser considerado um SUV, ele não foi contabilizado nessa avaliação de custos. Portanto, a análise se limita às tecnologias ICEVe, ICEVg e BEV.

Os custos de manutenção utilizados, foram aquelas programadas e contratadas diretamente na montadora. Os valores foram buscados nos sites dessas e, por isso, foram utilizados até 140.000km, pois acima disso não havia informação. No caso do *hatch*, os ICEV apresentam uma revisão a cada 10.000km ou 12 meses de operação, enquanto o BEV é a cada 20.000 km, e foi considerado a cada dois anos de operação. Até os 140.000 km o ICEV tem um custo de R\$ 10.942,99, enquanto o BEV é de R\$ 4.720,00. Para os *sedans*, os ICEV e HEV apresentam uma revisão a cada 10.000km ou 12 meses de operação, totalizando R\$ 5.848,00 e R\$ 12.943,96, respectivamente, enquanto o BEV a cada 20.000 km, e foi considerado a cada dois anos de operação, em um total de R\$ 7.670,00.

## 4 RESULTADOS

Os resultados encontrados estão detalhados neste Capítulo.

### 4.1 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DA FROTA

#### 4.1.1 Frota *hatch*

A resposta estatística sobre a quilometragem média anual dos veículos da frota fornece informações importantes sobre o modo de uso dos veículos. Foram coletados dados de 188 veículos em uso, de uma população de 267, e as métricas apresentadas estão descritas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** Dados estatísticos dos veículos *hatch* da frota

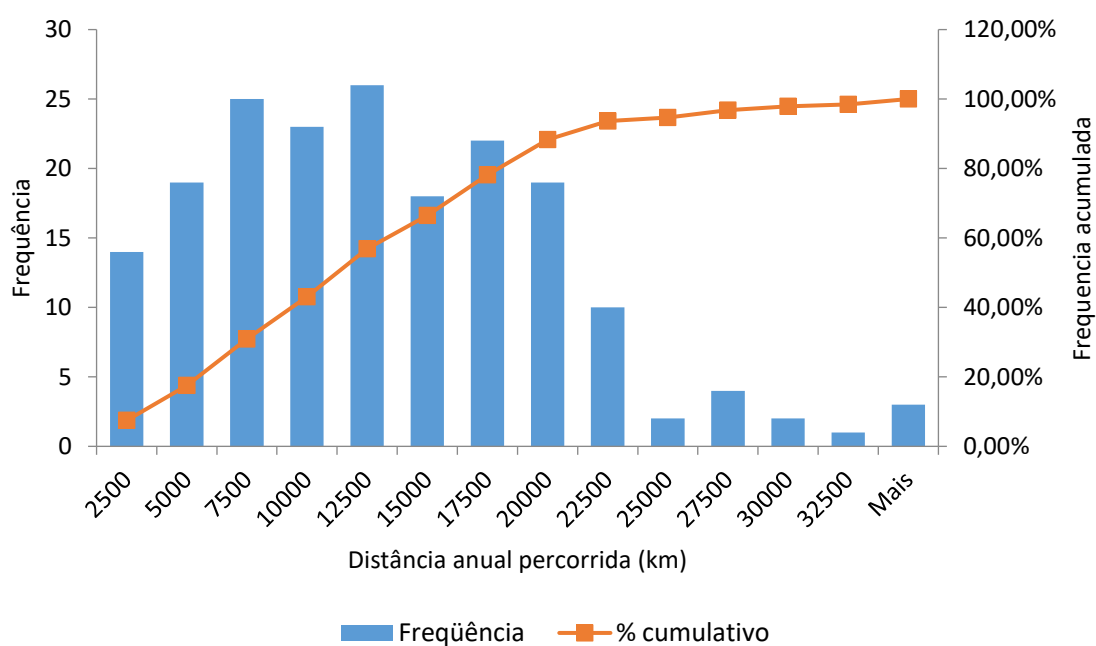
|                      |                               |
|----------------------|-------------------------------|
| <b>Média</b>         | 12.401,63 km/ano              |
| <b>Mediana</b>       | 10.782,63 km/ano              |
| <b>Moda</b>          | 15.965 km/ano                 |
| <b>Desvio Padrão</b> | 7.685,17 km                   |
| <b>Variância</b>     | 59.061.833,81 km <sup>2</sup> |
| <b>Curtose</b>       | 4,22 (leptocúrtica)           |
| <b>Mínimo</b>        | 118 km                        |
| <b>Máximo</b>        | 53.179 km                     |

Os dados mostram que o alto desvio padrão e variância indicam uma dispersão grande entre as quilometragens de uso dos veículos, ou seja, existe uma grande variação no uso entre as organizações militares. Isso é corroborado pela informação de mínimo, 118 km, enquanto o máximo é de 53.179 km, valores extremos, considerando uso anual de transporte terrestre.

E ainda, segundo os dados de média e mediana, bem como a curtose, sugerem que os dados não seguem uma distribuição normal, sendo que a maior concentração está em quilometragens menores que a média, conforme confirmado pelos dados de frequência ilustrado no histograma, considerando blocos de 2.500 km (Tabela 4.2) e apresentado na Figura 4.1, que mostra a distribuição das quilometragens, bem como a frequência acumulada.

**Tabela 4.2** Dados de distribuição das quilometragens

| Bloco | Frequência | % Cumulativo |
|-------|------------|--------------|
| 2500  | 14         | 7,45%        |
| 5000  | 19         | 17,55%       |
| 7500  | 25         | 30,85%       |
| 10000 | 23         | 43,09%       |
| 12500 | 26         | 56,91%       |
| 15000 | 18         | 66,49%       |
| 17500 | 22         | 78,19%       |
| 20000 | 19         | 88,30%       |
| 22500 | 10         | 93,62%       |
| 25000 | 2          | 94,68%       |
| 27500 | 4          | 96,81%       |
| 30000 | 2          | 97,87%       |
| 32500 | 1          | 98,40%       |
| Mais  | 3          | 100,00%      |

**Figura 4.1** Histograma de frequência das quilometragens *hatch*

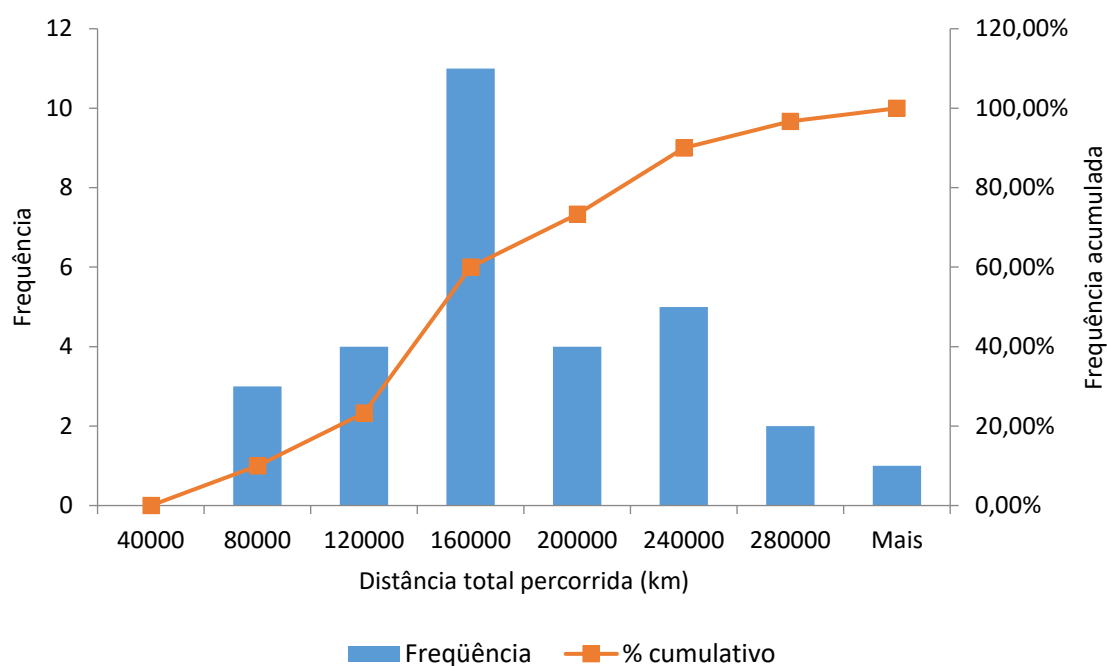
Além dos aspectos da distribuição, a partir da Figura 4.1 identifica-se que 90% dos veículos operam até 20.000 a 22.500 quilômetros por ano.

Para os dados de fim de vida, muitas organizações não apresentaram disponibilidade da informação. Diante disso, foram coletados apenas 31 dados e os veículos apresentaram uma

quilometragem média de fim de vida de 159.203,18 km, com curtose de 0,27 e assimetria de -0,12, indicando uma distribuição próxima da normal. Os dados do histograma estão mostrados na Tabela 4.3 e Figura 4.2.

**Tabela 4.3** Dados de fim de vida em blocos e frequência *hatch*

| Bloco  | Frequência | % cumulativo |
|--------|------------|--------------|
| 40000  | 0          | 0,00%        |
| 80000  | 3          | 10,00%       |
| 120000 | 4          | 23,33%       |
| 160000 | 11         | 60,00%       |
| 200000 | 4          | 73,33%       |
| 240000 | 5          | 90,00%       |
| 280000 | 2          | 96,67%       |
| Mais   | 1          | 100,00%      |



**Figura 4.2** Histograma dos dados de fim de vida dos *hatch*

A partir dos dados apresentados, verifica-se que falta base de dados sobre alienação de veículos na FAB, o que pode impactar na análise a ser realizada. De acordo com os resultados encontrados, 90% dos veículos *hatch* são alienados com até 240.000 km, sendo que a maioria se concentra entre 120.000 km e 160.000 km.

#### 4.1.2 Frota *sedan*

Os *sedans* apresentaram uma população de 260 veículos em uso, segundo o SILOMS, e após levantamento junto aos chefes das garagens foi coletada uma amostra de 175 veículos que apresentaram as métricas descritas na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** Dados estatísticos dos veículos *sedan* da frota

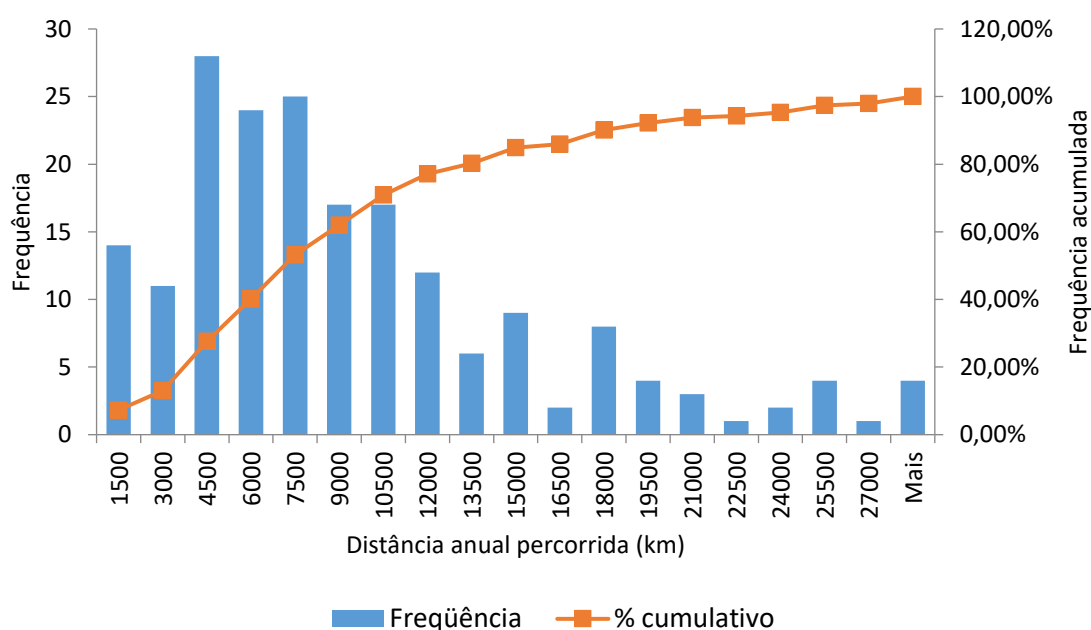
|                      |                               |
|----------------------|-------------------------------|
| <b>Média</b>         | 8.886,65 km/ano               |
| <b>Mediana</b>       | 6.865,50 km/ano               |
| <b>Moda</b>          | 6.304 km/ano                  |
| <b>Desvio Padrão</b> | 6.660,40 km                   |
| <b>Variância</b>     | 44.361.013,08 km <sup>2</sup> |
| <b>Mínimo</b>        | 208 km                        |
| <b>Máximo</b>        | 40.435 km                     |

A frota *sedan* apresentou dados mais homogêneos que a *hatch*. Com valores de dispersão e variância menores. Além disso, apresentou menor diferença entre o mínimo e o máximo, embora apresentar valores extremos entre 208 km e 40.435 km. A média, mediana e moda apontam para uma quilometragem de uso mais baixa do que a dos carros *hatch*.

Um histograma, considerando blocos de 1.500 km (Tabela 4.5) está ilustrado na Figura 4.3, visando apresentar a distribuição das quilometragens, bem como a frequência acumulada.

**Tabela 4.5** Dados de distribuição das quilometragens

| Bloco | Frequência | % cumulativo |
|-------|------------|--------------|
| 1500  | 14         | 7,29%        |
| 3000  | 11         | 13,02%       |
| 4500  | 28         | 27,60%       |
| 6000  | 24         | 40,10%       |
| 7500  | 25         | 53,13%       |
| 9000  | 17         | 61,98%       |
| 10500 | 17         | 70,83%       |
| 12000 | 12         | 77,08%       |
| 13500 | 6          | 80,21%       |
| 15000 | 9          | 84,90%       |
| 16500 | 2          | 85,94%       |
| 18000 | 8          | 90,10%       |
| 19500 | 4          | 92,19%       |
| 21000 | 3          | 93,75%       |
| 22500 | 1          | 94,27%       |
| 24000 | 2          | 95,31%       |
| 25500 | 4          | 97,40%       |
| 27000 | 1          | 97,92%       |
| Mais  | 4          | 100,00%      |

**Figura 4.3** Histograma de frequência das quilometragens *sedan*

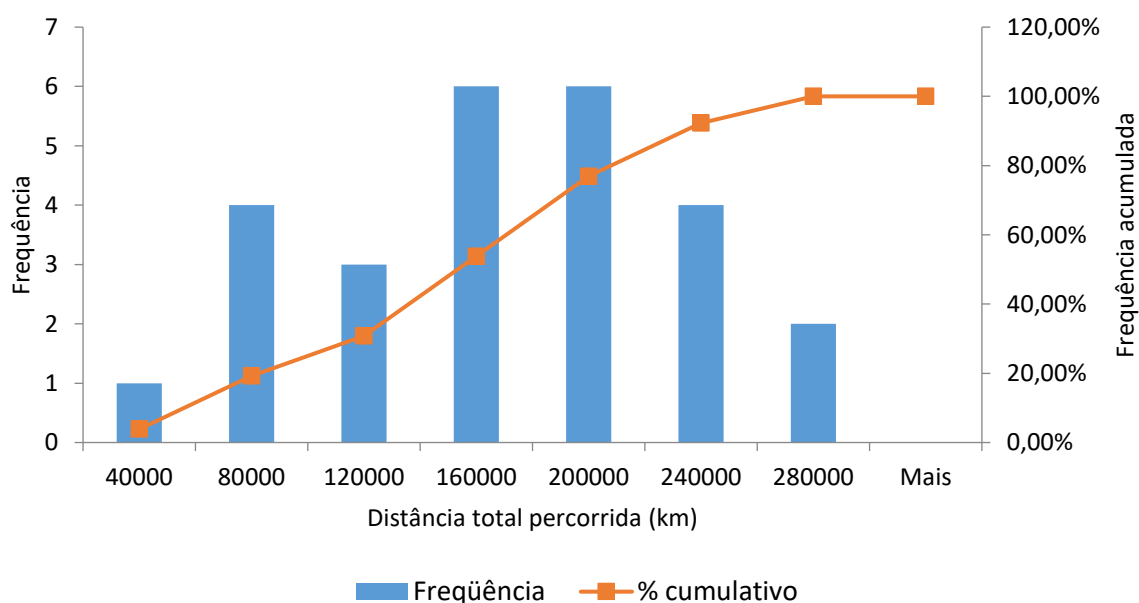
Os dados evidenciam que a maioria dos veículos estão concentrados em uma faixa menor de quilometragem, sendo que os seguintes dados são úteis na avaliação de eletrificação da frota:

- 40,1% dos veículos percorrem entre 3.000 e 6.000 km/ano;
- 77,08% dos veículos percorrem até 12.000 km/ano;
- Apenas 6,25% percorrem mais de 18.000 km/ano.

Para os dados de fim de vida, foram coletados dados de 26 veículos, de acordo com as organizações que dispunham das informações, e os veículos apresentaram uma quilometragem média de fim de vida de 148.784,59 km, com curtose de -0,73 e assimetria de -0,33, indicando uma distribuição ligeiramente simétrica à esquerda. Os dados do histograma estão mostrados na Tabela 4.6 e Figura 4.4.

**Tabela 4.6** Dados de fim de vida em blocos e frequência *sedan*

| Bloco  | Frequência | % cumulativo |
|--------|------------|--------------|
| 40000  | 1          | 3,85%        |
| 80000  | 4          | 19,23%       |
| 120000 | 3          | 30,77%       |
| 160000 | 6          | 53,85%       |
| 200000 | 6          | 76,92%       |
| 240000 | 4          | 92,31%       |
| 280000 | 2          | 100,00%      |
| Mais   | 0          | 100,00%      |



**Figura 4.4** Histograma dos dados de fim de vida *sedan*

Novamente, a amostra de dados de fim de vida é pequena, o que prejudica a avaliação estatística. De acordo com a tabela de dados de frequência e acumulado, 92,31% dos veículos são alienados com até 240.000 km, sendo que entre 120.000 km e 200.000 km estão concentrados 46,15 % de dados de fim de vida dos veículos.

#### 4.1.3 Análise comparativa entre a frota *hatch* e *sedan*

A frota *hatch* é mais numerosa, com 267 unidades, enquanto a *sedan* apresenta 260. Além disso, tendem a percorrer quilometragens anuais mais altas e apresentam maior variabilidade, dado evidenciado por apresentar um desvio padrão 15,4% maior, indicando maior dispersão de dados.

Sobre os dados de fim de vida, a média da quilometragem dos *hatch* é superior à dos *sedans*. Para a frota *hatch* a maior concentração se mostrou entre 120 e 160 mil quilômetros, enquanto para os *sedans* ficou entre 120 e 200 mil quilômetros. Para o trabalho, foi considerada uma quilometragem de fim de vida de 240.000 km, o que contempla em torno de 90% dos carros alienados, segundo informações coletadas. A falta de informação, resultou em uma amostra pequena, o que impactou nas informações sobre o fim de vida do veículo, por isso, as informações obtiveram um range tão grande.

## 4.2 FROTA ATUAL E IMPACTOS CORRELACIONADOS

Atualmente, as organizações militares da Força Aérea são compostas por postos de combustíveis internos, essenciais para aumentar o nível de segurança de suas operações. Esses postos são alimentados com óleo diesel e gasolina, ou seja, não dispõem de tanques de etanol para o abastecimento das viaturas. Os resultados de emissões calculados para os veículos existentes, abastecidos à gasolina para os modelos *hatch* e *sedan* estão mostrados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7** Emissões atuais da frota

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

As emissões desses dois tipos de veículos, quando somados, correspondem a um total de 1.010,73 tCO<sub>2</sub>/ano. Embora muito inferior às emissões das aeronaves, uma avaliação mais profunda deve ser realizada ao fazer essa comparação, pois seria mais fiel se fossem comparados os valores de emissão por quilometragem e por passageiro. Esse estudo não foi contemplado no escopo do trabalho atual.

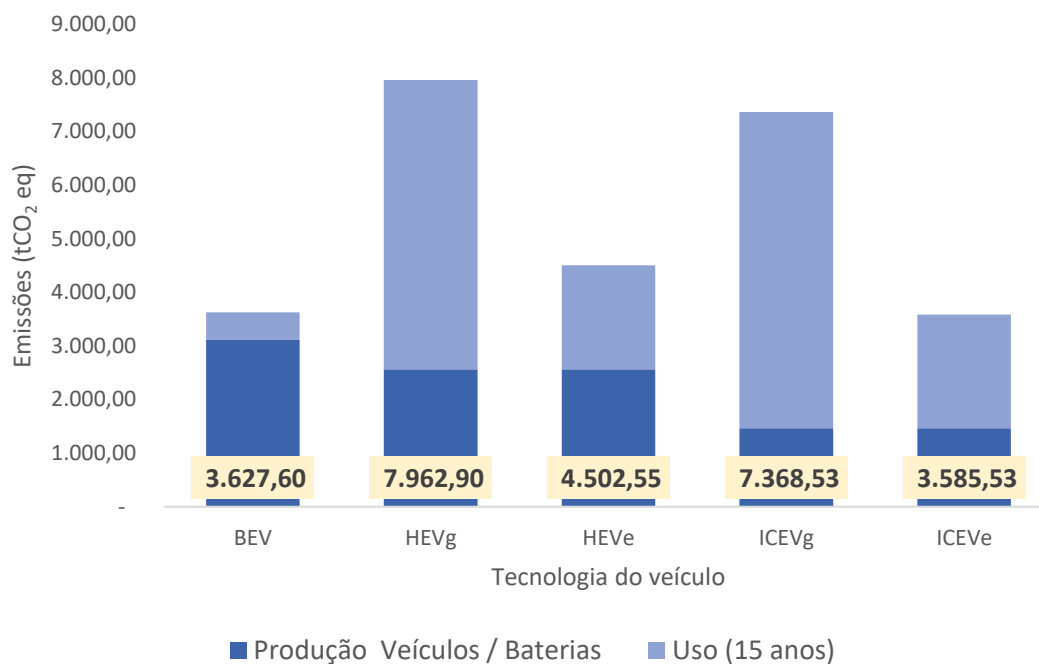
### **4.3 IMPACTOS AMBIENTAIS NA SUBSTITUIÇÃO DA FROTA**

Utilizando os métodos descritos na Seção 3, foi calculada as emissões para a renovação da frota, através da avaliação para a substituição de cada tipo de tecnologia. Considerando, ainda, os veículos propostos, para o *hatch* os modelos Renault Kwid, Toyota Corolla Cross e BYD Dolphin. E para o *sedan*, os modelos Nissan Versa, Toyota Corolla Altis e BYD Seal.

Essa análise foi dividida em duas simulações: substituição total da frota e substituição gradual da frota. A primeira trata de uma renovação instantânea, ou seja, a troca de todos os veículos e a avaliação dos impactos por 15 anos. Esses resultados permitem identificar os impactos de cada tecnologia. A segunda, trata de uma renovação gradual, de acordo com os dados coletados, são elas informação de ano de produção dos veículos existentes e da média de quilometragem anual operado por ano. Com essas informações, foi realizada uma previsão de ano de troca dos veículos, limitando a 15 anos de uso ou 240.000 km girados, o que ocorrer primeiro.

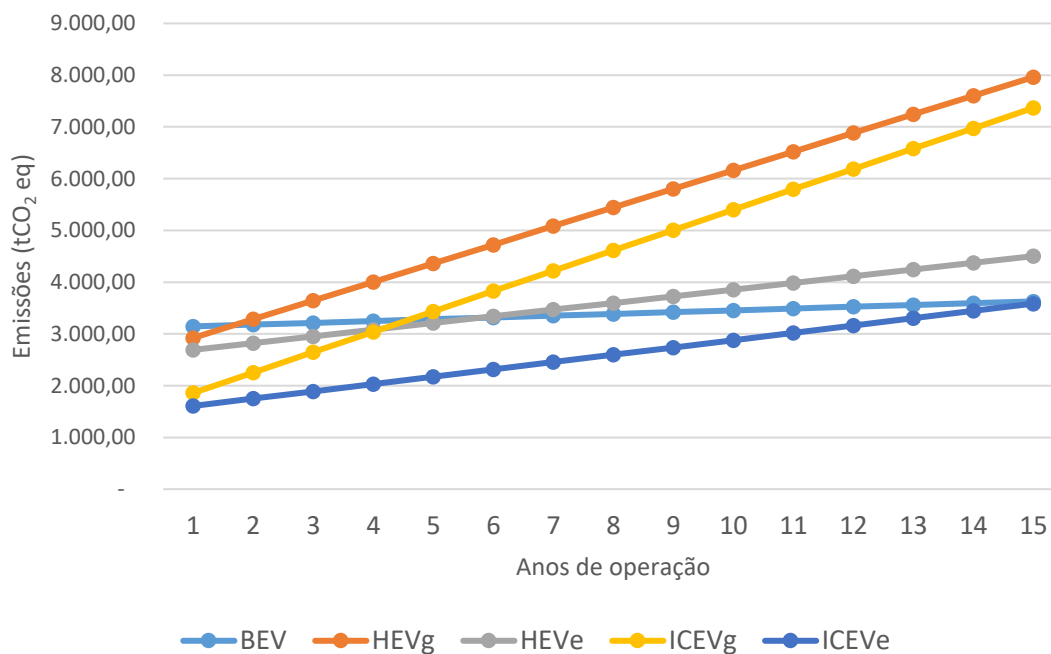
#### **4.3.1 Substituição da frota *hatch***

Foi considerado que no ano de 2025 todos os 267 veículos em uso fossem substituídos para um dos modelos: Renault Kwid, Toyota Corolla Cross ou BYD Dolphin. Como não foi encontrado no mercado brasileiro modelo HEV *hatch*, foi considerado o Corolla Cross, o que acabou impactando negativamente nos resultados para esse tipo de tecnologia. Os resultados de emissões desses três modelos estão apresentados no gráfico da Figura 4.5.



**Figura 4.5** Emissão dos veículos *hatch* para quinze anos de operação

Uma simulação para as emissões considerando os 267 veículos, ao longo dos quinze anos foi realizada e os resultados acumulados estão apresentados na Figura 4.6.



**Figura 4.6** Emissões acumuladas ao longo de 15 anos de operação (*hatch*)

A partir dos gráficos apresentados é possível identificar que, após 15 anos de operação, as emissões dos veículos BEV e ICEVe são muito próximas. Embora as emissões da produção do

veículo BEV sejam muito superiores aos demais, a baixa emissão de uso contribui para alcançar os resultados de emissões do ICEVe, mas esse alcance ocorre apenas entre o décimo quarto e décimo quinto ano de operação, conforme mostra a Figura 4.6.

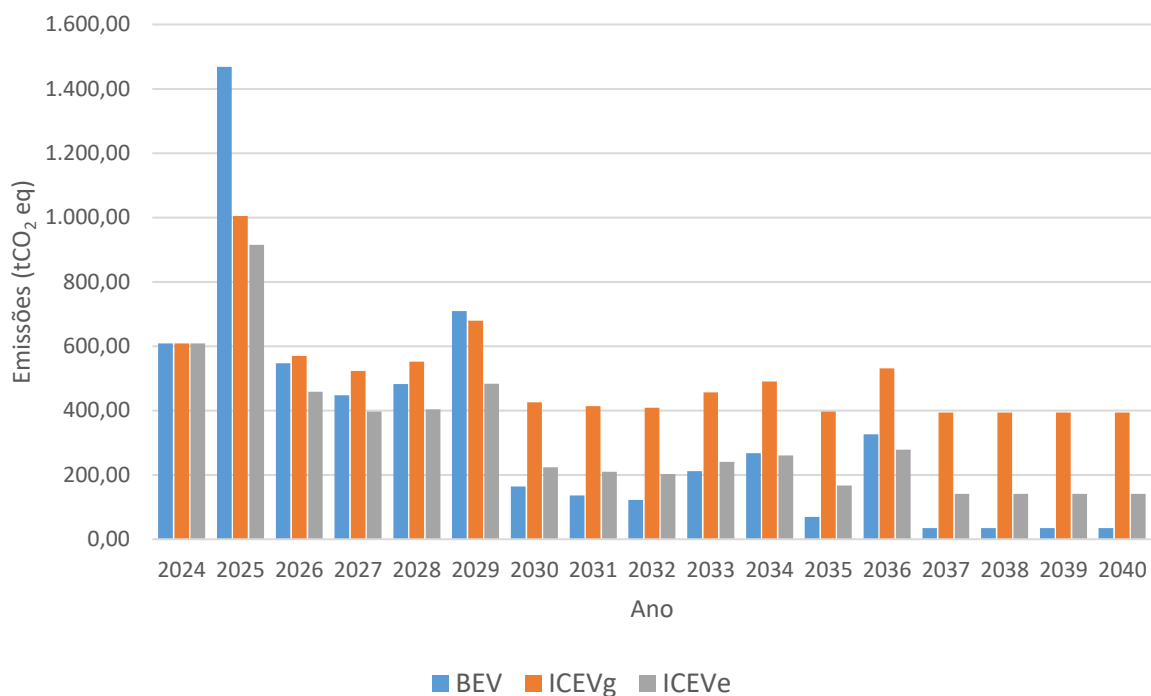
Embora o HEVe apresente um consumo mais baixo que o ICEVe, seu elevado impacto na produção do veículo não permite que, dentro de 15 anos, ele cruze a linha do gráfico com este, portanto, não apresenta bons resultados. Por fim, os veículos a gasolina apresentam o maior impacto dentro das tecnologias avaliadas.

Na substituição gradual, foi considerado que o ano de substituição da frota se inicia em 2025 e os veículos substituídos seriam aqueles que completassem 240.000 km ou quinze anos de operação, o que ocorrer primeiro. A quantidade de veículos adquiridos por ano, seguindo esses critérios, estão listados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** Quantidade de veículos adquiridos por ano (*hatch*)

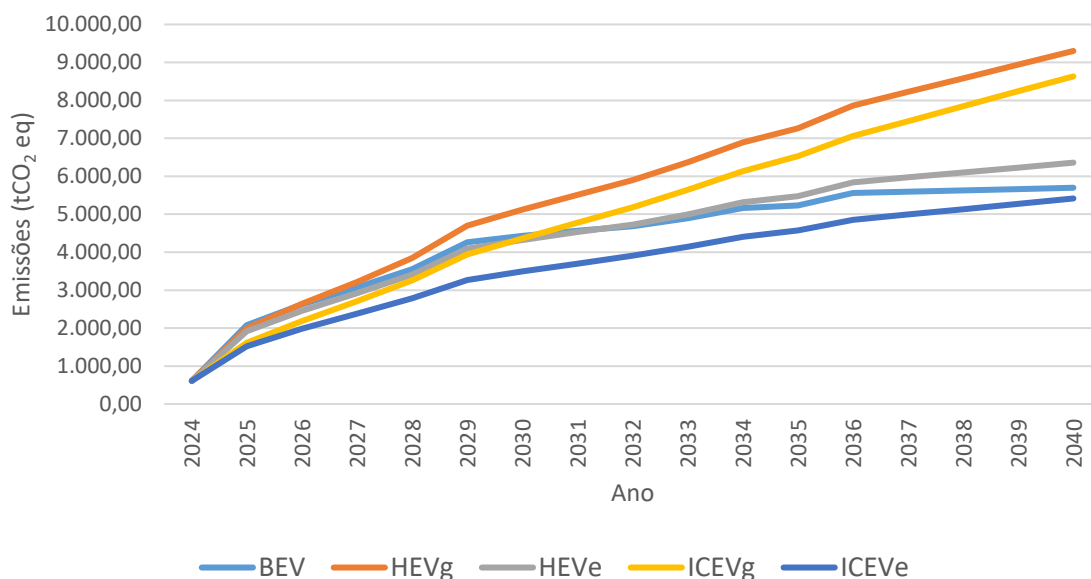
| <b>Ano</b> | <b>25</b> | <b>26</b> | <b>27</b> | <b>28</b> | <b>29</b> | <b>30</b> | <b>31</b> | <b>32</b> | <b>33</b> | <b>34</b> | <b>35</b> | <b>36</b> |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Veículos   | 96        | 22        | 17        | 23        | 50        | 4         | 2         | 1         | 10        | 17        | 0         | 25        |

No ano de 2036 é previsto que toda a frota atual tenha sido substituída, de acordo com os critérios estabelecidos. O gráfico da Figura 4.7 apresenta os impactos anuais da substituição da frota, considerando a produção dos veículos, manufatura dos combustíveis e uso.



**Figura 4.7** Impacto anual de substituição gradual da frota *hatch*

No primeiro ano, 2024, foi considerado a emissão atual da frota, com o uso de gasolina. No ano de 2025 já existe um alto impacto, especialmente para o BEV, devido à substituição de uma grande quantidade de veículos (96) e até o ano de 2040 são apresentados os impactos de uso e renovação. Os quatro últimos anos, de 2037 a 2040, não há aquisição de veículos novos e, portanto, os valores de emissão se dão apenas pelo uso e, nesses anos, o BEV se apresenta inferior aos demais. Os veículos HEV não foram considerados, pois apresentaram valores anteriores superiores. Os dados foram simulados até o ano de 2040, pois a partir desse ano uma nova aquisição deve ser feita, mas como o mercado está em constante mudança, uma nova avaliação se fará necessária. Os dados de emissão acumulados na substituição gradual da frota *hatch* estão apresentados na Figura 4.8.

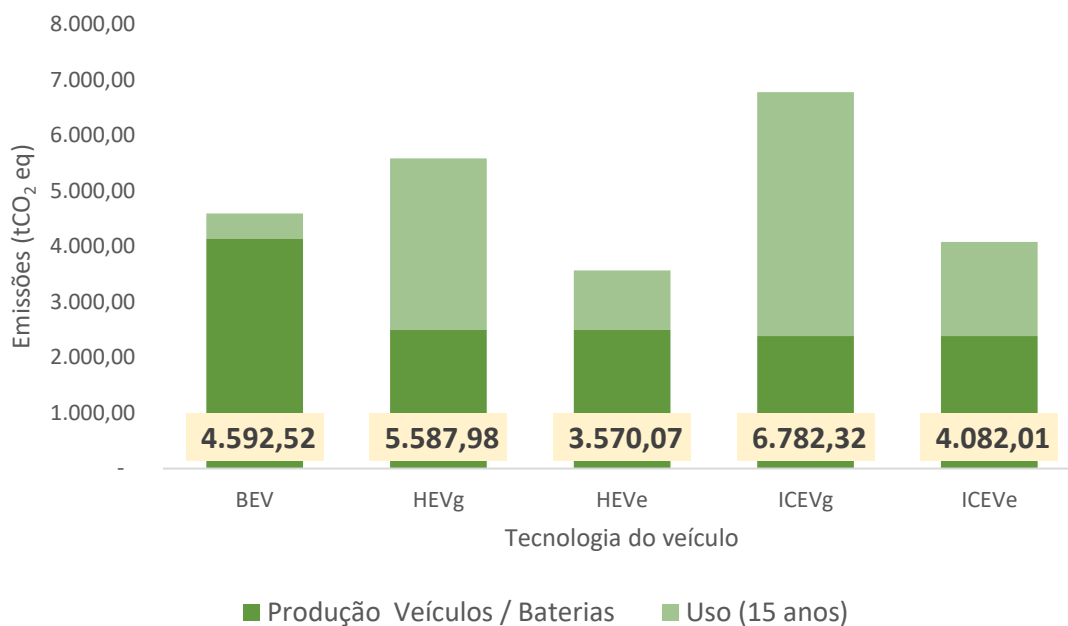


**Figura 4.8** Dados de emissão acumulada para substituição gradual da frota *hatch*

Diante desses resultados é possível visualizar que, embora no ano 2040 os resultados acumulados do ICEVe e do BEV sejam muito próximos, durante todo o ciclo de vida os valores de ICEVe se mostra menor. O que é justificado pela produção dos BEV causar maior impacto.

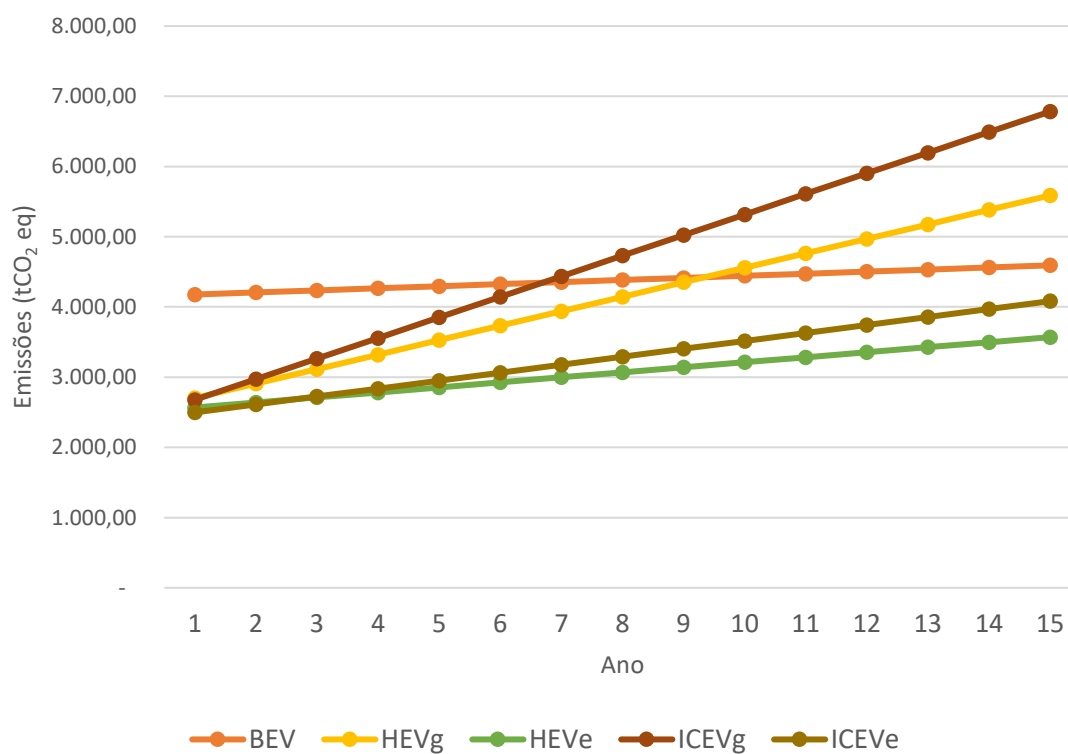
#### 4.3.2 Substituição da frota *sedan*

A frota *sedan* tem uma média anual operada menor que dos veículos *hatch*, além de menor frota, o que influencia em resultados de emissões menores. Considerando essas características, foi considerado que a troca dos veículos ocorrem ao 15º ano de operação. Além disso, no ano de 2025 todos os 260 veículos em uso fossem substituídos para um dos modelos: Nissan Versa, Toyota Corolla Altis ou BYD Seal. Os resultados de emissões desses três modelos estão apresentados no gráfico da Figura 4.9.



**Figura 4.9** Dados de emissão dos veículos *sedan* para quinze anos de operação

Uma simulação para as emissões considerando os 260 veículos, ao longo dos quinze anos foi realizada e os resultados apresentados na Figura 4.10.



**Figura 4.10** Dados acumulados de emissões ao longo de 15 anos de operação (*sedan*)

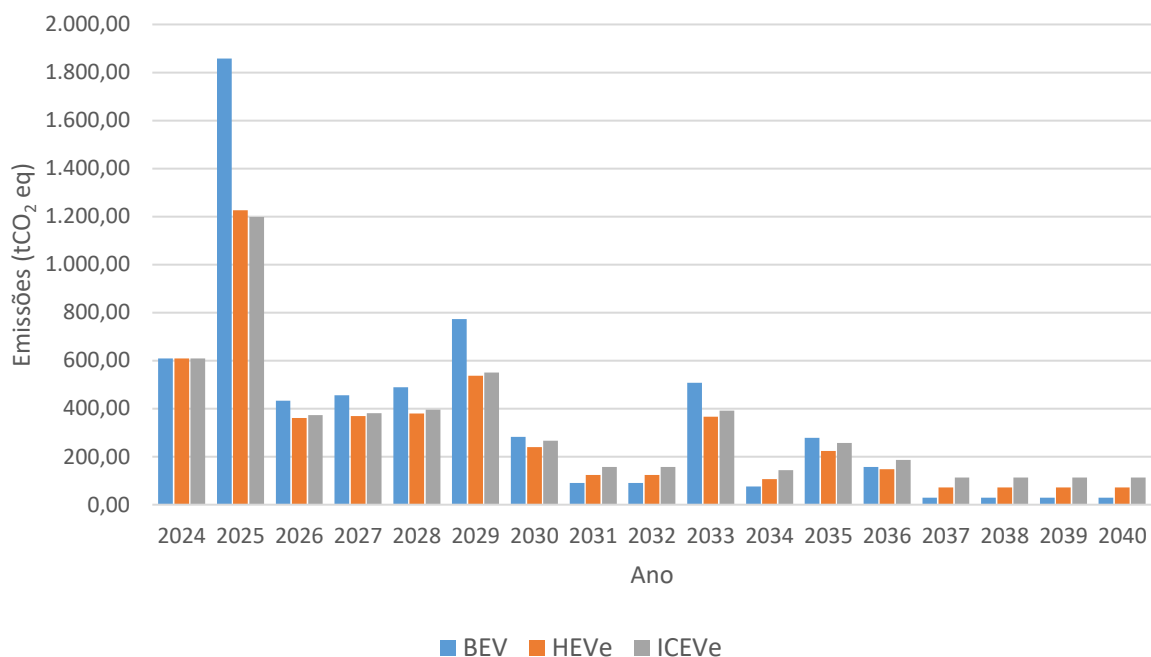
A partir da Figura 4.9 e Figura 4.10 é possível identificar que, após 15 anos de operação, as emissões dos veículos HEVe apresentam resultados bem abaixo do restante dos veículos. Apesar de ter um impacto maior em sua produção, quando comparado ao ICEV, antes do terceiro ano de operação esse impacto é revertido, conforme Figura 4.10, e se torna a melhor escolha no aspecto ambiental. Os veículos BEV, embora apresentem um baixo impacto no uso, na análise do ciclo de vida ainda são muito superiores os impactos, quando comparados aos veículos abastecidos a etanol. Por fim, os veículos a gasolina apresentam o maior impacto dentro das tecnologias avaliadas.

Na substituição gradual, o ano de substituição da frota também se inicia em 2025 e os veículos substituídos seriam aqueles que completassem quinze anos de operação, tendo em vista que esses veículos possuem uma quilometragem média anual mais baixa. A quantidade de veículos adquiridos por ano está listada na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9** Quantidade de veículos adquiridos por ano (*sedan*)

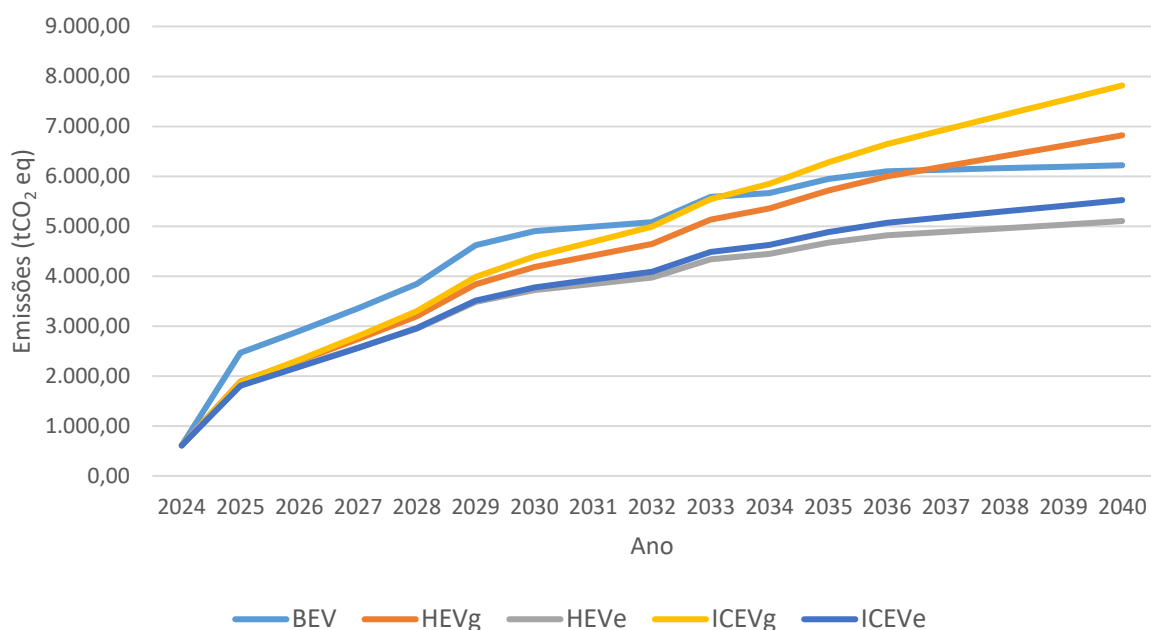
| <b>Ano</b>          | <b>25</b> | <b>26</b> | <b>27</b> | <b>28</b> | <b>29</b> | <b>30</b> | <b>31</b> | <b>32</b> | <b>33</b> | <b>34</b> | <b>35</b> | <b>36</b> |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Veículos adquiridos | 102       | 14        | 17        | 21        | 42        | 12        | 0         | 0         | 28        | 1         | 15        | 8         |

No ano de 2036 é previsto que toda a frota atual tenha sido substituída, de acordo com os critérios estabelecidos. A Figura 4.11 apresenta os impactos anuais da substituição da frota, considerando a produção dos veículos, manufatura dos combustíveis e uso. Para melhor visualização, os carros abastecidos à gasolina foram retirados, pois apresentam os maiores impactos.



**Figura 4.11** Impacto anual de substituição gradual da frota *sedan*

Assim como para o *hatch*, no ano de 2024 foi considerado a emissão atual da frota, com o uso de gasolina. O maior impacto é no ano de 2025, especialmente para o BEV, devido a substituição de uma grande quantidade de veículos (102) e até o ano de 2040 são apresentados os impactos de uso e renovação. Os quatro últimos anos, de 2037 a 2040, não há aquisição de veículos novos e, portanto, os valores de emissão se dão apenas pelo uso. Os dados foram simulados apenas até o ano de 2040, pois a partir desse ano uma nova aquisição deverá ser feita, mas como o mercado está em constante mudança, uma nova avaliação se fará necessária. Os dados de emissão acumulada na substituição gradual da frota *sedan* estão apresentados na Figura 4.12.



**Figura 4.12** Emissão acumulada para substituição gradual da frota *sedan*

Diante desses resultados é possível visualizar que os veículos alimentados por etanol apresentam um impacto substancialmente menor e que a diferença entre as opções HEVe e ICEVe é pequena e se deve pelo menor consumo do HEV.

#### 4.4 IMPACTOS NA SUBSTITUIÇÃO REGIONAL DA FROTA *HATCH*

Os impactos regionais, neste trabalho, são sensíveis à matriz de energia regional, tendo em vista a alteração da nacional. Como o transporte interno na produção de combustível, de veículos ou de baterias não foi considerado, as outras tecnologias não sofrem com essa avaliação. A matriz de energia nacional é subdividida em quatro subsistemas: Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul.

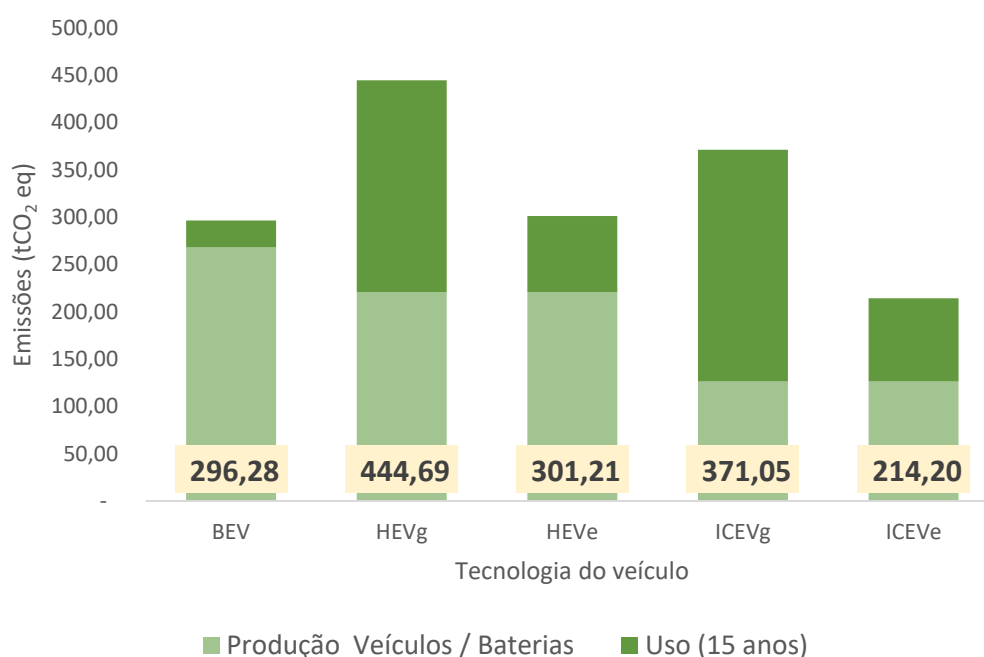
Os dados estatísticos, por subsistema, estão apresentados na Tabela 4.10. De acordo com os resultados, região Sul foi a que apresentou a menor quilometragem média operada por ano, como também a menor população. Mais da metade da população está concentrada no subsistema Sudeste/ Centro-Oeste, e é também a que apresentou maior dispersão dos dados e maior média de quilometragem operada anualmente.

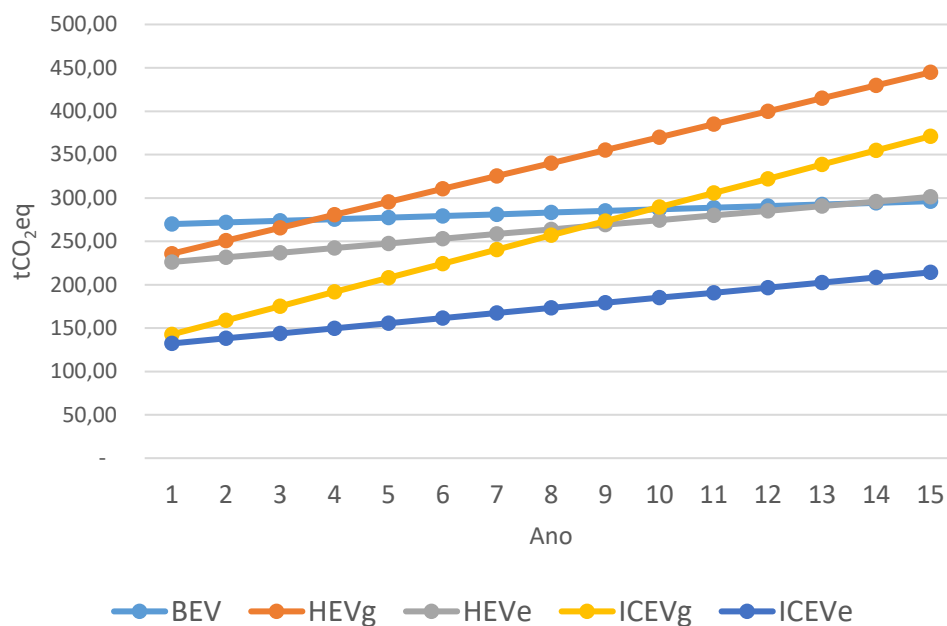
**Tabela 4.10** Dados estatísticos *hatch*, por subsistema

| Dados                        | Norte         | Nordeste      | Sudeste/<br>Centro-Oeste | Sul           |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|---------------|
| Média (km/ano)               | 9.845,44      | 12.054,64     | 12.941,33                | 7.599,24      |
| Mediana (km/ano)             | 9.410,70      | 13.128,50     | 11.793,60                | 5.905,00      |
| Desvio Padrão (km)           | 7.133,38      | 5.828,86      | 8.010,67                 | 6.147,89      |
| Variância (km <sup>2</sup> ) | 50.885.040,15 | 33.975.628,79 | 64.170.772,11            | 37.796.597,32 |
| Mínimo (km)                  | 118           | 338           | 748                      | 1.015         |
| Máximo (km)                  | 26.301,00     | 21.330        | 53.179                   | 19.000        |
| Nº de amostras               | 19            | 22            | 130                      | 17            |
| População                    | 23            | 29            | 193                      | 22            |

#### 4.4.1 Subsistema Norte

No subsistema Norte, como os dados de emissão da matriz energética são maiores do que para o sistema nacional (72,66 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh), os resultados apontam uma grande diferença entre as emissões de veículos *hatch* BEV e ICEVe. Apesar de, após 15 anos, o BEV obter melhores resultados que o HEVe, até 12 anos de operação o HEVe se mostra mais amigável ambientalmente, mesmo sendo um veículo maior. Os dados foram gerados para a substituição total da frota e vida útil de 15 anos. Portanto, nessa região, sob o aspecto ambiental, o ICEVe se mostra mais vantajoso, conforme Figura 4.13 e Figura 4.14.

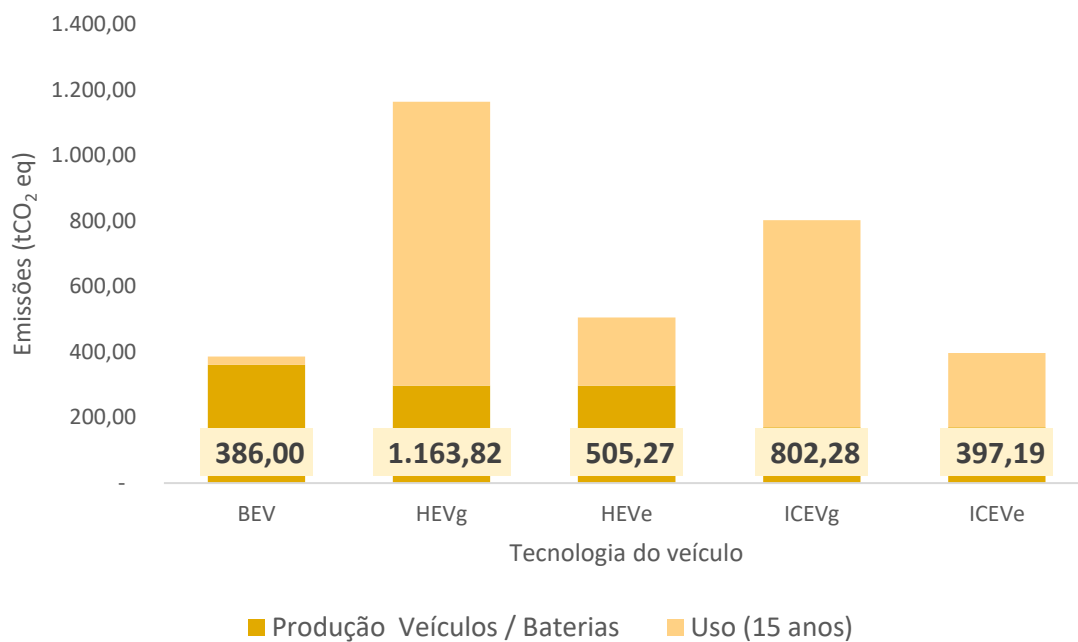
**Figura 4.13** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação no subsistema Norte



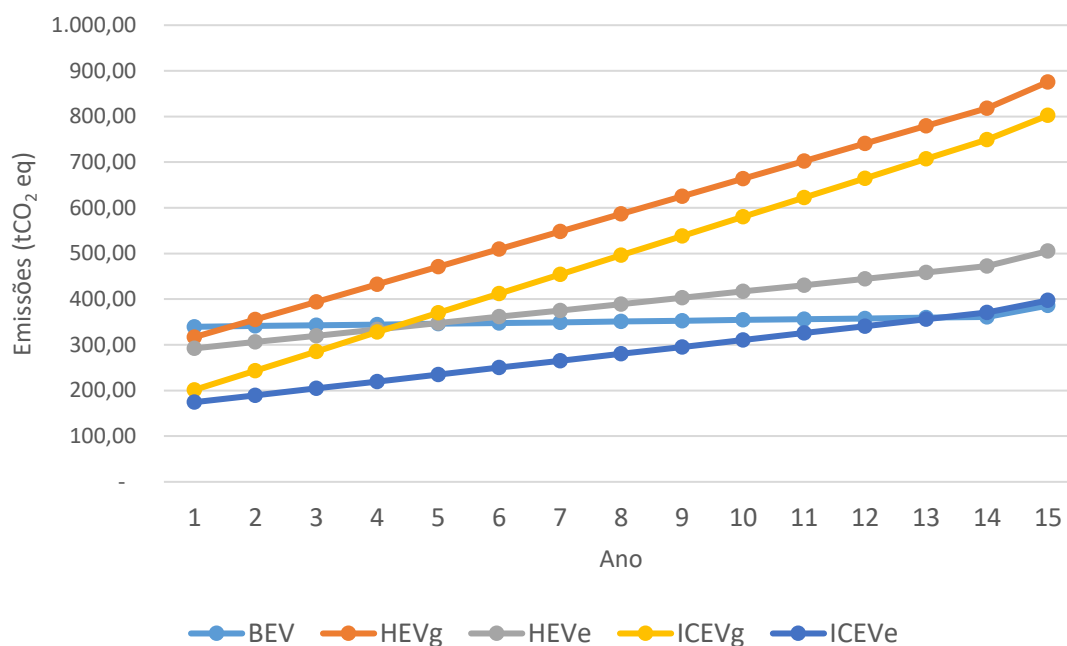
**Figura 4.14** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *hatch* no subsistema Norte

#### 4.4.2 Subsistema Nordeste

O subsistema Nordeste é o menor emissor do Brasil, sendo responsável por apenas 24,68 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh. Com essa característica, considerando as fases de produção e uso, após 15 anos, o BEV se tornou mais atrativo que o restante, seguido pelo ICEVe, conforme Figura 4.15. Entretanto, uma informação importante é que essa vantagem só é alcançada após, aproximadamente, treze anos de operação, de acordo com o gráfico da Figura 4.16. Até esse ponto, o ICEVe se mostrou mais vantajoso. Uma particularidade da simulação desse subsistema é que dois veículos, dos vinte e nove da frota regional, completam 240.000 km no décimo quinto ano de vida, portanto, foi considerada nova aquisição neste ano. Ainda assim o BEV se mostrou mais vantajoso, mesmo sem colher os benefícios dessa aquisição.



**Figura 4.15** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação no subsistema Nordeste

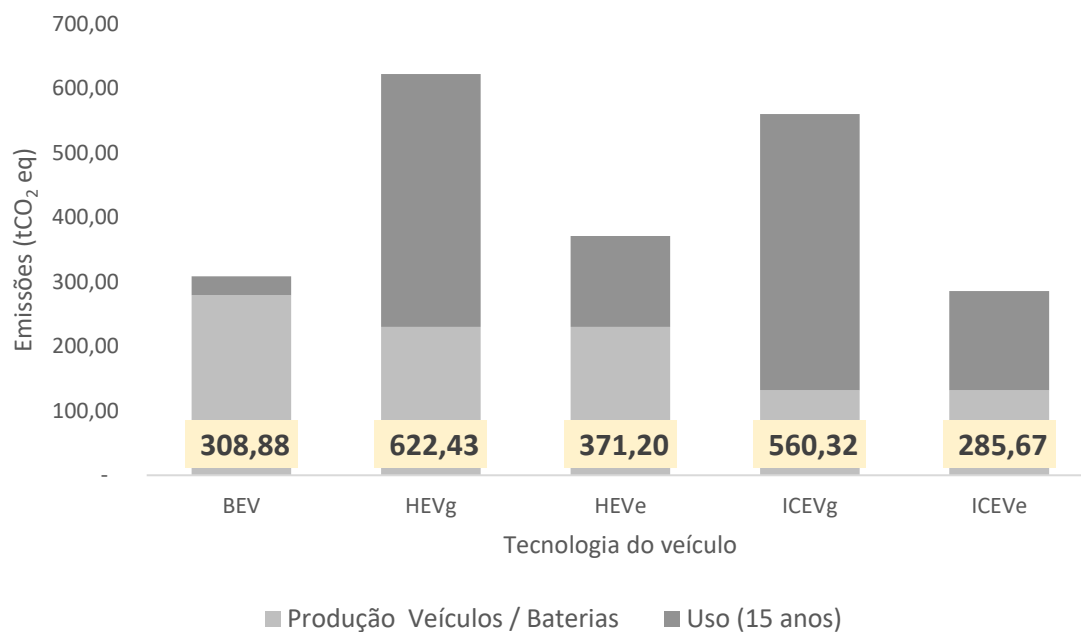


**Figura 4.16** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *hatch* no subsistema Nordeste

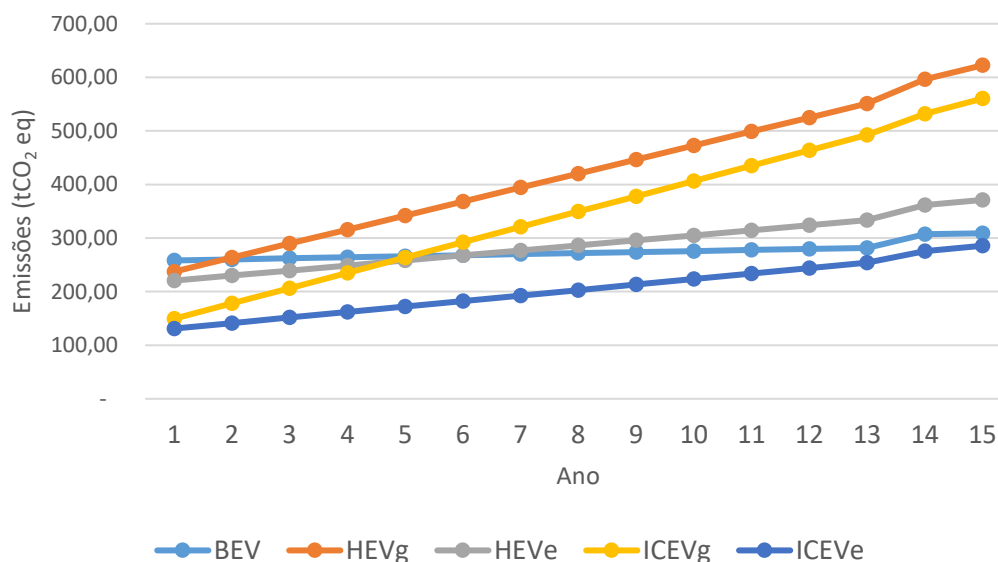
#### 4.4.3 Subsistema Sul

A matriz de energia do subsistema sul é um pouco menos emissora do que o do sistema nacional, e apresenta 42,90 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh. Mesmo sendo menos emissora, os resultados para os quinze anos de operação mostraram que o ICEVe é ambientalmente favorável em relação as

outras tecnologias, conforme mostrado na Figura 4.17 e Figura 4.18. No décimo quarto ano de vida dos veículos, houve uma substituição de dois veículos da frota, por alcançar os 240.000 km de vida. Isso contribuiu para aumentar a diferença entre o ICEVe e BEV.



**Figura 4.17** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação no subsistema Sul



**Figura 4.18** Dados de emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *hatch* no subsistema Sul

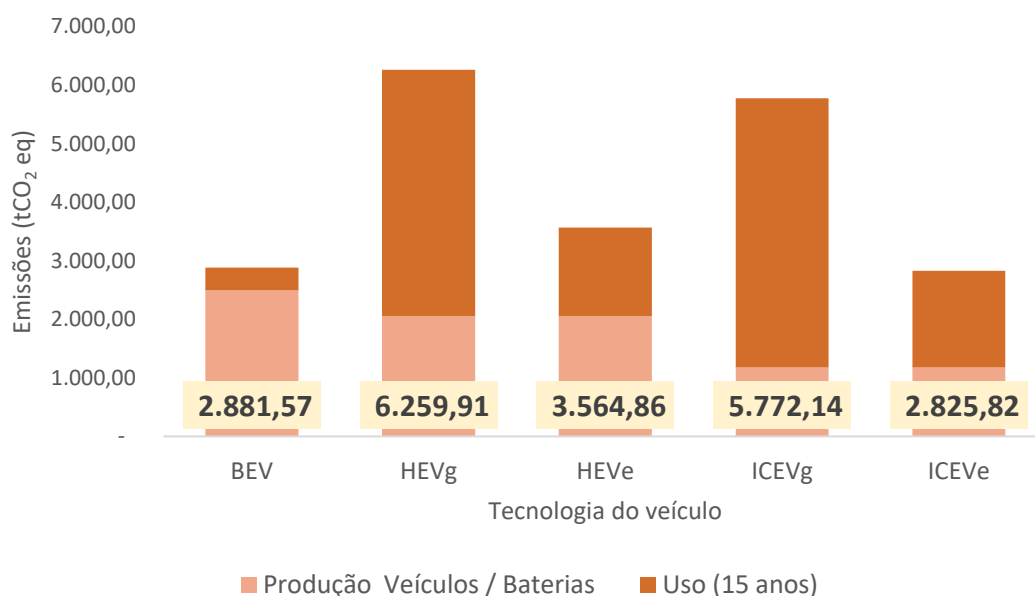
#### 4.4.4 Subsistema Sudeste e Centro-Oeste

A frota desse subsistema apresenta duas particularidades, ser a maior em quantidade de veículos, 193 no total, e ter a maior quilometragem operada anualmente. Tendo em vista essas características, uma gama de veículos atingem 240.000km antes de 15 anos de operação e a quantidade de veículos considerados na substituição são mostrados na

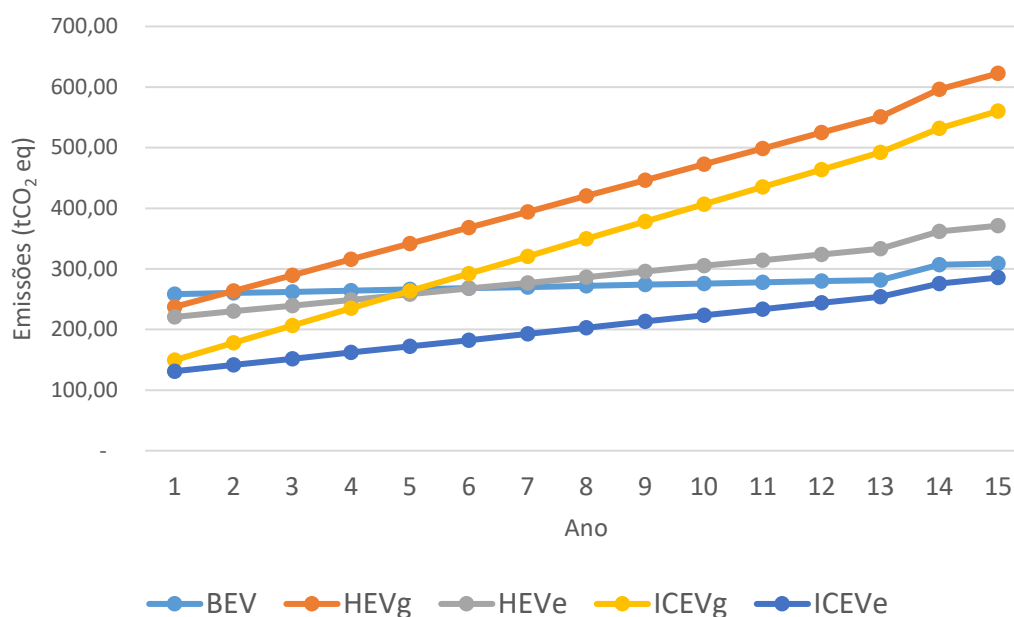
**Tabela 4.11** Quantidade de veículos adquiridos por ano (*hatch*)

| Ano                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|--------------------|----|----|----|----|----|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| Primeira Aquisição | 72 | 18 | 10 | 13 | 43 | 1 | 0 | 1 | 8 | 11 | 0  | 16 |    |    |    |
| Segunda Aquisição  |    |    |    |    |    |   |   |   |   |    | 1  | 0  | 3  | 8  | 9  |

A matriz do subsistema Sudeste/Centro-Oeste apresenta o valor mais próximo das emissões do sistema nacional 53,05 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh. Assim como na substituição da frota nacional, os veículos ICEVe apresentaram menores emissões durante os quinze anos simulado, Figura 4.19, e durante todo o ciclo de vida, Figura 4.20.



**Figura 4.19** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação *hatch* - Sudeste/Centro-Oeste



**Figura 4.20** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de hatch no subsistema Sudeste/ Centro-Oeste

#### 4.5 IMPACTOS NA SUBSTITUIÇÃO REGIONAL DA FROTA SEDAN

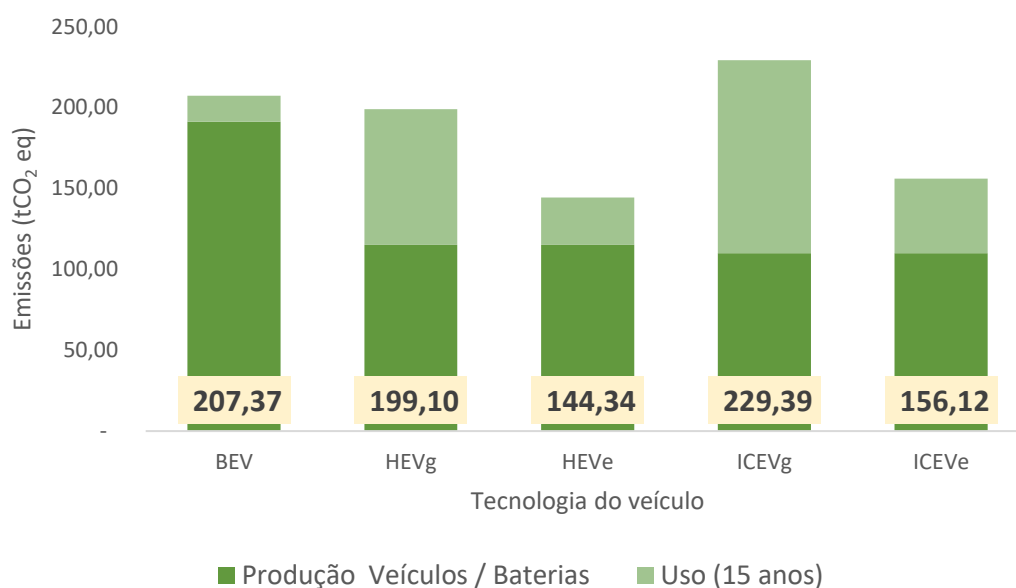
Os dados estatísticos, por subsistema, estão apresentados na Tabela 4.12. De acordo com os resultados, a região Norte apresentou a menor quilometragem média operada por ano e a região sul a menor população. A maior parte da população está concentrada no subsistema Sudeste/ Centro-Oeste.

**Tabela 4.12** Dados estatísticos sedan, por subsistema

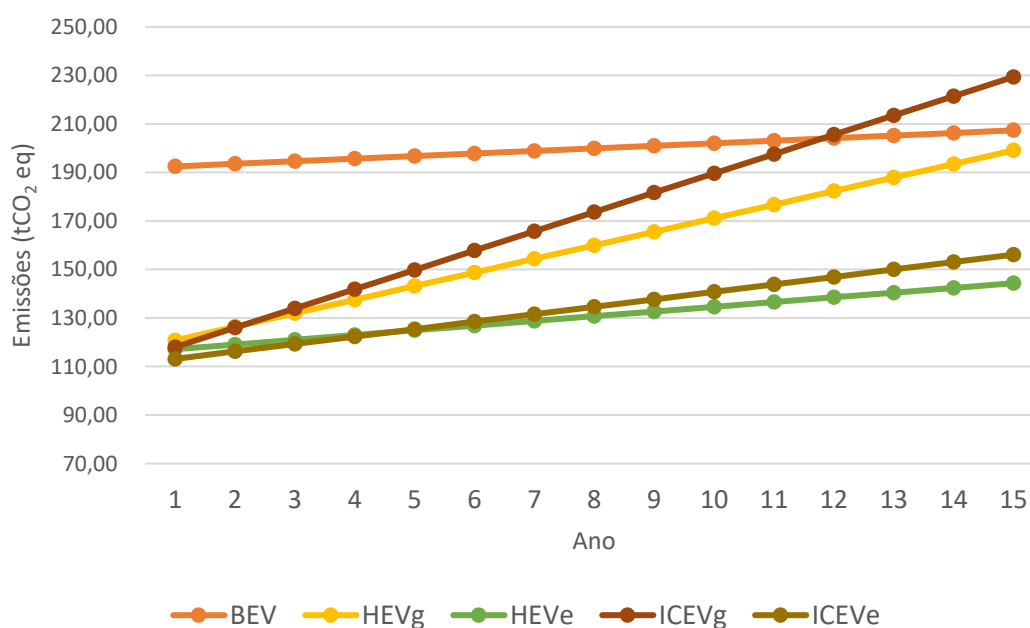
| Dados                        | Norte         | Nordeste      | Sudeste/<br>Centro-Oeste | Sul           |
|------------------------------|---------------|---------------|--------------------------|---------------|
| Média (km/ano)               | 5.768,84      | 9.348,77      | 9.265,92                 | 7.134,38      |
| Mediana (km/ano)             | 5.024,67      | 7.851,00      | 7.170,00                 | 6.780,00      |
| Desvio Padrão (km)           | 5.485,55      | 6.767,88      | 6.853,58                 | 3.991,92      |
| Variância (km <sup>2</sup> ) | 30.091.226,91 | 45.804.207,87 | 46.971.522,00            | 15.935.457,09 |
| Mínimo (km)                  | 208           | 549,5         | 227                      | 1.483         |
| Máximo (km)                  | 16.743,00     | 23.000        | 40.435                   | 13.527        |
| Nº de amostras               | 15            | 10            | 155                      | 9             |
| População                    | 15            | 10            | 226                      | 9             |

#### 4.5.1 Subsistema Norte

No subsistema Norte, os resultados apontaram que os veículos com o uso do etanol são muito mais favoráveis ao meio ambiente, sendo que o HEVe se mostrou o mais vantajoso. Isso devido ao melhor consumo que os veículos ICEV. Destaca-se que, com a alta emissão da matriz de energia elétrica da região Norte (72,66 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh), o BEV se mostrou menos vantajoso até mesmo que o HEVg. Os resultados estão apresentados na Figura 4.21 e Figura 4.22.



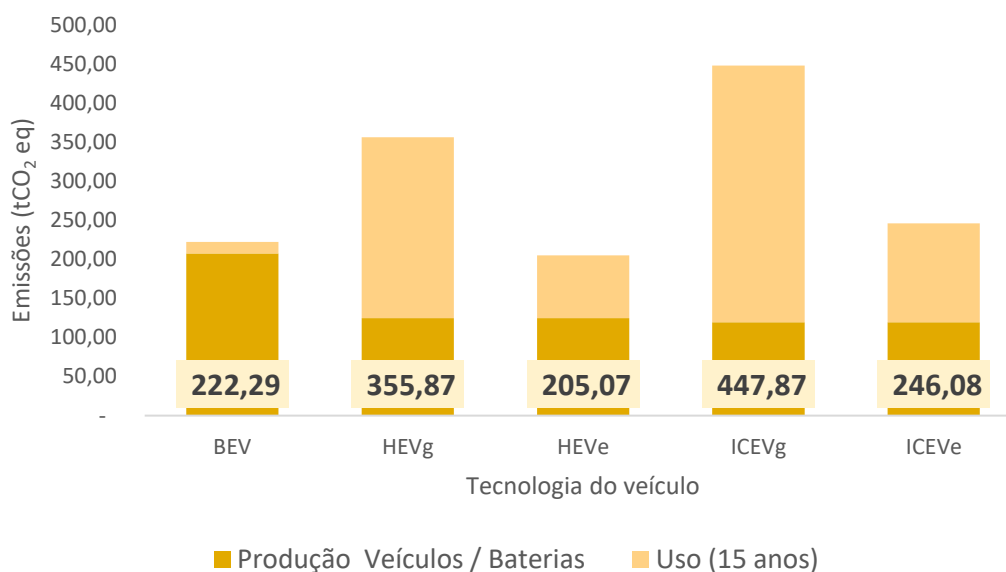
**Figura 4.21** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação *sedan* no subsistema Norte



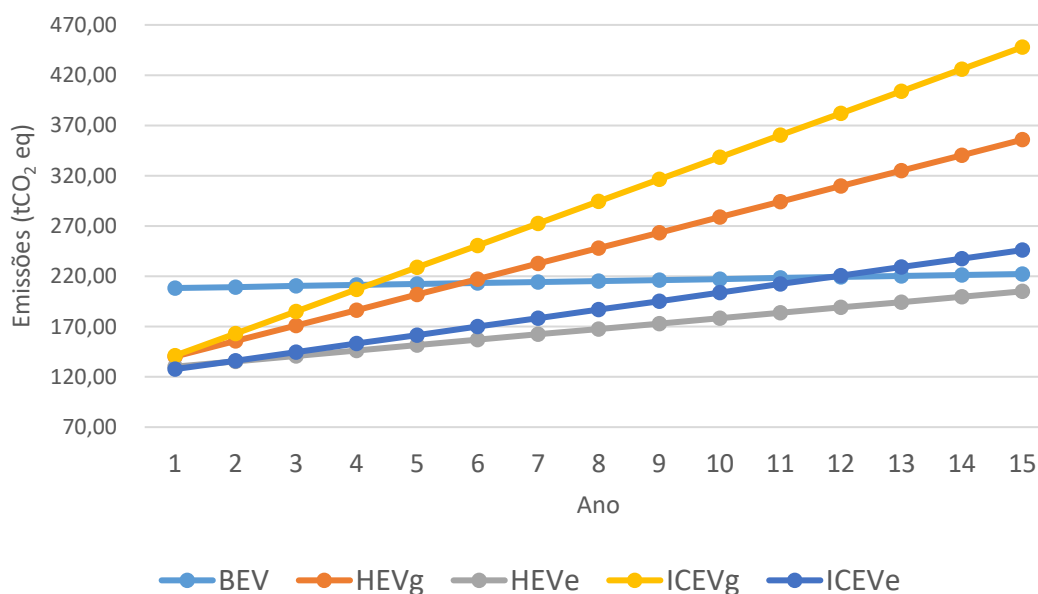
**Figura 4.22** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *sedan* no subsistema Norte

#### 4.5.2 Subsistema Nordeste

Mesmo o subsistema Nordeste sendo o menor emissor do Brasil, os carros HEVe apresentaram melhores resultados de emissão do que o BEV, este que ficou na segunda posição. Isso ocorre devido ao baixo consumo dos híbridos, adicionalmente utilizando os biocombustíveis. Os resultados encontrados para os quinze anos de operação estão detalhados na Figura 4.23 e Figura 4.24.



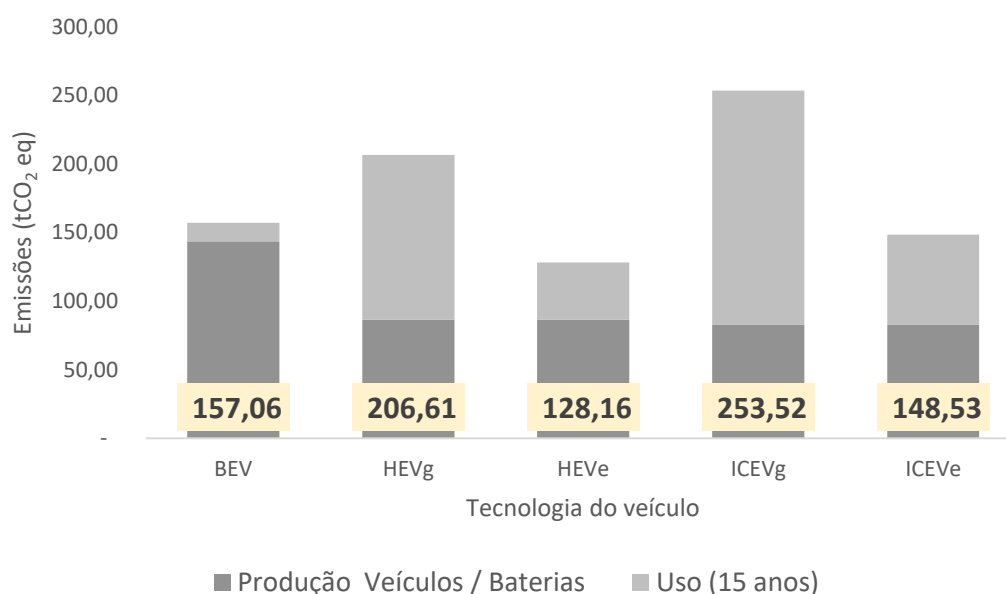
**Figura 4.23** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação *sedan* no subsistema Nordeste



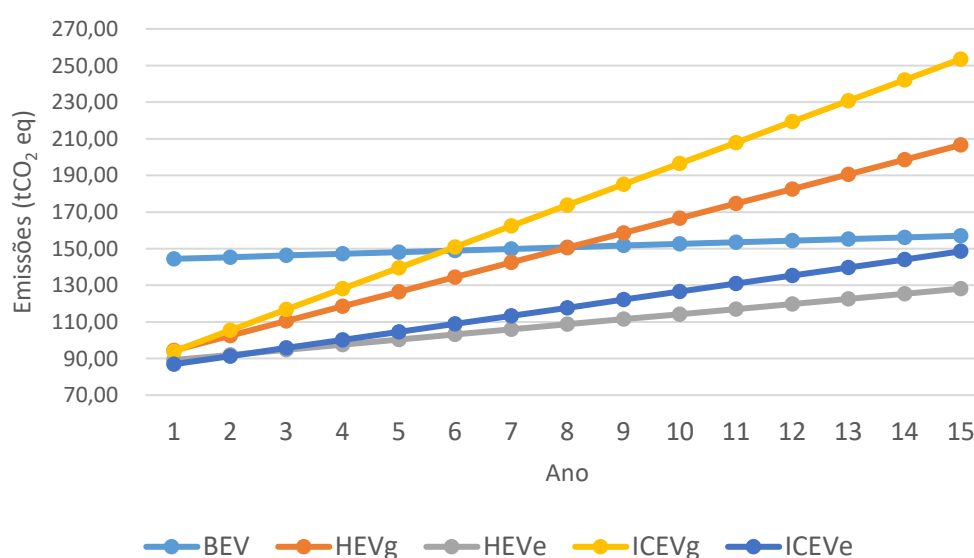
**Figura 4.24** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *sedan* no subsistema Nordeste

### 4.5.3 Subsistema Sul

Os resultados para os *sedans* no subsistema sul seguiram os resultados encontrados para o *sedan* nacional, com o HEVe se apresentando como a tecnologia mais vantajosa sob o aspecto ambiental, seguido pelos ICEVe e, em terceira posição, os BEV. A partir da Figura 4.25 é possível verificar os resultados de emissões após quinze anos de operação e na Figura 4.26 é apresentado os dados acumulados durante esses anos de vida



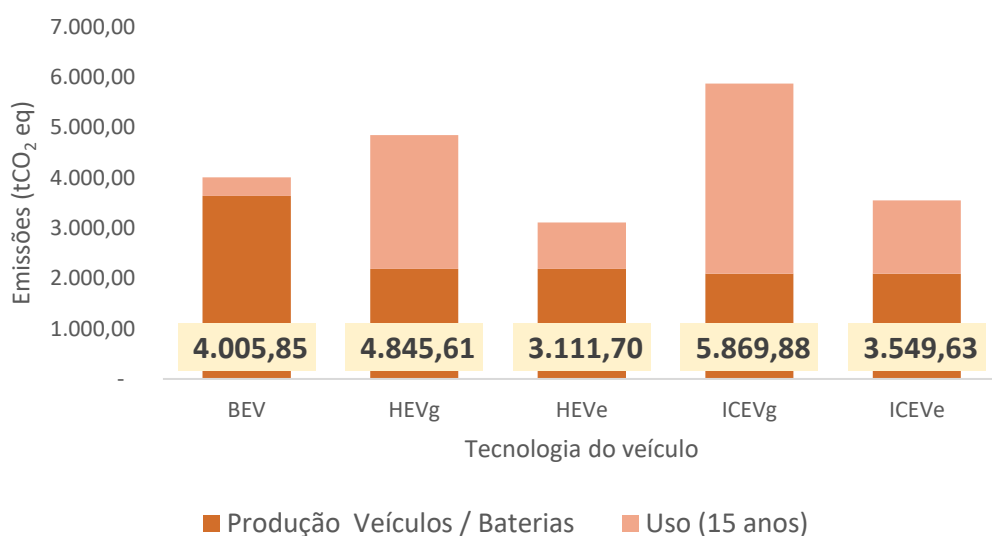
**Figura 4.25** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de operação *sedan* no subsistema Sul



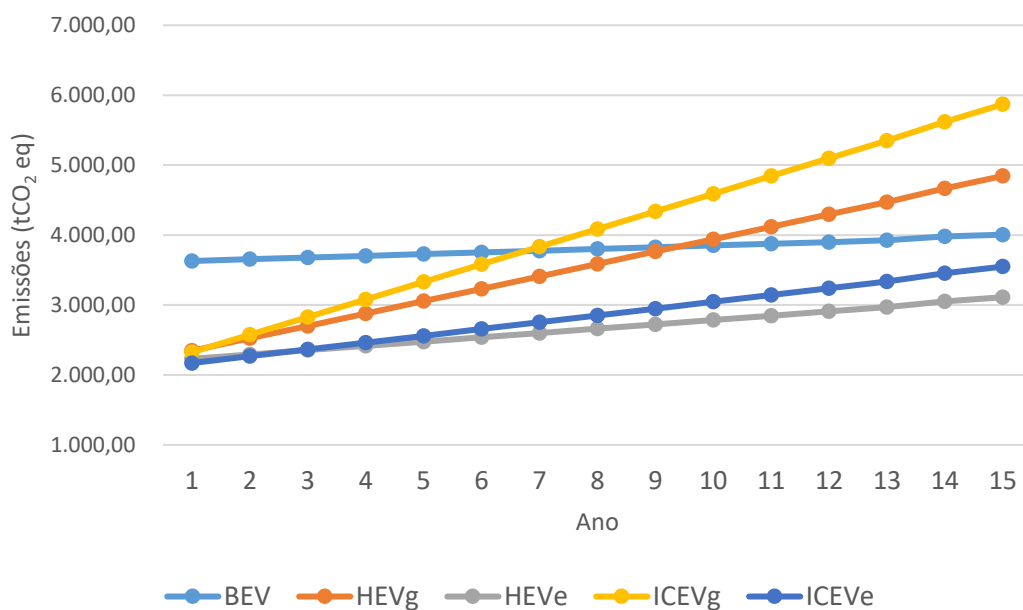
**Figura 4.26** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *sedan* no subsistema Sul

#### 4.5.4 Subsistema Sudeste/ Centro-Oeste

Quase noventa por cento da frota *sedan* está dentro do subsistema Sudeste/Centro-Oeste. Assim como na substituição da frota nacional, os veículos HEVe apresentaram menores emissões durante os quinze anos simulado, Figura 4.27, assim como melhor opção a partir do segundo ano do ciclo de vida, Figura 4.28. Os resultados são seguidos pelos ICEVe e o BEV. Os veículos à gasolina apresentam os maiores impactos.



**Figura 4.27** Emissões (tCO<sub>2</sub>eq) de quinze anos de vida *sedan* - Sudeste/ Centro-Oeste



**Figura 4.28** Emissões acumuladas (tCO<sub>2</sub>) de *sedan* no subsistema Sudeste / Centro-Oeste

## **4.6 AVALIAÇÃO DE CUSTOS DOS MODELOS PROPOSTOS**

Assim como na avaliação ambiental, a análise de custos foi dividida em duas simulações: substituição total da frota e substituição gradual da frota. A primeira trata de uma renovação instantânea, ou seja, a troca de todos os veículos e a avaliação dos impactos por 15 anos. Esses resultados permitem identificar os impactos financeiros de cada tecnologia. A segunda, trata de uma renovação gradual, de acordo com os dados coletados, são elas informação de ano de produção dos veículos existentes e da média de quilometragem anual operado por ano. Com essas informações, foi realizada uma previsão de ano de troca dos veículos, limitando a 15 anos de uso ou 240.000 km girados, o que ocorrer primeiro.

### **4.6.1 Substituição da frota *hatch***

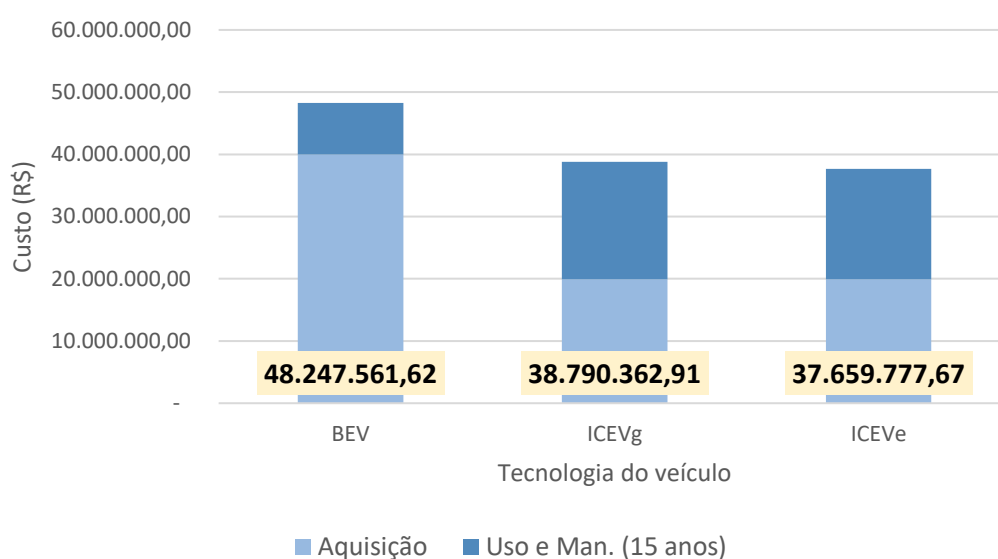
A frota atual é totalmente abastecida com gasolina. Estima-se que, a partir dos dados coletados, modelos e ano das viaturas em uso, o custo desse abastecimento é de R\$ 1.392.082,04 ao ano. Caso essa mesma frota fosse alimentada com etanol o custo ficaria em R\$ 1.321.231,37, uma redução percentual de 5% ou uma economia de R\$ 70.850,67 ao ano.

Para os gastos com etanol e gasolina, aplicados ao modelo ICEV escolhido, os custos anuais de operação da frota à etanol ficou em R\$ 988.164,62, enquanto à gasolina ficou em R\$ 1.063.536,97, cerca de 7% superior.

Para os BEV, os custos de uso com energia elétrica se mostram muito inferiores aos derivados de petróleo e, para o modelo escolhido, o custo anual com calculado com a energia necessária foi de R\$ 466.048,11, menos da metade do valor que os custos com gasolina ou etanol. Entretanto, na avaliação da substituição da frota, os custos de aquisição do BEV, no Brasil, ainda são muito superiores aos ICEV.

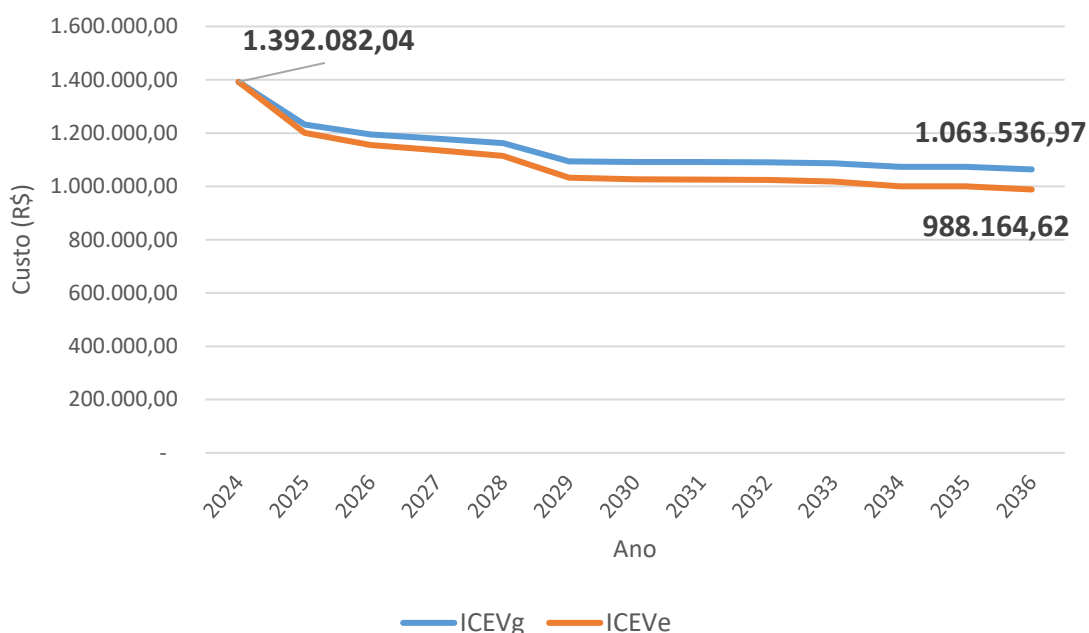
Quanto aos custos das manutenções, foram utilizados os valores informados nos sites da montadora, por isso, foram utilizados até 140.000km, pois acima disso não havia informação. Os ICEV apresentam uma revisão a cada 10.000km ou 12 meses de operação, enquanto o BEV é a cada 20.000 km, e foi considerado a cada dois anos de operação. Até os 140.000 km o ICEV tem um custo de R\$ 10.942,99, enquanto o BEV é de R\$ 4.720,00.

A fim de determinar o melhor custo de frota, foi feita uma simulação com a aquisição dos 267 veículos (BEV, ICEVg e ICEVe) e acrescentado os custos de manutenção programada e operação, por quinze anos, a Figura 4.29 apresenta os custos total de vida, para cada tipo de tecnologia. Nota-se que o custo de aquisição, aproximadamente dobrado, do BEV em relação ao ICEV, não é recuperado ao longo dos quinze anos de operação com custos inferiores. Não foram considerados análises de Valor Presente Líquido ou qualquer outra correção no tempo, o que seria mais prejudicial aos resultados para o BEV.



**Figura 4.29** Custo (R\$) do ciclo de vida de 15 anos de operação da frota *hatch* nova

Portanto, como solução econômica, o ICEV ainda se apresenta mais competitivo. Diante disso, uma avaliação da substituição da frota atual, movida a gasolina, por ICEVg e ICEVe, é proposta considerando a substituição gradual dos 267 veículos, seguindo a regra de 15 anos de uso ou 240.000 km, o que completar primeiro. Um aspecto interessante a ser destacado é a redução nos custos operacionais, nessa substituição. Os cálculos mostram que a frota atual tem um custo de abastecimento de R\$ 1.392.082,04 por ano, com gasolina e, após a substituição total, com o valor do combustível para o ano de 2024, essa despesa, com o etanol, cai para R\$ 988.164,62 por ano, cerca de 30% mais barato, o que equivale a uma economia anual de R\$ 403.917,42, conforme mostrado na Figura 4.30. O alto custo da frota atual é especialmente influenciado por veículos com muitos anos de uso, especialmente aqueles até 2014, que apresentam menor eficiência.



**Figura 4.30** Custos de uso para a substituição da frota por ICEVg ou ICEVe

#### 4.6.2 Substituição da frota *sedan*

Para a frota *sedan*, evidencia-se que, diferentemente dos veículos *hatch*, o HEV é uma solução de mercado e que, em questões ambientais, apresentaram melhores resultados, especialmente quando abastecidos com etanol. Como a frota atual (260 unidades) é totalmente abastecida com gasolina, ela foi utilizada como base de comparação na renovação da frota. Estima-se que, a partir dos dados coletados, modelos e ano das viaturas em uso, o custo desse abastecimento é de R\$ 997.350,99 ao ano. Caso essa mesma frota fosse alimentada com etanol o custo ficaria em R\$ 951.756,10, assim como no *hatch*, uma redução percentual de 5% ou uma economia de R\$ 45.594,89 ao ano.

Para as despesas com etanol, gasolina e energia elétrica, aplicados aos novos modelos escolhidos para análise, os resultados de custos de uso estão mostrados na Tabela 4.13. A partir dos resultados é possível identificar que os veículos mais econômicos no uso são o BEV, entretanto o seu custo de aquisição e a pequena quantidade de modelos *sedan* dessa tecnologia no mercado brasileiro, ainda são empecilhos na avaliação econômica. Em segunda colocação, o HEVe apresentou custos atrativos no uso, sendo aproximadamente 37% mais econômicos que o ICEVe, o que contribui para uma economia de R\$ 286.727,04 por ano nos custos de operação. A análise foi realizada para o país inteiro, mas pode ser mais econômico se for considerado o

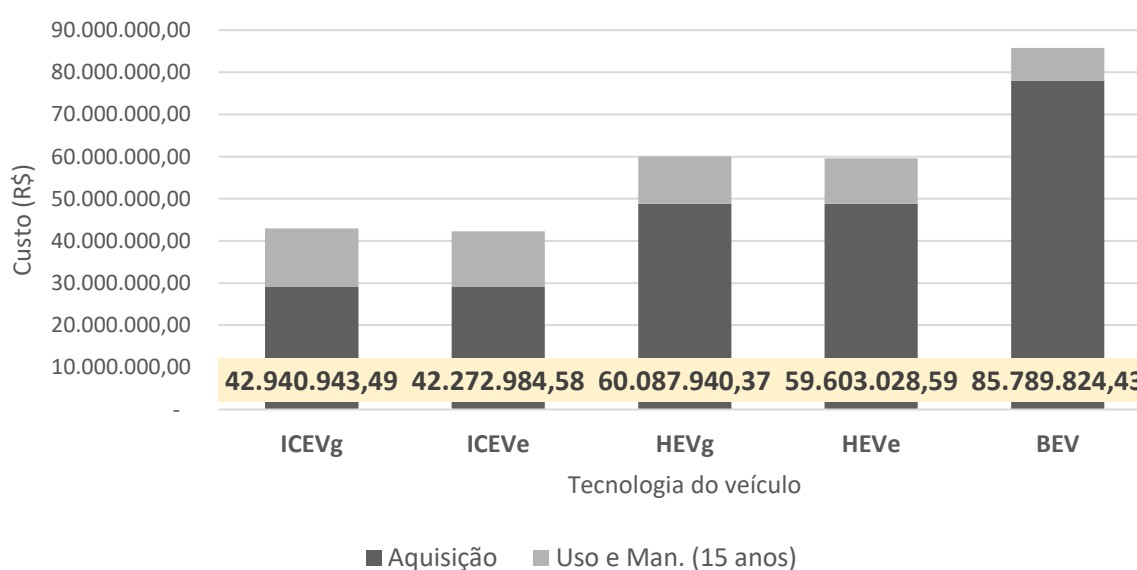
uso da gasolina na Região Nordeste e no Estado do Pará, onde o preço do etanol é menos vantajoso.

**Tabela 4.13** Custos no uso dos novos modelos escolhidos para simulação

| Dado                         | ICEVg      | ICEVe      | HEVg       | HEVe       | BEV        |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Custo uso da frota (R\$/ano) | 825.404,23 | 780.873,64 | 526.474,05 | 494.146,60 | 389.841,63 |

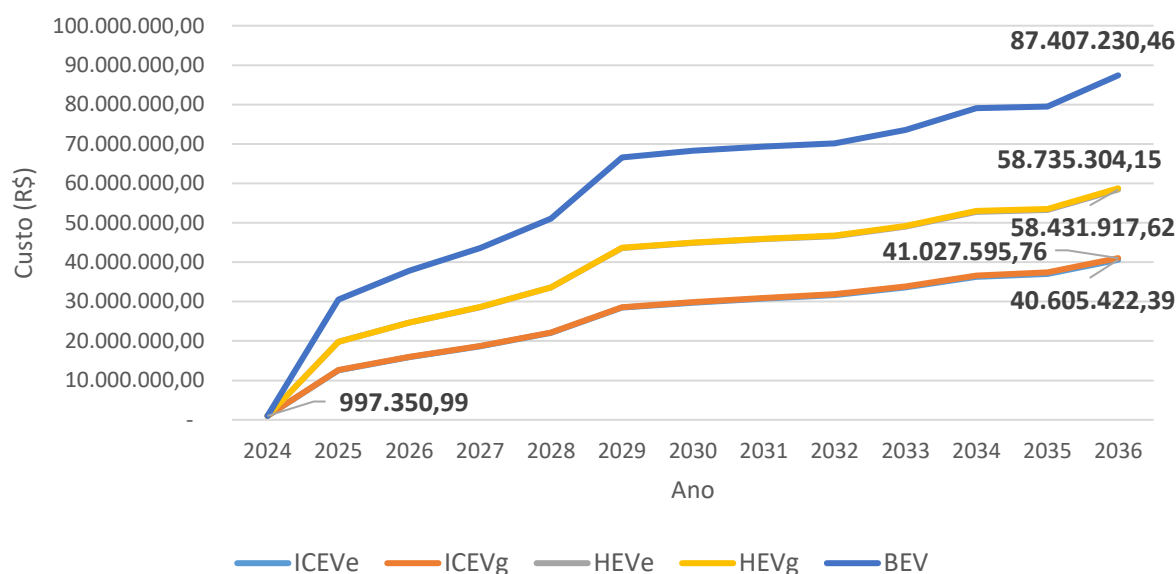
Quanto aos custos das manutenções, foram utilizados os valores informados nos sites da montadora, por isso, foram utilizados os dados disponíveis que são até 120.000 km. Os ICEV e HEV apresentam uma revisão a cada 10.000km ou 12 meses de operação, totalizando R\$ 5.848,00 e R\$ 12.943,96, respectivamente, enquanto o BEV a cada 20.000 km, e foi considerado a cada dois anos de operação, em um total de R\$ 7.670,00.

A fim de determinar o melhor custo de frota, foi feita uma simulação com a aquisição dos 260 veículos (BEV, HEVg, HEVe, ICEVg e ICEVe) e acrescentado os custos de manutenção programada e operação, por quinze anos, a Figura 4.31 apresenta os custos acumulados para cada tipo de tecnologia. Nota-se que os custos de aquisição do BEV e do HEV, quando comparados ao ICEV, não são recuperados ao longo dos quinze anos de operação com custos inferiores. Não foram considerados análises de Valor Presente Líquido ou qualquer outra correção no tempo, o que seria mais prejudicial aos resultados para o BEV e HEV.



**Figura 4.31** Custo (R\$) do ciclo de vida de 15 anos de operação da frota *sedan* nova

Para a renovação da frota os resultados estão mostrados na Figura 4.32. Foi considerada que a aquisição dos veículos se iniciaria em 2025, portanto, em 2024 a despesa é referente apenas ao uso dos modelos atuais à gasolina. É possível identificar que os veículos ICEV tem um custo mais baixo durante toda a cadeia, se tornando a opção mais econômica e, especialmente, quando alimentados a etanol.



**Figura 4.32** Custos (R\$) de renovação da frota *sedan*

#### 4.6.3 Análise de custos de operação regional

O fator regional, para a simulação, irá afetar os custos de operação, pois variam os preços da gasolina, etanol e energia elétrica. A Tabela 4.14 e Tabela 4.15 apresentam os custos de operação dos veículos *hatch* e *sedan* para as diferentes tecnologias. Em todos os locais o custo de uso é mais baixo para o BEV. Para o ICEV, é possível identificar que a região Nordeste é a única que apresenta um valor para o etanol superior ao da gasolina em aproximadamente 6%. Já a região Sudeste/ Centro-Oeste é a região que apresenta a maior vantagem do preço do etanol, quando comparado à gasolina, em torno de 7%. Nas tabelas, estão destacada em negrito as regiões onde o etanol ou a gasolina foram mais econômicos.

**Tabela 4.14** Custos de operação por região dos carros *hatch*

| <b>Região</b>               | <b>ICEVg (R\$)</b> | <b>ICEVe (R\$)</b> | <b>BEV (R\$)</b> |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Norte (23)                  | 47.568,30          | <b>43.889,69</b>   | 18.749,04        |
| Nordeste (29)               | <b>115.323,44</b>  | 121.496,11         | 49.834,59        |
| Sul (22)                    | 77.166,24          | <b>71.725,35</b>   | 33.182,29        |
| Sudeste/ Centro-Oeste (193) | 823.478,99         | <b>751.053,47</b>  | 364.282,19       |

**Tabela 4.15** Custos de operação por região dos carros *sedan*

| <b>Região</b>               | <b>ICEVg (R\$)</b> | <b>ICEVe (R\$)</b> | <b>HEVg (R\$)</b> | <b>HEVe (R\$)</b> | <b>BEV (R\$)</b> |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| Norte (12)                  | 24.077,56          | <b>23.490,86</b>   | 15.357,58         | <b>14.865,31</b>  | 10.501,98        |
| Nordeste (13)               | <b>62.833,88</b>   | 66.512,27          | <b>40.077,83</b>  | 42.089,79         | 30.214,85        |
| Sul (09)                    | 32.228,35          | <b>31.614,45</b>   | 20.556,46         | <b>20.006,02</b>  | 15.361,20        |
| Sudeste/ Centro-Oeste (226) | 706.264,44         | <b>659.256,06</b>  | 450.482,18        | <b>417.185,47</b> | 333.763,60       |

#### 4.7 PRECIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE CARBONO

Uma possibilidade de ganho na redução da emissão dos gases de efeito estufa é com os créditos de carbono. Para cada tonelada de CO<sub>2</sub> evitado, emite-se um crédito de carbono. A Fundação Getúlio Vargas (FGV) disponibiliza uma plataforma com os dados de Mercado de Carbono, países participantes e valores. Nesse sistema, verificou-se que, no ano de 2021, os preços por escopo do *Carbon Offsetting and Reduction Scheme* (CORSIA) apresentaram um preço de U\$\$ 2,52 por crédito de carbono, para os sistemas de eficiência energética e combustíveis (FGV, 2024). Foi utilizado esse mercado, pois é o que mais se aproxima das atividades da FAB. Considerando o preço médio do dólar, em 2023, de R\$ 4,995, o preço da emissão da tonelada de dióxido de carbono equivalente tem um custo de R\$ 12,59 (IPEA, 2023).

Quando verificada a redução de toneladas de CO<sub>2</sub>eq na substituição da frota e combustíveis, verifica-se que o maior ganho ocorre nos carros *hatch* BEV e ICEVe. A fim de comparação, a Tabela 4.16 apresenta, na primeira linha, o valor médio anual do ciclo de vida frota, ou seja, o custo da vida da frota e dividido por quinze, que foi a vida útil analisada e, na segunda linha, a precificação do carbono quando renovada a frota atual.

**Tabela 4.16** Análise do lucro com o mercado de carbono - *Hatch*

| <b>Descrição</b>         | <b>ICEVe (R\$/ano)</b> | <b>BEV (R\$/ano)</b> |
|--------------------------|------------------------|----------------------|
| Custo médio anual        | 2.625.604,09           | 3.216.504,11         |
| Lucro mercado de carbono | 5.866,94               | 7.251,82             |

A partir dos resultados, é possível identificar que o mercado de carbono não como incentivo não é suficiente para convencer a escolha por tecnologias de baixa emissão, devido ao baixo preço do CO<sub>2</sub>. O lucro corresponde a cerca de 0,23% do valor da vida útil. O mesmo ocorre para os carros *sedans*, conforme resultados apresentados na Tabela 4.17, em que o lucro do mercado apresenta cerca de 0,01% do custo anual de vida.

**Tabela 4.17** Análise do lucro com o mercado de carbono - *Sedan*

| <b>Descrição</b>         | <b>ICEVe (R\$/ano)</b> | <b>HEVe (R\$/ano)</b> | <b>HEVg (R\$/ano)</b> | <b>BEV (R\$/ano)</b> |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Custo médio anual        | 42.272.984,58          | 60.087.940,37         | 56.971.241,42         | 85.789.824,43        |
| Lucro mercado de carbono | 3.600,74               | 2.429,87              | 4.142,11              | 4.683,48             |

## 5 DISCUSSÕES

A análise dos resultados apresentados nessa pesquisa revela que a eletrificação da frota *sedan* pode proporcionar significativos benefícios ambientais, entretanto para o *hatch* não se mostrou atrativo. Sob o aspecto custos, é necessária uma política para incentivar o mercado da eletromobidade no setor público. Esse capítulo é dedicado a apresentar particularidades do Comando da Aeronáutica, destacar os principais resultados encontrados e aplicáveis e comparar os resultados com a literatura.

### 5.1 CONTEXTO FORÇA AÉREA BRASILEIRA

A Força Aérea Brasileira, organização subordinada ao Ministério da Defesa tem suas particularidades por se tratar de uma organização dedicada à defesa da nação. Nesse sentido, na Política Nacional de Defesa está previsto a contribuição do nível de segurança das Estruturas Estratégicas, quem englobam, entre outras, os sistemas de geração e distribuição de energia elétrica e o transporte (BRASIL, 2016), além disso é extremamente importante a preocupação com a resiliência de suas operações. Certamente, o cuidado com o meio ambiente é uma preocupação, com o intuito de prevenir e contingenciar eventos de crises climáticas, como o ocorrido no Rio Grande do Sul, no ano de 2024, o qual a FAB teve forte atuação.

Sobre os sistemas de transporte escolhidos para análise, foram divididos em dois tipos: carros *hatch* e *sedan*. O primeiro trata o que é chamado internamente de carros de serviço. Esses carros são utilizados para as tarefas diárias da organização, quando existe a necessidade de deslocamentos mais longos, que não é possível realizar a pé. Além disso, os militares têm uma característica particular quando precisam viajar a trabalho, pois a instituição é responsável por prover apoio de transporte, hotel e alimentação aos militares, por meio de suas unidades. Dessa forma, os veículos *hatch* são utilizados no deslocamento para aeroportos e rodoviárias ou reuniões externas, quando envolve o efetivo comum ou de menor grau hierárquico. Já os *sedans* são chamados como veículo especial ou de representação e são utilizados para o deslocamento de oficiais gerais, comandantes de organização e autoridades.

Sobre o banco de dados das viaturas, o Comando da Aeronáutica possui o Sistema Integrado de Logística de Material e de Serviços (SILOMS) que é responsável por propiciar o planejamento e controle das atividades logísticas e, por isso, possui informações de recursos e materiais disponíveis. Essa ferramenta foi utilizada como fonte de base de dados dos veículos

(modelo e ano de fabricação), situação e localidade de uso. As informações quanto à quilometragem média utilizada anualmente e a quilometragem média de fim de vida, por localidade, foi levantado diretamente com os chefes dos setores de garagem de cada localidade.

Nesse sentido, foi identificada a necessidade de implementar/ aprimorar um software de gestão de frotas terrestres na Aeronáutica, capaz de guardar não só os dados de material, como também de uso. Dessa forma, possibilita a gestão do uso de combustível, custos com manutenção, entre outros. Essa ferramenta não só contribui para uma visão gerencial de uso da FAB, como ajuda o chefe da garagem local a identificar quando é mais econômico alienar determinada viatura ou adquirir uma nova.

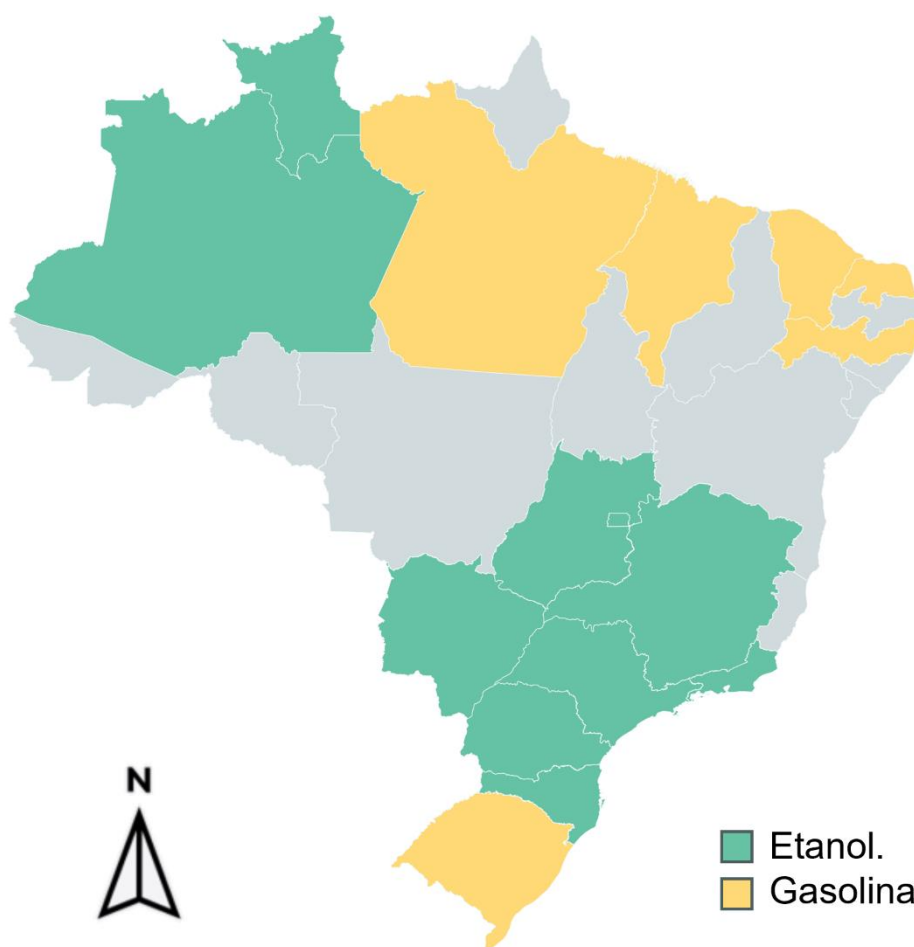
Quanto às instalações das organizações militares, atualmente as viaturas são abastecidas dentro das unidades, que possuem postos de abastecimentos internos. Esse aspecto contribui para a resiliência operacional. Entretanto, todos o Brasil é abastecido com gasolina e diesel, ou seja, não possuem instalações necessárias para o abastecimento de álcool. Como não era escopo do trabalho, a avaliação dos custos na adequação dessas instalações não fora englobada.

As discussões trazidas nessa seção serão apresentadas em relação aos resultados regionais, tendo em vista ter uma maior precisão e aplicação.

## **5.2 ESTIMATIVA DE EMISSÕES E CUSTOS DA FROTA *HATCH***

Primeiramente vale explorar sobre a situação atual da frota *hatch*. Esses veículos são os que apresentam a maior quantidade de quilometragem operada por ano, pois são utilizados para diversos tipos de missão e atendem todo o efetivo. Sobre os dados informados a quilometragem anual variou de 118 a 53.179, com uma média de 12.042. Uma variação muito grande, que tende a ser errôneo, tendo em vista que o software atual não grava os dados de quilometragem e os chefes de garagem tem alta rotatividade, ou seja, não possuem um histórico da frota.

O primeiro resultado que deve ser evidenciado é quanto à utilização atual, que é feita por meio de gasolina e tem um custo anual de R\$ 1.392.082,04. Caso os mesmos veículos forem abastecidos com álcool, o custo cai para R\$ 1.321.231,37, cerca de 5% de redução. Quando a análise chega ao nível estadual, esse valor cai para R\$ 1.309.687,92 ou 6% por ano. O mapa da Figura 5.1 apresenta os estados que se mostraram mais atrativos o uso do etanol, tons em azul, ou da gasolina, tons amarelos.



**Figura 5.1** Custos mais baixos para o etanol (verde) ou para a gasolina (amarelo) - *hatch*

Outro aspecto importante na avaliação financeira é que os veículos são do ano de 1996 até 2021. Os veículos datados antes de 2014 apresentam consumos muito superiores, quando comparados ao novo modelo escolhido. O custo anual de operação à gasolina da frota atual, considerando as 205 unidades com ano até 2014, totaliza R\$ 1.095.862,85, enquanto para os novos modelos esse total fica em R\$ 800.333,08, uma redução de 27% ou R\$ 295.529,77 anual.

Na análise do custo de vida, foram considerados as despesas de aquisição, manutenção e operação. Os resultados, por região, estão mostrados na Tabela 5.1. Como destacado na tabela, apenas para a região Nordeste o ICEVg foi mais vantajoso, para as outras regiões o ICEVe obteve melhores resultados. O alto custo de aquisição dos BEV não viabiliza, até o momento, a aplicação da tecnologia, embora o seu custo de operação seja inferior aos demais. Uma política incentivo que tem sido adotada em alguns estados é a isenção do IPVA aos proprietários, entretanto, como ao Poder Público é isento, esse incentivo não se aplica.

**Tabela 5.1** Custo do ciclo de vida da frota *hatch*

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

Quanto às emissões, foi realizada uma análise do ciclo de vida desde a produção dos veículos e combustíveis, até o uso. No entanto, essa pesquisa apresenta um diferencial em incluir a análise regional, as emissões estão mostradas na Tabela 5.2. Vale destacar que os cálculos de emissões da matriz elétrica regional foram feitos com base nos dados de emissões das térmicas, em 2020, e geração apresentada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), em 2023. Quando comparado com os dados de emissão nacional apresentados pela EPE, de 55 gCO<sub>2</sub>/ kWh, o calculado ficou um pouco abaixo, representando 54,5 gCO<sub>2</sub>/kWh. Essa alteração afeta os resultados do BEV quando somadas as emissões regionais e comparados pelo nacional, o que resulta em uma redução de, aproximadamente, 3tCO<sub>2</sub>, anualmente.

**Tabela 5.2** Emissões de CO<sub>2</sub> da frota *hatch*, por região

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

Sobre os resultados de emissão, destaca-se que os *hatch* BEV, na região Nordeste, emitiram menos do que os veículos à etanol. Esse resultado difere daqueles encontrados na literatura consultada, no contexto Brasil. Evidencia-se que não foi encontrado estudo anterior que faz a análise por região no Brasil.

Um instrumento que tem sido adotado mundialmente, como incentivo para as tomadas de decisões ambientalmente mais amigáveis é a adoção do mercado de carbono. Utilizando o valor de R\$ 12,59 por crédito de carbono, o lucro estimado por região, na substituição dos veículos atuais a gasolina pelos modelos escolhidos está apresentada na Tabela 5.3, por região. A partir

desses resultados é possível verificar que o valor do mercado não é suficiente para influenciar a análise decisória.

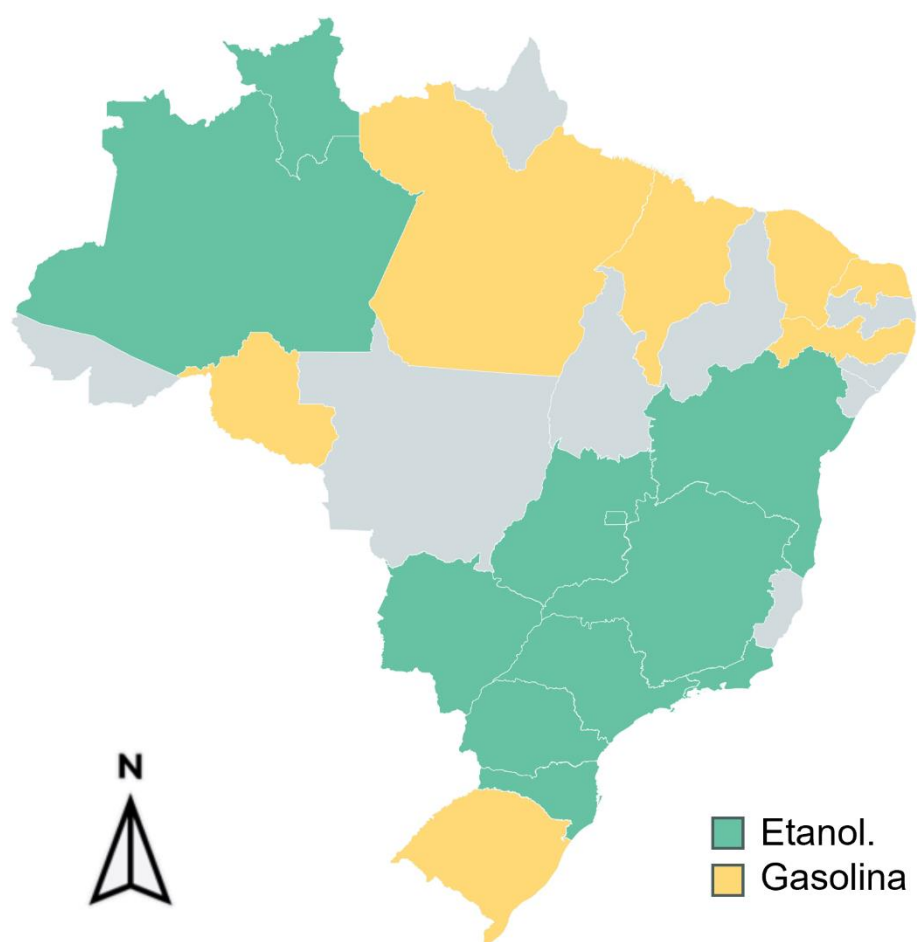
**Tabela 5.3** Precificação das emissões de CO<sub>2</sub> no mercado de carbono

| <b>Região</b>               | <b>ICEVe (R\$/ano)</b> | <b>BEV (R\$/ano)</b> |
|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| 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             |

### 5.3 ESTIMATIVA DE EMISSÕES E CUSTOS DA FROTA SEDAN

Os veículos *sedan*, quando comparados ao *hatch*, apresentam menor quilometragem média anual de operação. Sobre os dados informados, apresentaram anos de 1999 até 2021 e a quilometragem anual variou de 208 a 40.435, com uma média de 8.887. Apesar de menos disperso do que os dados do *sedan*, ainda apresentou uma dispersão muito grande, um motivo pela necessidade de um software de gestão do histórico.

Sobre os resultados quanto à utilização atual, os *sedans* também são abastecidos à gasolina e sua operação tem um custo anual de R\$ 997.350,99. Caso os mesmos veículos forem abastecidos com álcool, o custo cai para R\$ 951.756,10, cerca de 5% de redução. Quando a análise chega ao nível estadual, esse valor cai para R\$ 946.243,19 por ano, uma economia de R\$ 51.107,80 por ano. O mapa da Figura 5.2 apresenta os estados que se mostraram mais atrativos o uso do etanol, tons em azul, ou da gasolina, tons amarelos.



**Figura 5.2** Custos mais baixos para o etanol (verde) ou para a gasolina (amarelo) - *sedan*

Quanto à avaliação financeira na substituição dos veículos mais antigos, por aqueles mais novos, tendo em vista a melhoria da eficiência dos veículos ao longo dos anos, os *sedans* obtiveram resultados menos impactantes que os *hatch*. Essa diferença foi maior para os veículos de fabricação até 2013. Dessa forma, o custo anual de operação à gasolina da frota atual, considerando as 152 unidades com ano até 2013, totaliza R\$ 598.238,57, enquanto para os novos modelos esse total fica em R\$ 466.883,37, uma redução de 22% ou R\$ 131.355,21 anual.

Assim como os *hatch*, na análise do custo de vida, foram considerados as despesas de aquisição, manutenção e operação, entretanto com uma diferença, pois na análise do *sedan* os HEV estão presentes. Os resultados, por região, estão mostrados na Tabela 5.4. Como destacado na tabela, apenas para a região Nordeste o ICEVg foi mais vantajoso, para as outras regiões o ICEVe obteve melhores resultados. O alto custo de aquisição dos BEV financeiramente ainda não viabiliza a aplicação da tecnologia, embora o seu custo de operação seja inferior aos demais.

**Tabela 5.4** Custo do ciclo de vida da frota *sedan*

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

Também para os *sedans*, foi realizada uma análise do ciclo de vida seguindo a mesma metodologia dos *hatch*. Essa análise foi feita regionalmente e as emissões estão mostradas na Tabela 5.5. Os resultados de emissão demonstram que os veículos HEVe são os menores emissores para todas as regiões brasileiras.

**Tabela 5.5** Emissões de CO<sub>2</sub> da frota *sedan*, por região

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

Quando aplicado os preços do crédito de carbono para análise lucrativa desse instrumento, os resultados encontrados são os mostrados na Tabela 5.6, por região. A partir desses resultados é possível verificar que o valor do mercado não é suficiente para influenciar a análise decisória.

**Tabela 5.6** Precificação das emissões de CO<sub>2</sub> no mercado de carbono (*sedan*)

| <b>Região</b>                   | <b>ICEVe (R\$/ano)</b> | <b>HEVg(R\$/ano)</b> | <b>HEVe(R\$/ano)</b> | <b>BEV (R\$/ano)</b> |
|---------------------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 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-<br>Oeste (226) | 3.147,50               | 2.140,30             | 3.600,74             | 4.053,98             |

## 5.4 COMPARAÇÃO COM ESTUDOS ANTERIORES

A fim de consultar os resultados das emissões encontrados com estudos anteriores, foram calculados os dados de emissão em gCO<sub>2</sub>eq/km para cada tecnologia e apresentado na Tabela 5.7.

**Tabela 5.7** Emissões calculadas em gCO<sub>2</sub>eq/km

| <b>Tipo de veículo</b> | <b>ICEVg</b> | <b>ICEVe</b> | <b>HEVg</b> | <b>HEVe</b> | <b>BEV</b> |
|------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| <i>Hatch</i>           | 157,13       | 78,42        | 172,35      | 100,35      | 83,57      |
| <i>Sedan</i>           | 209,63       | 116,11       | 167,08      | 97,20       | 115,12     |

Resultados semelhantes foram encontrados em (GAUTO *et al.*, 2023) que avaliaram modelos na linha dos *sedans* e foram encontrados: 269,3 gCO<sub>2</sub>eq/km, para o ICEVg, 120,9 gCO<sub>2</sub>eq/km para o ICEVe, 77,6 para o HEVe e 98,36 para o BEV. Assim como encontrado no trabalho atual, para os veículos *sedans*, os híbridos à etanol se mostram a melhor opção sob a perspectiva ambiental, o que demonstra que biocombustíveis combinados à eletrificação têm maior potencial para a redução de emissão de gases de efeito estufa, outros trabalhos obtiveram resultados semelhantes (ANDERSSON & BÖRJESSON, 2021; DE CARVALHO *et al.*, 2023; GAUTO *et al.*, 2023).

De Souza *et al.* (2018) fizeram a avaliação de um automóvel de passageiros compactos, no contexto brasileiro, e encontraram que no aspecto CO<sub>2</sub>eq/km o ICEVe apresentou o melhor resultado, seguido pelo BEV. Resultado semelhante foi encontrado nesse estudo quanto à avaliação dos *hatch*.

Essa pesquisa apresenta um diferencial para os estudos encontrados no contexto brasileiro, pois avalia o contexto regional. Especificamente para os *hatch*, a falta de disponibilidade de modelos HEV contribuiu para que, na análise regional, a região nordeste, que possui a matriz mais limpa do país, apresentou os melhores resultados ambientais para o BEV. Não foram encontrados estudos anteriores que avaliam os impactos, regionalmente no Brasil, apenas para os Estados Unidos (ONAT *et al.*, 2015).

## 6 CONCLUSÕES

Este estudo atendeu ao objetivo geral estabelecido ao avaliar o impacto da eletrificação de transporte terrestre leve (*hatch* e *sedan*), com foco nos aspectos ambientais e de custos. Foram criados dois modelos de inventário visando a fundamentar a tomada de decisões na renovação de frota terrestre, considerando as tecnologias a combustão, híbrida e totalmente elétrica, abastecidas com álcool e gasolina. O primeiro avalia as emissões de dióxido de carbono da vida do veículo e o segundo os custos de aquisição, manutenção e uso, para cada tecnologia.

Tendo em vista que os resultados são afetados pelas características locais, uma avaliação regional da matriz elétrica foi realizada, bem como uma análise estadual de custos de energia e combustível foi utilizada. Essa avaliação se tornou um diferencial de estudos anteriores, que não consideram a regionalização. Os modelos foram aplicados ao caso específico de renovação da frota *hatch* e *sedan* da Força Aérea Brasileira a fim de gerar resultados que possam ser discutidos e evidenciados.

Sob o aspecto ambiental, os resultados para a frota *hatch* mostraram que o ICEVe tem menor impacto em todas as regiões do país, com exceção da região Nordeste, que o BEV se tornou mais atrativo. A diferenciação por região da matriz de energia elétrica permitiu um resultado diferencial dos estudos anteriores, específico para a matriz de energia mais limpa do país, Nordeste. Esses resultados foram permitidos, pois falta no mercado nacional híbridos do tipo *hatch*. Para os *sedans*, a presença de modelos HEVe permitiram que, em todas as regiões, essa tecnologia obtivesse os menores impactos ao meio ambiente, assim como a literatura disponível.

Sob o aspecto de custos, a avaliação identificou que a eletrificação não se mostra atrativa, as despesas de aquisição dos veículos ainda os tornam muito superiores aos ICEV. Caso seja de interesse do governo a eletrificação das frotas públicas, existe a necessidade de implementação de políticas de incentivo reais para esse setor, tendo em vista que a aplicação do mercado de carbono não se mostrou atrativa. Duas alternativas se mostraram viáveis na redução de custos do uso atual, são elas a adoção do etanol em vários estados do país e a substituição dos veículos mais antigos, que são carros que possuem menor eficiência.

Destaca-se que os modelos desenvolvidos possuem um diferencial por serem exatos para o modelo e consumo de aplicação, se tornando uma eficiente ferramenta de tomada de decisão. Para a análise específica da FAB, verificou-se que a eletrificação da frota, sob o aspecto financeiro, ainda não se torna viável. Entretanto, uma alteração de parte da frota para o uso do etanol, não só gera economia, como diminui os impactos às mudanças climáticas causadas com o uso da gasolina.

De forma geral, a busca pela transição energética e a necessidade de diversificação de fontes de energia, evidenciam dois aspectos importantes. O primeiro é que existe a necessidade de incentivo para soluções de fim de vida das baterias, como a reciclagem, tendo em vista que o componente representa o grande desafio ambiental dos carros elétricos. O segundo, é que as características do setor de transportes brasileiro, que possui ampla participação de biocombustíveis na matriz, fazem com que o bioetanol é uma solução favorável para a promoção da transição energética (DE CARVALHO *et al.*, 2023).

## **6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Sob o aspecto ambiental, alguns dados não foram considerados no cálculo, são eles:

- Embora o Brasil não produza as baterias utilizadas nos veículos elétricos, sendo a China a maior produtora, o transporte entre os países não foi contabilizado. Entretanto, quando comparado os valores de emissões utilizados para os veículos BEV, nota-se que eles são superiores aos resultados encontrados em Qiao *et al.* (2017), que avalia a produção dos veículos e componentes na China;
- Conforme detalhado na revisão da literatura, a economia circular aplicada às baterias tem um potencial considerável na redução das emissões da produção desses componentes. Entretanto, no Brasil não existe uma política aprovada para a implementação de reutilização e reuso, portanto, não foi considerada essa contribuição no trabalho; e,
- Não foram consideradas as emissões para implantação de infraestrutura de recarga e nem das adequações das organizações militares para recebimento de etanol.

Quanto aos custos, têm-se como limitações que não foram considerados valores de inflação ou manipulação de valores no tempo, nem custos com adequações de infraestrutura, no caso de alteração da tecnologia ou do combustível.

## **6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para cálculo de emissões e atualização do modelo, é necessário se atualizar constantemente com o mercado, especialmente dos EV. O aparecimento de modelos novos do mercado tem sido contante e soluções que alterem os resultados, podem ocorrer em breve. E ainda, é necessário o acompanhamento das soluções de baterias, não só sob o aspecto de fim de vida, como sobre a utilização de novos componentes que impactem a produção. Uma análise incluindo os impactos de reciclagem seria relevante para a continuação.

Quanto aos custos, uma análise econômica quanto o histórico de custos com etanol e gasolina, por estado, se torna importante em subsidiar a tomada de decisão nos locais. Além disso, uma análise do custo passado, tentando identificar custos futuros, seria interessante na avaliação do uso. Como também, a partir do ano que vem as organizações militares adquirirão energia por meio do Mercado Livre e não mais no Mercado Cativo, como os dados que foram utilizados neste trabalho. Estima-se que ocorra uma redução em, aproximadamente, 30% no valor da tarifa de energia. Uma avaliação com esses valores faz-se necessária. Uma análise de sensibilidade também seria enriquecedora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICHBERGER, C. & JUNGMEIER, G. (2020) Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review. *Energies*, v. 13, p. 6345.
- AJANOVIC, A. & HAAS, R. (2019) Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review. *Fuel cells*, v. 19, n. 5, p. 515-529.
- ANDERSSON, Ö. & BÖRJESSON, P. (2021) The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. *Applied Energy*, v. 289, p. 116621.
- ANEEL (2023) Agência Nacional de Energia Elétrica. Perdas de Energia. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>>. Acesso em: 21 jul. 2024.
- ANEEL (2024) Agência Nacional de Energia Elétrica. Sistema de Acompanhamento de Informações de Mercado para Regulação Econômica - SAMP. Disponível em: <<https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/cativo>>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- ANFAVEA (2023) Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Séries históricas, a partir de janeiro/1957, de autoveículos por segmento (automóveis, comerciais leves, caminhões, ônibus, total) de produção, licenciamento de nacionais, importados e total; exportações em unidades. Disponível em: <<https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-excel/>>. Acesso em: 5 out. 2023.
- ANP (2023) Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gas Natural e Biocombustíveis. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>>. Acesso em: 11 jul. 2024.
- ANP (2024) Agência Nacional do Petróleo. Preços de distribuição de combustíveis. Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos/precos-de-distribuicao-de-combustiveis>>. Acesso em: 9 ago. 2024.
- APOSTOLAKI-IOFIDOU, E., CODANI, P., & KEMPTON, W. (2017) Measurement of power loss during electric vehicle charging and discharging. *Energy*, v. 127, p. 730–742.
- ARSHAD, F., LIN, J., MANURKAR, N., FAN, E., AHMAD, A., TARIQ, M. N., WU, F., CHEN, R., & LI, L. (2022) Life cycle assessment of lithium-ion batteries: a critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 180, p. 106164.
- ABNT (2009a) Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura. ABNT.
- ABNT (2009b) Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. ABNT.

- BAGDI, T., GHOSH, S., SARKAR, A., HAZRA, A. K., BALACHANDRAN, S., & CHAUDHURY, S. (2023) Evaluation of research progress and trends on gender and renewable energy: A bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 423, p. 138654.
- BENITEZ, A., WULF, C., DE PALMENAER, A., LENGERSDORF, M., RÖDING, T., GRUBE, T., ROBINIUS, M., STOLTEN, D., & KUCKSHINRICHS, W. (2021) Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on type IV carbon fiber hydrogen tank. *Journal of cleaner production*, v. 278, p. 123277.
- BEKEL, K., & PAULIUK, S. (2019) Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 24, p. 2220–2237.
- BEN (2023) Balanço Energético Nacional. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- BERGER, M., SONDEREGGER, T., ALVARENGA, R., BACH, V., CIMPRICH, A., DEWULF, J., FRISCHKNECHT, R., GUINEÉ, J., HELBIG, C., HUPPERTZ, T., JOLLIET, O., MOTOSHITA, M., NORTHEY, S., PEÑA, C. A., RUGANI, B., SAHNOUNE, A., SCHRIJVERS, D., SCHULZE, R., SONNEMANN, G., VALERO, A., WEIDEMA, B., & YOUNG, S. B. (2020) Mineral resources in life cycle impact assessment: part II—recommendations on application-dependent use of existing methods and on future method development needs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, p. 798-813.
- BRASIL (2010) Presidência da República. Casa civil. Lei n 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- BRASIL (2016) Política Nacional de Defesa Estratégia Nacional de Defesa. Disponível em: <[https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/estado\\_e\\_defesa/copy\\_of\\_pnd\\_e\\_end\\_2016.pdf](https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/estado_e_defesa/copy_of_pnd_e_end_2016.pdf)>. Acesso em: 24 ago. 2024.
- BRASIL (2018) Resolução Nº 758, de 23 de novembro de 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.
- BRASIL (2020a) Comando da Aeronáutica. Diretoria de Administração da Aeronáutica. Manual de Transporte de Superfície. MCA 75-1E. Rio de Janeiro.
- BRASIL (2020b) Quarto Relatório de Atualização Bienal do Brasil à Convenção-Quadro Das Nações Unidas Sobre Mudança Do Clima. Disponível em: <[https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/BUR/BUR4\\_Brasil\\_Port.pdf](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/BUR/BUR4_Brasil_Port.pdf)>. Acesso em 03 set. 2024.
- BRASIL (2021) Em nova meta, Brasil irá reduzir emissões de carbono em 50% até 2030. 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.
- BRASIL (2023) Atividade Legislativa. Projeto de Lei n 2.327, de 2021. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/148903>>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- BYD (2024a) Build Your Dreams. BYD Dolphin. Divertido, Pop e 100% elétrico. Disponível em: <<https://www.byd.com/br/car/dolphin>>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- BYD (2024b) Build Your Dreams. BYD SEAL. Configure o seu BYD. Disponível em: <<https://www.byd.com/br/order-seal>>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- DE CARVALHO, E. N., JÚNIOR, A. C. P. B., & DE MENDONÇA BRASIL, A. C. (2023) Impact of electric vehicle emissions in the Brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol. *Energy Reports*, v. 10, p. 2582–2596.
- CAVALETT, O., CHAGAS, M. F., SEABRA, J. E., & BONOMI, A. (2013) Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 3, p. 647–658.
- CHISTOV, V., ARAMBURU, N., & CARRILLO-HERMOSILLA, J. (2021) Open eco-innovation: A bibliometric review of emerging research. *Journal of cleaner production*, v. 311, p. 127627.
- COX, B., BAUER, C., BELTRAN, A. M., VAN VUUREN, D. P., & MUTEL, C. L. (2020) Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, v. 269, p. 115021.
- DE SOUZA, L. L. P., LORA, E. E. S., PALACIO, J. C. E., ROCHA, M. H., RENÓ, M. L. G., & VENTURINI, O. J. (2018) 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.
- DENTON, T. (2020) Electric and Hybrid Vehicles. IMI - Institute of the motor industry. Oxford, Inglaterra. Published by Routledge, 222 p.
- DESANTES, J. M., MOLINA, S., NOVELLA, R., & LÓPEZ-JUÁREZ, M. (2020) Comparative global warming impact and NOX emissions of conventional and hydrogen automotive propulsion systems. *Energy Conversion and Management*, v. 221, p. 113137.
- DIXIT, A., & JAKHAR, S. K. (2021) Airport capacity management: A review and bibliometric analysis. *Journal of Air Transport Management*, v. 91, p. 102010.
- DUNN, J., SLATTERY, M., KENDALL, A., AMBROSE, H., & SHEN, S. (2021) Circularity of lithium-ion battery materials in electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, v. 55, n. 8, p. 5189–5198, 2021.

- EDWARDS, R., LARIVE, J. F., & BEZIAT, J. C. (2011) Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power Trains in the European Context-Report, Version 3c. Disponível em: <<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec>>.
- ELGOWAINY, A., HAN, J., WARD, J., JOSECK, F., GOHLKE, D., LINDAUER, A., RAMSDEN, T., BIDDY, M., ALEXANDER, M., BARNHART, S., SUTHERLAND, I., VERDUZCO, L., & WALLINGTON, T. J. (2018) Current and future United States light-duty vehicle pathways: cradle-to-grave lifecycle greenhouse gas emissions and economic assessment. *Environmental science & technology*, v. 52, n. 4, p. 2392–2399.
- EPA (2005) 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=EPA&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%5C0000016%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=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=2>>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- EPE (2024). Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 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.
- FAHIMNIA, B., SARKIS, J., & DAVARZANI, H. (2015) Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International journal of production economics*, v. 162, p. 101-114.
- FAN, E., LI, L., WANG, Z., LIN, J., HUANG, Y., YAO, Y., CHEN, R., & WU, F. (2020) Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects. *Chemical reviews*, v. 120, n. 14, p. 7020-7063.
- FARIA, R., MARQUES, P., MOURA, P., FREIRE, F., DELGADO, J., & DE ALMEIDA, A. T. (2013) Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 271-287.
- FGV (2024) Fundação Getúlio Vargas. Dashboard Precificação de Carbono. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNTZkNjc0NTAtYTVjMi00OTc1LWJhZTEtYWQxY2M0YzdjMGM0IiwidCI6ImRlNGNlMThtLTUyMTQtNDA2OS04MTg4LTFiOGZiNDJlM2NjZSJ9&pageName=ReportSection8563bbab36110c9ec008>>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- GAUTO, M. A., CARAZZOLLE, M. F., RODRIGUES, M. E. P., DE ABREU, R. S., PEREIRA, T. C., & PEREIRA, G. A. G. (2023) Hybrid vigor: Why hybrids with

- sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. *Energy for Sustainable Development*, v. 76, p. 101261.
- GLENSOR, K., & MUÑOZ B, M. R. (2019) Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways. *Sustainability*, v. 11, n. 22, p. 6332.
- HAWKINS, T. R., SINGH, B., MAJEAU-BETTEZ, G., & STRØMMAN, A. H. (2013) Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of industrial ecology*, v. 17, n. 1, p. 53–64, 2013.
- HE, X., ZHANG, S., WU, Y., WALLINGTON, T. J., LU, X., TAMOR, M. A., MCELROY, M. B., MAX ZHANG, K., NIELSEN, C. P., & HAO, J. (2019) Economic and climate benefits of electric vehicles in China, the United States, and Germany. *Environmental science & technology*, v. 53, n. 18, p. 11013–11022.
- HELMERS, E., DIETZ, J., & WEISS, M. (2020) Sensitivity analysis in the life-cycle assessment of electric vs. combustion engine cars under approximate real-world conditions. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 3, p. 1241.
- HILL, N. (2020) Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through Life Cycle Assessment. Retrieved October, v. 17, p. 2022.
- HUGHES, A. E., HAQUE, N., NORTHEY, S. A., & GIDDEY, S. (2021) Platinum group metals: A review of resources, production and usage with a focus on catalysts. *Resources*, v. 10, n.9, p. 93.
- ICCT (2021) International Council on Clean Transportation. A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. Disponível em: <[www.theicct.orgcommunications@theicct.org](http://www.theicct.orgcommunications@theicct.org)>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- IEA (2023) 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.
- IEMA (2022) Instituto de Energia e Meio Ambiente. Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/produto/inventario-de-emissoes-atmosfericas-em-usinas-termelétricas>>. Acesso em: 02 ago. 2024.
- IPCC (2018) Intergovernmental Panel on Climate Change. Global warming of 1.5°C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Framing and Context. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, v. 21, p. 1–9.
- IPCC (2024) Intergovernmental Panel on Climate Change. About the IPCC. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/about/>>. Acesso em: 2 set. 2024.

- IPEA (2023) Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada. Taxa de Câmbio - R\$ / US\$ - Comercial - Venda - Média. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=31924>>. Acesso em: 22 ago. 2024.
- IVANOVA, D., BARRETT, J., WIEDENHOFER, D., MACURA, B., CALLAGHAN, M., & CREUTZIG, F. (2020) Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 9, p. 093001.
- KALLITSIS, E., KORRE, A., KELSALL, G., KUPFERSBERGER, M., & NIE, Z. (2020) Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-manganese cathodes utilising novel electrode chemistries. *Journal of Cleaner Production*, v. 254, p. 120067.
- KAMATH, D., SHUKLA, S., ARSENAULT, R., KIM, H. C., & ANCTIL, A. (2020) Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications. *Waste Management*, v. 113, p. 497-507.
- KARAASLAN, E., ZHAO, Y., & TATARI, O. (2018) Comparative life cycle assessment of sport utility vehicles with different fuel options. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, n. 2, p. 333–347.
- KARABASOGLU, O., & MICHALEK, J. (2013) Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains. *Energy Policy*, v. 60, p. 445–461.
- KAWAMOTO, R., MOCHIZUKI, H., MORIGUCHI, Y., NAKANO, T., MOTOHASHI, M., SAKAI, Y., & INABA, A. (2019) Estimation of CO<sub>2</sub> emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. *Sustainability*, v. 11, n. 9, p. 2690.
- KOROMA, M. S., BROWN, N., CARDELLINI, G., & MESSAGIE, M. (2020) Prospective environmental impacts of passenger cars under different energy and steel production scenarios. *Energies*, v. 13, n. 23, p. 6236.
- KOROMA, M. S., COSTA, D., PHILIPPOT, M., CARDELLINI, G., HOSEN, M. S., COOSEMANS, T., & MESSAGIE, M. (2022) 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.
- KOSTOPOULOS, E. D., SPYROPOULOS, G. C., & KALDELLIS, J. K. (2020) Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. *Energy Reports*, v. 6, p. 418–426.
- KUMPULAINEN, M., & SEPPÄNEN, M. (2022) Combining Web of Science and Scopus datasets in citation-based literature study. *Scientometrics*, v. 127, n. 10, p. 5613–5631.
- LAI, X., CHEN, Q., TANG, X., ZHOU, Y., GAO, F., GUO, Y., BHAGAT, R., & ZHENG, Y. (2022) Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. *Etransportation*, v. 12, p. 100169.

- LANDER, L., KALLITSIS, E., HALES, A., EDGE, J. S., KORRE, A., & OFFER, G. (2021) Cost and carbon footprint reduction of electric vehicle lithium-ion batteries through efficient thermal management. *Applied Energy*, v. 289, p. 116737.
- LI, W., BAI, H., YIN, J., & XU, H. (2016) 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.
- LI, Z., SHEN, G. Q., & XUE, X. (2014) Critical review of the research on the management of prefabricated construction. *Habitat international*, v. 43, p. 240-249.
- LIU, X., KWON, H., WANG, M., & O’CONNOR, D. (2023) 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.
- MELIN, H. E., RAJAEIFAR, M. A., KU, A. Y., KENDALL, A., HARPER, G., & HEIDRICH, O. (2021) Global implications of the EU battery regulation. *Science*, v. 373, n. 6553, p. 384–387.
- MENDOZA BELTRAN, A., COX, B., MUTEL, C., VAN VUUREN, D. P., FONT VIVANCO, D., DEETMAN, S., EDELENBOSCH, O. Y., GUINÉE, J., & TUKKER, A. (2020) 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.
- NISSAN (2024) Nissan Versa. Desafiamos o seu conceito. Disponível em: <<https://www.nissan.com.br/veiculos/modelos/novo-versa.html>>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- NORDELÖF, A., MESSAGIE, M., TILLMAN, A. M., LJUNGGREN SÖDERMAN, M., & VAN MIERLO, J. (2014) 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.
- ONAT, N. C., KUCUKVAR, M., & TATARI, O. (2015) 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.
- ONS (2024) Operador Nacional do Sistema. Geração de Energia. Histórico da Operação. Disponível em: <[https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao\\_energia.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx)>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- QIAO, Q., ZHAO, F., LIU, Z., JIANG, S., & HAO, H. (2017) Comparative study on life cycle CO<sub>2</sub> emissions from the production of electric and conventional vehicles in China. *Energy Procedia*, v. 105, p. 3584-3595.

- RAJAEIFAR, M. A., GHADIMI, P., RAUGEI, M., WU, Y., & HEIDRICH, O. (2022) Challenges and recent developments in supply and value chains of electric vehicle batteries: A sustainability perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 180, p. 106144.
- RAJAEIFAR, M. A., RAUGEI, M., STEUBING, B., HARTWELL, A., ANDERSON, P. A., & HEIDRICH, O. (2021) Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies. *Journal of Industrial Ecology*, v. 25, n. 6, p. 1560–1571.
- RAYKIN, L., MACLEAN, H. L., & ROORDA, M. J. (2012) Implications of driving patterns on well-to-wheel performance of plug-in hybrid electric vehicles. *Environmental science & technology*, v. 46, n. 11, p. 6363–6370.
- RENAULT (2024) Renault KWID. Versões e Preços. Disponível em: <[https://www.renault.com.br/veiculos-de-passeio/kwid/versoes-e-precos.html?gradeCode=ENS\\_MDL2P1SERIELIM4%2F1000](https://www.renault.com.br/veiculos-de-passeio/kwid/versoes-e-precos.html?gradeCode=ENS_MDL2P1SERIELIM4%2F1000)>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- RITCHIE, H., (2020) 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.
- ROMANO, A. B., & TACO, P. W. G. (2021) Revisão bibliométrica dos estudos referentes a veículos autônomos em revistas indexadas das bases de dados Web of Science e Scopus. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 17, n. 49, p. 172-187.
- SANTOS, J. J. C., FARIA, P. R. D., CHAVES BELISARIO, I., DOS SANTOS, R. G., & BARONE, M. A. (2024) Thermo-economic Modeling as a Tool for Internalizing Carbon Credits into Multiproduct System Analysis. *Processes*, v. 12, n. 4, p. 705.
- SCHENKER, V., OBERSCHELP, C., & PFISTER, S. (2022) Regionalized life cycle assessment of present and future lithium production for Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 187, p. 106611.
- SEABRA, J. E., MACEDO, I. C., CHUM, H. L., FARONI, C. E., & SARTO, C. A. (2011) Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 5, n. 5, p. 519–532.
- SEARS, J., ROBERTS, D., & GLITMAN, K. (2014) A comparison of electric vehicle Level 1 and Level 2 charging efficiency. In *2014 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*. IEEE. pp. 255-258.
- SEBRAE (2023) Carros elétricos: desafios e oportunidades no Brasil. 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.

- SHAFIQUE, M., AZAM, A., RAFIQ, M., & LUO, X. (2022) Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong. *Research in Transportation Economics*, v. 91, p. 101112.
- SHAFIQUE, M., & LUO, X. (2022) Environmental life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective. *Journal of Environmental Management*, v. 303, p. 114050.
- SHU, X., GUO, Y., YANG, W., WEI, K., & ZHU, G. (2021) Life-cycle assessment of the environmental impact of the batteries used in pure electric passenger cars. *Energy Reports*, v. 7, p. 2302-2315.
- SILVESTRI, L., FORCINA, A., ARCESE, G., & BELLA, G. (2020) Recycling technologies of nickel–metal hydride batteries: an LCA based analysis. *Journal of cleaner production*, v. 273, p. 123083.
- SUN, X., LUO, X., ZHANG, Z., MENG, F., & YANG, J. (2020) Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production*, v. 273, p. 123006.
- TANRIVERDI, G., BAKIR, M., & MERKERT, R. (2020) What can we learn from the JATM literature for the future of aviation post Covid-19?-A bibliometric and visualization analysis. *Journal of air transport management*, v. 89, p. 101916.
- TOYOTA (2024a) Corolla Cross – Dirigir um SUV com a qualidade Toyota não tem volta. Conheça as versões. Disponível em: <<https://www.toyota.com.br/modelos/corolla-cross>>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- TOYOTA (2024b) Corolla – Um ícone com tudo que te move. Conheça as versões. Disponível em: <<https://www.toyota.com.br/modelos/corolla-hybrid>>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- UNICA (2024) União da Indústria de Cana de Açúcar e Bioenergia. Observatório da Cana e Bioenergia, Volume comercializado por unidades certificadas. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=110>>. Acesso em: 19 jul. 2024.
- VELANDIA VARGAS, J. E., FALCO, D. G., DA SILVA WALTER, A. C., CAVALIERO, C. K. N., & SEABRA, J. E. A. (2019) 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.
- VERMA, S., DWIVEDI, G., & VERMA, P. (2022) Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 49, p. 217-222.
- WANG, J. J., CHEN, H., ROGERS, D. S., ELLRAM, L. M., & GRAWE, S. J. (2017) A bibliometric analysis of reverse logistics research (1992-2015) and opportunities for future research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 47, n. 8, p. 666-687.

- WANG, F., DENG, Y., & YUAN, C. (2020) Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles. *Journal of Cleaner Production*, v. 264, p. 121339.
- WANG, M., CAI, H., LEE, U., KAR, S., SYKORA, T., & LIU, X. (2024) *Development of R&D GREET 2023 Rev1 to Estimate Greenhouse Gas Emissions of Sustainable Aviation Fuels for 40B Provision of the Inflation Reduction Act* (No. ANL/ESIA-24/9). Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (United States).
- WANG, Y., SUN, X., WANG, B., & LIU, X. (2020) Energy saving, GHG abatement and industrial growth in OECD countries: A green productivity approach. *Energy*, v. 194, p. 116833.
- WANG, M., HAN, J., DUNN, J. B., CAI, H., & ELGOWAINY, A. (2012) 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.
- YANG, Y., OKONKWO, E. G., HUANG, G., XU, S., SUN, W., & HE, Y. (2021) On the sustainability of lithium ion battery industry—A review and perspective. *Energy Storage Materials*, v. 36, p. 186-212.
- YANG, Z., WANG, B., & JIAO, K. (2020) Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China. *Energy*, v. 198, p. 117365.

## APÊNDICE A – REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

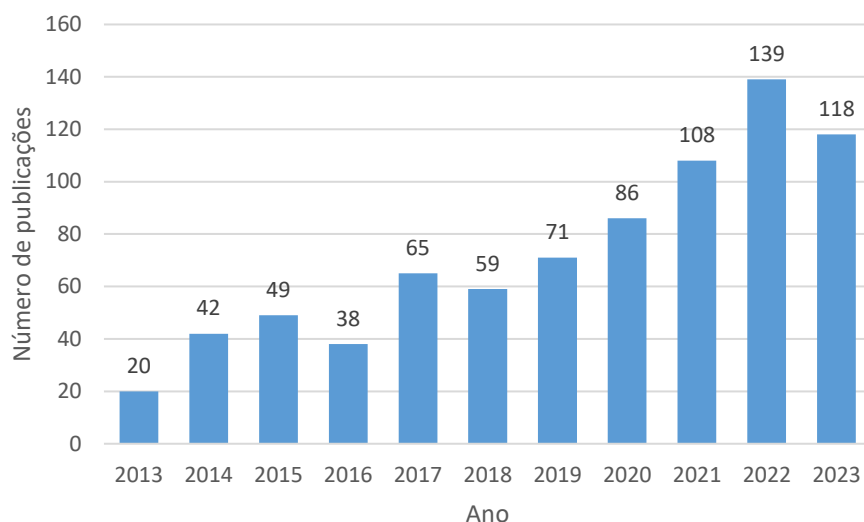
Na revisão sistemática, o primeiro aspecto avaliado foi a escolha do banco de dados. Para possibilitar a escolha, foram avaliados os materiais disponíveis nas bases de dados da *Elsevier Scopus* e da *Clarivate Analytics Web of Science* (WoS). Essas bases foram escolhidas tendo em vista a alta qualidade dos artigos, grande quantidade de publicações e impacto científico representativo, também, por isso, elas são altamente utilizadas em revisões sistemáticas e bibliométricas (KUMPULAINEN & SEPPÄNEN, 2022).

Estudos de revisão bibliométrica tendem a utilizar apenas uma base de dados, devido à complexidade técnica de combinação dos dados (CHISTOV *et al.*, 2021). O processo de unificar as bases requer uma combinação e reparo de dados que demanda grande esforço (KUMPULAINEN & SEPPÄNEN, 2022). Como exemplo, Badgi *et al.* (2023) utilizou os softwares R (pacote estatístico), Biblioshiny 2.0 e Microsoft Excel 2.0 para mesclar os dados das duas bases. Para esse trabalho foi utilizada apenas uma base de dados, contemplando aquela que se mostrou mais expressiva.

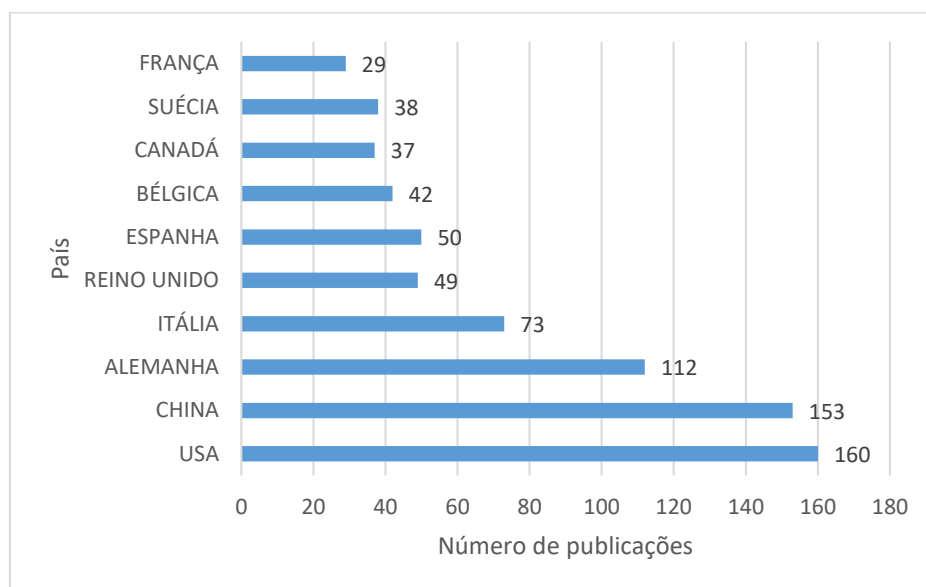
Duas perguntas de pesquisa foram testadas, são elas: (“*life cycle assessment*” AND ICEV AND BEV) e (“*life cycle assessment*” AND “*electric vehicle*”). Optou-se pela utilização da segunda, pois, quando avaliada, a primeira apresentou menor quantidade de pesquisas relacionadas às baterias, componente fundamental na ACV do tema. Diante disso, a seguinte pergunta de pesquisa foi utilizada: “*life cycle assessment*” AND “*electric vehicle*”.

Na base de dados da Scopus foram encontrados 936 documentos, os quais foram limitados para aqueles dos últimos dez anos (2013 – 2023), artigos e revisões (de conferência ou não) e escritos na língua inglesa, o que resultou na análise de 795 deles. A mesma pesquisa na base da WoS resultou em 493 documentos, que aplicados às restrições, restaram 475 deles.

Considerando que a base de dados da Scopus apresentou uma maior quantidade de documentos publicados sobre o tema, optou-se pela escolha de avaliação dos resultados apresentados nessa base. A Figura A.0.1 e a Figura A.0.2 apresentam o número de publicações por ano e por país sobre o tema.



**Figura A.0.1** Número de publicações por ano



**Figura A.0.2** Número de publicações dos dez países que mais publicaram

A partir da Figura A.0.1, é possível identificar que em dez anos, 2013 a 2022, a quantidade de trabalhos multiplicou por um fator de quase sete vezes. Isso demonstra que várias pesquisas ainda estão sendo desenvolvidas sobre o assunto, o que permite interpretar que a ciência não está completamente consolidada. Um aspecto observado e não apresentado nas figuras, é que nos anos de 2020 a 2023 a China apresentou um crescimento no número de publicações, ocupando a primeira posição nesses anos, enquanto esse país apresentou 90 documentos, o EUA publicou 72. A Figura A.0.2 apresenta os dez países que mais publicaram nos últimos dez anos, sendo que o Brasil se encontra na vigésima posição, com 13 publicações.

Tendo como conclusão de que o assunto ainda está sendo amadurecido, uma nova limitação dos resultados foi colocada, e optou-se pela avaliação dos documentos publicados entre os anos de 2020 e 2023, o que resultou em 451 documentos na base de dados da Scopus. Essa ação visa identificar quais são os últimos resultados e explorar o que há de mais recente na literatura.

Na base de dados da *Scopus*, as cinco fontes que apresentaram o maior número de publicações na língua inglesa foram: *Journal of Cleaner Production* (48 artigos), *Resources Conservation and Recycling* (24 artigos), *Sustainability Switzerland* (24 artigos), *Science of the Total Environment* (20 artigos) e *Energies* (18 artigos).

A quantidade de citações que certa publicação obteve é uma forma de avaliar o impacto que determinado artigo apresentou na comunidade acadêmica. A Tabela A.0.1 apresenta os cinco artigos mais citados na base de dados da *Scopus*, bem como indica os autores, a revista publicada, ano e número de citações.

**Tabela A.0.1** Artigos mais citados

| Título                                                                                                                     | Autores                | Revista/Conferência                   | Ano  | Citações |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------|------|----------|
| <i>Sustainable recycling technology for Li-Ion batteries and beyond: Challenges and future prospects</i>                   | Fan et al.             | <i>Chemical Society Reviews</i>       | 2020 | 775      |
| <i>Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options</i>                                      | Ivanova et al.         | <i>Environmental Research Letters</i> | 2020 | 196      |
| <i>When the background matters: Using scenarios from integrated assessment models in prospective life cycle assessment</i> | Mendoza Beltran et al. | <i>Journal of Industrial Ecology</i>  | 2020 | 118      |
| <i>Life Cycle Assessment of Lithium Nickel Cobalt Manganese Oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles</i>      | Sun et al.             | <i>Journal of Cleaner Production</i>  | 2020 | 108      |
| <i>Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective</i>     | Lai et al.             | <i>eTransportation</i>                | 2022 | 106      |

Em Fan *et al.* (2020) os autores analisam o mercado das baterias nos aspectos da economia, meio ambiente e política, com foco em avaliar se os EV são ambientalmente mais amigáveis e se economizam mais energia, quando comparados ao ICEV. Ele destaca a evolução do conhecimento das baterias íon lítio, entretanto, existe um desafio quanto à reciclagem desse componente. Dessa forma, eles propõem a estratégia do 3R (reprojetar, reutilizar e reciclar) em busca da melhoria da eficiência, do retorno econômico, do benefício ambiental e da segurança.

Ivanova *et al.* (2020) apresenta uma revisão sistemática de estudos de ACV multirregionais, publicados a partir de 2011, para consumo doméstico, o que inclui, além do transporte, alimentação, lixo, construção entre outros, a fim de determinar soluções com o mais alto potencial de redução da emissão de CO<sub>2</sub>. O transporte é o setor que apresenta o maior potencial de descarbonização, tendo como principal fator para isso a representatividade no balanço de emissões. Através do uso do modelo fixo para exploração dos contextos geográficos, técnicos e sociodemográficos, a análise apontou para que os maiores resultados, quando relacionado à frota terrestre, seria a alteração dos carros para: viver sem carro, utilizar EV e aumento do uso de transportes públicos. Os resultados para a descarbonização apresentados ficam dentro do esperado na busca pelo alcance das metas da diminuição climática (1,5 a 2°C).

Mendoza Beltran *et al.* (2020) apresenta como diferencial em seu trabalho a realização da ACV por meio do uso de duas ferramentas: o software IMAGE 3.0 que é utilizado para gerar cenários futuros e os resultados encontrados são utilizados como entrada para o inventário do ciclo de vida, por meio do software ecoinvent 3.3. A motivação dos autores se justifica pelo fato da ACV ser amplamente utilizada para tomada de decisões, nas quais é mais acertada caso sejam considerados aspectos futuros. Para testar a metodologia os autores geram alterações nos cenários de energia elétrica e avalia como afetam os resultados da avaliação para o EV e o ICE.

Sun *et al.* (2020) avalia os impactos das LIB no uso em carros de passageiros. Os autores utilizam, como dados primários, informações de dois fornecedores de LIB chineses, de dois produtores de cátodos e de duas empresas de reciclagem. Dentre as conclusões, evidenciam que a etapa de preparação dos minerais é a mais impactante, em grande parte devido à produção do cátodo. E ainda, a reciclagem tem potencial para redução e os autores apontam soluções de fabricação dos cátodos, que permitem contribuir para um menor impacto.

No mesmo contexto, Lai *et al.* (2022) faz uma revisão crítica da ACV das LIB, avaliando os tipos, padrões, métodos e desafios técnicos da avaliação. Considerando aspectos do berço ao túmulo, os autores fazem uma análise das etapas de produção, uso, utilização secundária e reciclagem. Entre as principais conclusões os autores destacam: a efetividade das ACV na avaliação ambiental e econômica, se tornando uma referência valiosa na tomada de decisão; é necessário desenvolver um ACV de todo o ciclo da LIB, rastrear os materiais desde a montante da produção e a fabricação a partir da reciclagem são essenciais no desenvolvimento sustentável; a produção tem impactos ambientais significativos e a reciclagem tem contribuição ambientais e econômicos consideráveis.

## **A.1 ANÁLISE DOS MAPAS BIBLIOMÉTRICOS**

A bibliometria é um método quantitativo que utiliza os dados da literatura científica para fazer análise (KUMPULAINEN & SEPPÄNEN, 2022). A análise bibliométrica é um método importante na análise de numerosas publicações, pois permite detectar lacunas de conhecimento, avaliar a qualidade da pesquisa e apontar novos desenvolvimentos dentro de determinado campo (CHISTOV *et al.*, 2021). Pode ser desenvolvida através do contexto escolhido pelo pesquisador, podendo ser realizada de acordo com a base científica (DIXIT & JAKHAR, 2021; ROMANO & TACO, 2021), periódicos (LI *et al.*, 2014; TANRIVERDI *et al.*, 2020), assunto (FAHIMNIA *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2017), entre outros.

O software VOSviewer foi utilizado para traçar mapas bibliométricos com base nos dados gerados pela pesquisa citada na base da Scopus.

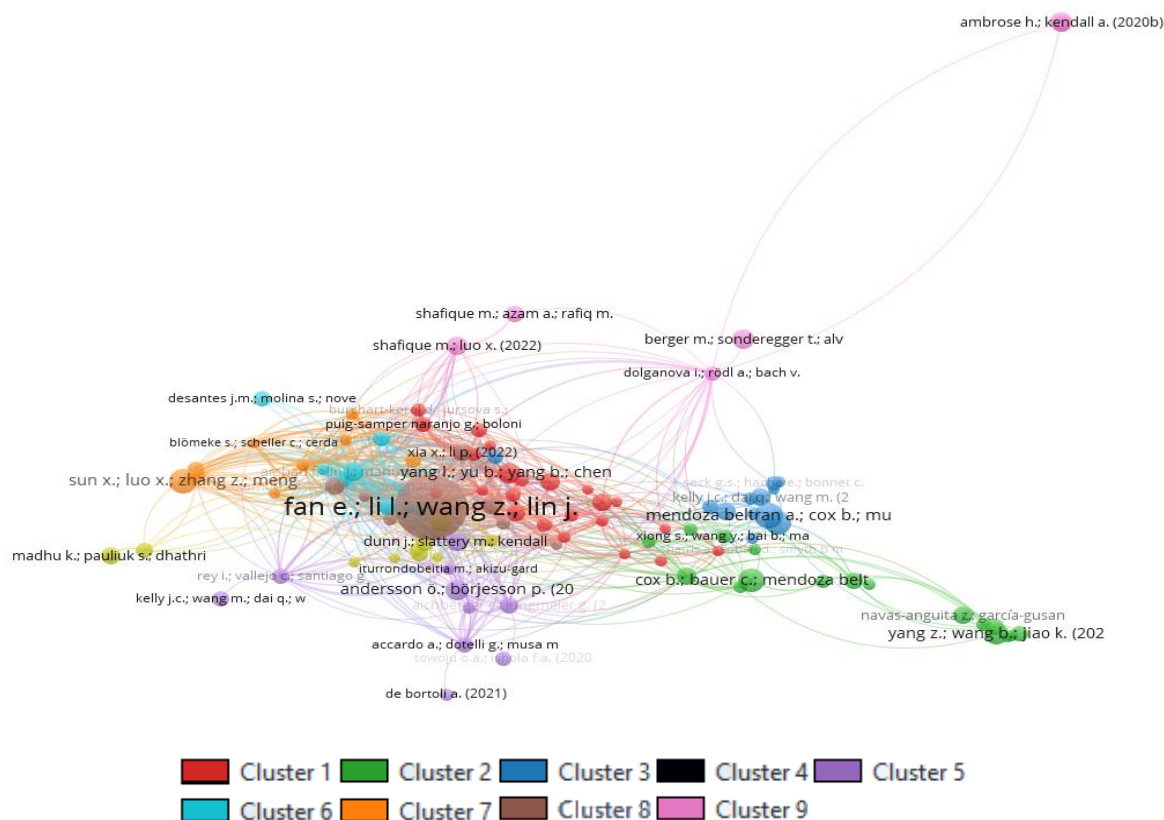
### **A.1.1. Análise dos títulos e resumos**

Por meio de mapa bibliográfico é possível identificar os termos que mais aparecem nas publicações e a relação entre esses termos. Utilizando o VOSViewer foi realizado um mapa que apresenta os termos mais relevantes contidos nos Títulos e Resumos das publicações.

O mapa dos textos foi criado a partir da aplicação da premissa que o termo deveria ocorrer, no mínimo, 25 vezes. A partir desse filtro, foram encontradas 95 palavras e o VOSViewer fez uma nova correção, selecionando os 60% mais relevantes dentre eles. Ao fim, foram identificados 57 termos, conforme Figura A.0.3.







**Figura A.05** Mapa de acoplamento bibliográfico

Foram identificados 09 clusters e para cada um foram analisados os três documentos com maior número de citações, a fim de verificar o alinhamento dos autores. Os clusters foram classificados de um a nove em ordem decrescente de quantidade de publicações.

O primeiro cluster, na cor vermelha, apresentam ACV de veículos elétricos e à combustão. Os artigos destacam que a aplicação de energias renováveis na matriz energética possibilita a melhora dos resultados dos EV, tanto no uso quanto na localidade de produção das baterias. Yang, Lai *et al.* (2021) avalia as emissões de CO<sub>2</sub>, Compostos Orgânicos Voláteis (VOC), Óxido de Nitrogênio (Nox), Material Particulado (PM) e Dióxido Sulfúrico (SO<sub>2</sub>), através de análise de ciclo de vida de BEV, PHEV e ICEV na China. Os resultados encontrados demonstram que a adoção do BEV e PHEV reduzem as emissões de CO<sub>2</sub>, VOX e Nox, e aumentam as emissões de PM e SO<sub>2</sub>. Verma *et al.* (2022) apresenta uma revisão sobre ACV e análise do custo do ciclo para as mesmas tecnologias de veículos e, também, conclui que a adoção dos veículos elétricos diminui a emissão de gases de efeito estufa, mas aumentam o impacto na toxicidade humana. Quanto ao custo, é destacado que há incertezas quanto aos valores da gasolina e da eletricidade, além de, atualmente, o custo inicial da bateria ser elevado.

Helmerts *et al.* (2020) apresenta um diferencial na análise do ciclo de vida, pois acrescentam veículos a diesel e a gás natural, além de utilizar dados de laboratório no inventário, através da eletrificação de um VW Caddy, originalmente com motor a combustão.

O segundo cluster, na cor verde, apresenta publicações de ACV com bases em custos e cenários futuros. Lander *et al.* (2021) apresenta uma solução de engenharia para implementação de um sistema de gerenciamento térmico e melhoria dos projetos das baterias. Os resultados demonstram um aumento da vida útil, redução do custo do ciclo de vida e da pegada de carbono. Cox *et al.* (2020) faz uma comparação, sob o aspecto ambiental e de custos, dos carros de passageiros atuais (2017) e futuros (2040) em diferentes cenários energéticos e como principal conclusão apresenta que a eletrificação dos motopropulsores é uma forma eficaz de redução do impacto ambiental e, na análise de custos, tendem a ser um aspecto vantajoso no futuro. Yang *et al.* (2020), além das tecnologias elétricas e de combustão, complementa com a tecnologia a hidrogênio para diferentes cenários e quilometragens na China. E assim, destaca que para a avaliação da sustentabilidade é preciso selecionar o veículo e cenário de combustível adequados, com base na quilometragem a ser percorrida.

Os documentos representados no tom azul escuro compreendem o terceiro cluster. Conforme explicado anteriormente, Mendoza Beltran *et al.* (2020b) utiliza o software IMAGE 3.0 para gerar cenários futuros e utilizar como base de dados na ACV. Lai *et al.* (2022) faz uma revisão crítica da ACV das LIB, considerando aspectos do berço ao túmulo, como a produção, uso, utilização secundária e reciclagem. Os autores destacam que a produção tem impactos ambientais significativos e a reciclagem tem contribuições ambientais e econômicas consideráveis. Rajaeifar *et al.* (2021) avalia o ciclo de vida das baterias e compara três diferentes tecnologias piro metalúrgicas na reciclagem. Os três documentos do cluster destacam a importância da geração renovável nessas análises.

O cluster quatro, amarelo, apresenta documentos relacionados com a ACV de EV, entretanto sendo mais específicos nos componentes minerais das soluções. Kallitsis *et al.* (2020) faz uma ACV para a produção de LIB na China e os resultados apontam para um potencial de aquecimento global 40% superior do que literaturas anteriores e, ainda, destaca que a diminuição da toxicidade humana ocorrerá com o uso de novos eletrodos químicos. Benitez *et al.* (2021) faz a ACV de veículo elétrico a célula de combustível e foca no processo de produção da fibra de carbono do tanque de hidrogênio, sendo este componente importante no impacto

ambiental. Hughes *et al.* (2021) fazem uma revisão sobre os recursos dos metais do grupo platinum: rutênio (Ru), ródio (Rh), paládio (Pd), ósmio (Os), irídio (Ir) e platina (Pt), com foco em produção e uso, tendo em vista o aumento do uso com a transição energética.

O cluster cinco, na cor roxa, apresenta assuntos relacionados, principalmente, à avaliação das baterias. Dunn *et al.* (2021) faz uma análise do fluxo global da economia circular das LIB usados nos VE, envolvendo a reciclagem e o impacto na disponibilidade de seus compostos químicos até o ano de 2040. Os autores ainda definem que a adoção de uma química de baixo cobalto é uma medida chave. Andersson & Börjesson (2021) apresenta uma ACV dos carros BEV, PHEV e HEV, combinados com o uso de combustível fóssil, biocombustível de primeira geração e de segunda geração. Os resultados encontrados apontam que os combustíveis renováveis têm maior potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa, portanto, os PHEV podem permitir resultados mais ambiciosos do que os BEV. Aichberger & Jungmeier (2020) faz uma revisão de 50 publicações realizadas entre os anos de 2005 e 2020 que estudam o ciclo de vida das LIB e aponta falta de transparência nas publicações, que podem gerar efeitos de superestima e subestima nas etapas do ciclo.

Os autores destacados na cor azul claro, cluster 6, fazem as avaliações dos impactos ambientais focando em soluções dos componentes químicos das baterias ou do combustível. Arshad *et al.* (2022) apresenta uma ACV do processo de produção das LIB, compara com estudos anteriores, a partir de uma análise de 80 estudos selecionados (2010-2021) e aponta a dificuldade de comparação com os resultados disponíveis. Desantes *et al.* (2020) apresenta diferenciais na ACV, ao considerar veículos com célula de combustíveis, movidos à hidrogênio, o efeito da água na emissão de gases de efeito estufa e o mix energético atual europeu. Silvestri *et al.* (2020) realiza a primeira ACV para baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH), desde o processo de produção até a reciclagem e destaca a importância da reciclagem para preservação dos recursos e redução da toxicidade humana.

Na cor laranja são apresentados os documentos do cluster 7 que trata da ACV para as baterias e carros elétricos, sobressaindo documentos que tratam da reciclagem das baterias e novas soluções de cátodos. Sun *et al.* (2020) avalia os impactos das LIB utilizando dados de empresas chinesas e, dentre as conclusões, evidenciam que a etapa de preparação dos minerais é a mais impactante, a reciclagem tem potencial para redução e apresenta soluções para os cátodos. Wang *et al.* (2020) aponta que as baterias de lítio-oxigênio (Li-O<sub>2</sub>) têm menor impacto

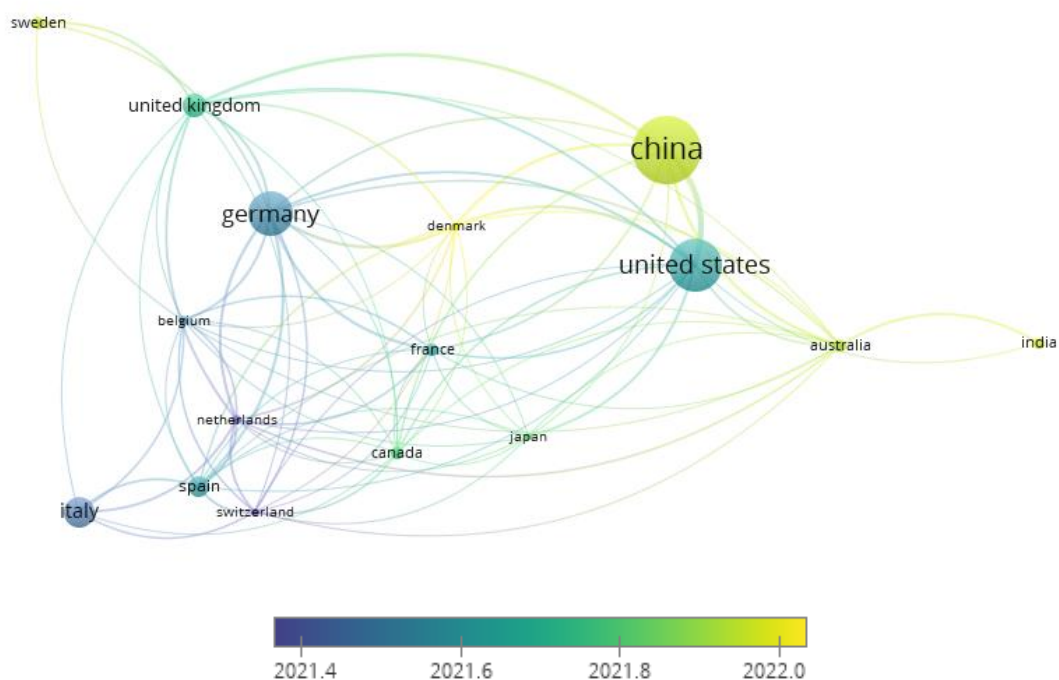
ambiental do que as de lítio-níquel-manganês-cobalto, devido a redução do uso de metais pesados e do consumo de energia na produção. Nesse mesmo caminho, Shu *et al.* (2021) avalia duas das soluções de baterias líderes de mercado,  $\text{LiFePO}_4$  e  $\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$ , apresenta impactos distintos em cada etapa do ciclo de vida, mas em todo ele a primeira demonstrou ser mais ecológica.

O cluster 8, na cor marrom, apresenta documentos que tratam do fim da vida das baterias na ACV. O mais expressivo desse grupo (FAN *et al.*, 2020) descrito entre os artigos mais citados, avalia os desafios dos impactos das baterias e as tecnologias de reciclagem. Kamath *et al.* (2020) apresenta uma análise do uso como segundo ciclo de vida em 41 cenários nos EUA, que contemplam uso residencial e no serviço público, com fotovoltaicas, e uso de pico na concessionária. Koroma *et al.* (2022) faz uma ACV da eletrificação da frota de carros, combinando cenários de mudança de mix elétrico, redução da eficiência da bateria, renovação e reciclagem.

Por fim, com apenas seis documentos, o cluster rosa apresenta documentos que conduzem estudos com cenários futuros. Berger *et al.* (2020) trata de métodos de análise de impacto do ciclo de vida, tendo como estudo o carro elétrico, e destaca a importância da avaliação dos minerais utilizados nas baterias através da recomendação do aumento do número de minerais cobertos pela avaliação e inclusão de estoques. Em Shafique *et al.* (2022) os autores fazem um estudo de caso em Hong Kong, através de uma ACV de ICEV, PHEV e BEV, para cenários de mix elétricos de 2019 a 2050. Eles revelam que, para 2050, os melhores resultados foram para o BEV, seguidos pelo PHEV a diesel, e em todos os resultados o ICEV a gasolina representou o pior impacto. Nessa mesma direção, Shafique & Luo (2022) fazem a ACV dos EV, considerando as fases de produção, transporte e uso de veículos, em 10 países. Um resultado surpreendente é que dentre EUA, RU, Suécia, Noruega, Holanda, Coreia, Alemanha, França, China e Canadá, a China apresentou os piores impactos atuais e futuro.

### **A.1.3. Análise de co-autoria entre os países**

O mapa de co-autoria entre os países permite visualizar os países que mais publicaram e a relação dos pesquisadores de mais de um país. Para gerar o mapa, foi adotada a premissa que o país deveria ter o mínimo de 10 publicações em co-autoria, o que resultou em 16 países, conforme Figura A.0.6.



**Figura A.0.6** Mapa de co-autoria entre os países

As cores do mapa apresentado estão relacionadas com a idade média das publicações dos países. O espectro de cores vai de azul, mais antigas, a amarelo, mais recentes. Conforme detalhado anteriormente a China tem sobressaído nas pesquisas relacionadas à área, o que é possível ser visualizado, por apresentar grande quantidade de publicações e mais recentes. Outros países que apresentaram publicações mais atuais foram a Dinamarca, Suécia, Austrália e Índia.

#### **A.1.4. Apontamentos da revisão bibliométrica**

Por meio da revisão bibliométrica foi possível identificar, por meio da avaliação da quantidade de publicações anual, entre 2013 e 2023, que a ciência sobre o tema ainda está sendo amadurecida.

O setor de transportes tem grande contribuição na emissão de gases de efeito estufa e a eletrificação da frota de veículos terrestres tem sido apontada como uma solução para a redução desse impacto. E, nessa transição, as baterias são componentes essenciais para que ocorra de forma sustentável. Entretanto, elas ainda apresentam desafios a serem superados.

Sobre esse componente, as dificuldades mais citadas nos artigos são: necessidade de implementação da reciclagem, redução de impactos na produção, preocupação com os recursos

esgotáveis (especialmente o cobalto), desenvolvimento de técnicas para permitir a utilização como segunda vida, aprimoramento de projeto, desenvolvimento de uma nova geração dessa peça. Além disso, vários autores destacam que a ACV nesse aspecto não está consolidada, havendo superestima e subestima dos cálculos. Diante disso verifica-se que existem lacunas na ciência das baterias.

Outra questão que é muito explorada, visando um resultado efetivo, é sobre o uso de fontes renováveis no mix elétrico. Eles impactam não só o uso da frota, como também a produção de baterias. Portanto, em longo prazo é essencial que o planejamento de governo tenha medidas efetivas para a implementação de uma fonte de geração de eletricidade mais limpa.

Nos últimos anos a China tem dominado não só o mercado de vendas, como a implementação da medida e o número de pesquisas no tema. E ainda assim, foi evidenciado por Shafique & Luo (2022), quando da ACV dos EV 10 países (EUA, RU, Suécia, Noruega, Holanda, Coreia, Alemanha, França, China e Canadá) a China apresentou os piores impactos atuais e futuro. A partir desse tipo de estudo é possível identificar a importância de avaliar cada região de forma distinta, de acordo com suas características, em cenários com dados atualizados e expectativas para próximos anos.