



TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS ENERGÉTICOS E EMISSÕES
DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO CENÁRIO BRASILEIRO
DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E DE USO DO BIOETANOL**

ENIO NASCIMENTO DE CARVALHO

Brasília, 1º de maio de 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

Título: Avaliação dos impactos energéticos e emissões dos veículos elétricos no cenário brasileiro de transição energética e de uso do bioetanol

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Antônio César Pinho Brasil Junior, Dr.
Coorientador: Prof. Augusto César de Mendonça Brasil, Dr.

Brasília - DF

2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

Avaliação dos impactos energéticos e emissões dos veículos elétricos no cenário brasileiro de transição energética e de uso do bioetanol

Enio Nascimento de Carvalho

Tese submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências Mecânicas

Aprovada por:

Prof. Antonio C. P. Brasil Junior, Dr., UnB
(Orientador)

Prof. Augusto César de Mendonça Brasil, Dr., UnB
(Coorientador)

Prof. Mario Benjamim Baptista de Siqueira, Dr., UnB
(Examinador Interno)

Profa. Flávia Consoni, Dra., Unicamp
(Examinador Externo)

Prof. Marcio de Almeida D Agosto, Dr., UFRJ
(Examinador Externo)

Brasília, 1º de maio de 2024

Ficha Catalográfica

Carvalho, Enio Nascimento de
Avaliação dos impactos energéticos e emissões dos veículos elétricos no cenário brasileiro de transição energética e de uso do bioetanol, [Distrito Federal] 2024.
145 p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutorado, Ciências Mecânicas, 2024).
Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.
1. veículos elétricos, 2. avaliação do ciclo de vida,
3. gases de efeito estufa, 4. transição energética, 5. bioetanol.
I. ENM/FT/UnB II. Título (série)

Referência Bibliográfica

Carvalho, E.N. (2024). Avaliação dos impactos energéticos e emissões dos veículos elétricos no cenário brasileiro de transição energética e de uso do bioetanol. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Publicação ____/2024, ENM/ FT/ Universidade de Brasília, Brasília-DF, 145.p.

Cessão de Direitos

Autor: Enio Nascimento de Carvalho

Título: Avaliação dos impactos energéticos e emissões dos veículos elétricos no cenário brasileiro de transição energética e de uso do bioetanol

Grau: Doutor Ano: 2024

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

Enio Nascimento de Carvalho

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela graça e direção em todos os momentos,

Agradeço à minha esposa Polyanna por todo o suporte e paciência,

Agradeço ao meu filho Daniel pelo carinho,

Aos meus pais pela inspiração,

Agradeço aos profs. Antônio Brasil e Augusto Brasil pela confiança e orientação,

Agradeço aos amigos do CNPq pela motivação para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O setor de transportes se destaca no cenário mundial com parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa, atualmente cerca de 25% das emissões mundiais. Na conjuntura mundial de transição energética associada às mudanças da matriz para fontes renováveis, a eletrificação da mobilidade se mostra como uma das alternativas no sentido da mitigação dos impactos do aquecimento global. No cenário brasileiro, o bioetanol é amplamente utilizado em veículos flex-fuel e corresponde a cerca de 35% do total da energia primária dos veículos leves. Além disso, o mix de geração de eletricidade do país compreende cerca de 83% de fontes renováveis, compostas basicamente por fontes hidráulicas, eólicas e biomassa, sendo razoável considerar a eletrificação do setor de transportes como uma das alternativas no sentido da sustentabilidade. O presente estudo pretende contribuir para o planejamento de políticas públicas no sentido da redução das emissões de gases de efeito estufa, ao analisar o potencial de aquecimento global relacionado ao ciclo de vida dos veículos leves de passageiros no cenário da matriz elétrica brasileira e uso de biocombustíveis, bem como, por meio da projeção de cenários da frota brasileira e inclusão de veículos elétricos e híbridos no longo prazo. Nesse sentido, foram utilizadas metodologias estatísticas aplicadas a séries históricas de dados e algoritmos de regressão para estimar a frota, além da abordagem de avaliação do ciclo de vida aplicada à fabricação e uso dos veículos e produção dos combustíveis visando estimar o potencial de aquecimento global. Os resultados da análise comparativa mostraram que os veículos com motores à combustão interna e híbridos abastecidos a bioetanol apresentaram as menores emissões por quilômetro rodado, em comparação aos veículos elétricos a bateria. A longo prazo, o cenário com maior participação do bioetanol se mostrou mais favorável à redução das emissões ao apresentar redução das emissões anuais em cerca de 53% no ano de 2050 em comparação ao ano de 2020. O cenário de maior eletrificação da frota se mostrou promissor em relação à mitigação das emissões com redução das emissões de gases de efeito estufa da frota em até 6% no ano de 2050. De uma forma geral, os resultados indicaram que investimentos voltados à ampliação do uso do bioetanol, bem como, a eletrificação da frota se mostraram como um caminho promissor no sentido da transição energética para fontes renováveis e voltada a descarbonização do setor de transportes no Brasil.

Palavras-chave: veículos elétricos, avaliação do ciclo de vida, gases de efeito estufa, transição energética, bioetanol.

ABSTRACT

The transportation sector stands out on the world stage with a significant share of greenhouse gas emissions, currently around 25% of global emissions. In the global context of energy transition associated with changes in the matrix towards renewable sources, the electrification of mobility appears to be one of the alternatives for mitigating the impacts of global warming. In Brazil, bioethanol is widely used in flex-fuel vehicles and accounts for around 35% of the total primary energy of light vehicles. In addition, the country's electricity generation mix comprises around 83% renewable sources, made up basically of hydroelectric, wind and biomass sources, and it is reasonable to consider the electrification of the transportation sector as one of the alternatives towards sustainability. This study aims to contribute to the planning of public policies to reduce greenhouse gas emissions by analyzing the global warming potential related to the life cycle of light passenger vehicles in the scenario of the Brazilian electricity matrix and the use of biofuels, as well as by projecting scenarios for the Brazilian fleet and the inclusion of electric and hybrid vehicles in the long term. To this end, statistical methodologies applied to historical data series and regression algorithms were used to estimate the fleet, in addition to the life cycle assessment approach applied to the manufacture and use of vehicles and the production of fuels in order to estimate the potential for global warming. The results of the comparative analysis showed that vehicles with internal combustion engines and hybrids fueled by bioethanol had the lowest emissions per kilometer driven compared to battery electric vehicles. In the long term, the scenario with a greater share of bioethanol proved to be more favorable to reducing emissions by reducing annual emissions by around 53% in 2050 compared to 2020. The scenario with greater electrification of the fleet proved promising in terms of mitigating emissions, with a reduction in greenhouse gas emissions from the fleet of up to 6% in 2050. Overall, the results indicate that investments aimed at expanding the use of bioethanol, as well as electrification of the fleet, are a promising path towards the energy transition towards renewable sources and decarbonization of the transport sector in Brazil.

Keywords: Electric vehicles, life cycle assessment, greenhouse gas emissions, energy transition, bioethanol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais Tipos de Veículos Elétricos e Híbridos	31
Figura 2 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido em série	33
Figura 3 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido em paralelo.....	33
Figura 4 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido Power-split	34
Figura 5 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido Série-paralelo	35
Figura 6 – Configuração do grupo motopropulsor de um veículo elétrico a bateria.....	36
Figura 7 - Modelo básico de uma célula de hidrogênio	37
Figura 8 – Configuração do grupo motopropulsor de um veículo FCEV	37
Figura 9 – Venda anual de novos veículos no Brasil (ANFAVEA, 2022).....	42
Figura 10 - Número de veículos importados e exportados (ANFAVEA, 2022).....	45
Figura 11 - Representação Esquemática do Macroprocesso de Simulação.....	51
Figura 12 - Projeção de crescimento da população (IBGE, 2022)	52
Figura 13 - Série histórica Produto Interno Bruto do Brasil (BACEN, 2023)	53
Figura 14 – Vendas anuais de novos veículos por tipo de combustível (ANFAVEA, 2022) ..	54
Figura 15- Curva: inclusão de novos veículos versus PIB per capita (Autoria própria).....	55
Figura 16 - Treino do modelo: vendas de novos veículos (Autoria própria)	56
Figura 17 - Curva de sucateamento de veículos ajustada (MMA, 2013)	57
Figura 18 - Intensidade de uso dos veículos (CETESB, 2013)	58
Figura 19 - Curva de probabilidades de vida útil dos veículos	59
Figura 20 - Cenários de Inserção dos Veículos Elétricos (Autoria própria)	62
Figura 21 - Cenários de Inserção dos Veículos Híbridos (Autoria própria).....	62
Figura 22 - Limites do sistema em estudo.....	64
Figura 23 - Fluxograma metodologia Well-to-Wheel (adaptado de Sheng et al., 2021)	65
Figura 24 - Área ampliada de plantio da cana-de-açúcar (Adaptado de: Bordonal et al., 2018)	67
Figura 25 - Projeção da oferta total de bioetanol no Brasil até 2031 (EPE/MME, 2021).....	69

Figura 26 - Participação energética do bioetanol em veículos leves (adaptado de ANP, 2022)	70
Figura 27 - Limites do sistema em estudo para a produção do etanol.....	71
Figura 28 - Projeção da geração elétrica: PNE 2050 (MME/EPE, 2020)	74
Figura 29 - Perfil padrão de velocidade - FTP75 (EPA, 2022)	76
Figura 30 – Principais forças atuantes no movimento veicular linear.....	77
Figura 31 – Principais etapas dos processo de reciclagem por pirometalurgia (adaptado de Enrique & Jorges, 2022).....	85
Figura 32 - Principais etapas dos processo de reciclagem por hidrometalurgia (adaptado de Enrique & Jorges, 2022).....	86
Figura 33 - Projeção da frota de veículos em cenários de crescimento do PIB	88
Figura 34 - Variação das emissões da fabricação em função da vida útil do veículo	89
Figura 35 - Variação do consumo energético em função do coeficiente de arrasto aerodinâmico	90
Figura 36 – Fatores de emissão na produção do bioetanol e gasolina.....	91
Figura 37 - Emissões da etapa WTT considerando a variação dos fatores de emissão na produção do bioetanol	92
Figura 38 - Cenário BAU: número de veículos vendidos por tipo.....	94
Figura 39 - Cenário Hibridização: número de veículos vendidos por tipo.....	95
Figura 40 - Cenário Eletrificação: número de veículos vendidos por tipo.....	96
Figura 41 - Cenário BAU: número de veículos por tipo (milhões/ano)	97
Figura 42 - Cenário Hibridização: número de veículos por tipo (milhões/ano).....	98
Figura 43 - Cenário de Eletrificação: número de veículos por tipo (milhões/ano)	99
Figura 44 – Consumo energético por tipo de veículo (WTW).....	100
Figura 45 - Previsão do consumo de eletricidade pela frota de BEV nos cenários.....	102
Figura 46 – Projeção do consumo energético nos cenários (WTW).....	103
Figura 47 – Emissões de gases efeito estufa na produção das partes principais de cada veículo no cenário da indústria brasileira.....	105

Figura 48 – Recuperação de emissões pelos métodos de reciclagem – Pirometalurgia e Hidrometalurgia.....	107
Figura 49 – Potencial de redução de emissões nos cenários com a adoção da reciclagem por hidrometalurgia.....	108
Figura 50 - Potencial de aquecimento global de diferentes veículos e combustíveis por km	110
Figura 51 - Projeção do Potencial de Aquecimento Global em cenários de fabricação dos veículos.....	112
Figura 52 - Projeção do potencial de aquecimento global em cenários de uso de veículos e produção de combustíveis (WTW).....	113
Figura 53 - Potencial de Aquecimento Global da frota em cenários de fabricação e uso dos veículos.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gases de efeito estufa (UNFCCC, 1997 e Protocolo G., 2023)).....	38
Tabela 2 – Correlações de variáveis em relação à venda de novos veículos (Autoria própria)	54
Tabela 3 - Principais estimativas de vida útil média dos veículos	58
Tabela 4 - Percentual das vendas de veículos por tipo de combustível (ANFAVEA, 2022)...	60
Tabela 5 – Emissões e consumo energético nas etapas de produção do bioetanol	72
Tabela 6 - Principais referências sobre fatores de emissão na produção do bioetanol e gasolina no Brasil.....	73
Tabela 7 - Propriedades dos Combustíveis (ANP, 2022a)	73
Tabela 8 - Fatores de emissão na geração elétrica por fonte (Barros et al., 2018).....	75
Tabela 9 - Parâmetros utilizados no cálculo do consumo energético por modelo de veículo..	78
Tabela 10 - As eficiências energéticas dos diferentes tipos de veículos	78
Tabela 11 - Consumo energético dos diferentes modelos de veículos	79
Tabela 12 - GWP na manufatura dos veículos	80
Tabela 13 - Demanda de Energia Acumulada (DEA) do ciclo fabricação (Yazdanie et al., 2016)	81
Tabela 14 - Características dos principais tipos de baterias (Sanguesa et al., 2021).....	82
Tabela 15 - Principais Classes de Bateria de Lítio-íon (Yudhistira et al., 2022)	83
Tabela 16 - Principais referências para a vida útil média de baterias de Lítio-íon.....	83
Tabela 17 – Recuperação de Energia Acumulada - Ciclos de Reciclagem.....	87
Tabela 18 - Coeficientes de arrasto dos principais modelos de veículos vendidos no Brasil (CarrosNaWeb, 2024).....	90
Tabela 19 - Cenário BAU: frota de veículos (milhões/ano).....	98
Tabela 20 - Cenário HYB: frota de veículos (milhões/ano).....	98
Tabela 21 - Cenário ELE: frota de veículos (milhões/ano).....	99
Tabela 22 - Comparativo de emissões na produção dos veículos em diferentes países	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –Principais referências na avaliação energética e de emissões de veículos	30
Quadro 2 - Características das políticas voltadas à indústria automotiva (adaptado de Pascoal et al., 2022).....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
COP	Conferência das Partes - órgão das Nações Unidas sobre mudanças climáticas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Agência Internacional de Energia
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
MDIC	Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério das Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SINDIPEÇAS	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área frotal do veículo
a	Aceleração do veículo
BAU	Cenário business-as-usual
BEV	Veículos elétricos a bateria
c_{arr}	Coefficiente de arrasto
c_{rr}	Coefficiente de resistência ao rolamento
DEA	Demanda de energia acumulada
e	Bioetanol
E100	Cenário bioetanol 100%
E50	Cenário bioetanol 50%
ELE	Cenário de eletrificação da frota
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EV	Veículos elétricos
F_{ace}	Força de aceleração
F_{arr}	Força de arrasto aerodinâmico
F_{inc}	Força de inclinação
F_{rol}	Força de rolamento
g	Aceleração da gravidade
g	Gasolina
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	Potencial de aquecimento global
HEV	Veículos elétricos híbridos
HYB	Cenário de hibridização da frota
ICE	Veículo com motor de combustão interna
ACV	Avaliação do ciclo de vida
m	Massa
MAN	Manufatura
MUT	Mudança no uso da terra
NMC	Baterias lítio-íon do grupo níquel-mangânês-cobalto
PA	Percentual de adoção do mercado
P_{ace}	Potência requerida para a aceleração do veículo
PIB	Produto Interno Bruto
P_{inc}	Potência requerida para superar a inclinação do veículo
PS	Percentual de saturação do mercado

P_{tot}	Potência total requerida nas rodas
P_{arr}	Potência requerida para superar o arrasto ar
P_{rol}	Potência requerida para superar a resistência ao rolamento
S	Parcela de veículos não sucateados
SIN	Sistema Interligado Nacional
t	Tempo
TTW	tank-to-wheel
v	Velocidade do veículo
WTT	well-to-tank
WTW	well-to-wheel
ρ	Densidade do ar
θ	Ângulo de inclinação da estrada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	20
1.2	MOTIVAÇÃO.....	21
1.3	OBJETIVOS.....	22
1.3.1	Objetivos específicos.....	23
1.4	ESTADO DA ARTE.....	23
1.4.1	Impactos ambientais e energéticos da inserção de veículos elétricos.....	23
1.4.2	Avaliação do ciclo de vida (ACV) da fabricação dos veículos.....	26
1.4.3	Avaliação do ciclo de vida dos combustíveis.....	28
1.5	TIPOS DE VEÍCULOS LEVES DE ACORDO COM O GRUPO MOTOPROPULSOR.....	31
1.5.1	Veículos Híbridos (HEV).....	31
1.5.1.1	<i>Conjunto motopropulsor híbrido em série.....</i>	<i>32</i>
1.5.1.2	<i>Conjunto motopropulsor híbrido em paralelo.....</i>	<i>33</i>
1.5.1.3	<i>Conjunto motopropulsor híbrido Power-split.....</i>	<i>33</i>
1.5.1.4	<i>Conjunto motopropulsor série-paralelo.....</i>	<i>34</i>
1.5.2	Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (PHEV).....	35
1.5.3	Veículo Elétrico a Bateria (BEV).....	35
1.5.4	Veículos Elétricos a Célula de Combustível (FCEV).....	36
1.6	EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....	38
2.	POLÍTICAS PÚBLICAS DO SETOR AUTOMOTIVO NO BRASIL.....	40
2.1	UM BREVE HISTÓRICO DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA NACIONAL.....	40
2.2	POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O SETOR AUTOMOTIVO NO BRASIL.....	42
2.2.1	Plano Nacional da Indústria Automobilística (1957).....	42
2.2.2	Programa Befiex (1960 e 1970).....	43

2.2.3	Abertura Comercial Brasileira do Setor de Automóveis (1990)	43
2.2.4	Novo Regime Automotivo Brasileiro (1995)	44
2.2.5	Inovar-Auto (2012).....	45
2.2.6	Rota 2030 (2018)	46
2.2.7	Programa MOVER – Mobilidade Verde e Inovação (2023).....	48
2.2.8	Perspectivas para as políticas públicas no setor automotivo	48
3.	METODOLOGIA.....	51
3.1	DADOS DE ENTRADA E CONSIDERAÇÕES INICIAIS	51
3.2	PROJEÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS	53
3.3	REGISTROS DE NOVOS VEÍCULOS.....	54
3.4	CURVA DE SUCATEAMENTO DE GOMPERTZ	56
3.5	INTENSIDADE DE USO ANUAL DOS VEÍCULOS E VIDA ÚTIL MÉDIA.....	57
3.6	CENÁRIOS DE INSERÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	59
3.7	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	63
3.7.1	Fase de Operação: Produção e Consumo de Combustível e Geração de Energia Elétrica (Well-to-Wheel)	64
3.7.2	Produção do bioetanol: Análise Well-to-Tank (WTT).....	65
3.7.2.1	<i>Produção do bioetanol no Brasil</i>	66
3.7.2.2	<i>A produção do bioetanol e o uso da terra</i>	66
3.7.2.3	<i>O Programa Renovabio e as perspectivas de produção do bioetanol</i>	68
3.7.2.4	<i>O uso do bioetanol nos veículos leves e a definição dos limites do sistema</i>	69
3.7.3	Geração de Energia Elétrica: Análise Well-to-Tank (WTT).....	73
3.7.4	Consumo de Combustível: Análise Tank-to-Wheel (TTW).....	75
3.7.4.1	<i>O Ciclo Padrão de Condução</i>	75
3.7.4.2	<i>Forças Atuantes no Movimento Veicular</i>	76
3.7.5	Fase de manufatura dos veículos	79
3.7.5.1	<i>Baterias de Lítio-íon</i>	82

3.7.5.2	<i>Reciclagem da Bateria de Lítio-íon</i>	83
4.	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	88
4.1	PROJEÇÃO DA FROTA DE VEÍCULOS EM CENÁRIOS DE VARIAÇÃO DO PIB	88
4.2	VIDA ÚTIL DOS VEÍCULOS EM QUILOMETROS.....	89
4.3	COEFICIENTES DE ARRASTO AERODINÂMICO E CONSUMO ENERGÉTICO.....	90
4.4	FATORES DE EMISSÃO NA PRODUÇÃO DO BIOETANOL.....	91
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
5.1	PROJEÇÕES DOS LICENCIAMENTOS DE NOVOS VEÍCULOS POR TIPO... 94	
5.2	PROJEÇÃO DA FROTA BRASILEIRA.....	96
5.3	CONSUMO ENERGÉTICO NA PRODUÇÃO (WTT) E USO (TTW) DOS COMBUSTÍVEIS POR DIFERENTES VEÍCULOS.....	100
5.4	IMPACTO NA DEMANDA DA GERAÇÃO ELÉTRICA NO USO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS EM CENÁRIOS DE INSERÇÃO.....	101
5.5	CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL NO USO DOS VEÍCULOS (TTW) E PRODUÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS (WTT) EM CENÁRIOS DE INSERÇÃO.....	102
5.6	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL NA FABRICAÇÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE VEÍCULOS.....	104
5.7	POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES PELA RECICLAGEM DAS BATERIAS.....	106
5.8	POTENCIAL DE EMISSÕES EM CADA TIPO DE VEÍCULO.....	108
5.9	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DA FABRICAÇÃO DE VEÍCULOS EM CENÁRIOS.....	111
5.10	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL EM CENÁRIOS DE USO DE VEÍCULOS E PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEL.....	113
5.11	POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL NA FABRICAÇÃO E USO DOS VEÍCULOS.....	114
6.	CONCLUSÃO.....	117

6.1	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	121
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	121
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE DA SIMULAÇÃO	134
	APÊNDICE B: SÉRIES HISTÓRICAS E DADOS DE ENTRADA	135
	APÊNDICE C: GRÁFICO GWP TOTAL NOS CENÁRIOS	136
	APÊNDICE D: GRÁFICO POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DA PIROMETALURGIA NOS CENÁRIOS.....	137
	APÊNDICE E: GRÁFICO POTENCIAL DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DA HIDROMETALURGIA NOS CENÁRIOS	138
	APÊNDICE F: GRÁFICO CONSUMO ENERGÉTICO NA PRODUÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS E USO DOS VEÍCULOS NOS CENÁRIOS	139
	APÊNDICE G: PROJEÇÃO EMISSÕES GEE NA PRODUÇÃO E USO DOS VEÍCULOS E COMBUSTÍVEIS E POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DA RECICLAGEM DA BATERIA	140
	APÊNDICE H: PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO CENÁRIO DE MAIOR ELETRIFICAÇÃO	141
	APÊNDICE I: CONSUMO ENERGÉTICO E EMISSÕES POR TIPO DE VEÍCULO POR QUILOMETRO RODADO	142
	APÊNDICE J: COMPOSIÇÃO DE CÉLULAS DE BATERIA DE LÍTIO-ÍON (MOHR ET AL., 2020)	143
	APÊNDICE K: PROCESSAMENTO PIROMETALÚRGICO DE BATERIAS DE LÍTIO: DADOS DE ENTRADA E SAÍDA POR TONELADA DE BATERIA (FISHER ET AL., 2006).....	144
	APÊNDICE L: PROCESSAMENTO HIDROMETALÚRGICO DE BATERIAS DE LÍTIO: DADOS DE ENTRADA E SAÍDA POR TONELADA DE BATERIA (FISHER ET AL., 2006).....	145

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As emissões de gases de efeito estufa e seu impacto no clima global têm desencadeado uma série de medidas políticas em níveis internacionais. O Acordo de Paris, um marco crucial nesse cenário, estabeleceu metas ambiciosas para lidar com esse desafio complexo. O objetivo principal do Acordo de Paris é limitar o aumento da temperatura global a um máximo de 2°C acima dos níveis pré-industriais até o ano de 2050 (UNFCCC, 2015). Essa meta foi estabelecida com base em evidências científicas que indicam os impactos devastadores que um aumento maior poderia ter sobre o clima, ecossistemas e comunidades humanas em todo o mundo. Para alcançar esse objetivo, são necessárias medidas significativas e coordenadas para reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa em todos os setores da economia global.

O setor de transporte global está inserido neste contexto e é atualmente responsável por cerca de 25% das emissões de gases de efeito estufa e por cerca de 35% do consumo de energia (IEA, 2020), proveniente principalmente do uso de combustíveis fósseis em motores de ciclo de combustão interna. Apesar do visível desenvolvimento tecnológico dos motores a combustão interna nos últimos tempos, sabe-se que a eficiência veicular raramente ultrapassa 29% para o ciclo Otto e 48% para o Diesel (Kobayashi et al., 2009), o que pode representar uma vantagem comparativa aos veículos elétricos a bateria (BEV), tipicamente com eficiência energética próxima a 80%. Além disso, os veículos elétricos apresentam outras vantagens em relação aos convencionais com motorização a combustão interna, como a ausência de emissões pelo tubo de descarga e baixo ruído, o que pode contribuir para a redução da poluição atmosférica e sonora nos centros urbanos, além do baixo custo de manutenção, fatores que tem contribuído para a expansão de sua participação no mercado de veículos.

Por outro lado, sendo os veículos elétricos totalmente dependentes da eletricidade, a redução das emissões de gases de efeito estufa por meio da expansão da eletromobilidade depende da medida em que a eletricidade é convertida a partir de fontes renováveis, uma vez que os combustíveis fósseis utilizados na geração de eletricidade podem ter efeitos negativos aos indicadores de emissões de gases de efeito estufa, o que altera o foco da geração de eletricidade para a expansão do uso de fontes de energia renováveis (Sheng et al., 2021).

No cenário brasileiro, o mix de geração de energia elétrica é majoritariamente composto por fontes renováveis, cerca de 84%, destacando-se as fontes hidráulicas, eólicas e

biomassa, que atualmente representam uma participação respectivamente de 65%, 9% e 9% da matriz, e ainda com grande potencial a ser explorado nas próximas décadas. A matriz energética do setor de transportes é composta por cerca de 25% de fontes renováveis, devido à participação dos biocombustíveis, com destaque para o etanol da cana-de-açúcar, que representa cerca de 43% do consumo de veículos leves no Brasil (EPE, 2020).

1.2 **Motivação**

Diante do cenário inicialmente apresentado, os acordos voltados à mitigação dos efeitos do aquecimento global levaram à pactuação de metas de descarbonização aos países signatários, por meio de políticas públicas voltadas a propor soluções para o alcance dos objetivos comuns de acordo com a particularidade de cada estado. Especificamente, para o setor de transportes terrestres por veículos leves de passageiros, as soluções a médio e longo prazo tem sido apontadas na direção da eletrificação e da substituição da matriz de combustíveis fósseis por renováveis.

A União Europeia tem implementado várias estratégias para a descarbonização do setor dos transportes como parte de seus esforços para combater as mudanças climáticas e atingir suas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. As soluções apontadas passam pela promoção da aquisição de veículos elétricos por meio de incentivos fiscais, desenvolvimento da infraestrutura de carregamento, regulamentações mais rígidas para as emissões dos veículos convencionais, bem como, incentivos ao desenvolvimento e ao uso de biocombustíveis sustentáveis e hidrogênio verde, como alternativas aos combustíveis fósseis. Recentemente, a Comissão Europeia aprovou a regulamentação legal, a qual, exigirá que novos veículos vendidos a partir de 2030 apresentem 55% menos emissões de CO₂ e a partir de 2035, zero emissões de CO₂ pelo cano de descarga, em comparação aos níveis de 2021, medida que restringirá o uso de veículos com motores à combustão interna.

Nos Estados Unidos da América, as medidas para a mitigação das emissões variam, a depender do estado da federação, porém, de uma forma geral as iniciativas têm sido adotadas no sentido de aumentar os padrões de eficiência energética e de redução de emissões dos veículos leves, bem como, incentivos fiscais ao consumidor para à adoção de veículos mais eficientes do ponto de vista energético, como, veículos elétricos e híbridos. No cenário americano, a produção dos biocombustíveis tem sido motivada principalmente pela necessidade de redução da dependência do petróleo e pelo apoio ao setor agrícola do país, uma vez que a

produção do etanol do milho, tem gerado discussões sobre a competição com a produção de alimentos e mesmo sobre o seu impacto ambiental.

No Brasil, a eletrificação da frota de veículos enfrenta dilemas, por um lado, sabe-se que a eletrificação do conjunto automotivo em circulação pode contribuir no sentido a redução da pegada de carbono, desde que a avaliação de toda a cadeia produtiva seja considerada e que se demonstre de forma efetiva a redução das emissões globais. Por outro lado, a literatura científica destaca pontualmente fatores que poderão impactar na escolha, tais como, a alta pegada de carbono na produção das baterias Lítio-íon, a composição das fontes primárias da matriz de geração elétrica (renovável ou não renovável), bem como, os parâmetros de origem energética e estrutural, como a demanda adicional na geração elétrica, a sobrecarga da rede em razão do horário de pico de carregamento, a baixa autonomia dos veículos e a necessidade de investimento significativos em infraestrutura de carregamento.

Em outra abordagem, a ampliação do uso dos bioetanol tem sido apontada como uma alternativa à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, por contar com uma cadeia produtiva outrora desenvolvida e implementada no país, em especial, após o lançamento dos veículos flex-fuel. Entretanto, existem controvérsias quanto ao nível de sustentabilidade da produção deste biocombustível, que mais uma vez depende de uma avaliação criteriosa de toda a cadeia produtiva, uma vez que estudos desenvolvidos no cenário nacional, mostram possíveis gargalos relacionados aos impactos ambientais no processo de produção agrícola, em mudanças de uso da terra (deflorestamento), bem como, em função de emissões indiretas pelo uso da terra e substituição da produção de alimentos pela produção dos biocombustíveis.

A literatura científica de análise desta conjuntura no Brasil se mostra muito restrita, resultando em limitações ao planejamento de ações fundamentadas cientificamente por parte dos tomadores de decisão. Nesse contexto, o presente estudo pretende apontar alternativas para a descarbonização do transporte terrestre por veículos leves de passeio, dentro das particularidades e vantagens competitivas do cenário brasileiro, de forma a contribuir com o planejamento de políticas públicas voltadas à mitigação dos efeitos do aquecimento global.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo a análise comparativa do impacto da eletrificação da frota de veículos leves no consumo energético e no potencial de aquecimento global (GWP), considerando as alternativas tecnológicas atuais dos veículos com motores à

combustão interna, elétrico a bateria e híbrido, no cenário brasileiro de transição da matriz energética e de uso do bioetanol no setor de transportes.

1.3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Projetar a frota brasileira de veículos leves a longo prazo (2023-2050);
- Estimar a inserção dos veículos elétricos e híbridos na frota no cenário brasileiro de longo prazo;
- Estimar os impactos energéticos da inserção de veículos elétricos no cenário brasileiro de longo prazo;
- Estimar os impactos da inserção dos veículos elétricos nas emissões de gases de efeito estufa;
- Realizar uma análise comparativa do Potencial de Aquecimento Global das configurações veículos leves em estudo, com diferentes combustíveis.

1.4 Estado da arte

Estudos recentes ao redor do mundo têm focado no impacto da inserção dos veículos elétricos. Os principais serão apresentados nas próximas seções.

1.4.1 Impactos ambientais e energéticos da inserção de veículos elétricos

Alguns estudos têm se concentrado nos impactos ambientais e energéticos devido à inserção dos veículos elétricos. Schill & Gerbaulet (2015) estudaram o impacto em cenários futuros dos veículos elétricos no sistema de geração elétrica da Alemanha, ao utilizarem um modelo numérico para simular o despacho das usinas de geração elétrica e o carregamento dos veículos. Este estudo apresentou dois cenários para a frota de veículos alemã em 2020, cujos estoques de 0,4 e 0,5 milhão de veículos elétricos na frota, representaria a demanda adicional de 0,1% a 0,2% do consumo total de energia elétrica. A projeção mostrou que no ano de 2030, o estoque de 3,7 e 4,8 milhões de veículos elétricos demandaria o consumo adicional de 1,3% a 1,6% da demanda total.

Em estudo desenvolvido por Keshavarzmohammadian et al. (2017), a avaliação do impacto das emissões de veículos elétricos leves no setor de transportes nos Estados Unidos da América, no período de 2017 a 2050, foi desenvolvida por meio de um modelo de otimização linear (ANSWER-MARKAL) aplicado ao sistema energético nacional com a utilização de dados da Agência de Proteção Ambiental (EPA), considerando o ciclo de vida dos veículos

desde a fabricação ao uso. Os resultados mostraram que em um cenário otimista, onde os veículos elétricos a bateria (BEV) corresponderiam a 15% e 47% da frota em 2030 e 2050, respectivamente, haveria uma redução nas emissões de gases de efeito estufa da ordem de 16% e 36% no setor de transporte, o que corresponderia a reduções de emissões de 5% e 9% em toda a economia dos EUA.

Miri et al. (2021) propuseram uma metodologia para modelar o consumo energético de veículos elétricos, baseada na simulação numérica de um modelo de veículo disponível no mercado (BMW i3). O modelo desenvolvido em software MATLAB/Simulink inclui a simulação do conjunto motopropulsor, a dinâmica longitudinal do veículo e um modelo de motorista que representa o comportamento humano. Os resultados da simulação mostraram consumos de 158 a 176 Wh/km, considerando o perfil de velocidade padrão americano. O modelo foi validado em relação aos valores de consumo de energia publicados que demonstraram um nível satisfatório de precisão com 2% a 6% de erro entre a simulação e os resultados experimentais de testes.

Um estudo comparativo dos efeitos energéticos e de emissões, em função da inserção de veículos elétricos (BEV), híbridos (PHEV) e a célula de combustível a hidrogênio (FCEV) nos mercados australiano e neozelandês foi desenvolvido por Sheng et al. (2021). Os autores fizeram uso da metodologia Well-to-wheel do ciclo de vida, com vistas a analisar os impactos das emissões de gases de efeito estufa e o consumo energético nas etapas de produção dos combustíveis e uso dos veículos. Os resultados mostraram que, em termos de consumo de energia, os veículos elétricos a bateria (BEV) teriam um desempenho melhor do que outros tipos nos países em estudo. Os autores concluíram que, em termos das emissões de gases de efeito estufa, os veículos BEV emitem 90% menos gases de efeito estufa que a segunda melhor opção, os veículos híbridos (PHEV) na Nova Zelândia e 40% menos que a segunda melhor opção na Austrália, os veículos a célula de combustível (FCEV).

Yue et al. (2021), avaliaram o consumo de energético e emissões da frota de veículos elétricos na cidade de Xangai, utilizando o modelo GREET e a metodologia Well-to-wheel do ciclo de vida dos combustíveis, que abrange desde a produção dos combustíveis, ao uso e manutenção dos veículos. O estudo apresenta uma avaliação do consumo energético, das emissões de gases de efeito estufa e custos de uso dos veículos elétricos e dos veículos movidos a combustível fóssil. Os resultados mostraram que o consumo energético total por quilômetro rodado dos veículos elétricos seria 11% menor do que o dos veículos à combustão interna. Por outro lado, do ponto de vista das principais emissões, as emissões de GEE dos veículos elétricos

se mostraram superiores às dos veículos a combustível fóssil uma vez que a matriz elétrica do cenário é dominada pelo carvão.

Um modelo de aprendizado de máquina com regressão linear múltipla e regressão de vetores de suporte, foi desenvolvido por Pokharel et al. (2021) para investigar o consumo total de energia de veículos elétricos, utilizando dados coletados de veículos Tesla modelo S e de seus usuários. Neste estudo foram aplicadas variáveis independentes que incluíam a alteração de situações da vida real ou parâmetros externos, como: a distância da viagem, o tipo de pneu, o estilo de condução, a potência, a leitura do hodômetro, o modelo de veículo elétrico, o ciclo de condução na cidade, em autoestrada e estradas rurais. Dentre as variáveis independentes analisadas, a variável distância percorrida, apresentou a maior correlação com o consumo energético, cujo coeficiente de correlação foi de 0,87 e o modelo de aprendizado de máquina - Aumento de Gradiente Extremo (XGBoost) - apresentou a maior precisão (92%). Os autores concluíram que os algoritmos de aprendizado de máquina podem ajudar os condutores, fornecendo informações sobre as condições que podem influenciar no consumo energético, bem como, melhorar o desempenho de vários modelos de veículos elétricos.

Sathre & Gustavsson (2021), analisaram os ciclos de vida de veículos com motores à combustão interna e motores elétricos, incluindo a fabricação e operação, considerando o mix de biocombustíveis no cenário sueco. Os limites do sistema incluíam todas as emissões fósseis e biogênicas de sistemas técnicos e as emissões de decomposição evitadas dos resíduos da colheita deixados na floresta. Os resultados deste estudo mostraram que as rotas de uso da eletricidade para alimentar os BEV têm impactos climáticos menores, em comparação com às rotas dos veículos à combustão abastecidos a biometanol e gasolina. Os autores sugeriram que acelerar a tendência atual de eletrificação de veículos, juntamente com o aumento da geração de eletricidade renovável, seria uma estratégia no caminho da sustentabilidade do setor de transportes.

No Brasil, Dranka & Ferreira (2020) avaliaram o impacto das tecnologias de veículos elétricos e híbridos comparativamente aos veículos com motores à combustão interna, em sistemas energéticos combinando energias renováveis para produção de eletricidade, objetivando estimar o nível global de emissões de gases de efeito estufa em cenários energéticos. Os autores fizeram uso do aplicativo EnergyPLAN para projetar o sistema energético a longo prazo, bem como, realizaram uma avaliação do ciclo de vida (ACV) dos veículos, abrangendo as etapas de produção dos combustíveis, uso e fabricação dos veículos. Os resultados indicaram um claro efeito positivo do aumento da participação dos veículos

elétricos na redução das emissões de CO₂, com redução das emissões totais em cerca de 34% no cenário com maior eletrificação em comparação ao cenário padrão. Além disso, a pesquisa destaca a importância dos estudos prospectivos para subsidiar decisões governamentais voltadas a análise de potenciais sinergias entre os setores de transporte e de energia no uso de biorrecursos.

Recentemente, Mera et al. (2023) em seu relatório voltado ao cenário brasileiro, utilizaram a ACV baseada no escopo de estudo voltado a carros de passeio na Europa, nos Estados Unidos, na China e na Índia. Os autores consideraram em sua abordagem, as emissões na queima do bioetanol em motores à combustão, bem como, introduziram fator de emissão devido ao uso indireto da terra no plantio da cana-de-açúcar, cujo fator adotado foi igual ao etanol do milho produzido nos Estados Unidos. Neste cenário, o relatório estima as emissões médias de veículos ICE a bioetanol e a gasolina de 155 g CO₂eq/km e para um BEV, 55 g CO₂eq/km.

Por fim, a metodologia de avaliação do ciclo de vida foi utilizada por Gauto et al. (2023) para estimar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de veículos tradicionais ICE, veículos PHEV e veículos BEV, abastecidos por biocombustíveis ou recarregados com energia elétrica de matriz brasileira ou europeia. O estudo mostrou que as emissões calculadas de GEE para veículos HEV a biocombustíveis são inferiores às observadas para o BEV, mesmo no Brasil, onde a intensidade de carbono da matriz elétrica é baixa em comparação com a maioria dos países. Os autores estimaram em 77,5 gCO₂eq/km e 104,8 gCO₂eq/km, respectivamente, as emissões totais do HEV a bioetanol e do BEV.

1.4.2 Avaliação do ciclo de vida (ACV) da fabricação dos veículos

A avaliação do ciclo de vida dos produtos vem sendo amplamente utilizada no estudo do impacto Ambiental, em particular na avaliação do impacto dos veículos no setor de transportes. Neste sentido, Hawkins et al. (2013) desenvolveram um inventário do ciclo de vida de veículos elétricos e à combustão e o aplicaram para avaliar os processos de fabricação e uso destes veículos quanto as categorias de impacto ambiental. O estudo estimou em 95 gCO₂eq e 43 gCO₂eq por quilômetro (vida útil de 150.000 km), respectivamente, as emissões na fabricação de um veículo elétrico e de um à combustão interna. Além disso, os resultados mostraram que os veículos elétricos movidos pelo atual mix de eletricidade europeu podem reduzir em cerca de 10% a 24% o potencial de aquecimento global (GWP) em relação aos veículos convencionais a diesel ou a gasolina.

Qiao et al. (2017) desenvolveram um estudo com o objetivo de identificar a real capacidade dos veículos elétricos na China. Este estudo estimou as emissões de CO₂ da fase de produção e comparou os resultados com o nível de emissão dos veículos com motor à combustão interna, modelos atualmente dominantes na frota chinesa. Os resultados revelaram que as emissões de CO₂ da produção de um veículo elétrico variam de 14,6 a 14,7 t CO₂, em termos percentuais, de 59% a 60% acima das emissões de um ICE (9,2t). De acordo com esta publicação, a produção das baterias de lítio-íon e componentes adicionais, como o motor de tração e o controlador eletrônico em um EV, são os principais responsáveis pelas emissões. Diante deste fato, à medida que as técnicas de fabricação de baterias de íons de lítio estão se aprimorando e a indústria de reciclagem de materiais está se desenvolvendo, um enorme potencial de redução das emissões de CO₂ dos veículos elétricos haverá na China.

A categoria de veículos utilitários esportivos geralmente apresenta maior consumo energético em função do seu peso e capacidade de carga. Neste sentido, Karaaslan et al. (2018) avaliaram o ciclo de vida *cradle-to-grave* de veículos utilitários esportivos em cenários dos Estados Unidos com foco na avaliação dos impactos ambientais do berço ao túmulo para as fases do ciclo de vida que vão desde a fabricação até a reciclagem no final da vida. Um método de avaliação de ciclo de vida de entrada-saída econômica híbrida (EIO-LCA) foi usado neste trabalho de pesquisa para estimar os impactos ambientais (emissões de gases de efeito estufa, consumo energético e de água). Neste cenário, os resultados mostraram que o veículo elétrico a bateria (BEV) apresenta a menor emissão de gases de efeito estufa (77,2 toneladas) e o menor consumo de energia (1046 GJ), embora apresentem maiores emissões no processo de fabricação, em especial da bateria.

Kawamoto et al. (2019) avaliaram as emissões de CO₂ de veículos convencionais a gasolina e a diesel comparadas com veículos elétricos a bateria (BEV) em regiões dos Estados Unidos, União Europeia, Japão, China e Austrália, por meio de uma avaliação do ciclo de vida que contempla a fabricação, uso e manutenção dos veículos e a produção dos combustíveis. Os resultados deste estudo mostraram que as emissões de CO₂ na fabricação dos veículos BEV (12,2 t CO₂eq ou 61 g CO₂eq/km) foi maior do que a dos ICE (5,5 t CO₂eq ou 27,5 g CO₂eq/km) devido às emissões adicionais de CO₂ na produção da bateria. Entretanto, este estudo mostrou que em regiões onde fontes de energia renovável e formas de geração de energia elétrica com baixa emissão de CO₂ são amplamente utilizadas, à medida que a distância percorrida ao longo da vida útil do veículo aumenta, as emissões operacionais totais de CO₂ do BEV tornam-se menores do que as do ICE. Além disso, o estudo demonstrou que a emissão de CO₂ do ciclo de

vida dos ICE tende a ser menor do que a dos BEV, uma vez que as emissões de CO₂ para a produção de baterias são consideravelmente elevadas, cerca de 51% das emissões da produção do veículo.

Com o objetivo de analisar a mitigação dos impactos ambientais na fabricação de veículos, Koroma et al. (2020) estudaram os impactos das mudanças futuras na produção de energia, ferro e aço na avaliação do ciclo de vida dos veículos elétricos. Neste estudo, os resultados mostraram que os futuros veículos elétricos a bateria podem ter um potencial de aquecimento global (GWP) 36 a 53% menor em comparação com o BEV atual. Destacaram ainda, que as mudanças no mix de fontes de geração elétrica seriam responsáveis por 89% das reduções do GWP ao longo do ciclo de vida do BEV. Nesta abordagem, os resultados também mostraram que o potencial para medidas de melhoria da eficiência energética para redução do GWP na fabricação de veículos e baterias seria mais benéfico quando aplicado agora do que em um futuro distante (2050), quando se espera que a intensidade de emissões de CO₂ na geração elétrica na União Europeia seja menor.

1.4.3 Avaliação do ciclo de vida dos combustíveis

A avaliação do ciclo de vida dos combustíveis que compõe a matriz energética do setor de transportes é fundamental na estimativa dos impactos ambientais e energéticos vinculados ao ciclo de vida da operação dos veículos. Neste contexto, Henrique et al. (2014) realizaram uma análise comparativa dos principais impactos ambientais do ciclo de vida e balanço energético do etanol de cana-de-açúcar e do biodiesel de soja e óleo de palma, nas condições brasileiras, com a aplicação da metodologia Well-to-Tank no ciclo de vida dos combustíveis, que incluem os processos agrícolas, industriais e de transporte de matéria-prima. Os resultados mostraram que para a produção de cada megajoule (MJ) de bioetanol são emitidos de 3 a 6 g CO₂eq de gases de efeito estufa. O estudo concluiu que os sistemas de produção de biocombustíveis com maior rendimento agrícola e uso extensivo de co-produtos em seu ciclo de vida apresentam melhores resultados ambientais.

Tsiropoulos et al. (2014) desenvolveram um estudo voltado à avaliação dos impactos ambientais da produção de etanol a partir do melaço da cana-de-açúcar na Índia, bem como, uma análise comparativa com o etanol de cana-de-açúcar do centro-sul do Brasil. Conforme resultados deste estudo para a produção de cada megajoule (MJ) de bioetanol no Brasil, são emitidos de 17 a 23 g CO₂eq de gases de efeito estufa. De acordo com os autores medidas importantes podem ser tomadas em toda a cadeia de produção para melhorar o desempenho

ambiental da produção indiana de etanol, como, evitar o uso de pesticidas específicos, evitar o descarte de vinhaça não tratada, além da transição para culturas com eficiência hídrica.

Uma análise do ciclo de vida do sistema de transporte urbano de passageiros brasileiro, com foco em uma análise comparativa dos biocombustíveis e da eletrificação, e seus potenciais no sentido da mitigação das emissões, foi desenvolvida por Kain Glensor (2019). O autor considerou vários cenários de conversão de frotas de carros e ônibus urbanos para uso 100% elétrico ou de biocombustíveis até o ano de 2050. Os autores estimaram que, para a produção de cada megajoule (MJ) de bioetanol no Brasil são emitidos cerca de 18 g CO₂eq de gases de efeito estufa e para a gasolina 13,8 g CO₂eq. Este estudo apresentou resultados favoráveis para a eletrificação em termos da mitigação das emissões de gases de efeito estufa, porém, mostrou possíveis limitações no consumo de energia elétrica frente ao aumento da demanda pelos veículos elétricos nos cenários de eletrificação.

Wang et al. (2015) estudaram o consumo energético e emissões de gases de efeito estufa resultantes do uso de bioetanol feito de várias matérias-primas. Os resultados deste estudo mostraram que mesmo quando as mudanças no uso da terra são incluídas nas emissões de gases de efeito estufa, a mudança do milho para a cana-de-açúcar e depois para a biomassa celulósica ajudaria a aumentar significativamente as reduções no uso de energia e nas emissões de GEE pelo uso do bioetanol. Em relação à gasolina de petróleo, o etanol de milho, cana-de-açúcar e palha de milho podem reduzir as emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida em 19–48%, 40–62%, 90–103%, respectivamente. Tendências semelhantes foram encontradas em relação aos benefícios da energia fóssil para as rotas do bioetanol.

Os estudos previamente referenciados nesta seção, representam as principais abordagens metodológicas voltadas à avaliação do ciclo de vida aplicada ao setor de transportes e energético. O Quadro 1 traz um resumo das principais referências consideradas neste estudo, bem como, a síntese da metodologia e dos resultados apresentados em cada trabalho.

Quadro 1 – Principais referências na avaliação energética e de emissões de veículos

Referência	Metodologia	Resultados
Schill & Gerbaulet (2015)	Modelo numérico para simulação de despacho e carregamento.	Frota de 3,7 e 4,8 milhões de BEV, consumo de 1,3% a 1,6% da demanda elétrica da Alemanha.
Keshavarz-mohammadian et al. (2017)	ACV por modelo de otimização linear	Frota de 15% e 47% de BEV, redução de 16% e 36% nas emissões dos transportes nos Estados Unidos.
Miri et al. (2021)	Simulação numérica do consumo energético.	Consumo do BEV de 158 a 176 Wh/km.
Sheng et al. (2021)	Metodologia Well-to-wheel de ACV dos combustíveis.	Nova Zelândia: BEV emitem 90% (WTW) menos que os PHEV. Austrália: BEV emitem 40% menos que os FCEV.
Yue et al. (2021)	Metodologia Well-to-wheel de ACV dos combustíveis.	O consumo energético do BEV é 11% menor que o do ICE. As emissões (WTW) do BEV é maior que do ICE no cenário chinês.
Sathre & Gustavsson (2021)	ACV das rotas dos combustíveis utilizados em ICE e BEV.	O uso da eletricidade no BEV gera menores emissões que biometanol e gasolina em ICE em rotas na Suécia.
Dranka & Ferreira (2020)	ACV dos veículos ICE e BEV e sistema energético em EnergyPLAN.	Redução das emissões em cerca de 34% no cenário com maior eletrificação em comparação ao cenário padrão brasileiro.
Hawkins et al. (2013)	ACV da fabricação dos veículos ICE e BEV	Estimou em 95 gCO ₂ eq/km e 43 gCO ₂ eq/km a fabricação de um BEV e de um ICE no cenário europeu.
Qiao et al. (2017)	ACV da fabricação e uso dos veículos ICE e BEV	Estimou 14,6 a 14,7 t CO ₂ as emissões na produção de um 59% a 60% acima das emissões de um ICE.
Karaaslan et al. (2018)	ACV da fabricação e uso dos veículos utilitários ICE e BEV	O BEV apresenta a menor emissão GEE (77,2 toneladas) e o menor consumo de energia (1046 GJ) comparado ao ICE em cenário americano.
Kawamoto et al. (2019)	ACV da fabricação e uso dos veículos ICE e BEV	Emissões: BEV de 61 g CO ₂ eq/km e ICE de 27,5 g CO ₂ eq/km em cenários europeus e asiáticos.
Koroma et al. (2020)	ACV da fabricação e uso dos veículos ICE e BEV	Futuros BEV podem ter GWP 36 a 53% menor em comparação com o BEV atual.
Kain Glensor (2019)	ACV da fabricação e uso dos veículos ICE e BEV.	Estimaram 18 g CO ₂ eq/MJ e 13,8 g CO ₂ eq/MJ na produção do bioetanol e gasolina.
Mera et al. (2023)	ACV da fabricação e uso dos veículos ICE, HEV e BEV.	Estima 155 g CO ₂ eq/km para ICE a bioetanol e gasolina e 55 g CO ₂ eq/km para um BEV.
Gauto et al. (2023)	ACV da fabricação e uso dos veículos ICE, HEV e BEV.	Emissões de 77,5 gCO ₂ eq/km para o HEV a bioetanol e 104,8 gCO ₂ eq/km para o BEV.

1.5 Tipos de veículos leves de acordo com o grupo motopropulsor

Para efeito do presente trabalho, este item aborda as nomenclaturas, definições e abreviações dos veículos que serão descritos ao longo do texto. Quanto a motorização, os veículos elétricos podem ser categorizados da seguinte forma (Fig. 1):

- HEV (Hybrid Electric Vehicle): veículo elétrico híbrido;
- PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle): veículo elétrico híbrido plug-in;
- BEV (Battery Electric Vehicle): veículo elétrico a bateria;
- FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle): veículo elétrico a célula de combustível.

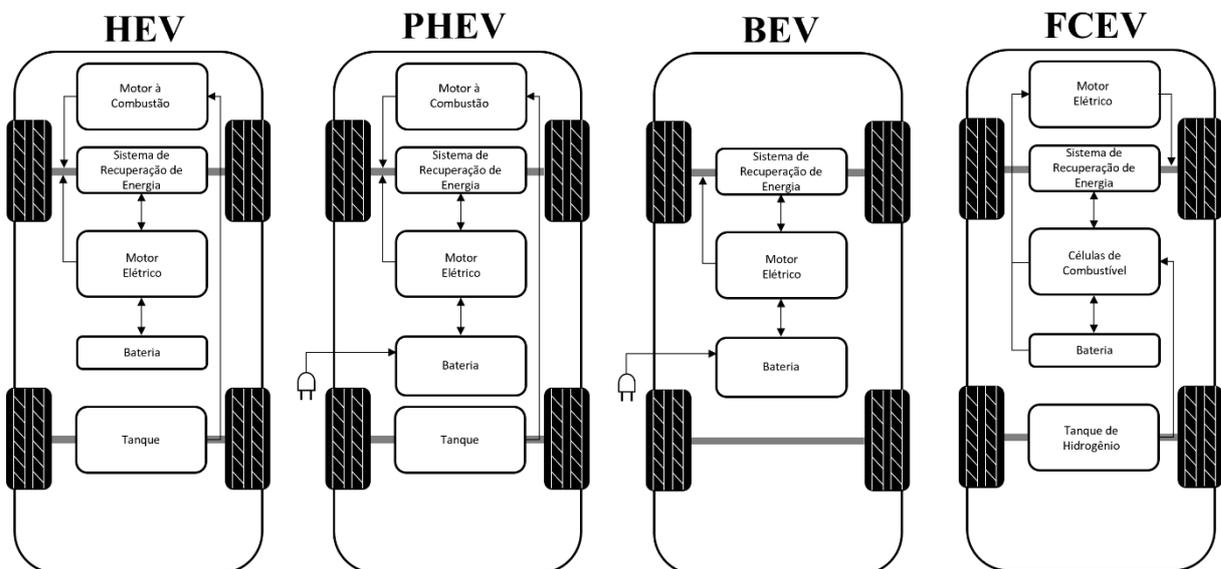


Figura 1 - Principais Tipos de Veículos Elétricos e Híbridos

1.5.1 Veículos Híbridos (HEV)

O desenvolvimento dos veículos híbridos está diretamente associado à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e à melhoria da eficiência energética. Neste sentido, a inserção de motores elétricos nos conjuntos motopropulsores, permitiram o aumento da eficiência energética nos veículos, uma vez que são mais eficientes em converter energia elétrica em movimento, especialmente, em velocidades mais baixas e em condições de trânsito urbano, nas quais os motores à combustão interna apresentam menores eficiências. Além disso, os motores elétricos podem atuar como geradores, e mesmo, recuperar parte da energia da frenagem, ao transformar a energia cinética em eletricidade que é armazenada na bateria.

Nos veículos HEV, o grupo motopropulsor é resultado da combinação entre um motor à combustão interna e um motor elétrico. A bateria pode ser carregada tanto pelo motor a

combustão quanto pelo sistema de frenagem regenerativa, o qual, converte a energia cinética em energia química. Entretanto, para permitir a maximização das potencialidade do grupo motopropulsor, é fundamental o gerenciamento do fluxo energético das diversas fontes, com foco na redução do consumo de combustível. O sistema de gerenciamento, por meio de algoritmos de otimização, pode determinar quando alternar entre modos de condução, como modo totalmente elétrico, híbrido ou modo de economia de combustível, com base nas condições de estrada, carga da bateria, demanda de potência e outras variáveis.

Atualmente, observa-se uma variedade de configurações de grupo motopropulsor para veículos híbridos. Entre elas, destacam-se os quatro principais arranjos utilizados em veículos comercializados: série, paralelo, power-split e série-paralelo (Zhuang et al., 2020). Essas configurações representam diferentes abordagens na integração de motores a combustão interna e motores elétricos, visando otimizar a eficiência e o desempenho dos veículos híbridos. Cada arranjo possui suas próprias vantagens e desafios, influenciando o comportamento dinâmico, a economia de combustível e a experiência de condução do veículo híbrido.

1.5.1.1 Conjunto motopropulsor híbrido em série

O HEV em série, utiliza o motor elétrico como única fonte de propulsão, podendo estar localizados tanto no eixo traseiro quanto dianteiro. Nesta configuração, o motor à combustão interna é responsável somente pelo acionamento do gerador que possibilitará o carregamento da bateria. Uma vez que o motor à combustão não é responsável diretamente pela tração, pois, trabalha exclusivamente na produção de energia elétrica, pode operar de forma otimizada, em faixa de rotação que lhe permita uma maior eficiência (Fig. 2).

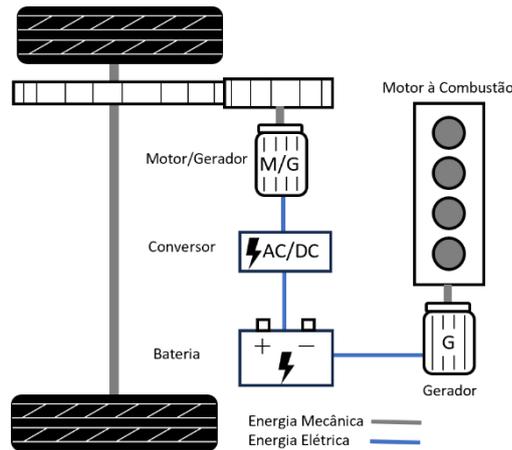


Figura 2 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido em série

1.5.1.2 Conjunto motopropulsor híbrido em paralelo

O HEV em paralelo apresenta tanto o motor elétrico com o motor a combustão mecanicamente acoplados à transmissão e simultaneamente transmitem a potência necessária à propulsão do veículo. Em geral, o motor elétrico é utilizado para a tração do veículos em situações de menor eficiência do motor à combustão o que é controlado pelo sistema de gerenciamento para permitir uma maior eficiência que os veículos convencionais com motores à combustão interna. O motor à combustão possui ainda como atribuição o acionamento do gerador elétrico para o carregamento da bateria (Fig. 3).

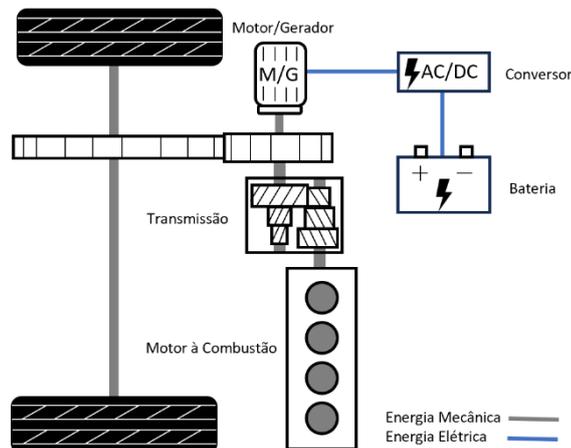


Figura 3 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido em paralelo

1.5.1.3 Conjunto motopropulsor híbrido Power-split

Em geral, o conjunto motopropulsor híbrido por divisão de potência (Power-split) utilizam um ou mais conjuntos de engrenagens planetárias, com o objetivo de acomodar o motor à combustão e motores-geradores elétricos ao eixo de tração do veículo (Fig. 4). O sistema atua como uma transmissão variavelmente contínua (CVT), o que resulta em uma operação mais

eficiente do conjunto, o que geralmente tem como efeito, o menor consumo de combustível se comparado às configurações em série e em paralelo, em especial, nas condições de condução urbanas (Zhuang et al., 2020).

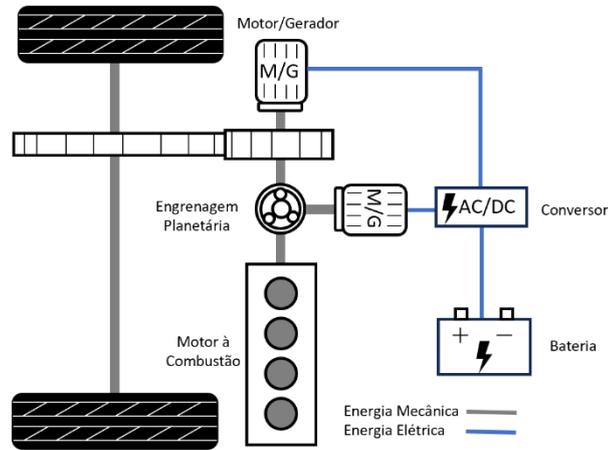


Figura 4 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido Power-split

1.5.1.4 Conjunto motopropulsor série-paralelo

O HEV em série-paralelo, combina as características de série e paralelo, com a combinação de dois motores-geradores elétricos e um motor à combustão acoplados à transmissão, e por meio de controle podem ser acionados simultaneamente ou de forma separada. Esta configuração permite três distintos modos de operação, quais sejam, série, paralelo e EV, por meio da utilização da embreagem, responsável pela conexão entre o motor à combustão e o eixo de transmissão do veículo. Em geral a configuração série-paralelo, apresenta maior custo devido à maior complexidade do sistema (Fig. 5).

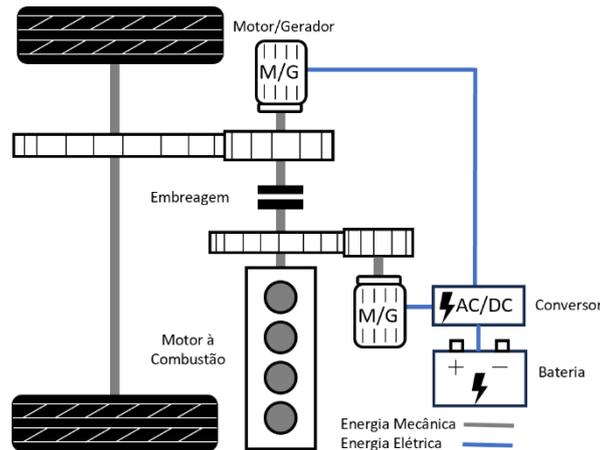


Figura 5 – Configuração do grupo motopropulsor híbrido Série-paralelo

1.5.2 Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (PHEV)

Semelhantemente aos HEV, os PHEV podem apresentar configurações dos motores em série, paralelo e série-paralelo. Entretanto, apresentam adicionalmente um carregador da bateria a bordo, havendo possibilidade de carregamento da bateria diretamente na rede ou de abastecimento do veículo via tanque de combustível. Em geral, operam no modo esgotamento de carga da bateria, quando o estado da bateria atinge um limiar predefinido, o modo de esgotamento de carga é comutado para o modo de sustentação de carga, onde o motor de combustão interna é acionado.

1.5.3 Veículo Elétrico a Bateria (BEV)

O BEV utiliza somente o motor elétrico para a propulsão totalmente elétrica, e trabalha em modo de esgotamento de carga da bateria (Fig. 6). A bateria pode receber carga para carregamento via sistema de frenagem regenerativa ou via carregador ligado à rede elétrica externa. Em geral, devido à limitada autonomia são mais utilizados em trajetos urbanos, pois, podem percorrer com uma única carga uma distância que varia de 100 a 250 km. O consumo de energia necessário para cobrir 100 km está situado na faixa de 15 a 20 kWh, com valores que dependem do modelo específico. É importante notar que essa faixa de autonomia pode sofrer ajustes conforme as especificações individuais do veículo. Caso o veículo elétrico a bateria seja equipado com baterias de maior capacidade, o alcance pode ser ampliado, atingindo entre 300 e 500 km (Ntombela et al., 2023).

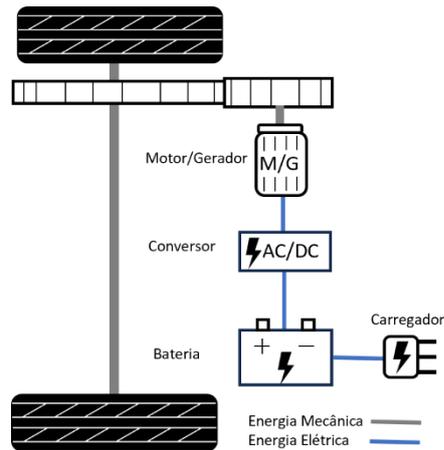


Figura 6 – Configuração do grupo motopropulsor de um veículo elétrico a bateria

Uma vez descarregada, a bateria de um BEV pode levar até 36 horas para um carregamento completo, o que é considerando um tempo elevado em comparação com o reabastecimento de um veículo ICE convencional, o que pode ser caracterizado como uma das principais desvantagens comparativas de um veículo elétrico a um veículo convencional. Entretanto, o tempo de carregamento pode ser melhorado, a depender da configuração do carregador, da sua infraestrutura e do nível de potência operacional, podendo chegar a até 30 minutos em estações de carregamento de alta potência. Por outro lado, os BEV apresentam vantagens comparativas aos veículos convencionais, como a sua construção simples, o baixo custo de manutenção, o baixo ruído, a não emissão de gases de efeito estufa via cano de descarga, além da propulsão elétrica ser caracterizada por torques instantâneos e elevados, mesmo em baixas velocidades (Un-Noor et al., 2017).

1.5.4 Veículos Elétricos a Célula de Combustível (FCEV)

Os veículo elétricos a célula de hidrogênio são abastecidos a hidrogênio (H_2) que é armazenado em um reservatório a alta pressão, na forma gasosa ou líquida. Os FCEV, de uma forma geral, se diferem dos demais elétricos em função do uso de uma célula de combustível (Fig. 7). A célula de combustível é um dispositivo eletroquímico que converte a energia química do hidrogênio e do oxigênio (ou outro agente oxidante) em eletricidade, por meio de uma reação de oxiredução.

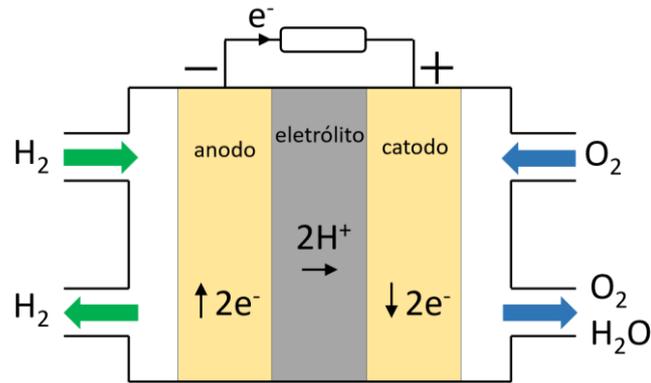


Figura 7 - Modelo básico de uma célula de hidrogênio

A energia elétrica gerada é responsável pela alimentação dos motores elétricos que por sua vez respondem pela energia cinética do veículo (Fig. 8). Os FCEV são conhecidos por serem pouco poluentes, uma vez que a reação química que ocorre na célula de combustível liberará somente água via escapamento. Conseqüentemente, os veículos elétricos a célula de combustível se apresentam como uma possibilidade voltada à mitigação do impacto ambiental dos combustíveis quando comparados aos de combustão interna. Além disso, apresentam vantagens comparativas aos BEV, em relação ao tempo de reabastecimento mais rápido, em torno de 3 a 5 minutos, bem como, uma maior autonomia cerca de 600 km.

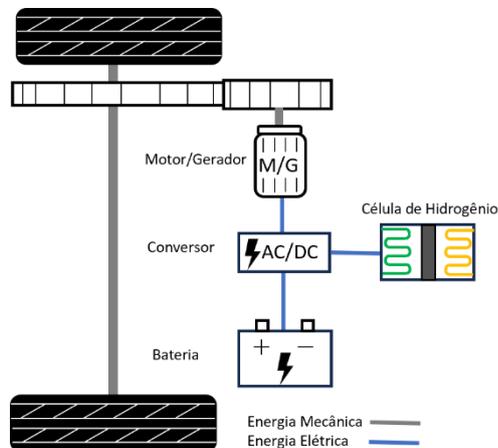


Figura 8 – Configuração do grupo motopropulsor de um veículo FCEV

Entretanto, a reação química do hidrogênio na célula de combustível, que gera energia elétrica, ocorre a uma taxa menor em comparação com a variação da carga. Além disso, as acelerações e desacelerações rápidas, bem como operações frequentes de partida e parada durante a condução do veículo, podem impactar negativamente a durabilidade da célula de combustível. Em função dessas características, as células de combustível são comumente empregadas em sistemas híbridos de armazenamento de energia, que combinam outras fontes de energia, como baterias e ultracapacitores. Diante ao exposto, a estratégia de gerenciamento

de energia está focada na redução do consumo e no prolongamento da vida útil da célula de combustível (Yu et al., 2022).

1.6 Emissões de gases de efeito estufa

O Protocolo de Kyoto, tratado internacional assinado no ano de 1997, durante a Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, se constituiu um importante marco no esforço global para combater as mudanças climáticas, por meio de compromissos assumidos pelos países signatários, dentre os quais, a redução das emissões de gases de efeito estufa (UNFCCC, 1997). Neste sentido, o protocolo fixou os principais gases de efeito estufa, considerados para efeitos no presente estudo (Tab. 1).

Tabela 1 - Gases de efeito estufa (UNFCCC, 1997 e Protocol G., 2023))

Gases de Efeito Estufa	Fórmula	GWP (100 anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Óxido nitroso	N ₂ O	265
Hidrofluorcarbonetos	HFCs (HFC-23)	12.400
Perfluorcarbonos	PFCs (PFC-14)	6.630
Hexafluoreto de enxofre	SF ₆	23.500

O dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) é uma medida que expressa a contribuição total de todos os gases de efeito estufa presentes na atmosfera, em termos do potencial de aquecimento global (GWP) do dióxido de carbono (CO₂) durante um período de tempo específico. Essa medida é usada para comparar e somar os efeitos de diferentes gases de efeito estufa, com diferentes capacidades de reter o calor na atmosfera.

Os gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), contribuem para o aquecimento global, mas apresentam diferentes intensidades e durações de impacto na atmosfera. O CO₂eq permite que esses gases sejam expressos em uma unidade comum para facilitar a compreensão e a avaliação do impacto total das emissões de GEE. Neste sentido, a COP 3 em sua decisão 2, reafirmou a aplicação dos potenciais de aquecimento global com base nos efeitos dos gases de efeito estufa ao longo do horizonte temporal de 100 anos (UNFCCC, 1997).

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) publicou em 2023 o Relatório Síntese das Mudanças Climática 2023 (IPCC, 2023), no qual, destaca as atividades humanas como responsáveis inequivocamente pelo aquecimento global, principalmente através das emissões de gases com efeito de estufa históricas e atuais, decorrentes da utilização

insustentável da energia, da utilização dos solos e da alteração do uso do solo, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção nas regiões, entre países e no interior de cada país, e entre indivíduos. Ainda, de acordo com este relatório, a temperatura da superfície global atingiu 1,1°C acima de 1850-1900 em 2011-2020 e as emissões globais de gases de efeito de estufa tendem a continuar a se elevar neste cenário. Neste sentido, as ações e políticas de mitigação das emissões globais tem desempenhado um papel fundamental, voltadas à restrição do aquecimento frente à meta de limite de aquecimento em até 2°C.

2. POLÍTICAS PÚBLICAS DO SETOR AUTOMOTIVO NO BRASIL

2.1 Um breve histórico da indústria automotiva nacional

Até o início da década de 1950, a indústria automotiva brasileira era limitada à montagem de alguns veículos, onde a quase totalidade das peças (80%) eram trazidas do exterior, sendo baixo o índice de nacionalização das autopeças.

No ano de 1952, o governo de Getúlio Vargas deu início à nacionalização da indústria automobilística brasileira por meio de políticas que restringiam progressivamente a importação de autopeças com similares nacionais, visando estimular a produção local de autopeças (Pascoal et al., 2022).

O período que vai de meados da década de 1950 ao início da década de 1960 é considerado o início da nacionalização da indústria automobilística brasileira, com incentivos governamentais à produção nacional de autopeças, bem como, a concessão de cotas para a importação e a redução do câmbio para a importação de equipamentos para a indústria, o que possibilitou a estruturação da indústria automotiva.

Entre as décadas de 1960 e 1970 foram criados e ampliados programas de créditos de recursos para o financiamento de veículos, o que possibilitou o aumento significativo da demanda por automóveis, com um crescimento médio nas vendas de cerca de 20% ao ano. No final dos anos 1970, a indústria passou a produzir cerca de 1 milhão de unidades por ano (Santos & Burity, 2002).

A crise do petróleo na década de 1970, levou à elevação significativa dos preços desta commodity no mercado internacional. Neste contexto, o governo brasileiro buscou alternativas para reduzir a dependência do petróleo, com o lançamento do programa Proálcool, que teve como objetivos principais, a diversificação da matriz energética, a redução da dependência do petróleo, o estímulo ao desenvolvimento rural e a promoção a pesquisa e desenvolvimento. O programa alcançou os seus objetivos, o que resultou em 99,5% de veículos a etanol na participação em novas vendas no ano de 1983 (ANFAVEA, 2024).

A década de 1990 foi marcada pela abertura do mercado de automóveis às importações, o que trouxe novos desafios voltados à competitividade da indústria nacional, tais como, o processo de integração com os mercados externos, necessidade de redução de custos,

melhoria da qualidade e produtividade, com vistas à adequação aos padrões internacionais (Pascoal et al., 2022).

No início dos anos 2000, foi lançada a tecnologia dos veículos flex-fuel, que permitiu o abastecimento a gasolina, a etanol ou a qualquer combinação destes combustíveis, que já equiparam cerca de 30 milhões de veículos até o presente (ANFAVEA, 2024). Em meados desta década, a indústria automobilística passou por um novo período de investimentos com indução às políticas de expansão do crédito e aos incentivos fiscais para redução dos preços dos veículos, o que resultou na forte expansão do mercado interno, na implantação de novas plantas fabris, bem como, na modernização dos modelos de veículos (Pascoal et al., 2022).

A década de 2010 foi desafiadora para a indústria automobilística brasileira, que após recordes de produção em 2012 (3,1 milhões), nos anos seguintes, em função de problemas macroeconômicos que causaram a queda da renda do consumidor e a contração do crédito, ocasionaram uma retração da produção de automóveis no Brasil. No final desta década, a indústria voltou a apresentar crescimento na produção, com cerca de 2,19 milhões de unidades vendidas em 2019, porém, com significativa capacidade da indústria ociosa.

Na década de 2020, a indústria automobilística nacional passa por novos desafios no cenário das transformações globais induzidas pelas mudanças climáticas e as políticas de redução de emissões de gases de efeito estufa que passam pela transição energética para fontes renováveis e pela melhoria da eficiência energética dos veículos. Em termos quantitativos, a frota brasileira de veículos leves em 2020 ultrapassou 38 milhões de unidades (SINDIPEÇAS, 2020), apesar de ter experimentado quedas significativas nos emplacamentos de veículos novos nos últimos cinco anos, em função, principalmente, de questões econômicas (Fig. 9). De fato, a venda de novos veículos se apresenta fortemente vinculada ao poder aquisitivo da população e consequentemente à atividade econômica.

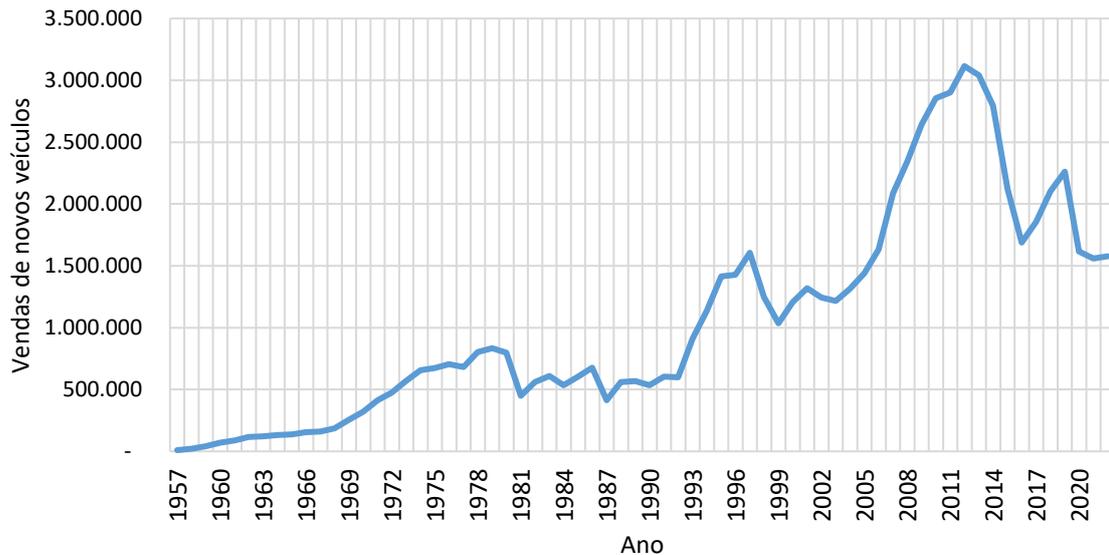


Figura 9 – Venda anual de novos veículos no Brasil (ANFAVEA, 2022)

2.2 Políticas públicas para o setor automotivo no Brasil

Segundo Pascoal et al., (2022) As políticas públicas industriais podem ser definidas como qualquer tipo de intervenção ou política governamental que tente melhorar o ambiente empresarial ou alterar a estrutura da atividade econômica relacionada com setores, tecnologias, atividades da cadeia de valor ou uma combinação dos três.

No Brasil, podemos destacar as sete principais intervenções governamentais que tiveram forte influência no ambiente de produção da indústria automobilística:

2.2.1 Plano Nacional da Indústria Automobilística (1957)

O Plano Nacional da Indústria Automobilística (PNA) foi instituído em 1957, por meio do Decreto 41.018/1957, pelo governo do presidente Juscelino Kubitschek. O objetivo principal do PNA era incentivar o desenvolvimento da indústria automobilística nacional, bem como, da cadeia produtiva de autopeças, que até aquele momento dependia em sua maior parte da importação de veículos e de seus componentes. O Decreto 41.018/1957 fixava como metas na fabricação dos automóveis, os seguintes percentuais das peças produzidas no Brasil:

- 1º de julho de 1957: 50% de peças nacionais;
- 1º de julho de 1958: 65% de peças nacionais;
- 1º de julho de 1959: 85% de peças nacionais;
- 1º de julho de 1960: 95% de peças nacionais.

O plano previa incentivos às montadoras de automóveis com vistas à ampliação da instalação e conteúdo nacional. O plano adotava medidas, como, melhores taxas de câmbio,

cotas para peças importadas, benefícios fiscais, garantias de financiamento e empréstimos. Os incentivos resultaram no crescimento da indústria automobilística nacional, inclusive, com novas tecnologias e estratégias de produção.

2.2.2 Programa Befiex (1960 e 1970)

O Befiex foi um programa de benefício fiscal lançado pelo governo federal nas décadas de 1960 e 1970, com vistas à concessão de benefícios fiscais a programas especiais de exportação. O Befiex foi um instrumento de política econômica que induziu empresas de maior porte, em especial aquelas de capital estrangeiro, a realizar junto ao governo um tipo de contrato pelo qual se comprometeriam com certo desempenho na geração de divisas durante um período de tempo, em troca de benefícios fiscais para suas importações, com a finalidade de promoção das exportações (Baumann, 1990).

O principal atrativo do programa residia na oportunidade oferecida às montadoras que exportassem uma quantidade específica de veículos. Elas poderiam, mediante redução ou isenção de impostos, importar insumos essenciais para a composição de sua linha de produção nacional, correspondendo a uma porcentagem do número de veículos exportados. Essa estratégia inaugurou a integração regional da indústria automobilística brasileira com o mercado latino-americano, destacando-se especialmente a relação com a Argentina (Ibusuki et al., 2013).

2.2.3 Abertura Comercial Brasileira do Setor de Automóveis (1990)

O processo de abertura comercial e maior exposição da indústria automotiva brasileira à competição internacional teve início nos anos 1990, durante a gestão do presidente Fernando Collor. Essa abertura implicou na eliminação de medidas de proteção contra a concorrência estrangeira e introduziu uma redução gradual das tarifas de importação e a adoção da flutuação cambial. No setor automotivo, a motivação principal era a busca pelo avanço tecnológico frente à defasagem tecnológica dos veículos de fabricação nacional comparativamente aos importados.

Entre 1992 e 1993, a política pública para a indústria automobilística foi marcada por intensas negociações na Câmara Setorial do Complexo Automotivo. Essas negociações envolveram representantes dos trabalhadores, do setor de autopeças, das concessionárias, das montadoras, dos sindicatos e do governo, com o objetivo de elaborar medidas capazes de estimular o mercado e aumentar os níveis de produção.

De acordo com Schapiro (2017), dentre as medidas governamentais de incentivo adotadas, podem ser destacadas:

- A redução dos preços dos veículos em 22%, alcançada por meio da diminuição de impostos (IPI e ICMS) e da redução das margens de lucro dos fabricantes de automóveis, fornecedores de peças e concessionárias;
- O compromisso de manter os níveis de emprego até julho de 1993;
- A implementação de um programa de financiamento para veículos;
- O estabelecimento de metas de produção.

Como resultados da política, ocorreu o nascimento do conceito de carro popular (veículo de custo reduzido e baixa potência), com a redução da alíquota do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para automóveis com motores de até 1.0 litro, bem como, o aumento dos investimentos destinados a ampliar a capacidade produtiva e modernizar o setor automotivo, totalizando cerca de 20 bilhões de dólares até o ano 2000.

2.2.4 Novo Regime Automotivo Brasileiro (1995)

Após o lançamento do Plano Real (1994) ocorreu uma forte valorização cambial que juntamente com a redução das alíquotas de importação de veículos, trouxe um crescimento abrupto das importações de veículos. Além disso, no âmbito do Mercosul, a Argentina promoveu o seu programa de incentivos à indústria automobilística, que ocasionou o aumento das importações deste país, causando um desbalanceamento das contas externas do Brasil.

O Novo Regime Automotivo Brasileiro (NRA) foi instituído no ano de 1995 pelo Governo Federal, por meio da Medida Provisória – MP 1.024/1995, mais tarde convertida na lei 9.440/1997. Para promover a indústria automotiva nacional, o NRA propôs um conjunto de incentivos fiscais às montadoras que optassem por estabelecer suas operações no Brasil, desde que atingissem um índice mínimo de nacionalização de veículos e se comprometessem a exportar parte de sua produção. Além disso, havia estímulos específicos para aquelas empresas já instaladas ou que viessem a se instalar nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. O programa introduziu reduções adicionais nas tarifas de importação de veículos, autopeças, equipamentos e insumos industriais, alcançando um nível de abertura inédito no cenário nacional (Schapiro, 2017).

As medidas da política pública do NRA surtiram o efeito planejado no curto prazo, uma vez que representaram uma queda significativa nas importações (cerca de 38%) acompanhada pelo aumento nas exportações até o final da década de 1990 (Fig. 10), e ao mesmo

tempo impactaram na competitividade da cadeia produtiva do setor automotivo no Brasil. Enfim, apesar dos elevados custos do programa, relacionados às renúncias fiscais, as medidas foram capazes de mitigar os impactos das importações de veículos na balança comercial durante o período do ano de 1995 e 1999.

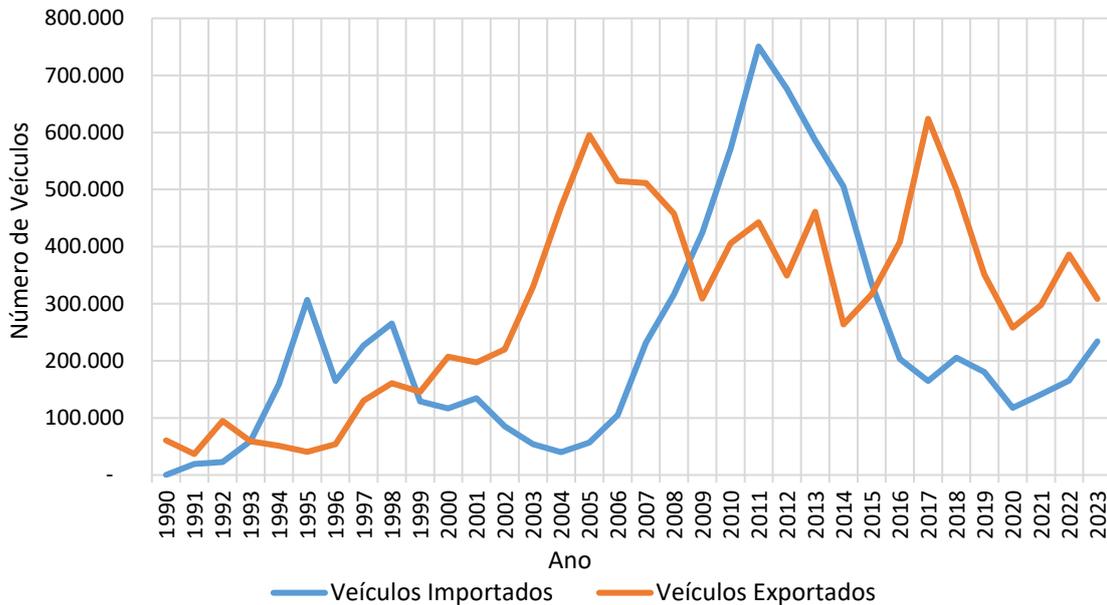


Figura 10 - Número de veículos importados e exportados (ANFAVEA, 2022)

Entretanto, as medidas foram denunciadas por outros países produtores junto à Organização Mundial do Comércio (OMC), que alegaram a violação do tratado de livre comércio, diante do tratamento diferenciado ao conteúdo local, o que foi resolvido posteriormente, por meio de acordos entre os países e redução dos incentivos.

2.2.5 Inovar-Auto (2012)

No ano de 2012 foi instituído o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO, por meio da Lei 12.715/2012. O programa teve o objetivo de apoiar o desenvolvimento tecnológico, a inovação, a segurança, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade dos automóveis, caminhões, ônibus e autopeças.

Da mesma forma como ocorrido em ocasiões anteriores, o programa veio como uma medida para reverter uma crise econômica no setor automotivo e para mitigar o efeito do aumento das importações, que no ano de 2008 superaram as exportações (Fig. 10), causando um desbalanceamento da balança comercial brasileira.

De maneira mais precisa, o programa Inovar-Auto foi desenvolvido com o propósito de alcançar dois objetivos estratégicos interligados que consistiam em atrair novos

investimentos para o país, visando assegurar uma maior nacionalização na fabricação dos veículos adquiridos pelos consumidores brasileiros e conseqüentemente gerar impactos positivos significativos na indústria de autopeças. Além disso, o programa buscava induzir o aperfeiçoamento dos padrões de produção aos padrões internacionais, em termos de custo e tecnologia, aumentando a competitividade da indústria automobilística nacional (Schapiro, 2017).

A elegibilidade no programa era destinada a empresas que produziam ou importavam veículos, ou que possuíssem novos planos de investimento para a fabricação de veículos no país. Uma vez habilitadas, essas empresas poderiam usufruir de créditos tributários relacionados ao Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI). No entanto, para aproveitar esses benefícios, as empresas participantes precisavam se comprometer com diversas contrapartidas, tais como o cumprimento de metas de eficiência energética, a realização de etapas de produção em solo nacional e o investimento mínimo em pesquisa, desenvolvimento e inovação, entre outros requisitos. Adicionalmente, o programa incluía restrições à importação, incluindo a imposição de cotas.

Por meio de metodologia diferença em diferenças, Niquito & Carraro (2021) avaliaram os impactos do programa e concluíram que não seria possível afirmar que o Inovar-Auto teve impacto direto na produção de veículos e no ativo imobilizado. No entanto, destacaram sinais de uma redução nos custos das operações industriais, que seriam um dos efeitos desejados do programa. Relataram ainda, que o incentivo não se traduziu em aumento de empregos ou valor adicionado, sugerindo indícios de declínio nessas áreas analisadas. Portanto, as expectativas de aumento no emprego e na produção, não foram confirmadas por meio desta pesquisa.

2.2.6 Rota 2030 (2018)

O Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística, foi instituído em dezembro do ano de 2018, por meio da Lei n. 13.755/2018. Em um contexto de transformações da mobilidade mundial tanto no uso como na produção dos veículos voltadas à sustentabilidade ambiental.

O Rota 2030 é uma política governamental de longo prazo (15 anos), aplicada à cadeia produtiva do setor automotivo, que tem como objetivo, apoiar o desenvolvimento tecnológico, a competitividade, a inovação, a segurança veicular, a proteção ao meio ambiente, a eficiência energética e a qualidade de automóveis, de caminhões, de ônibus, de chassis com motor e de autopeças.

Nos termos da Lei 13.755/2018, o Rota 2030 prevê a concessão de benefícios fiscais para a dedução com pesquisa e desenvolvimento (P&D), com foco no cumprimento de métricas governamentais voltadas às seguintes diretrizes:

- Incremento da eficiência energética, do desempenho estrutural e da disponibilidade de tecnologias assistivas à direção dos veículos comercializados no País;
- Aumento dos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação no País;
- Estímulo à produção de novas tecnologias e inovações, de acordo com as tendências tecnológicas globais;
- Incremento da produtividade das indústrias para a mobilidade e logística;
- Promoção do uso de biocombustíveis e de formas alternativas de propulsão e valorização da matriz energética brasileira;
- Garantia da capacitação técnica e da qualificação profissional no setor de mobilidade e logística; e
- Garantia da expansão ou manutenção do emprego no setor de mobilidade e logística.

Uma vez que o programa acaba de concluir os cinco primeiros anos de vigência, sendo uma política de longo prazo (15 anos), não há estudos conclusivos sobre os resultados obtidos até o presente momento. Entretanto, Pelegrina & Stoeber (2023) em uma análise comparativa com um semelhante programa alemão - Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (NPE), destacaram o atraso no cronograma do programa brasileiro e a necessidade de ajustes gerenciais como a ausência de relatórios de acompanhamento (para o NPE foram gerados 4 relatórios nos primeiros 5 anos de programa), a falta de representatividade da comunidade científica e a baixa representatividade da indústria, em especial, destacam a ausência de complementaridade dos objetivos do Rota 2030 com outras políticas dos países de origem dos fabricantes. De acordo com este estudo, uma indicação de como os objetivos do programa brasileiro poderiam ser mais complementares aos objetivos da NPE foi a decisão da Volkswagen alemã de investir em um centro de P&D de biocombustíveis no Brasil.

Finalmente, destaca-se que os objetivos do Rota 2030 podem ser classificados como um programa exploratório, procurando inovações em várias áreas, industriais e tecnologias, sem uma visão clara de onde a indústria automóvel deverá estar em 2030, de acordo com as intenções do País (Pelegrina & Stoeber, 2023).

2.2.7 Programa MOVER – Mobilidade Verde e Inovação (2023)

O Programa MOVER – Mobilidade Verde e Inovação, foi instituído em dezembro/2023 por meio da Medida Provisória nº 1.205/2023. O programa amplia as exigências de sustentabilidade da frota automotiva e estimula a produção de novas tecnologias nas áreas de mobilidade e logística, no âmbito do Programa Rota 2030, com o objetivo de fomentar o aumento dos investimentos em eficiência energética e a imposição de limites mínimos para a reciclagem na produção de veículos e introduz uma abordagem fiscal diferenciada, conhecida como IPI Verde, que reduz a carga tributária para aqueles que emitem menos poluentes (MDIC, 2023).

O programa MOVER amplia a abrangência do Rota 2030, e inclui medidas para incentivar a produção de diversos tipos de veículos elétricos e híbridos, além de biocombustíveis e infraestrutura de recarga. No caso dos biocombustíveis, o programa considera a eficiência energético-ambiental no ciclo do poço à roda e na fabricação dos veículos do berço ao túmulo, cuja meta principal é reduzir em 50% as emissões de carbono dos veículos leves até 2030.

2.2.8 Perspectivas para as políticas públicas no setor automotivo

O lançamento de políticas públicas voltadas ao setor automotivo fazem parte de iniciativas das principais economias globais, em especial, entre aquelas que possuem um parque industrial automotivo desenvolvido e um mercado consumidor forte e consolidado. O Brasil se encontra atualmente no grupo dos seis maiores mercados consumidores de automóveis do mundo, posição alcançada em função do histórico de políticas públicas voltadas ao enfrentamento de desafios históricos, que podem ser divididos basicamente, em dois conjuntos: o primeiro envolvia a própria sobrevivência e consolidação da cadeia produtiva e o segundo voltado ao desenvolvimento tecnológico frente à competitividade com a indústria internacional.

No conjunto inicial de políticas públicas, podemos incluir o Plano Nacional da Indústria Automobilística, o Programa Biefex e o Novo Regime Automotivo. Essas iniciativas foram direcionadas, em primeiro lugar, para fortalecer a indústria automobilística, enfrentando desafios iniciais relacionados à criação e estabelecimento de parques industriais e empresas fundamentais na cadeia produtiva. Posteriormente, o foco se voltou para o desafio de equilibrar a balança comercial, devido à entrada significativa de veículos importados decorrente da abertura do mercado. Em geral, as medidas adotadas na política pública para enfrentar esses desafios incluíam incentivos fiscais destinados a impulsionar as exportações e aumento dos

impostos sobre produtos importados. Todas essas medidas acabaram surtindo efeito no curto prazo com o reequilíbrio da balança comercial, porém, a ausência de concorrência externa trouxe o efeito indesejado da defasagem tecnológica do automóvel brasileiro frente ao importado.

O segundo conjunto de políticas públicas, se refere ao Novo Regime Automotivo, Programa Inovar- Auto e o Rota 2030, teve como foco o enfrentamento da questão de defasagem tecnológica dos veículos nacionais, voltado ao desenvolvimento tecnológico frente a competitividade com a indústria internacional. As políticas públicas objetivavam induzir pesquisa e desenvolvimento e inovação em toda a cadeia produtiva, com vistas ao aperfeiçoamento dos padrões de produção aos padrões internacionais, melhoria da eficiência energética e desenvolvimento de combustíveis alternativos. No entanto, mesmo sem avaliações dos impactos dessas políticas públicas, é possível inferir que, em grande parte, não alcançaram seus objetivos, devido à notável falta de competitividade da indústria nacional frente à internacional e diante da aparente defasagem tecnológica do produto nacional em comparação ao importado.

Atualmente, a indústria automobilística global passa por novos desafios inseridos no contexto da sustentabilidade ambiental que passa pela descarbonização dos ciclos produtivos e o desuso dos combustíveis fósseis. Neste contexto, o Brasil está inserido em um cenário de vantagens comparativas frente aos demais complexos industriais internacionais, uma vez que apresenta uma matriz de geração elétrica predominantemente renovável e na vanguarda do desenvolvimento de tecnologias de produção e uso de biocombustíveis. Neste cenário, se torna estratégico para o país, o investimento em políticas de incentivo a pesquisa, desenvolvimento e inovação que envolvam toda a cadeia produtiva automobilística, voltadas ao aumento da competitividade dos meios de produção, à sustentabilidade da rota de produção em toda a sua cadeia, bem como, à melhoria da eficiência e redução das emissões dos sistemas de propulsão.

O Quadro 2 apresenta um resumo das principais características das políticas públicas voltadas à indústria automotiva no Brasil.

Quadro 2 - Características das políticas voltadas à indústria automotiva (adaptado de Pascoal et al., 2022)

Características	Plano Nacional da Indústria Automobilística (1957)	Programa Befiex (1960)	Abertura Comercial (1990)	Novo Regime Automotivo (1995)	Inovar-Auto (2012)	Rota 2030 (2018)
Taxas de câmbio reduzidas	X			X		
Cotas para a importação	X	X	X	X	X	
Créditos fiscais	X	X		X	X	X
Financiamento	X	X	X			
Garantias de empréstimos	X		X			
Promover o conteúdo local	X	X		X	X	X
Promover as exportações		X		X		X
Melhorar a qualidade			X		X	X
Liberalização do comércio			X			
Redução de impostos			X	X		
Desenvolvimento de fornecedores	X		X		X	X
Eficiência energética					X	X
Investimento em tecnologia industrial					X	X
Melhoria da segurança					X	X
Investimento em inovação					X	X
Abrange os fabricantes de autopeças						X

3. METODOLOGIA

Para tornar possível a realização do presente estudo, inicialmente foi realizado um levantamento de séries históricas brasileiras de dados como: o PIB, a população, a frota de veículos leves e o consumo do bioetanol. A modelagem da frota brasileira de veículos leves consistiu no tratamento e análise de dados estatísticos, em particular, dados econômicos, demográficos e de frota dos últimos 10 anos, com a aplicação de modelos de regressão. Para estimar o desempenho e consumo energético médio dos veículos selecionados, foram avaliados o perfil de velocidade padrão brasileiro e a série histórica da curva de intensidade de uso. A abordagem Well-to-Wheels aplicada à avaliação do ciclo de vida dos combustíveis e ao mix de fontes que compõe a geração de energia elétrica, permitiram avaliar as emissões e o consumo energético no uso dos veículos, e por fim, uma análise das emissões e consumo na produção de cada tipo veículo pode ser realizada através da avaliação do ciclo de vida aplicada à manufatura.

O macroprocesso de fluxo adotado neste estudo, de forma geral, pode ser representado na Fig. 11.

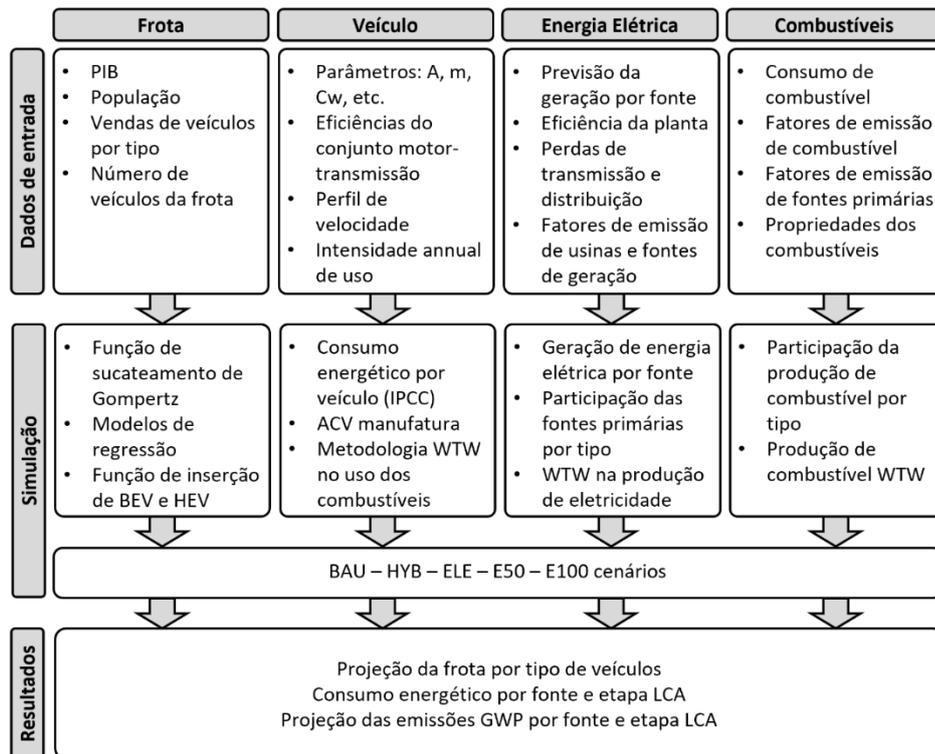


Figura 11 - Representação Esquemática do Macroprocesso de Simulação

3.1 Dados de entrada e considerações iniciais

Estudo desenvolvido por Wu et al. (2014) mostra que a projeção do estoque de veículos pode ser aproximada a uma função do PIB per capita com uma curva característica

para cada país. Nesse sentido, o número de veículos por habitante da frota de um país depende de fatores socioeconômicos e pode ser representado em função do PIB per capita.

População: Segundo dados estatísticos do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) cerca de 85% da população brasileira vive em áreas urbanas. De acordo com os resultados do censo demográfico de 2022, o Brasil apresentava uma população de 203.062.512 habitantes naquele ano, com crescimento anual de 6,45% desde o último censo (IBGE, 2022). A projeção adotada no presente estudo mostra que a população do Brasil alcançará o 221 milhões de habitantes em 2050 (Fig. 12).

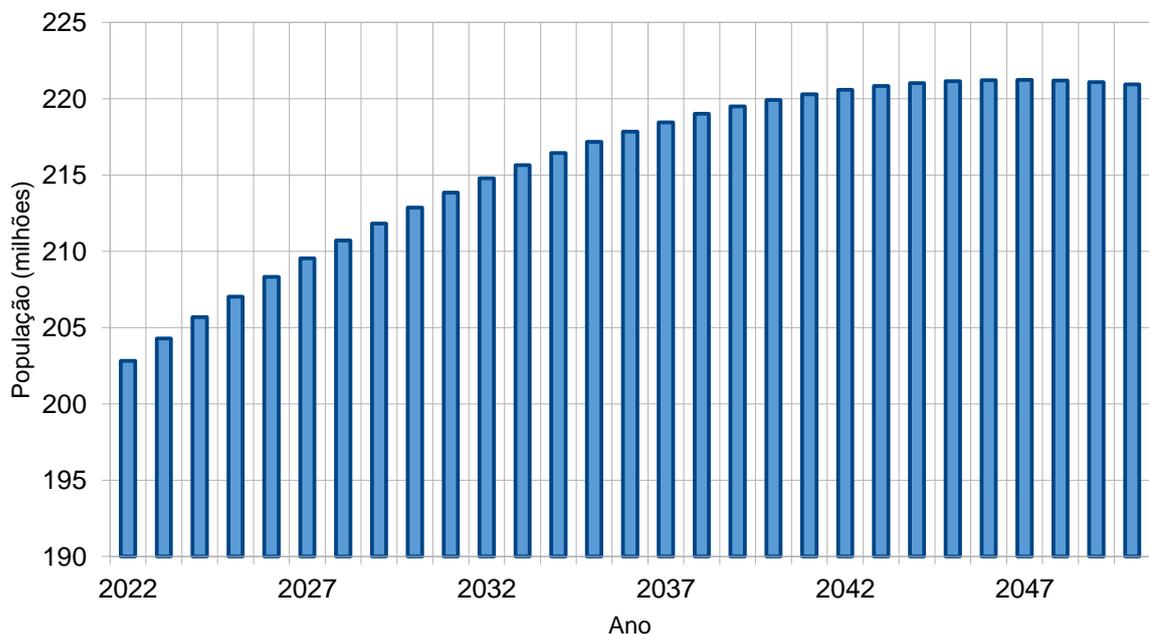


Figura 12 - Projeção de crescimento da população (IBGE, 2022)

Crescimento econômico: O crescimento da economia do país impacta diretamente na atividade econômica, por isso o indicador do Produto Interno Bruto (PIB) per capita tem forte correlação com a venda de veículos, bem como com a inserção de novas tecnologias no mercado automobilístico. Os estudos de projeção do PIB ao redor do mundo não são consensuais, principalmente quando relacionados a países em desenvolvimento, pois existem diversos fatores que impactam diretamente neste indicador, como instabilidades políticas, necessidade de reformas estruturais, ou mesmo eventos pontuais como pandemias.

A Fig. 13 representa a série histórica do produto interno bruto do Brasil nas duas últimas décadas.

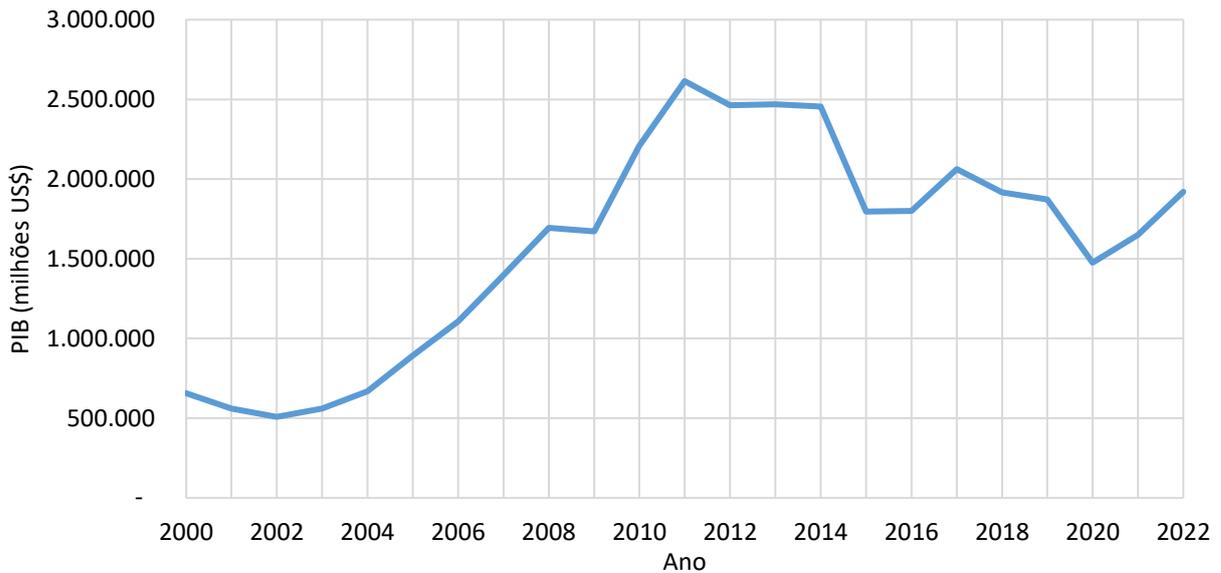


Figura 13 - Série histórica Produto Interno Bruto do Brasil (BACEN, 2023)

Neste trabalho foi adotada a projeção do PIB de acordo com o estudo desenvolvido pelo Ministério das Minas e Energia do Brasil, o Plano Nacional de Energia (MME/EPE, 2020) no cenário desafio da expansão, o qual estimou o crescimento médio anual do PIB brasileiro em 3,1%. Nesse contexto, o PIB per capita de 2022 que foi de US\$ 7.721, pela projeção, seria de US\$ 16.740 no ano de 2050.

3.2 Projeção da frota de veículos

Com o objetivo de simular o crescimento e projeção da frota veicular brasileira para as próximas décadas, é importante caracterizar a situação atual da frota e prever quais indicadores serão determinantes na evolução dessa frota. De acordo com dados da ANFAVEA (2022), o mercado brasileiro de veículos leves, composto por veículos leves de passeio e comerciais leves, apresentou cerca de 1,9 milhão de veículos vendidos no ano de 2022, composto majoritariamente por veículos leves de passeio, cerca de 83%, e 12% veículos abastecidos a óleo diesel, os últimos, especialmente voltados a aplicação comercial leve (Fig. 14).

No presente estudo, foram considerados apenas os automóveis, ou seja, veículos automotores leves de transporte de passageiros, com capacidade para até oito pessoas, não considerados os veículos com motores do ciclo Diesel, pois, em geral não são utilizados como veículos de passeio no Brasil, nem mesmo, os veículos ciclo Otto movidos a gás natural, pois representam cerca de 3% da frota brasileira de automóveis.

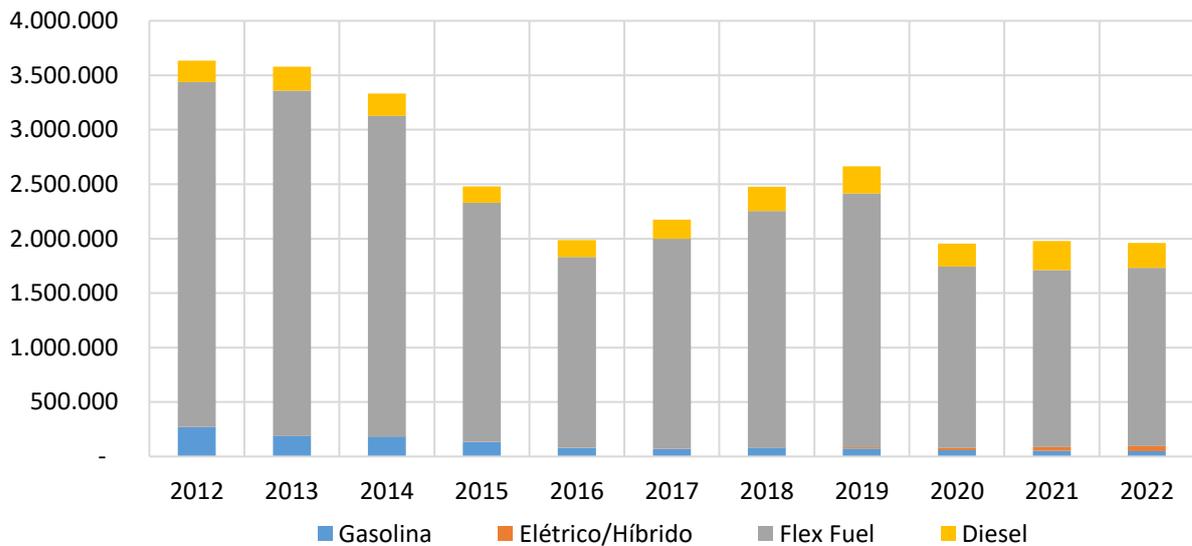


Figura 14 – Vendas anuais de novos veículos por tipo de combustível (ANFAVEA, 2022)

A idade dos veículos é um fator fundamental no estudo da frota, pois tanto a intensidade de uso anual dos veículos quanto o seu sucateamento possuem curvas características que variam conforme a idade. No ano de 2020, estima-se que a idade média da frota circulante brasileira era de 9 anos.

Wu e outros. (T. Wu et al., 2014) analisaram a aplicação das curvas de Gompertz em função do PIB per capita para prever o estoque de veículos e previram o padrão de estoque de veículos na China. De fato, no presente estudo os indicadores foram analisados com base em séries estatísticas, que mostraram maiores correlações lineares entre o PIB e as variações do PIB per capita, tipicamente 0,94 e 0,95, em relação ao número de novos veículos vendidos (Tabela 2).

Tabela 2 – Correlações de variáveis em relação à venda de novos veículos (Autoria própria)

	Ano	PIB	População	PIB per capita	Veículos vendidos
Ano	1,00	0,87	0,99	0,84	0,79
PIB	0,87	1,00	0,86	1,00	0,94
População	0,99	0,86	1,00	0,83	0,81
PIB per capita	0,84	1,00	0,83	1,00	0,95
Veículos vendidos	0,79	0,94	0,81	0,95	1,00

3.3 Registros de novos veículos

Uma vez que a variável PIB per capita foi identificada, dentre as séries históricas disponíveis, como a de maior correlação com o registro de veículos novos, os dados estatísticos

da série histórica (ANFAVEA, 2021) dessa variável no período do ano de 1980 a 2022 (Fig. 15), foram pré-processados em etapa de seleção de algoritmos de aprendizado de máquina supervisionado utilizando-se a plataforma Matlab (MathWorks Inc., 2021).

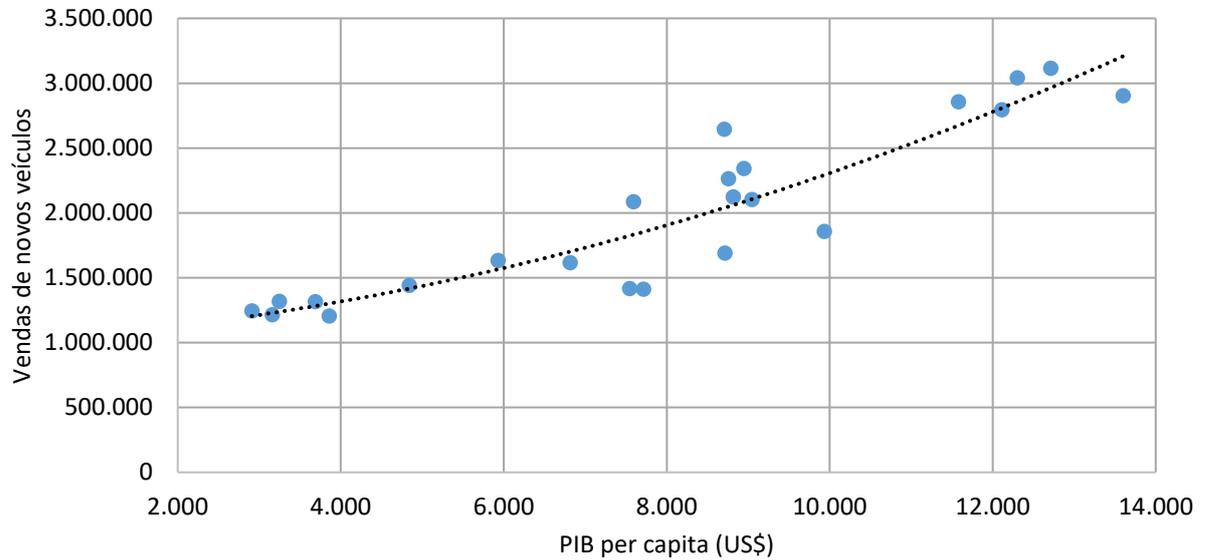


Figura 15- Curva: inclusão de novos veículos versus PIB per capita (Autoria própria)

Os resultados dos treinos de algoritmos mostraram maior aproximação, menor erro e tempo de processamento associados aos métodos de regressão linear, com coeficiente de determinação e raiz quadrada média do erro (média dos erros residuais), respectivamente de $R^2=0,90$ e $RMSE=268.000$ (Fig. 16), o que levou à escolha do referido método na simulação futura das vendas de novos veículos.

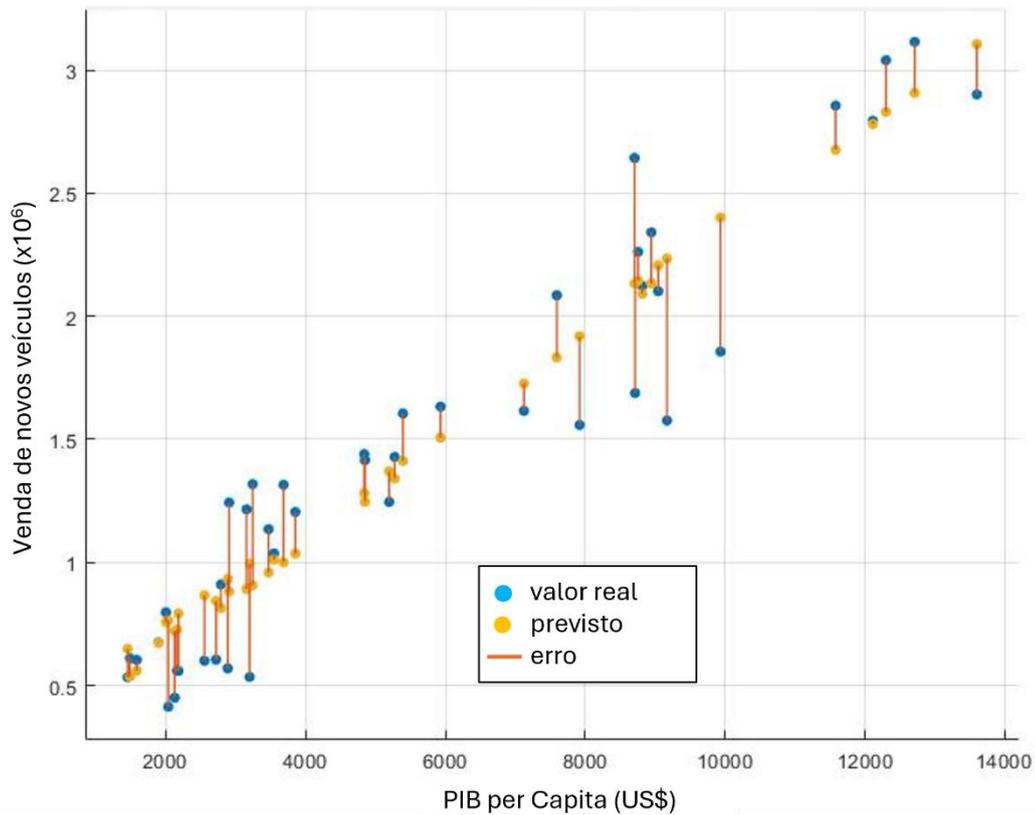


Figura 16 - Treino do modelo: vendas de novos veículos (Autoria própria)

3.4 Curva de sucateamento de Gompertz

Na etapa de projeção da frota de veículos, foi necessário estimar o sucateamento de veículos, que é função da idade, em cada ano e durante todo o período em estudo. Nesse sentido, o inventário brasileiro de emissões atmosféricas por veículos automotores (MMA, 2013) utilizou uma função de sucateamento aproximada à curva de Gompertz (Fig. 17) para a projeção do sucateamento de automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus. A metodologia foi destacada pelo IPCC (IPCC, 2006), sendo referência na estimativa de deterioração de veículos, com vistas ao ajuste dos dados estatísticos da frota. A função de sucateamento da frota tem a forma característica de uma função de Gompertz (Eq. 1) para automóveis (onde a e b são constantes).

$$S(t) = 1 - \exp(-\exp(a + b \cdot t)) \quad (1)$$

Em estudo elaborado por Gonçalves et al., (2019), a curva de sucateamento de Gompertz teve os seus coeficientes ajustados à realidade brasileira, pela utilização dos dados de veículos adimplentes e inadimplentes com o seguro de Danos Pessoais Causados por Veículos Automotores de Vias Terrestres (DPVAT).

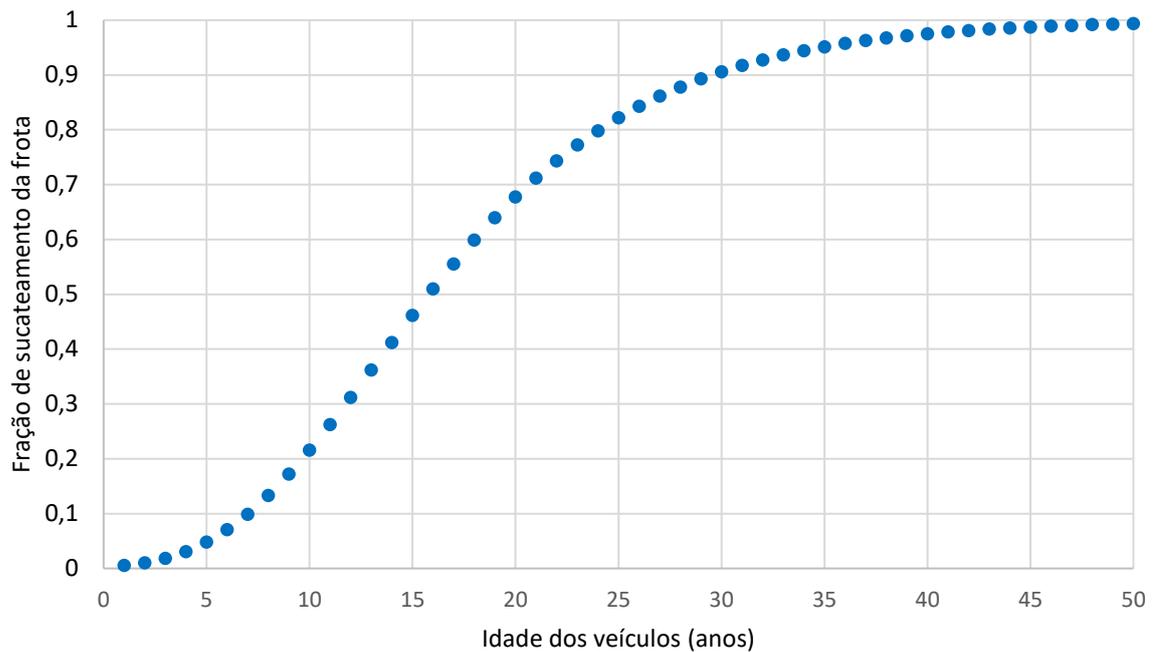


Figura 17 - Curva de sucateamento de veículos ajustada (MMA, 2013)

A Fig. 17 apresenta o resultado da aplicação da equação da curva de sucateamento ajustada à frota brasileira, que representa a fração de veículos da frota que é sucateada a cada ano, em função de sua idade em anos.

3.5 Intensidade de uso anual dos veículos e vida útil média

No Brasil, as informações sobre a intensidade de uso de veículos são escassas, porém, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo apresenta anualmente um relatório sobre as emissões da frota estadual (CETESB, 2019), no qual, utiliza dados sobre a distância anual percorrida. Esses dados são provenientes da leitura de odômetros de parte da frota em períodos consecutivos para o mesmo veículo (CETESB, 2013). Constituem, portanto, dados reais da frota do estado de São Paulo, que representa cerca de 30% da frota brasileira de veículos (Fig. 18). Nesse sentido, o modelo desenvolvido neste estudo considerou a curva de intensidade de uso da frota de veículos, por representar majoritariamente os veículos leves em circulação no país atualmente, com a premissa de que não haverá alteração significativa dessa curva de intensidade de uso ao longo do tempo nos próximos 30 anos.

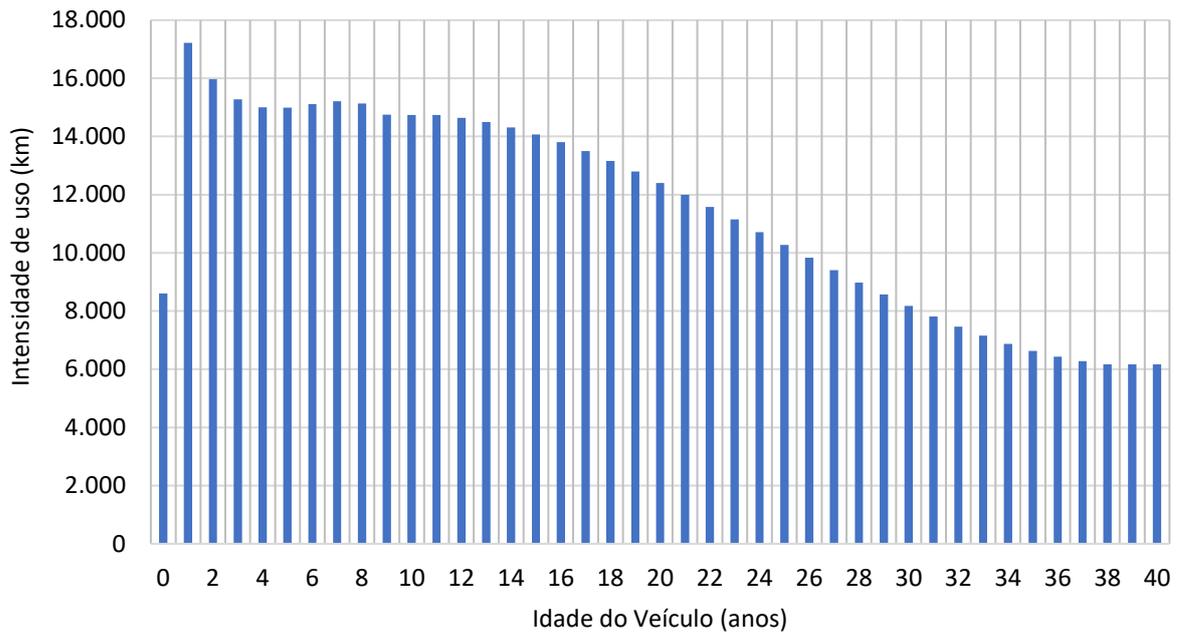


Figura 18 - Intensidade de uso dos veículos (CETESB, 2013)

A distância média percorrida por cada veículo durante seu período de vida útil, ou antes do sucateamento, é um parâmetro fundamental para estimar o consumo energético e as emissões durante o seu ciclo de vida. Entretanto, não constam dados governamentais disponíveis ou inventário recente que disponibilize este parâmetro da frota nacional. Adicionalmente, os principais estudos recentemente publicados no cenário brasileiro destacam a limitação de informações, apresentam valores distintos e sem uma abordagem de estimativa clara. A Tab. 3 apresenta o tempo de vida útil de alguns estudos referenciados.

Tabela 3 - Principais estimativas de vida útil média dos veículos

Fonte	Tempo de Vida Útil (anos)	Distância Média Percorrida (km)
Choma & Ugaya (2017)	9	150.000
de Souza et al. (2018)	14	160.000
Gauto et al. (2023)	10	160.000
Mera et al. (2023)	22	288.000

O tempo médio de vida útil dos veículos da frota pode variar em função de diversos fatores, como, as condições de condução, a manutenção veicular, índices de ocorrência de acidentes, avanços tecnológicos e novas regulamentações de segurança e ambientais, que podem torná-los obsoletos em termos de eficiência e segurança, parâmetros estes que fogem ao escopo do presente estudo.

Held et al. (2021) empregaram uma abordagem para estimar a vida útil dos veículos da frota, por meio de uma função de Weibull, que comumente descreve modos de falha

relacionados ao envelhecimento na engenharia de confiabilidade, por meio de uma curva de probabilidade de sobrevivência cumulativa da frota. Assim, a probabilidade de sobrevivência de cada veículo é resultado da razão entre número de veículos remanescentes de determinado ano (safra) com o número de veículos vendidos naquele ano. O ponto médio da curva de probabilidades (probabilidade=0,5) representa a vida útil média dos veículos daquela frota.

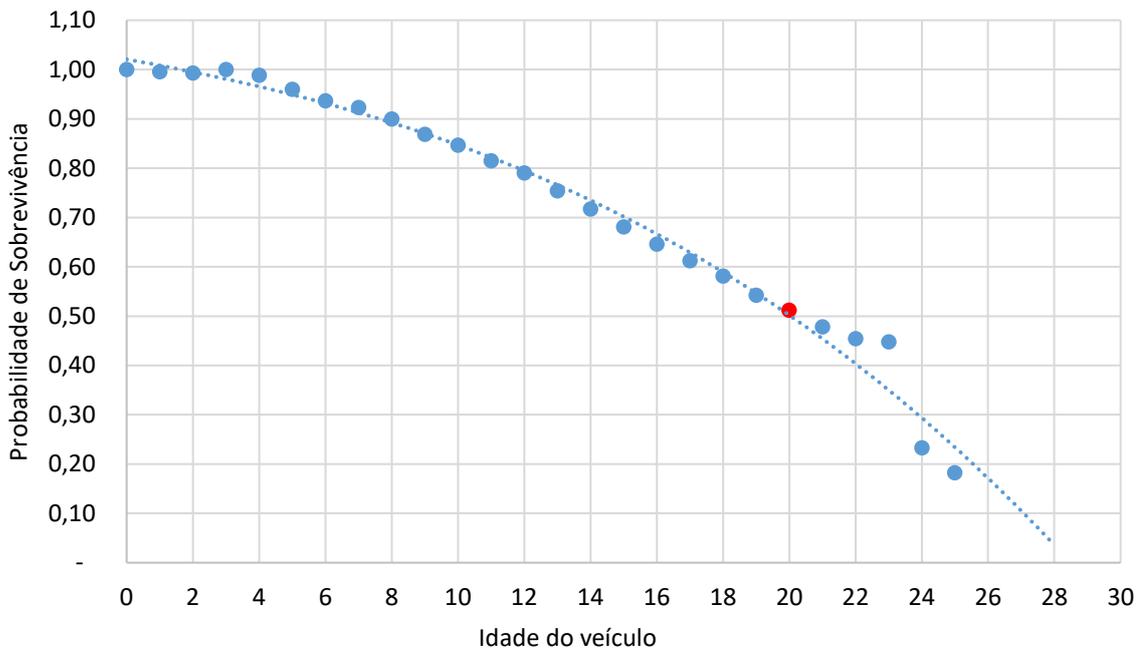


Figura 19 - Curva de probabilidades de vida útil dos veículos

Tendo como referência a metodologia previamente descrita, a curva de probabilidade de vida útil dos veículos da frota brasileira foi construída com dados de séries históricas, bem como, dados da curva de sucateamento de veículos no Brasil (Fig. 19). Neste caso, a curva de probabilidades indica que a vida útil média dos veículos leves da frota nacional é de 20 anos, o que corresponde a 300.000 quilômetros rodados, em consulta à curva de intensidade de uso (Fig. 18).

3.6 Cenários de inserção dos veículos elétricos

A participação dos veículos elétricos e híbridos no mercado brasileiro atualmente se apresenta pouco expressiva, apesar do aumento percentual nas vendas nos anos recentes. Dados da ANFAVEA, mostram que no ano de 2022, foram licenciados no Brasil, cerca de 1.731.348 veículos leves de passeio, dos quais, somente 2,85% representam veículos com motorização híbrida ou elétrica (Tab. 4).

Tabela 4 - Percentual das vendas de veículos por tipo de combustível (ANFAVEA, 2022)

Percentual de Veículos / Ano	2020	2021	2022	2023
Gasolina	3,38%	3,13%	2,82%	2,84%
Elétrico	0,09%	0,17%	0,49%	0,56%
Híbrido	1,04%	1,88%	2,36%	3,61%
Flex Fuel	95,49%	94,83%	94,34%	93,00%

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE) é um conjunto de estudos e diretrizes elaboradas pelo Ministério das Minas e Energia (MME) como uma estratégia de longo prazo para o setor energético brasileiro (MME/EPE, 2020), objetivando promover a construção de consensos fundamentais para o setor energético. Baseando-se em uma análise abrangente de custos e benefícios, o plano busca estabelecer diretrizes de longo prazo que orientem o desenvolvimento deste setor. O PNE 2050, propôs dois cenários de inserção dos veículos elétricos no mercado nacional, o primeiro chamado de referência que corresponde à participação de 11% dos veículos elétricos (BEV) e 61% de híbridos (HEV) nas vendas anuais até o ano de 2050 e o segundo cenário, chamado de alternativo, com os percentuais de 15% (BEV) e 85% (HEV) de participação nas vendas.

Baseado nas diretrizes estabelecidas pelo Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), este estudo considerará cinco cenários distintos. Os três primeiros cenários estão centrados nas projeções relacionadas à incorporação de veículos elétricos e híbridos na frota de veículos leves de passeio. Enquanto, os dois cenários restantes visam explorar a expansão da produção e o aumento da participação do bioetanol como fonte energética primária na frota brasileira. Com base nessas considerações, adotaremos, para fins deste estudo, esses cinco cenários como principais parâmetros de análise:

- Cenário Business-as-usual (BAU): Este cenário contempla uma transição mais lenta para o modelo de mobilidade elétrica, caracterizado por uma participação nas vendas de veículos novos de 11% BEV e 61% HEV até o ano de 2050.
- Cenário de Híbridização (HYB): Este cenário prevê a transição para o modelo de mobilidade elétrica com maior participação de veículos híbridos, que representariam 85% dos HEV e 15% dos BEV na venda de veículos novos até o ano de 2050.
- Cenário de Eletrificação (ELE): Este cenário foi modelado em linha com a tendência mundial de forte eletrificação da frota de veículos leves, prevendo a participação de veículos elétricos em 60% das vendas de veículos novos até o ano de 2050 (IEA, 2021).

- Cenário Bioetanol 50% (E50): Este cenário prevê a inserção de veículos elétricos e híbridos conforme cenário BAU. Porém, contempla 50% de participação do bioetanol como fonte energética dos veículos HEV e ICE.
- Cenário Bioetanol 100% (E100): Este cenário prevê a inserção de veículos elétricos e híbridos conforme cenário BAU. Porém, contempla 100% de participação do bioetanol como fonte energética dos veículos HEV e ICE.

Com o intuito de modelar a taxa de licenciamento anual para cada categoria de veículo, foi concebido um modelo destinado à incorporação dos veículos elétricos no mercado de veículos leves de passageiros. Esse modelo foi construído com base em dados atuais sobre a participação de veículos elétricos (BEV) e híbridos (HEV) nas vendas, aliado a projeções estabelecidas até o ano de 2050. Estudos realizados por Draper et al. (2008) e Sheng et al. (2021) indicam que a curva de inserção de veículos elétricos no mercado pode ser adequadamente aproximada por uma função exponencial em relação ao período de tempo (t). Essa função exponencial depende dos parâmetros escalares k e m , além do PS , que representa o percentual de saturação do mercado.

A Eq. 2 representa o modelo de curva exponencial de projeção que foi ajustado ao cenário brasileiro com os dados da série histórica de vendas de veículos.

$$PA(t) = \frac{PS}{1 + e^{-k(t-m)}} \quad (2)$$

Como resultado da aplicação desta metodologia, a Fig. 20 representa a projeção dos percentuais de novos veículos licenciados por tipo, considerados no presente estudo.

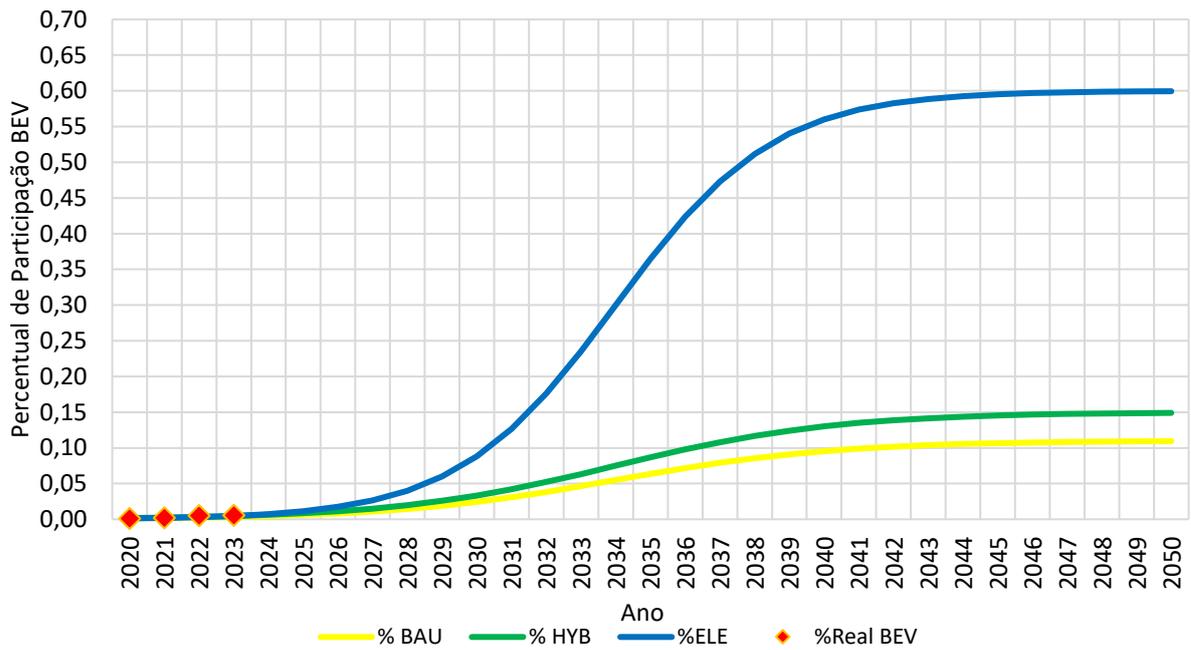


Figura 20 - Cenários de Inserção dos Veículos Elétricos (Autoria própria)

De forma semelhante, como resultado da abordagem adotada, a Fig. 21 apresenta as projeções de participação dos veículos híbridos em 3 cenários brasileiros de inserção em mercado, quais sejam: Cenário Business-as-usual (BAU), Cenário de Hibridização (HYB) e Cenário de Eletrificação (ELE).

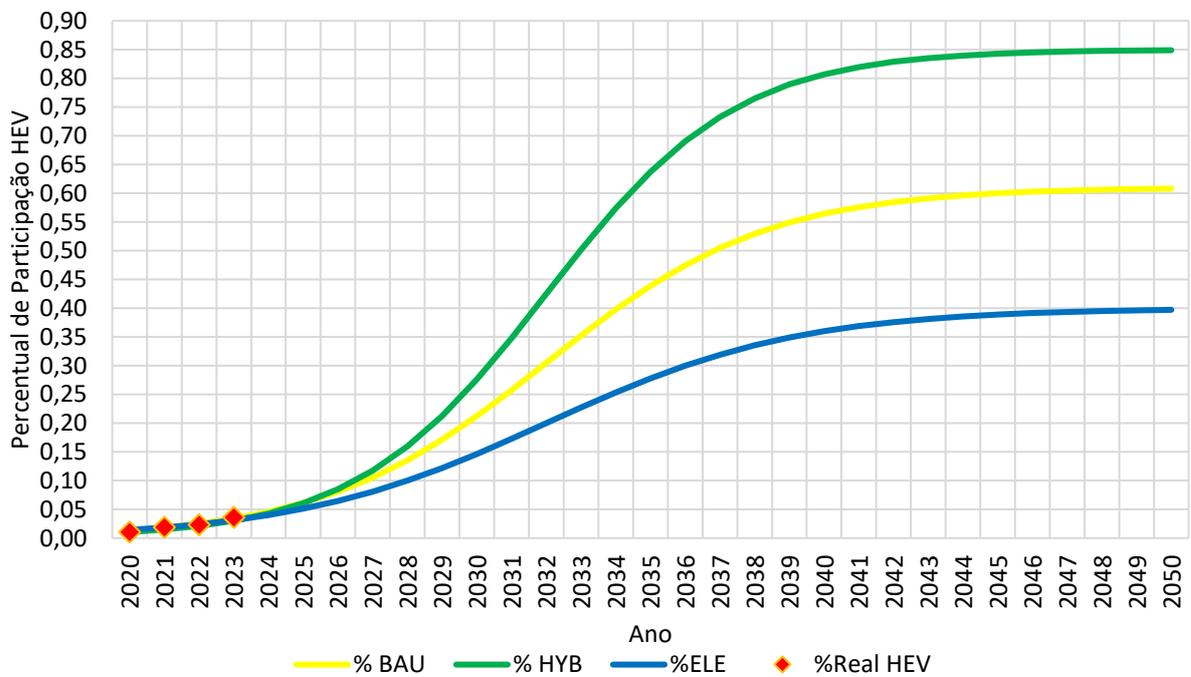


Figura 21 - Cenários de Inserção dos Veículos Híbridos (Autoria própria)

3.7 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida é uma técnica de análise desenvolvida para avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou atividade ao longo de sua vida útil, desde a extração e processamento de matérias-primas até a fabricação, transporte e distribuição do produto acabado, bem como o descarte no final da vida útil e/ou reciclagem após o término de sua vida útil (Karaaslan et al., 2018).

De acordo com a norma ISO 14040 (ISO, 2006), uma ACV deve incluir uma avaliação dos impactos do ciclo de vida (LCIA) para auxiliar na identificação dos potenciais problemas ambientais associados a várias atividades feitas pelo homem, pois, para tornar possível o gerenciamento dos problemas ambientais com sucesso, é necessário conhecer a sua magnitude (Lecouls, 2000).

No presente estudo uma análise da avaliação do ciclo de vida dos veículos com motor à combustão interna (ICE), veículos híbridos (HEV) e veículos elétricos (BEV) foi realizada comparando o seu Potencial de Aquecimento Global (GWP), considerando os cenários brasileiros de longo prazo de transição energética e de uso do bioetanol.

O fluxograma da Fig. 22 apresenta os principais processos envolvidos no ciclo, bem como, o limite do sistema que foi usado para modelar os tipos de veículos avaliados. Os limites do sistema incluem:

- Etapa de extração e processamento de matérias-primas: produção de matérias-primas (aço, alumínio, plástico, vidro, etc.), energia consumida durante a produção, emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à fabricação das matérias-primas.
- Etapa de manufatura do veículo: energia consumida durante a montagem, emissões de GEE durante a montagem.
- Etapa de produção dos combustíveis: produção do bioetanol, da gasolina e da energia elétrica e emissões associadas à produção dos combustíveis.
- Etapa de operação do veículo: consumo de combustível ou eletricidade ao longo da vida útil do veículo e emissões de GEE associadas ao uso.
- Etapa de fim de vida do veículo: processo de desmontagem e reciclagem das baterias de lítio-íon.

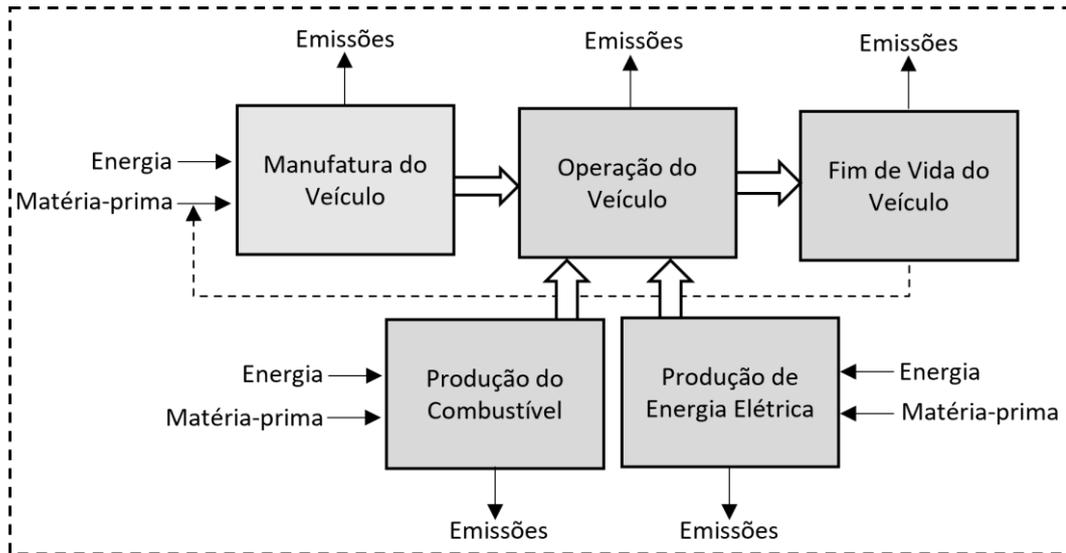


Figura 22 - Limites do sistema em estudo

Neste estudo não foram considerados os processos que envolvem as emissões decorrentes da manutenção do veículo, do pré-tratamento de fim de vida e o reuso da bateria em outras aplicações.

Embora a evolução tecnológica possa ocorrer tanto nos processos de produção dos veículos, quanto em melhorias na eficiência do consumo energético ou no aperfeiçoamento da produção dos combustíveis, estes não serão considerados para efeitos no presente estudo.

3.7.1 Fase de Operação: Produção e Consumo de Combustível e Geração de Energia Elétrica (Well-to-Wheel)

Na etapa de operação e uso dos veículos escolhidos, foi aplicada a metodologia Well-to-Wheel, uma subclasse de avaliação do ciclo de vida, especialmente desenvolvida para o estudo e aplicação na produção e uso de combustíveis em automóveis (Orsi et al., 2016). O WTW permite avaliar os consumos e emissões de diferentes veículos, dependendo da fonte primária de energia (Fig. 23).

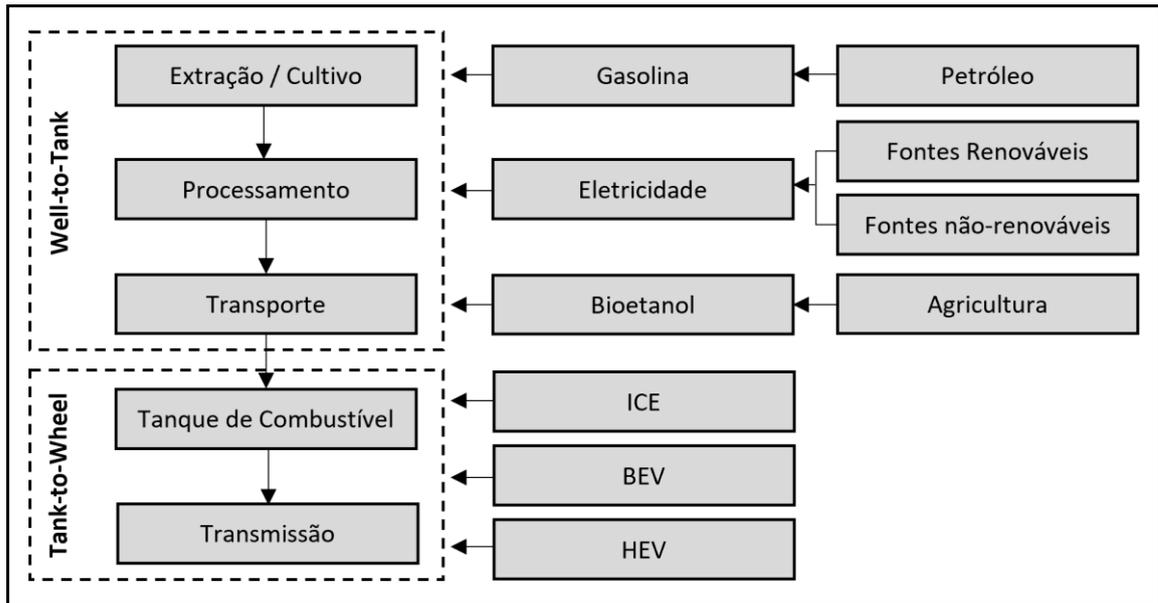


Figura 23 - Fluxograma metodologia Well-to-Wheel (adaptado de Sheng et al., 2021)

A Fig. 23 apresenta as principais etapas da fase de operação, composta pelas atividades de:

- Extração e processamento de matérias-primas: produção de matérias-primas, energia consumida durante a produção, emissões de gases de efeito estufa associadas à fabricação das matérias-primas;
- Produção dos combustíveis: produção do bioetanol, da gasolina e da energia elétrica e emissões associadas à produção dos combustíveis.
- Uso do veículo e consumo de combustível: consumo de combustível ou eletricidade ao longo da vida útil do veículo e emissões de GEE associadas ao uso.

3.7.2 Produção do bioetanol: Análise Well-to-Tank (WTT)

O uso intensivo do bioetanol no setor de transportes no País, iniciou no ano de 1975 com a implementação do Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL). Desde então, o Brasil tem sido um pioneiro no uso intensivo do bioetanol derivado da cana-de-açúcar. Este programa visionário foi concebido com o propósito claro de promover a produção em larga escala de bioetanol, por meio de incentivos governamentais, com o objetivo estratégico de substituir gradualmente a dependência da gasolina no abastecimento de veículos. Além disso, o PROALCOOL visava mitigar tanto os impactos econômicos quanto os ambientais associados ao uso dos combustíveis fósseis, ao mesmo tempo em que estimulava a economia local e fortalecia a segurança energética do país.

3.7.2.1 Produção do bioetanol no Brasil

Uma notável vantagem do etanol proveniente da cana-de-açúcar está intrinsecamente ligada ao seu processo de produção, caracterizado por sua quase total sustentabilidade. Nesse contexto, destaca-se a eficiente utilização do bagaço para a geração de eletricidade e calor, tornando o processo praticamente autossuficiente. Além disso, a vinhaça resultante da fermentação é reutilizada nos campos, contribuindo para a fertilização do solo (R. Edwards, J-F. Larivé, 2011). Vale ressaltar que esse método não apenas minimiza resíduos, mas também gera um excedente significativo de energia elétrica, representando aproximadamente 9% da matriz energética brasileira, quando incorporado à rede nacional.

Uma das mudanças recentes mais importantes na produção da cana-de-açúcar está associada ao processo de colheita, que tem sido gradualmente alterado de manual, onde passava por um processo de queima prévio da palha, para a colheita mecanizada não queimada, o que representará a mitigação das emissões da etapa de queima. A estimativa da safra 2023/24, traz os dados de aumento da mecanização da colheita de cana-de-açúcar no país, cuja projeção é que 92,4% da colheita seja mecanizada (CONAB, 2023).

Embora apresente benefícios notáveis, é crucial reconhecer que a produção de cana-de-açúcar acarreta impactos ambientais e sociais significativos. Estes incluem a degradação e desmatamento do solo, as mudanças diretas e indiretas no uso da terra (MUT), a poluição do solo e da água, a perda de biodiversidade associada às monoculturas e as emissões atmosféricas. Alguns desses impactos, embora relevantes, estão além do escopo do presente estudo.

3.7.2.2 A produção do bioetanol e o uso da terra

Uma das questões mais controversas relacionadas à produção do bioetanol, está associada aos impactos diretos e indiretos, oriundos das mudanças de uso da terra. As emissões por mudança de uso da terra (MUT) na produção de etanol referem-se às emissões de gases de efeito estufa resultantes da conversão de terras naturais, como florestas ou pastagens, em áreas de cultivo para a produção de biocombustíveis, como o bioetanol.

Tais emissões ocorrem devido à remoção da vegetação existente, que normalmente atua como um sumidouro de carbono, e à liberação do carbono armazenado no solo durante o processo de desmatamento, preparação do solo e cultivo de culturas para a produção de biocombustíveis. Como resultado, a produção de bioetanol a partir de fontes que envolvem mudanças no uso da terra pode ter um impacto significativo nas emissões totais de gases de

efeito estufa, tornando importante considerar esses fatores ao avaliar a sustentabilidade do bioetanol.

A produção da cana-de-açúcar no Brasil está predominantemente concentrada na região Centro-Sul do Brasil, em especial nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, os quais contribuem com aproximadamente 90% do total da produção nacional (Hernandes et al., 2021). A expansão da atividade canavieira nos últimos anos não tem alterado substancialmente esse panorama, uma vez que a maior parte do crescimento tem ocorrido nos estados centrais, impulsionada pela disponibilidade de terras a preços acessíveis, além de condições favoráveis para o cultivo da cana-de-açúcar.

A Fig. 24 apresenta o resultado da ampliação do plantio da cana-de-açúcar no período recente de maior expansão da produção entre 2006 e 2011. Os dados mostram que a ampliação do plantio ocorreu principalmente com o deslocamento de pastagens e outras culturas, o que enfraquece a hipótese de que a cana-de-açúcar tenha causado diretamente o desmatamento, o que aparentemente é improvável. Além disso, Walter et al. (2011) destacaram como improvável que a expansão da cana-de-açúcar tenha induzido o deslocamento da pecuária para outras regiões do Brasil, uma vez que a densidade da pecuária tem aumentado em estados da região Centro-Sul. De qualquer forma, é importante ressaltar que no Brasil as bases de dados para avaliação de MUT não são adequadas e ainda são necessários esforços para fornecer informações adequadas para este tipo de estudos.

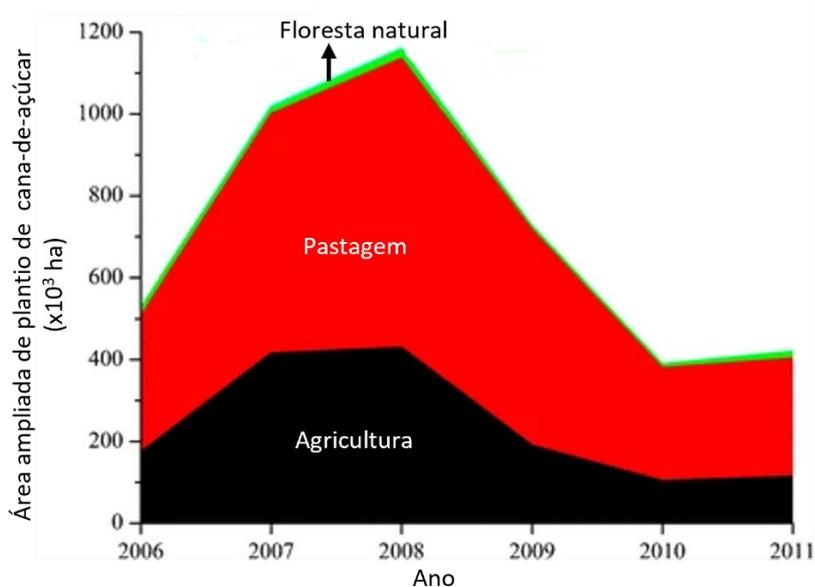


Figura 24 - Área ampliada de plantio da cana-de-açúcar (Adaptado de: Bordonal et al., 2018)

Entretanto, apesar das incertezas relacionadas aos impactos das mudanças diretas e indiretas no uso da terra, Seabra et al. (2014) destacaram como improvável que a expansão do

plântio da cana-de-açúcar no Brasil leve a maiores emissões do bioetanol, devido à combinação da demanda relativamente baixa por novas áreas e ao grande potencial de liberação de áreas devido à conversão de pastagens de baixa qualidade (a maioria delas pastagens degradadas).

3.7.2.3 O Programa Renovabio e as perspectivas de produção do bioetanol

Em face das incertezas relacionadas às perspectivas para a produção do bioetanol no Brasil, o programa Renovabio veio nortear a política nacional de biocombustíveis. O programa estabelecido pela Lei nº 13.576/2017, tem como objetivos principais: (i) contribuir para o atendimento aos compromissos do País no âmbito do Acordo de Paris; (ii) contribuir com a adequada relação de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida; (iii) - promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis e; (iv) contribuir com previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis.

O Renovabio possibilitou aos produtores e importadores de biocombustíveis, por meio da certificação voluntária, o recebimento de nota de eficiência energético-ambiental em valor inversamente proporcional à intensidade de carbono do biocombustível produzido (ANP, 2023). Em especial, esta iniciativa visa oferecer incentivos financeiros aos produtores que consigam comprovar, por meio de um processo de certificação, uma menor intensidade de carbono em seus métodos de produção de biocombustíveis. Antecipa-se que esses incentivos, baseados em um mercado de créditos de descarbonização, induzam o processo de produção ambientalmente sustentável e impulsionem a produção de bioetanol no Brasil.

Neste sentido, dados do Ministério de Minas e Energia indicam que no ano de 2023 foram ofertados ao consumidor cerca de 35 bilhões de litros. A projeção do plano decenal de expansão de energia para 2031 (EPE/MME, 2021) prevê que a produção alcance 46 bilhões de litros, o que representaria o crescimento de cerca de 31% na oferta deste biocombustível. O plano prevê ainda, a participação em termos energéticos do bioetanol em motores do ciclo Otto de 55% em 2031 (44% em 2021) e em especial, nos veículos flex-fuel em cerca de 48% no ano de 2031 (33% em 2021).



Figura 25 - Projeção da oferta total de bioetanol no Brasil até 2031 (EPE/MME, 2021)

Além da rota convencional de produção do bioetanol pela cana-de-açúcar, que limita o escopo do presente estudo, existe uma diversidade de rotas de produção já implementadas e que poderão contribuir significativamente com o aumento da oferta, tais como, o bioetanol de milho com previsão de produção de até 8,1 bilhões de litros até 2031, bem como, o bioetanol lignocelulósico de segunda geração, que envolve o uso do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, e o bioetanol de terceira geração, produzido através do cultivo de algas.

3.7.2.4 O uso do bioetanol nos veículos leves e a definição dos limites do sistema

Em 2003, a indústria automotiva brasileira introduziu no mercado veículos equipados com motores do ciclo Otto, a tecnologia flex-fuel, inaugurando a possibilidade para os consumidores escolherem entre abastecer com gasolina, bioetanol ou uma combinação destes dois combustíveis. Desde o seu lançamento, os veículos flex-fuel têm mostrado um notável sucesso comercial no Brasil, representando atualmente cerca de 94% dos novos emplacamentos anuais, conforme dados da ANFAVEA, (2022).

Este avanço tecnológico não apenas diversificou as opções de abastecimento, mas também possibilitou que uma parcela significativa da frota equipada com motores do ciclo Otto fosse alimentada exclusivamente com etanol, enquanto outra parte poderia optar pela gasolina, contendo uma mistura inicial obrigatória de 10% de etanol anidro, percentual que, nos dias atuais, pode chegar até 27% (Dallmann & Façanha, 2017).

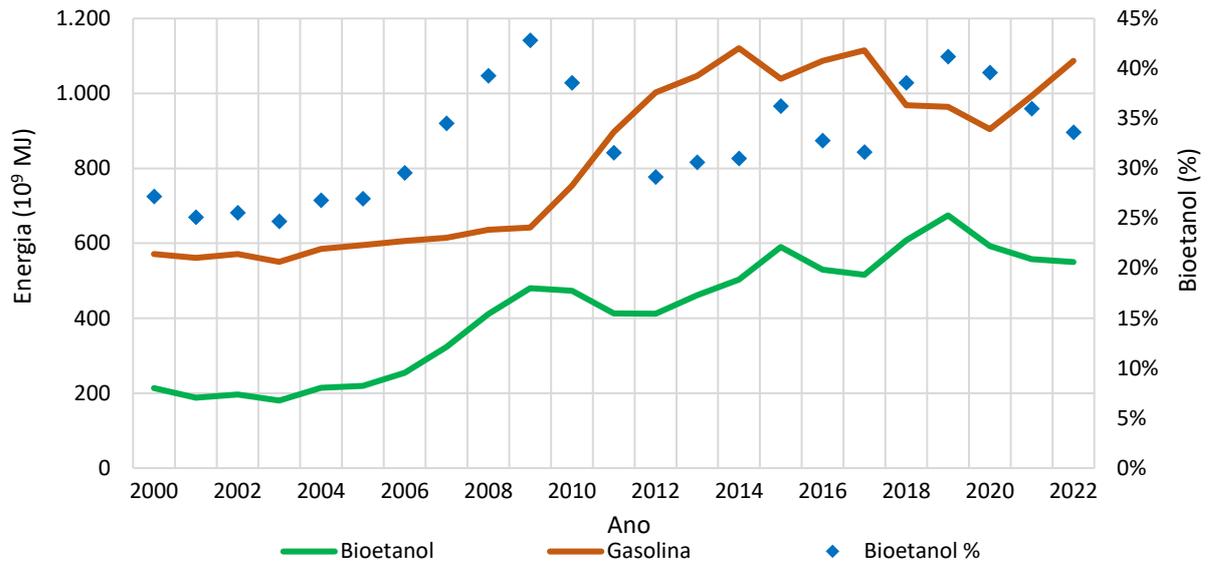


Figura 26 - Participação energética do bioetanol em veículos leves (adaptado de ANP, 2022)

Dado que os veículos flex-fuel predominam na frota brasileira, tornou-se imperativo modelar a decisão do usuário em relação à escolha do combustível, seja bioetanol, gasolina ou uma combinação desses dois. Nos últimos 10 anos, a média percentual de utilização de bioetanol no Brasil, em termos energéticos, foi aproximadamente 35%, conforme ilustrado na Fig. 26. Este dado crucial será incorporado como base no cenário de referência deste estudo, considerando o papel relevante desempenhado pelo bioetanol na matriz energética dos veículos leves ao longo desse período. Para efeitos deste estudo, será considerada apenas a utilização dos combustíveis gasolina e bioetanol em veículos com motor à combustão interna e híbridos.

Em complemento, é essencial estabelecer na modelagem, os limites do sistema em estudo, ou seja, a definição da rota relacionada ao ciclo de vida do bioetanol que para efeitos no presente estudo abrangerá desde a etapa de preparação do solo para o plantio da cana-de-açúcar até o processo de combustão nos veículos ICE e HEV (Fig. 27). Cabe ressaltar que as emissões devido a queima do biocombustível pelo cano-de-descarga (Tank-to-wheel) não serão contabilizadas, uma vez que a absorção biogênica do carbono ocorrerá durante a etapa de crescimento da planta, em função do processo de fotossíntese, em conformidade ao protocolo IPCC (2006).

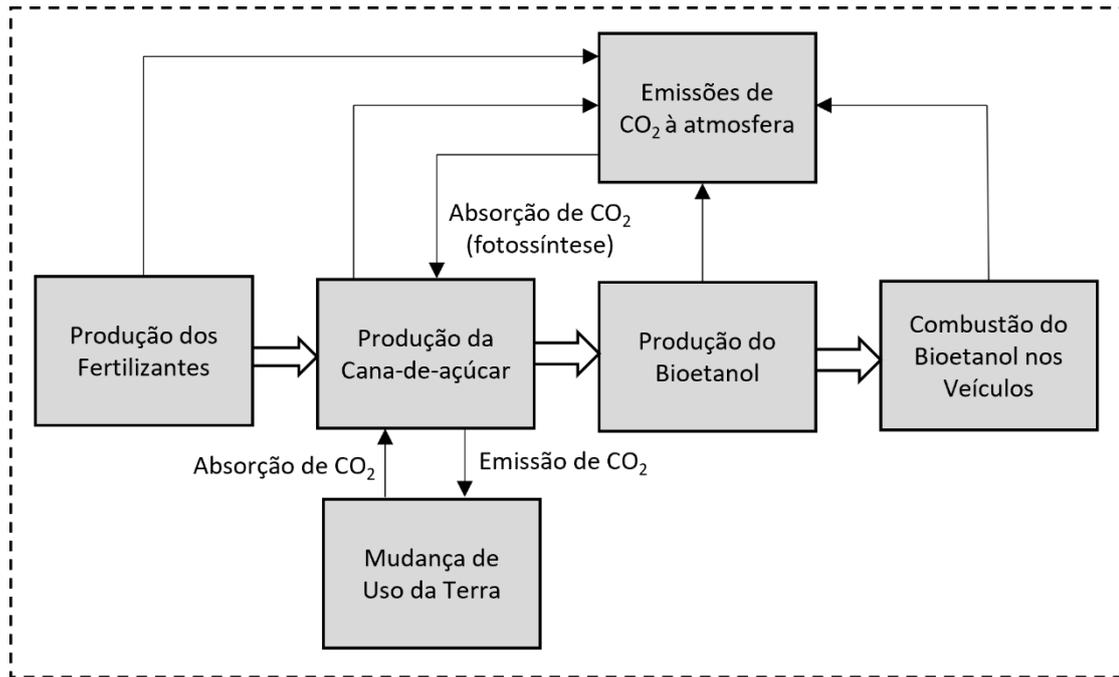


Figura 27 - Limites do sistema em estudo para a produção do etanol

Dessa forma, os limites do sistema de avaliação do ciclo de vida do bioetanol incluem as emissões nas etapas seguintes: (i) uso dos combustíveis fósseis durante a produção de insumos agrícolas; (ii) uso de fertilizantes, uréia e calcário; (iii) consumo de combustíveis fósseis na fase agrícola correspondente ao consumo de diesel em dispositivos agrícolas e caminhões; (iii) etapas de fermentação, destilação, desidratação e purificação do bioetanol e; (iv) o transporte do bioetanol até a unidade de distribuição. A Tabela 5 apresenta uma estimativa dos coeficientes de emissão em cada etapa, onde, os créditos se referem às emissões evitadas em função da produção do excedente de energia elétrica pelo bagaço da cana-de-açúcar.

A propósito da estimativa das emissões da denominada mudança no uso da terra (MUT) no Brasil, não há um consenso sobre os impactos deste tipo de emissão que ocorrem quando é alterada a cobertura para um uso da terra de menor estoque de carbono, para a produção da cana-de-açúcar. Seabra et al. (2014) dispuseram que os sistemas GREET e GTAP (avaliação de mudanças no uso da terra), acrescentam 46 gCO₂eq/MJ, em função de mudanças de uso da terra, para o bioetanol produzido no Brasil e transportado para os Estados Unidos. Por outro lado, a diretiva europeia impõe que as emissões decorrentes da alteração do uso do solo sejam tidas em conta, podendo ser aplicado um crédito de 29 gCO₂eq/MJ se a biomassa fosse obtida a partir de terrenos degradados restaurados. De fato, Walter et al. (2011) estimaram créditos de descarbonização de 33 gCO₂eq/MJ e 47 gCO₂eq/MJ nas emissões pelas mudança de uso da terra, no plantio da cana-de-açúcar em novas terras para a produção de etanol nos estados de São Paulo e Mato Grosso.

Neste sentido, Bordonal et al. (2018) estimaram que conversão de pastagens em cana-de-açúcar está associada ao acúmulo de carbono no solo que poderá reduzir ou até mesmo eliminar o tempo de reembolso de carbono da vegetação nativa. Ademais, diante das diretrizes do programa Renovabio, inclusive com metas anuais de redução das emissões da cadeia produtiva dos biocombustíveis, bem como, pelas limitações legais para o plantio em áreas de desmatamento, entende-se como razoável a adoção de cenário futuro sem a contribuição significativa de emissões pela mudança no uso da terra, motivo pelo qual o fator de emissão sem contribuição do MUT será adotado como padrão para efeitos no presente estudo, porém, considerando a possibilidade de impacto deste parâmetro nas análises das emissões.

Tabela 5 – Emissões e consumo energético nas etapas de produção do bioetanol

Etapas	Emissões kgCO ₂ eq/MJ (Walter et al., 2011)	Emissões kgCO ₂ eq/MJ (Seabra et al., 2014)	Consumo Energético MJ/MJ _{produzido} (Capaz, 2009)
1. Etapa Agrícola	0,0184	0,0110	0,080
1.1 Cultivo da Cana-de-açúcar	0,0028	0,0043	-
1.2 Queima no campo	0,0037	0,0000	-
1.3 Transporte e operações agrícolas	0,0055	0,0023	-
1.4 Emissões do solo	0,0064	0,0044	-
2. Etapa Industrial	0,0011	0,0010	0,003
3. Etapa de distribuição	0,0023	0,0020	0,020
4. Créditos	-0,0013	-0,0090	-
5. Mudança do uso da terra	-	0,0460	-
Total	0,0205	0,0510	0,103

Existem diversos estudos que avaliam as emissões na produção do bioetanol no cenário brasileiro, a principais referências são apresentadas na Tab. 6. De acordo com as publicações, a média do fator de emissão da produção do bioetanol é de 19 g CO₂eq para cada megajoule (MJ) de energia de biocombustível produzido, enquanto para a gasolina nas condições nacionais é de 30 g CO₂eq/MJ.

Tabela 6 - Principais referências sobre fatores de emissão na produção do bioetanol e gasolina no Brasil

Referência	Produção do Bioetanol (kg CO ₂ eq/MJ)	Produção da Gasolina (kg CO ₂ eq/MJ)
Walter et al., 2011	0,0205	-
R. Edwards, J-F. Larivé, 2011	0,0255	0,0140
Henrique et al., 2014	0,003 – 0,006	-
Cavalett & Chagas, 2013	0,0240	0,0720
Tsiropoulos et al., 2014	0,0170-0,0230	-
Seabra et al., 2014	0,0051	-
Wang et al., 2015	0,0280	0,0200
Glensor, 2019	0,0181	0,0140

A ANP produz periodicamente, o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2022a), no qual, apresenta um relatório atualizado da propriedades dos combustíveis utilizados no País. A Tab. 7 traz as principais propriedades adotadas no presente estudo.

Tabela 7 - Propriedades dos Combustíveis (ANP, 2022a)

Combustível	Densidade (kg/L)	Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)
Etanol hidratado	0,809	26
Gasolina C	0,754	39

3.7.3 Geração de Energia Elétrica: Análise Well-to-Tank (WTT)

Sabe-se que o atual mix de geração de eletricidade brasileiro é majoritariamente renovável, estima-se que 84% das fontes na geração de eletricidade sejam renováveis (EPE, 2020), compostas basicamente por geração hidráulica (65%), uso de biomassa (9%) e energia eólica (9%). Nesse cenário, como premissa básica, foi considerada apenas a energia elétrica gerada e transmitida por meio do Sistema Interligado Nacional – SIN (ONS, 2023), bem como a produção nacional de energia elétrica.

Neste estudo, a projeção da composição da matriz de geração de energia elétrica no Brasil foi baseada no Plano Nacional de Energia 2050 cujo cenário de referência prevê na composição, cerca de 93% de fontes renováveis em 2050 (Fig. 28). Na perspectiva tecnológica da eletromobilidade, o PNE 2050 destaca os desafios tecnológicos em relação à autonomia dos veículos elétricos e a infraestrutura de carregamento que deverão retardar a sua inserção a curto prazo no mercado brasileiro. Em um primeiro momento, entende que a eletrificação na frota brasileira ocorrerá por meio de veículos híbridos, onde os veículos leves devem contar com o

desenvolvimento desta tecnologia associada à motorização flexfuel. O PNE 2050 aborda a eletrificação dos veículos leves em duas vertentes: uma envolve uma transição progressiva para hibridização, com 61% da frota composta por veículos híbridos e 11% por veículos elétricos; a outra contempla um cenário mais avançado de eletromobilidade, com 85% de veículos híbridos e 15% de veículos elétricos (MME/EPE, 2020).

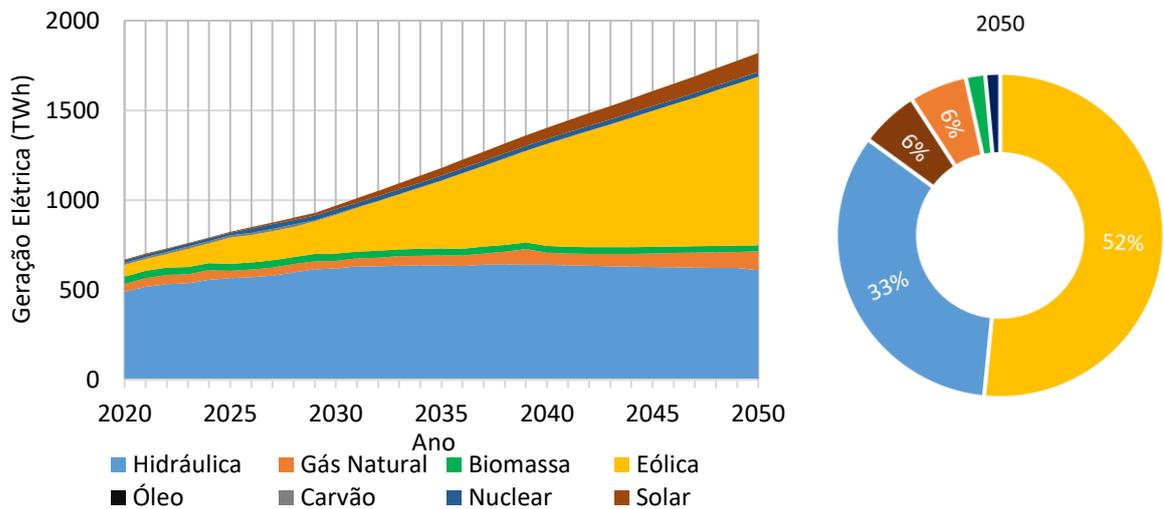


Figura 28 - Projeção da geração elétrica: PNE 2050 (MME/EPE, 2020)

No cenário de transição energética, a projeção mostra que a energia eólica se destacará com a participação de cerca de 52% da geração total em 2050. De fato, o potencial brasileiro instalado em geração eólica onshore é atualmente de cerca de 20 GW, e estudos recentes estimam o potencial instalável brasileiro de cerca de 700 GW para projetos eólicos, a maioria dos quais são potenciais offshore inexplorados.

Além dos custos envolvidos na produção de energia elétrica, na etapa WTT foram consideradas as perdas na transmissão e distribuição de energia elétrica. Weiss (Weiss et al., 2000) estimou as perdas na rede elétrica nos Estados Unidos da América em cerca de 9% da energia gerada. No Brasil, estima-se que as perdas na transmissão e distribuição estejam próximas a 17% do total de eletricidade gerada. A projeção das perdas na transmissão e distribuição considerada neste estudo está de acordo com o Plano Nacional de Energia 2050 (MME/EPE, 2020).

Por fim, para calcular o potencial de aquecimento global (GWP) decorrente do consumo de energia elétrica da rede, é necessário estimar os coeficientes de emissão das fontes que compõem a matriz elétrica ao longo de toda a cadeia produtiva do setor. Nesse contexto, Barros et al., (2018) realizaram uma avaliação do desempenho ambiental passado e futuro da geração de eletricidade no Brasil, considerando tanto o potencial de aquecimento global (GWP)

quanto o potencial de temperatura global (GTP). Os autores empregaram uma abordagem de avaliação do ciclo de vida, conforme os padrões ISO 14040 e ISO 14044, utilizando a base de dados Ecoinvent. Esse estudo proporcionou dados sobre o aquecimento global por meio da categoria de impacto GWP para um período de 100 anos, aplicado à geração de eletricidade no Brasil entre os anos de 2016 e 2026. Os resultados dessa pesquisa, em particular os fatores de emissão (Tabela 8), foram adotados no presente trabalho para estimar os fatores de emissão dos gases de efeito estufa associados à matriz de geração elétrica, inclusive durante o ciclo de vida de produção dos combustíveis primários.

Tabela 8 - Fatores de emissão na geração elétrica por fonte (Barros et al., 2018)

Fonte	g CO ₂ eq / MWh	Observações
Hidráulica	73.780	Produção de eletricidade, hidrelétrica, reservatório, região tropical.
Eólica	15.250	Produção de eletricidade, energia eólica, turbina de 1–3 MW, onshore.
Solar	85.910	Produção de eletricidade, fotovoltaica, instalação em terreno aberto de 570 kWp.
Biomassa	417.100	Produção de eletricidade, biomassa da cana-de-açúcar, com subproduto etanol.
Nuclear	12.090	Produção de eletricidade, nuclear, reator de água sob pressão.
Gás Natural	381.600	Produção de eletricidade, gás natural, usina de ciclo combinado.
Carvão	926.400	Produção de eletricidade por carvão mineral no Brasil.
Óleo	1.068.000	Produção de eletricidade por óleo diesel.

3.7.4 Consumo de Combustível: Análise Tank-to-Wheel (TTW)

Nesta seção, a metodologia para estimar o consumo energético e emissões de gases de efeito estufa na etapa de consumo dos combustíveis será apresentada, com base na abordagem Well-to-Wheel do ciclo de vida dos veículos em estudo.

3.7.4.1 O Ciclo Padrão de Condução

Os ciclos padrão de condução tem como objetivo estabelecer um método padronizado para medir o desempenho dos veículos em termos de consumo de combustível, emissões de poluentes e outros parâmetros relevantes. Esses ciclos de teste são projetados para simular condições de condução típicas e representativas, a fim de fornecer uma base de comparação consistente entre diferentes veículos.

A Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa (UNECE), publicou em 2004, o procedimento de teste de veículos leves harmonizado mundialmente (em inglês WLTP). O objetivo do WLTP foi de estabelecer um padrão global para a medição das emissões de poluentes e o consumo de combustível em veículos leves. O WLTP foi desenvolvido para substituir o antigo ciclo de testes conhecido como NEDC (New European Driving Cycle), que estava desatualizado e não refletia as condições reais de condução.

O ciclo de perfil de velocidade padrão no Brasil é semelhante ao ciclo americano FTP75 (EPA, 2023) para veículos leves de passageiros, proposto pela Norma Brasileira NBR6601, que prevê o deslocamento total de 12 km, com velocidade máxima de 91,2 km/h, por um período total de 1.369 segundos e não inclui subidas e descidas (Fig. 29). O ciclo de condução permite aproximar um modelo de condução necessário para a projeção do consumo energético.

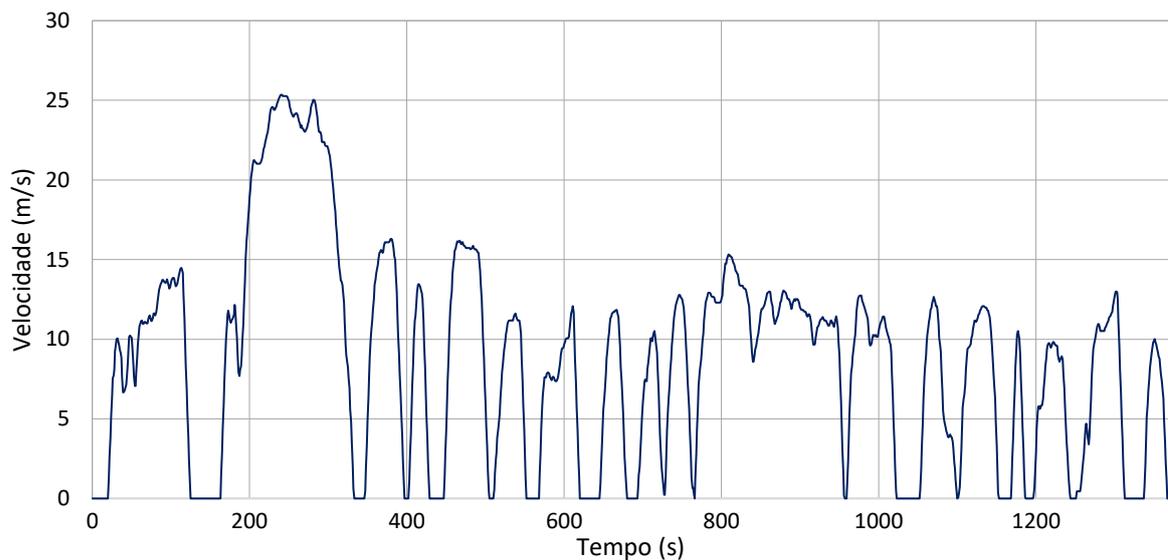


Figura 29 - Perfil padrão de velocidade - FTP75 (EPA, 2022)

3.7.4.2 Forças Atuantes no Movimento Veicular

Para estimar o consumo energético médio de cada veículo, rodando no ciclo padrão de condução, se faz necessária inicialmente, analisar as forças longitudinais atuantes no seu movimento linear. Neste sentido, a Fig. 30 apresenta as forças longitudinais consideradas no movimento veicular (Vidhya & Balaji, 2019).

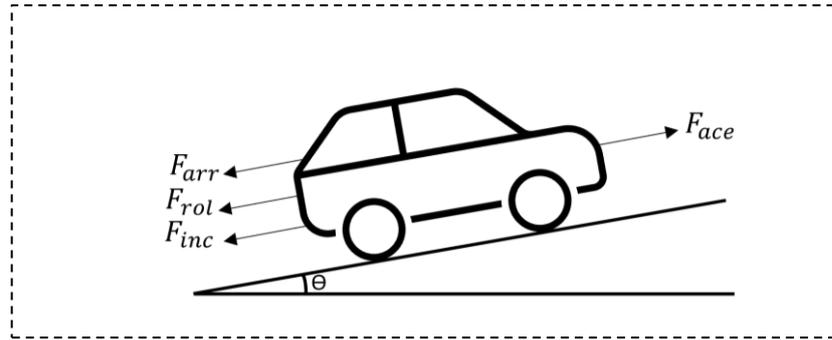


Figura 30 – Principais forças atuantes no movimento veicular linear

A força de aceleração (F_{ace}) é a componente responsável pela variação de velocidade do veículo, seja pelo acionamento dos freios ou pela tração nas rodas.

$$F_{ace} = m \cdot a \quad (3)$$

A força de arrasto aerodinâmico (F_{arr}) representa a resistência do ar ao movimento do veículo e depende da sua velocidade, do coeficiente de arrasto e de sua área frontal. A resistência do ar aumenta com a velocidade, exigindo maior potência para superá-la.

$$F_{arr} = c_{arr} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad (4)$$

A força de resistência ao rolamento (F_{rol}) representa a resistência oferecida pela rolagem dos pneus sobre a superfície da estrada. Depende do tipo e condição dos pneus, da qualidade da estrada e da carga no veículo. A resistência ao rolamento é uma força que atua na direção oposta ao movimento do veículo e deve ser superada pela força de tração para manter o veículo em movimento.

$$F_{rol} = m \cdot g \cdot c_{rol} \cdot \cos\theta \quad (5)$$

A força de inclinação (F_{inc}) é resultado da componente gravitacional que atua em função do ângulo de inclinação da estrada. Desta forma, dependerá do ângulo de inclinação da estrada e da massa do veículo.

$$F_{inc} = m \cdot g \cdot \sin\theta \quad (6)$$

Conhecidas as forças que atuam na dinâmica veicular, o consumo energético de cada veículo pode ser estimado por meio do consumo médio aplicado ao ciclo de condução padrão. Neste sentido, a energia total necessária para deslocar cada veículo é regida pelas equações 6 a 11, que representam os componentes de potência necessários para a aceleração (P_{acc}), para vencer o arrasto aerodinâmico (P_{adr}), para vencer a inclinação (P_{inc}) e a resistência ao rolamento (P_{rol}) do veículo.

$$P_{ace} = m \cdot v \cdot a \quad (7)$$

$$P_{arr} = c_{arr} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 / 2 \quad (8)$$

$$P_{rol} = m \cdot g \cdot v \cdot c_{rol} \cdot \cos\theta \quad (9)$$

$$P_{inc} = m \cdot g \cdot v \cdot \sin\theta \quad (10)$$

$$P_{tot} = P_{ace} + P_{arr} + P_{rol} + P_{inc} \quad (11)$$

$$E_{tot} = P_{tot} \cdot t \quad (12)$$

As constantes $c_{rol}=0,015$, $g=9,81 \text{ m/s}^2$ e $\rho =1,225 \text{ kg/m}^3$ representam, respectivamente, o coeficiente de resistência ao rolamento, a aceleração da gravidade e a densidade do ar. Destaca-se que o ciclo padrão não prevê inclinações, então, $\theta=0^\circ$.

Para a previsão do consumo energético, foram considerados veículos leves de passageiros (classe 3, UNECE) e selecionados os veículos mais vendidos por tipo no mercado brasileiro em 2021 (Tabela 9).

Tabela 9 - Parâmetros utilizados no cálculo do consumo energético por modelo de veículo

	Notação	ICE	HEV	BEV
Modelo				
		Hyundai HB20	Toyota Corolla	Nissan LEAF
Massa (kg)	m	1053	1440	1582
Coeficiente de arrasto	c_{arr}	0,33	0,28	0,28
Área frontal (m ²)	A	2,1	2,2	2,38

Utilizando as equações (6) a (11) juntamente com as eficiências (Tabela 10) é possível estimar a energia total consumida por cada veículo no ciclo padrão.

Tabela 10 - As eficiências energéticas dos diferentes tipos de veículos

Veículo	ICE	HEV	BEV	Fonte
Eficiência	0,180	0,264	0,623	Sheng et al., 2021

O Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) publica anualmente um estudo para avaliar a eficiência energética dos veículos automotores leves comercializados no Brasil (INMETRO, 2022), resultado de testes veiculares em laboratório, em consonância às normas e regulamentações brasileiras. Uma análise dos resultados do INMETRO, comparados com os resultados da simulação do presente estudo foi realizada e os dados mostram uma boa aproximação com a presente metodologia (Tabela 11).

Tabela 11 - Consumo energético dos diferentes modelos de veículos

	ICE	HEV	BEV	Fonte
Modelo	Hyundai HB20	Toyota Corolla	Nissan LEAF	
Consumo (MJ/Km)	1,50	1,27	0,58	INMETRO, 2021
Consumo (MJ/Km)	1,50	1,23	0,57	Resultados da simulação

O consumo de combustível pode ser estimado pelo produto do número de veículos da frota, por tipo de veículo e ano, pela distância percorrida e consumo médio por tipo de combustível, segundo publicação do IPCC (2006) e estudo desenvolvido por Choma & Ugaya (2017).

Então, as emissões no consumo de combustível, via cano de descarga dos motores à combustão interna puderam ser calculadas, adotando o fator de emissão para a gasolina brasileira de 0,067 kg CO₂eq/MJ (MME/EPE, 2005) e considerando as emissões (TTW) do bioetanol como nulas, uma vez que o carbono é considerado sequestrado na fase de produção do biocombustível.

3.7.5 Fase de manufatura dos veículos

No Brasil, a comercialização e a utilização dos veículos elétricos e mesmo dos híbridos, ainda representam um baixo percentual de participação em mercado, apesar do crescimento das vendas nos últimos anos, seguindo a tendência mundial. Segundo informações dos fabricantes, as vendas no ano de 2022 corresponderam respectivamente, a 0,5% (BEV) e 2,1% (HEV) do total dos novos veículos leves no Brasil (ANFAVEA, 2022). A produção atual de veículos elétricos no Brasil é limitada, com poucas fábricas dedicadas a esse tipo de conjunto motopropulsor, sendo a maior parte dos veículos elétricos disponíveis no país, fabricados no exterior.

Nas últimas décadas, a eletrificação da mobilidade tornou-se um tema central na agenda global. Nesse contexto, muitos estudos têm se concentrado na avaliação das emissões associadas à fabricação de veículos leves de passageiros, embora poucos tenham se dedicado ao contexto específico do Brasil. A Tabela 12 resume as principais referências utilizadas na análise do potencial de aquecimento global (GWP) médio durante a fabricação de cada tipo de veículo.

Tabela 12 - GWP na manufatura dos veículos

Referência	ICE (kg CO ₂ eq)	HEV (kg CO ₂ eq)	BEV (kg CO ₂ eq)
Hawkins et al., 2013	6450	-	13050 - 14250
Qiao et al., 2017	9172	-	14642 – 14746
Karaaslan et al., 2018	15500*	24500*	30200*
Kawamoto et al., 2019	5493	-	12267
Koroma et al., 2020	7350	9600	10350

*veículos utilitários esportivos

O estudo conduzido por Koroma et al. (2020), em conformidade com as normas da ISO (2006), merece destaque por sua análise dos impactos ambientais potenciais na produção de veículos de passeio. Utilizando a massa média dos automóveis de passageiros europeus como base, este estudo empregou uma avaliação do ciclo de vida dos componentes por meio do banco de dados Ecoinvent 3.4 (Ecoinvent, 2023). Os resultados indicaram as estimativas médias de emissões de 7.350, 9.600 e 10.350 kg CO₂eq durante o ciclo de fabricação de veículos com motores de combustão interna (ICE), veículos híbridos elétricos (HEV) e veículos elétricos a bateria (BEV), respectivamente. Embora esses dados não estejam contextualizados com a realidade brasileira, serão considerados para efeitos de comparação com os resultados do presente estudo.

No presente estudo, a abordagem da demanda de energia acumulada (DEA) foi implementada para estimar as emissões na fabricação dos veículos e ajustada à realidade brasileira, por meio de associação aos dados de projeção da matriz energética nacional e aos seus respectivos fatores de emissão. A DEA é um dos indicadores do ciclo de vida - representa a medida da quantidade total de energia necessária para produzir um produto. Aplicada à fabricação de veículos, a medida representa a demanda energética, desde a mineração e produção das matérias-primas, passando pela fabricação dos componentes e montagem do veículo, até o descarte final do produto. Yazdanie et al. (2016) desenvolveram a análise de ciclo de vida de veículos com motorização elétrica, híbrida e à combustão interna, por meio de inventários da Ecoinvent (2023) estimaram a DEA na fabricação dos componentes destes veículos. A Tabela 13 apresenta a estimativa de demanda energética na produção da carroceria em relação a sua massa (kg), do grupo motopropulsor em função da sua potência (kW) e da bateria de lítio-íon da classe NMC (níquel-mangânês-cobalto) em relação a sua massa (kg).

Tabela 13 - Demanda de Energia Acumulada (DEA) do ciclo fabricação (Yazdanie et al., 2016)

Tipo de veículo	Carroceria (MJ/kg)	Grupo Motopropulsor (MJ/kW)	Bateria NMC Lítio-íon (MJ/kg)
ICE	63,1	93	0
HEV	63,1	214	76
BEV	63,1	166	76

Os dados específicos relativos a cada categoria de veículo abordada neste estudo, como a potência do grupo motopropulsor, a massa da carroceria e da bateria, foram adquiridos a partir de catálogos técnicos que destacam as características apresentadas na Tabela 15. Essa abordagem viabiliza a estimativa da demanda energética total associada à fabricação de cada veículo. Com base na demanda energética global durante o processo fabril e com o conhecimento dos fatores de emissão da matriz energética relacionados à rota de produção, torna-se possível calcular as emissões totais de gases de efeito estufa originadas na produção de cada componente individual, assim como do veículo como um todo, no contexto brasileiro. A composição da matriz energética brasileira na produção dos veículos, segue o inventário do ciclo de vida da fabricação de automóveis de passageiros, cuja composição é de 77% de energia elétrica, 22% de gás natural e 1% de óleo diesel, conforme relatório n. 14 da Ecoinvent (Spielmann et al., 2007),.

Algumas considerações a respeito das características dos veículos fabricados no Brasil devem ser feitas. Os veículos leves com motores do ciclo Otto à combustão interna (ICE), utilizam majoritariamente a tecnologia flex-fuel, e representam atualmente cerca de 94% das vendas de veículos novos neste seguimento. A popularidade dos modelos flex-fuel resultaram de sua versatilidade no abastecimento de combustível, pela possibilidade de utilização tanto de gasolina quanto de bioetanol ou uma mistura destes. No presente estudo foram considerados somente os veículos ICE flex-fuel com utilização de bioetanol (ICEe) e gasolina (ICEg).

Os veículos híbridos são conhecidos por serem equipados com um motor a combustão interna, um motor elétrico e uma bateria que pode ser carregada externamente. Quanto a possibilidade de carregamento da bateria, o Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), pode ter a bateria carregada externamente pela rede elétrica, e o HEV, a bateria é carregada através de energia gerada pelo acionamento do motor à combustão ou por meio das frenagens regenerativas. No Brasil cerca de 2,5% das vendas de novos veículos leves no ano de 2022 foram de veículos híbridos (ANFAVEA, 2022), comercializados majoritariamente modelos

HEV. Diante deste fato, o modelo híbrido HEV foi adotado no presente estudo, com a utilização dos combustíveis bioetanol (HEVe) ou gasolina (HEVg).

3.7.5.1 Baterias de Lítio-íon

As baterias desempenham papel fundamental no desempenho de um veículo elétrico, uma vez que são responsáveis pelo armazenamento de energia, sendo um fator preponderante para determinar a autonomia do veículo. Atualmente, as baterias de íons de lítio (Lítio-íon) são as mais utilizadas em veículos elétricos, em função de suas vantagens comparativas. Se destacam pela leveza dos seus componentes, elevada capacidade de carga, resistência interna, bem como, pelos seus elevados ciclos de carga e descarga, além de se caracterizarem por um efeito de memória reduzido (Sanguesa et al., 2021). A Tab. 14 apresenta os principais tipos de baterias e suas características.

Tabela 14 - Características dos principais tipos de baterias (Sanguesa et al., 2021)

	Temperatura de Trabalho (°C)	Densidade energética (Wh/kg)	Potência específica (W/kg)	Ciclos
Pb-PbO ₂	20–45	30–60	75–100	500–800
Ni-Cd	0–50	60–80	120–150	2000
Ni-MH	0–50	60–120	250–1000	500
Zn-Br ₂	20–40	75–140	80–100	>2000
Na-NiCl	300–350	160	150–200	1500–2000
Na-S	300–350	130	150–290	2500–4500
Li-íon	20–60	100–275	350–3000	400–3000

As baterias de lítio-íon, de maneira geral, consistem em metais nobres, cujas reservas são limitadas tanto quantitativa quanto regionalmente. Dentre esses metais, incluem-se o lítio, cobalto, manganês, níquel e alumínio. Além disso, os procedimentos de extração e produção dessas matérias-primas tendem a ser onerosos em termos energéticos e acarretam impactos consideráveis no meio ambiente.

Neste estudo serão consideradas as baterias de lítio-íon em uso tanto nos veículos com motorização híbrida como nos elétricos. As baterias de lítio-íon podem ser classificadas em diversas famílias de acordo com a composição dos materiais utilizados no cátodo, sendo as principais destacadas na Tab. 15:

Tabela 15 - Principais Classes de Bateria de Lítio-íon (Yudhistira et al., 2022)

Classes de Bateria	Composição do Cátodo	Densidade Energética (kg/ kWh)
LFP	Lítio-Ferro-Fosfato (LiFePO ₄)	9,1
NMC	Lítio-Níquel-Manganês-Cobalto (LiNiMnCoO ₂)	7,1
NCA	Lítio-Níquel-Cobalto-Alumínio (LiNiCoAlO ₂)	4,8

Dentre as tecnologias comercializadas atualmente, as composições químicas das classes NMC e NCA se apresentam como as mais promissoras em função do melhor custo-benefício. Neste sentido, Duarte Castro et al. (2021) em estudo voltado à projeção da utilização das baterias de lítio-íon, destacou que essas classes devem dominar o mercado de baterias de automóveis no Brasil até o ano de 2030.

A fabricação da bateria de lítio-íon é o principal contribuinte na produção de veículos elétricos para as emissões de gases de efeito estufa, pois, representa cerca de 20 a 30% das emissões totais relacionadas à etapa de fabricação dos BEV. A fabricação da bateria lítio-íon apresenta menor impacto na produção dos HEV, uma vez que tem sua capacidade reduzida em cerca de 50% em relação a bateria dos BEV (Koroma et al., 2020).

O período de vida útil de uma bateria de íon de lítio em um veículo elétrico a bateria é essencial para o seu ciclo de vida, pois está intimamente ligado ao seu custo energético e à sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, várias metodologias têm sido utilizadas para estimar a duração média de uma bateria de íon de lítio para propulsão elétrica, como demonstrado na Tabela 16.

Tabela 16 - Principais referências para a vida útil média de baterias de Lítio-íon

Referência	Tempo de Vida Útil
Winslow et al., 2018	9 anos
Ziemann et al., 2018	10 anos
Y. Wu et al., 2020	10 anos
D. Qiao et al., 2021	6 a 12 anos

Em consonância às principais referências, bem como, às informações de fabricantes, para efeitos no presente estudo, a vida útil média de uma bateria de Lítio-íon será considerada de 10 anos.

3.7.5.2 Reciclagem da Bateria de Lítio-íon

Em um cenário de crescente participação dos veículos elétricos no mercado brasileiro, espera-se o aumento da demanda pelos metais que compõem a formação da bateria de lítio-íon, em especial, o lítio, o cobalto, o níquel e o manganês. Estima-se que até o ano de 2030, a procura

global por lítio e cobalto poderá aumentar entre 18 e 37 vezes em relação aos níveis do ano de 2015 (Duarte Castro et al., 2021).

Do ponto de vista ambiental, uma vez que o processo de fabricação das baterias de lítio-íon respondem por até 30% das emissões de gases de efeito estufa na produção de um veículo elétrico, é clara a necessidade de redução dos impactos ambientais do ciclo de vida do produto, seja pelo aperfeiçoamento das tecnologias de fabricação, pelo reuso ou reciclagem dos seus componentes. Entretanto, apesar de ser quase consensual entre os pesquisadores, quanto ao potencial tecnológico do reaproveitamento e reciclagem de baterias de lítio-íon, não há uma estratégia de gestão dominante para esse tipo de resíduo, sendo que a destinação mais adequada, depende de fatores locais, como custos, interesses, capacidade e infraestrutura.

Atualmente, não existem no Brasil políticas públicas ou regulamentações específicas voltadas à reciclagem das baterias de lítio-íon. Entretanto, no ano de 2019, o Ministério do Meio Ambiente juntamente com a Associação Brasileira de Baterias Automotivas e Industriais (ABRABAT) firmaram o acordo setorial para a implementação de sistema de logística reversa de baterias de chumbo-ácido (ABRABAT, 2019). Este acordo estabelece que os fabricantes, importadores e distribuidores de baterias de chumbo-ácido são responsáveis pela logística reversa dos resíduos, com o dever de coletar, transportar e destinar adequadamente as baterias usadas, com meta de coleta de 90% até o ano de 2023.

Existem diversos processos de reciclagem de baterias de lítio-íon, sendo mais promissoras, as tecnologias de reciclagem que permitem reutilizar os recursos e produtos obtidos para produzir novas unidades de bateria. Em geral, a literatura distingue três rotas principais de reciclagem: a pirometalurgia, a hidrometalurgia e o método inovador chamado de reciclagem direta. As duas primeiras rotas mencionadas são utilizadas em conjunto com processos de separação mecânica prévia e/ou pós-tratamento e também podem ser combinados (Rosenberg et al., 2023). Tendo em vista que o processo de reciclagem direta é um método ainda em desenvolvimento, para efeitos no presente estudo serão considerados somente os processos de pirometalurgia e hidrometalurgia.

A pirometalurgia é um processo para extrair materiais valiosos de baterias descartadas por meio da fusão dos metais componentes. Trata-se de metodologia de alta energia que pode aceitar quase qualquer tipo de bateria e que extrai metais nobres como o lítio, cobre, cobalto, níquel e aço. No processo geral, todos os produtos orgânicos da célula são incinerados para obter energia do processo e os metais valiosos são extraídos através de diferentes etapas de purificação. O processo de pirometalurgia mais usual, faz uso do subprocesso de calcinação,

que é um procedimento térmico executado em uma atmosfera com baixo teor de oxigênio ou isenta de oxigênio, a uma temperatura de 700 °C. Esse subprocesso é aplicado a materiais sólidos com o propósito de remover componentes voláteis, ao mesmo tempo em que o material sólido passa por mudanças em sua fase ou reações de decomposição. Após a lixiviação com água e a subsequente filtração, a água resultante é evaporada, deixando o composto químico de lítio disponível para processos posteriores. As principais etapas do processo convencional de pirometalurgia são apresentados na Fig. 31.

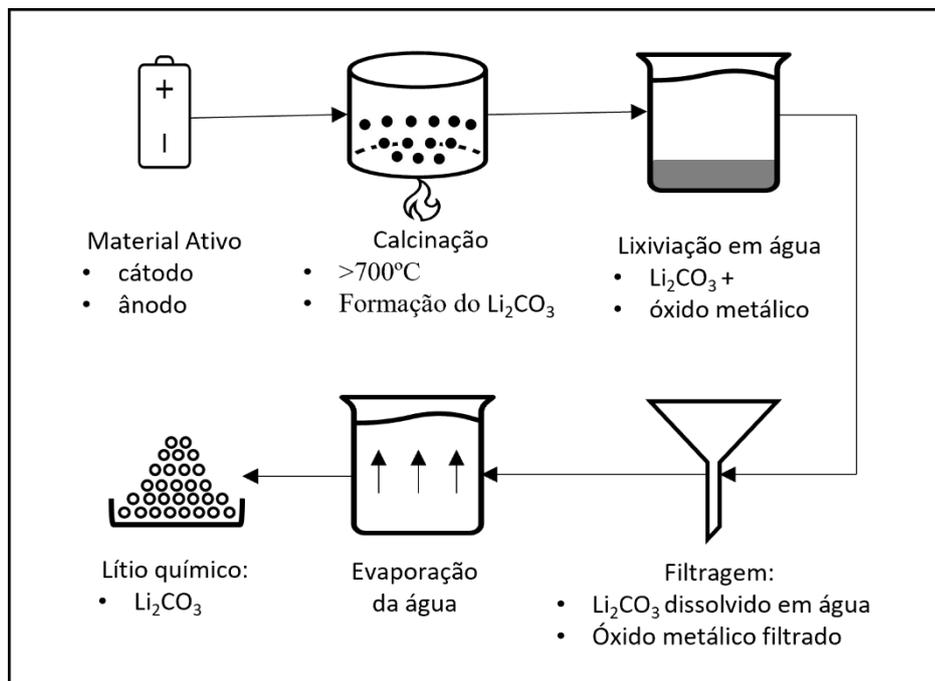


Figura 31 – Principais etapas dos processo de reciclagem por pirometalurgia (adaptado de Enrique & Jorges, 2022)

No processo hidrometalúrgico mais utilizado para a extração de lítio de baterias lítio-íon, as células usadas da bateria são descarregadas e separadas em componentes anódicos e catódicos, seguido da lixiviação, cristalização (absorção seletiva), extração e precipitação. O objetivo do processo hidrometalúrgico é ressintetizar os materiais da bateria para criar um circuito fechado de reciclagem. A lixiviação da massa negra é a primeira etapa de um tratamento hidrometalúrgico padrão, onde os componentes metálicos são transferidos para se dissolverem em soluções ácidas ou alcalinas para se prepararem para precipitação, extração de solvente e absorção seletiva (Enrique & Jorges, 2022). A Fig. 32 apresenta as principais etapas do processo convencional de hidrometalurgia.

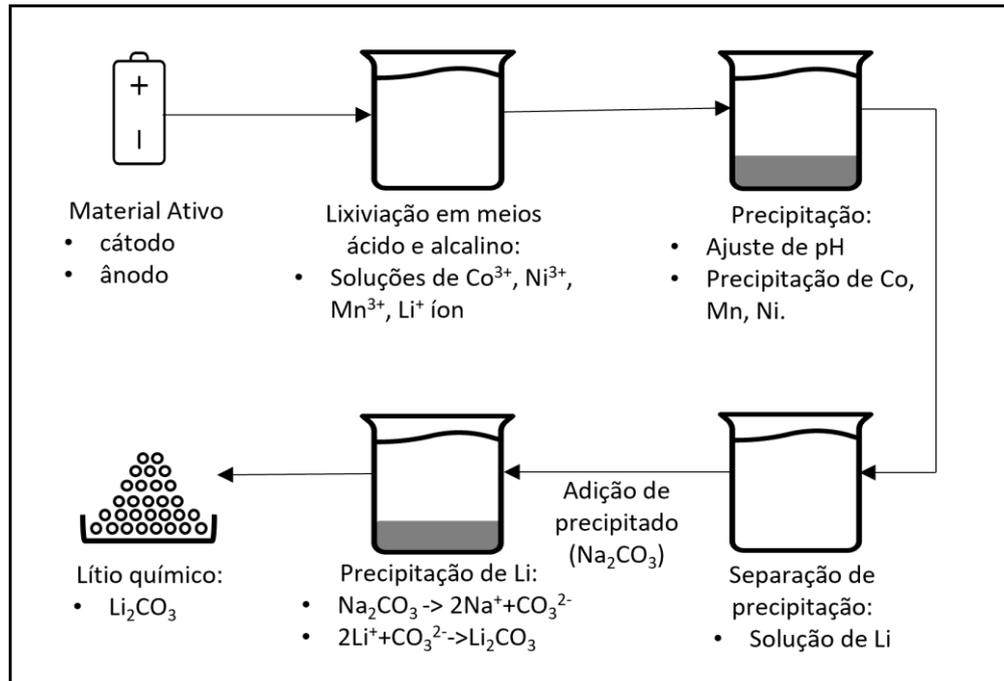


Figura 32 - Principais etapas dos processo de reciclagem por hidrometalurgia (adaptado de Enrique & Jorges, 2022)

Nos processos de reciclagem, é comum que as frações metálicas recuperadas não estejam na forma pura, mas sim como sais metálicos ou outros compostos químicos. Portanto, neste estudo, adotaremos como premissa que os compostos metálicos resultantes dos processos de reciclagem possuem a mesma composição e qualidade que os insumos de produção correspondentes necessários para cada tecnologia de célula considerada (Mohr et al., 2020). Além disso, nos processos de pirometalurgia e hidrometalurgia, a energia elétrica proveniente da rede será considerada como fonte energética, conforme descrito no inventário Ecoinvent (Fisher et al., 2006).

A fim de analisar os impactos ambientais e possíveis benefícios dos processos de reciclagem de baterias de lítio-íon, Mohr et al. (2020) realizaram uma revisão da literatura, onde destacaram o ganho energético acumulado em função do processo de reciclagem das baterias, cujos dados seguem apresentados nas tabela 17. A demanda de energia acumulada (DEA) se refere à energia poupada em função da recuperação de materiais no processo de reciclagem, descontada a energia demandada no processo de reciclagem.

Tabela 17 – Recuperação de Energia Acumulada - Ciclos de Reciclagem

Bateria lítio-ion tipo NMC	Pirometalurgia	Hidrometalurgia
Referência	DEA (MJ/ton. Bateria)	DEA (MJ/ton. Bateria)
Buchert et al., 2011	-	-16.000
Olofsson & Romare, 2013	-13.000	-
Hendrickson et al., 2015	-12.200	-
Buchert, 2015	-58.089	-41.115
Buchert & Sutter, 2016	-55.089	-47.014

A quantidade de baterias em desuso a cada ano, pode ser obtida dos dados de projeção do sucateamento da frota de veículos BEV e HEV que fazem parte do presente estudo e a massa de cada bateria consta dos catálogos dos veículos em estudo. Por meio dos dados de massa total de bateria, e conhecidos os fatores de emissão da matriz energética relacionados à rota de reciclagem, é possível estimar a redução de emissões totais de gases de efeito estufa, no cenário brasileiro, considerando a meta de 90% das baterias em desuso disponibilizadas para a reciclagem, de forma análoga ao acordo de reciclagem da ABRABAT (ABRABAT, 2019).

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para analisar a robustez e a confiabilidade dos resultados do presente estudo, uma análise de sensibilidade foi desenvolvida considerando-se a variação dos principais parâmetros e variáveis considerados neste estudo. Neste estudo, os principais parâmetros e variáveis considerados são: o PIB per capita, o tempo de vida útil dos veículos, o sucateamento da frota, a variação dos modelos de veículos e os fatores de emissão dos combustíveis.

4.1 Projeção da frota de veículos em cenários de variação do PIB

Na abordagem da metodológica apresentada na seção 3, o PIB per capita foi identificado como uma das principais variáveis que contribuem para a composição da frota de veículos. Nesta análise sensibilidade, o PIB per capita foi simulado em configurações de crescimentos médios do PIB da ordem de 1 a 3,1%, cujos resultados da variação do crescimento da frota de veículos são apresentados na Fig. 33.

A frota brasileira, composta por cerca de 43 milhões de veículos, na hipótese de menor crescimento médio de 1% poderá alcançar o número de 52 milhões de veículos, enquanto, na situação de maior crescimento econômico (PIB médio de 3,1%) poderá alcançar o estoque de 70 milhões de veículos.

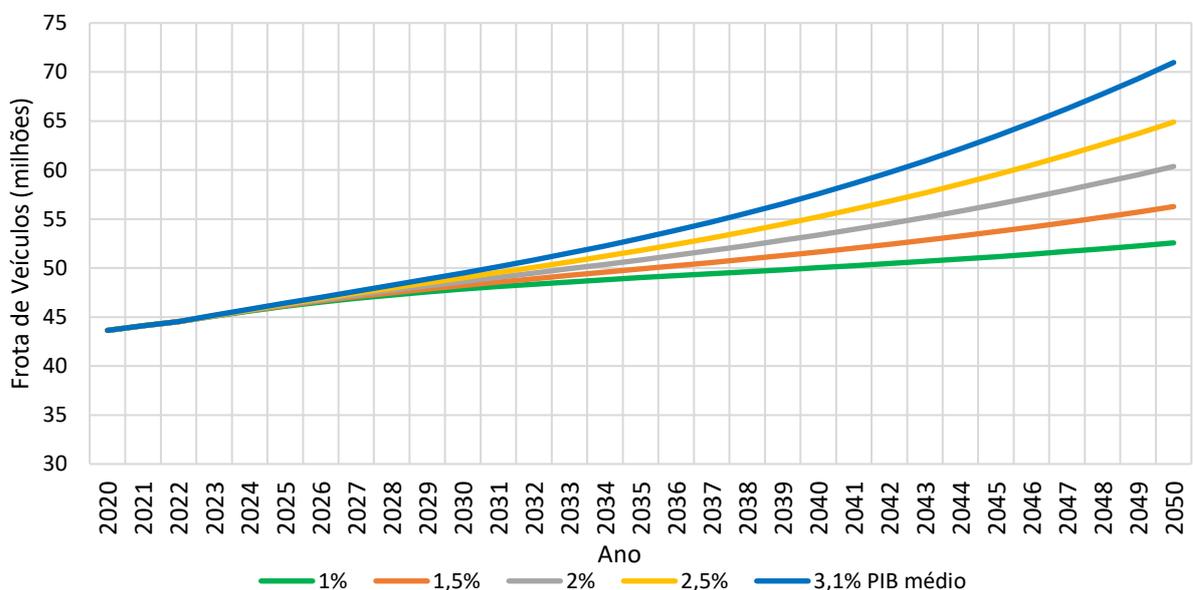


Figura 33 - Projeção da frota de veículos em cenários de crescimento do PIB

As curvas mostram a sensibilidade da variação do estoque de veículos à variação do crescimento econômico médio, que a cada 0,5% de aumento do crescimento médio do PIB, poderá representar o aumento de médio de 9% no total de veículos do ano de 2050.

Cabe destacar que a variação do número de veículos da frota impacta diretamente nas projeções de emissão da frota como um todo, porém, não influencia diretamente na escolha do melhor tipo de tecnologia de propulsão com vistas à mitigação dos impactos ambientais.

4.2 Vida útil dos veículos em quilômetros

Conforme metodologia apresentada neste estudo, existem diversas abordagens quanto a vida média de um veículo no Brasil e a média de quilômetros rodados durante este intervalo de tempo. Os parâmetros sobre a atividade do veículo ao longo de sua vida útil podem afetar significativamente estoque de veículos da frota, os resultados da projeção e consequentemente os impactos relacionados às emissões da frota.

Tendo como objetivo avaliar a sensibilidade das emissões relacionados à etapa de fabricação do veículo em relação a quilometragem média de cada veículo, que reflete a sua vida útil, foram simuladas quilometragens médias de 150 mil, 200 mil, 250 mil e 300 mil quilômetros percorridos (Fig. 34).

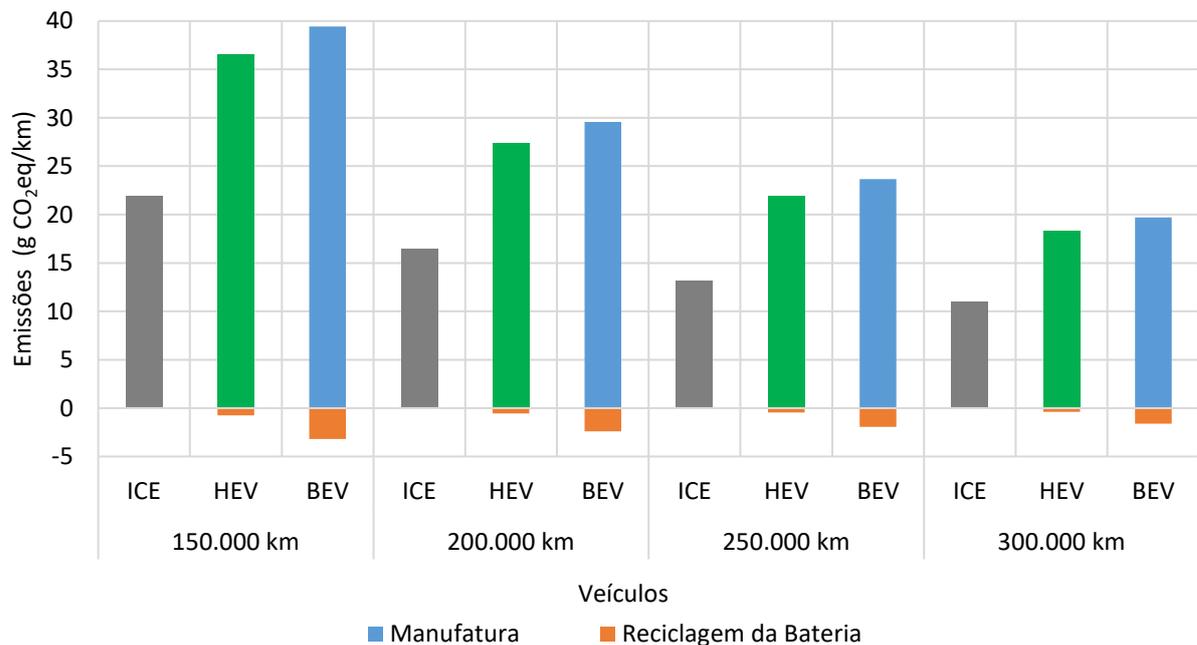


Figura 34 - Variação das emissões da fabricação em função da vida útil do veículo

Neste caso, identifica-se que a cada 50 mil quilômetros adicionais na vida útil do veículo corresponderia à redução de cerca de 21% nas emissões médias na fabricação do veículo. Tal fato pode ser explicado em função da distribuição das emissões da fabricação de cada veículo por um período maior de tempo. Entretanto, destaca-se que este parâmetro não impacta nas emissões no uso do veículo, uma vez as emissões desta etapa do ciclo estão diretamente vinculadas à eficiência energética.

4.3 Coeficientes de arrasto aerodinâmico e consumo energético

O coeficiente de arrasto aerodinâmico ou coeficiente de resistência aerodinâmica é uma medida da resistência do ar ao movimento do veículo. Uma análise de sensibilidade deste parâmetro foi desenvolvida com a finalidade de identificar o comportamento da variação do consumo energético no uso do veículo em função do coeficiente de arrasto dos principais veículos vendidos no Brasil (Tab. 18).

Tabela 18 - Coeficientes de arrasto dos principais modelos de veículos vendidos no Brasil

(CarrosNaWeb, 2024)

Modelo	Coeficiente de Arrasto
Chevrolet Onix	0,33
Volkswagen Polo	0,34
Hyundai HB20	0,33
Fiat Mobi	0,34
Volkswagen T-Cross	0,36
Fiat Argo	0,34

A Fig. 35 apresenta o resultado da simulação, cujos coeficientes de arrasto variam de 0,20 a 0,35. De acordo com os resultados da simulação, cada variação de 0,05 do coeficiente representa um aumento no consumo energético (kWh/km) em cerca de 5%.

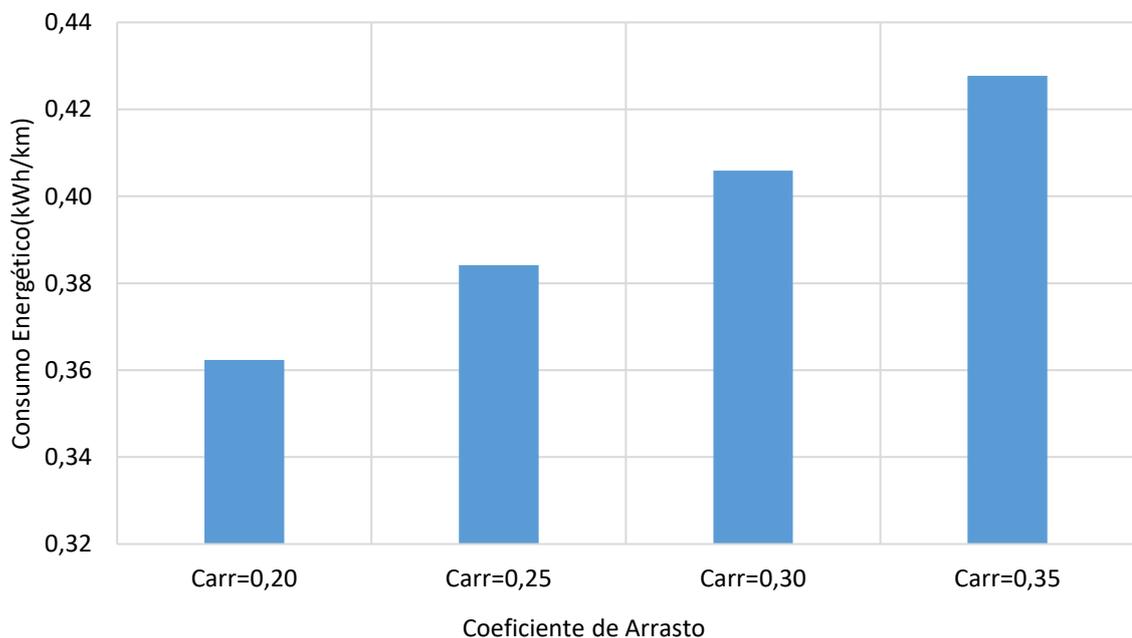


Figura 35 - Variação do consumo energético em função do coeficiente de arrasto aerodinâmico

Em geral, apenas veículos esportivos conseguem alcançar coeficientes de arrasto inferiores a 0,3, uma marca significativamente distante da realidade dos veículos comumente

encontrados na frota brasileira. O coeficiente médio de arrasto para os veículos nesta frota é de 0,34, um parâmetro essencial considerado neste estudo.

4.4 Fatores de emissão na produção do bioetanol

Conforme discussão prévia na seção de metodologia, existem diversos estudos que abordam a pegada de carbono no ciclo de fabricação do bioetanol, especificamente voltado ao cenário brasileiro. Estes estudos, normalmente, apresentam alguma diferença na estimativa dos fatores de emissão o que pode ser explicado pelas diferentes abordagens. Os resultados das estimativas dos fatores de emissão dos principais estudos considerados na seção metodologia, são apresentados no gráfico da Fig. 36.

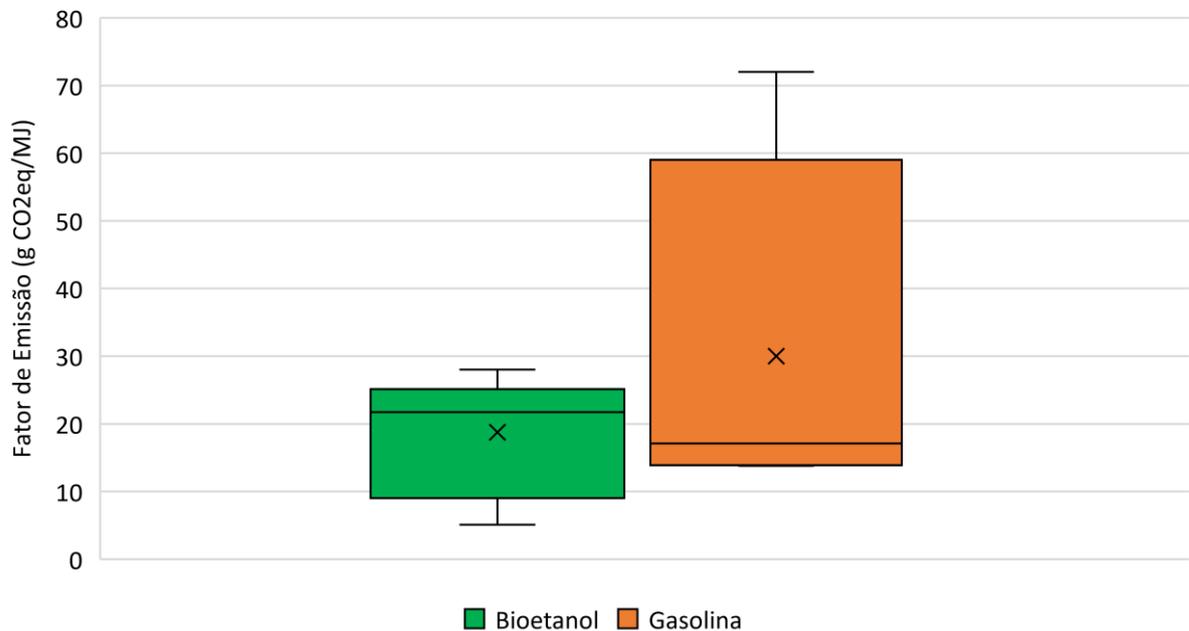


Figura 36 – Fatores de emissão na produção do bioetanol e gasolina

Entretanto, não há um consenso sobre as estimativas de impacto das emissões que ocorrem quando é alterada a cobertura para um uso da terra de menor estoque de carbono, denominada mudança no uso da terra (MUT) para a produção da cana-de-açúcar. Seabra et al. (2014) dispuseram que os sistemas GREET e GTAP (avaliação de mudanças no uso da terra), acrescentam 46 gCO₂eq/MJ, em função de mudanças de uso da terra, para o bioetanol produzido no Brasil e transportado para os Estados Unidos. Por outro lado, a diretiva europeia impõe que as emissões decorrentes da alteração do uso do solo sejam tidas em conta, podendo ser aplicado um crédito de 29 gCO₂eq/MJ se a biomassa fosse obtida a partir de terrenos degradados restaurados. De fato, Walter et al. (2011) estimaram créditos de descarbonização de 33

gCO₂eq/MJ e 47 gCO₂eq/MJ nas emissões pelas mudança de uso da terra, no plantio da cana-de-açúcar em novas terras para a produção de etanol nos estados de São Paulo e Mato Grosso.

Tendo em vista as diretrizes futuras para o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, o programa Renovabio, com a finalidade de certificação da produção do etanol voltada à sustentabilidade ambiental, realiza um mapeamento das terras produtivas de forma a mitigar os impactos das emissões oriundas do processo de mudança de uso da terra. Neste contexto, o Renovabio pode ser considerado como uma política pública que visa nortear a produção de biocombustíveis nas próximas décadas.

Nesta análise de sensibilidade, foi simulada a variação dos fatores de emissão durante a produção de bioetanol para o uso em veículos ICE, considerando os impactos positivos ou negativos nas mudanças de uso da terra. Além disso, são apresentadas as emissões associadas à etapa de produção de energia elétrica (WTT) utilizada por quilômetro nos veículos BEV (Fig. 37).

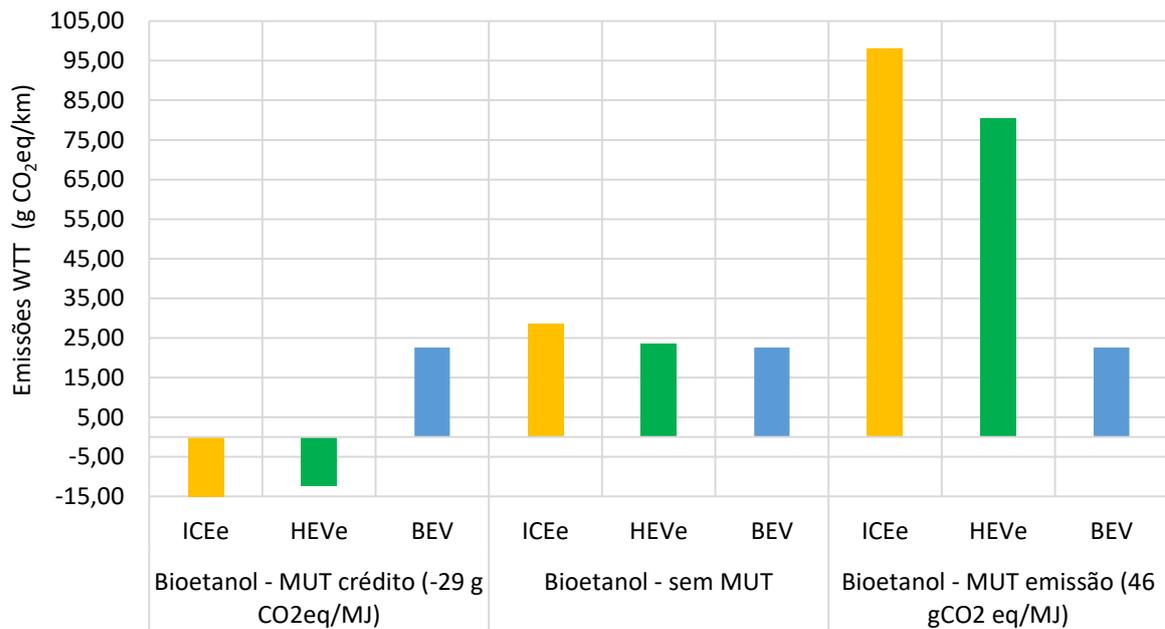


Figura 37 - Emissões da etapa WTT considerando a variação dos fatores de emissão na produção do bioetanol

Conforme previamente descrito na seção de metodologia, as estimativas para o coeficiente de emissão médio da matriz de geração elétrica (cerca de 32,68 gCO₂eq/MJ em 2023), que na literatura apresentam estimativas mais convergentes, consideram a pegada de carbono de toda a cadeia de produção da energia elétrica, que passa pela construção da usina, à operação e produção da matéria prima necessária à operação, inclusive a transmissão e distribuição de energia elétrica. De forma semelhante, os fatores de emissão da produção do

bioetanol consideraram toda a cadeia produtiva do bioetanol, desde a produção dos insumos agrícolas, até as etapas de plantio da cana-de-açúcar no campo, a sua colheita mecanizada, o processamento na indústria e distribuição, bem como, os impactos das emissões da mudança de uso da terra.

Os resultados da simulação demonstram uma clara relação entre as emissões resultantes da produção de bioetanol e as mudanças no uso da terra para o cultivo da cana-de-açúcar. Na hipótese de plantio em áreas degradadas e pastagens, a produção de bioetanol poderia gerar um crédito de descarbonização de até 15 gCO₂eq/km. Por outro lado, o uso de bioetanol proveniente de áreas desmatadas poderia resultar em emissões de 98 gCO₂eq/km rodados em veículos a combustão interna, considerando apenas as emissões associadas à produção do biocombustível.

Neste sentido, Bordonal et al. (2018) estimaram que conversão de pastagens em cana-de-açúcar está associada ao acúmulo de carbono no solo que poderá reduzir ou até mesmo eliminar o tempo de reembolso de carbono da vegetação nativa. Ademais, diante das diretrizes do programa Renovabio, inclusive com metas anuais de redução das emissões da cadeia produtiva dos biocombustíveis, bem como, pelas limitações legais para o plantio em áreas de desmatamento, entende-se como razoável a adoção de cenário futuro sem a contribuição significativa de emissões pela mudança no uso da terra, motivo pelo qual o fator de emissão sem contribuição do MUT será adotado como padrão para efeitos no presente estudo, porém, considerando a possibilidade de impacto deste parâmetro nas análises das emissões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo se propõe a apresentar os resultados e discussões em onze seções, divididas em três vertentes principais, que correspondem à análise do crescimento e composição da frota, o consumo energético considerando a abordagem Well-to-wheels e os potenciais de aquecimento global (GWP) em cada etapa do ciclo de vida da frota.

5.1 Projeções dos licenciamentos de novos veículos por tipo

Tendo como fundamento a metodologia apresentada na seção referente aos cenários de inserção, bem como, a projeção do registro de novos veículos, foram simulados os 3 cenários de introdução dos veículos elétricos e híbridos, cujos resultados serão apresentados. As vendas anuais de veículos novos dos anos de 2020, 2021 e 2022 se referem a dados reais, conforme série histórica da ANFAVEA (2022).

A Fig. 38 apresenta a projeção dos licenciamentos de novos veículos no cenário BAU, que em termos quantitativos deverá representar a variação de cerca de 1.743.674 em 2020 para cerca de 3.959.293 unidades em 2050. Neste cenário foi prevista a participação de 11% dos veículos BEV e 61% de HEV até o ano de 2050, o que representaria 432.671, 2.406.704 e 1.119.919, respectivamente, novos veículos BEV, HEV e ICE vendidos no ano de 2050.

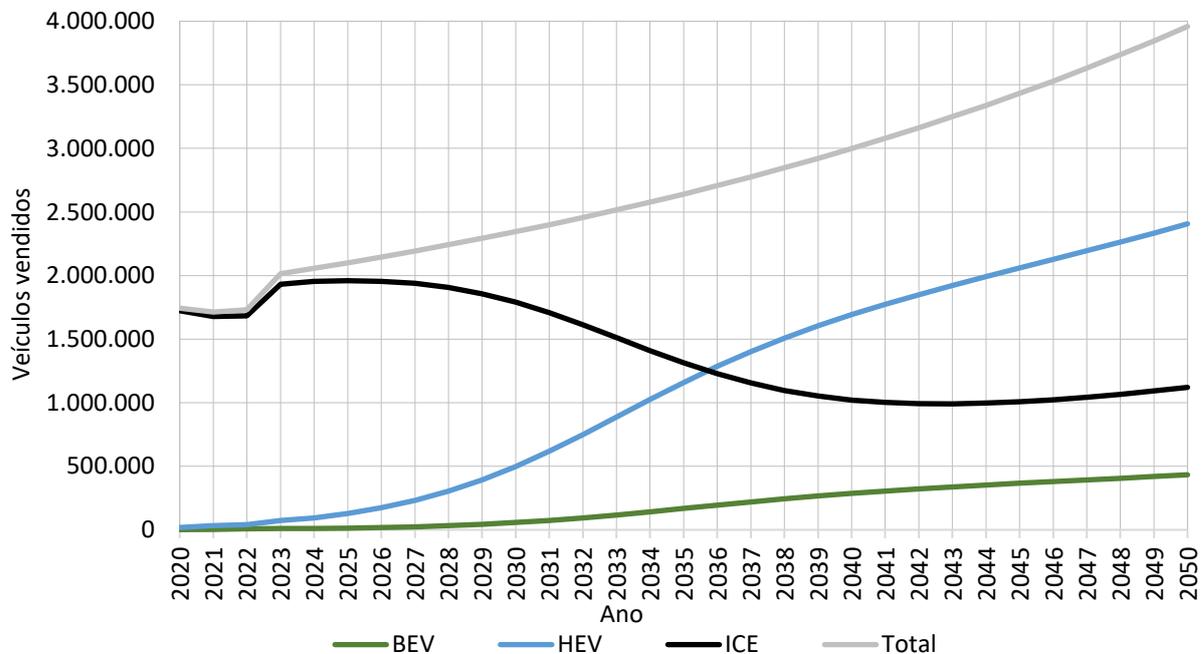


Figura 38 - Cenário BAU: número de veículos vendidos por tipo

A Fig. 39 apresenta a projeção dos licenciamentos de novos veículos no cenário de Híbridização. Neste cenário, onde predominariam as vendas de veículos híbridos, em até 85%

e de BEV em 15%, do mercado de veículos leves de passeio até 2050. Projeta-se em termos quantitativos, 590.006, 3.360.790 e 8.498, respectivamente, novos veículos BEV, HEV e ICE em 2050.

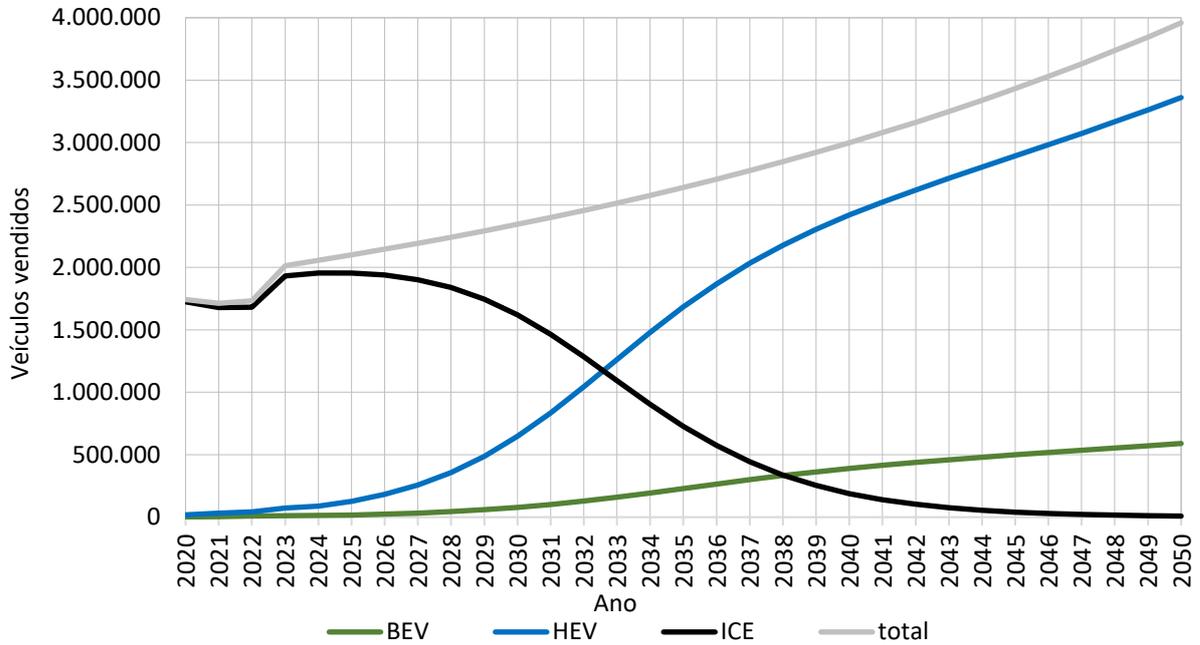


Figura 39 - Cenário Hibridização: número de veículos vendidos por tipo

O cenário de maior eletrificação da frota, representado na Fig. 40, projetou-se 60% dos licenciamentos de novos veículos elétricos em 2050. Neste caso, a previsão é que tenhamos cerca de 2.373.478, 1.572.509 e 13.307 novos veículos BEV, HEV e ICE vendidos anualmente em 2050.

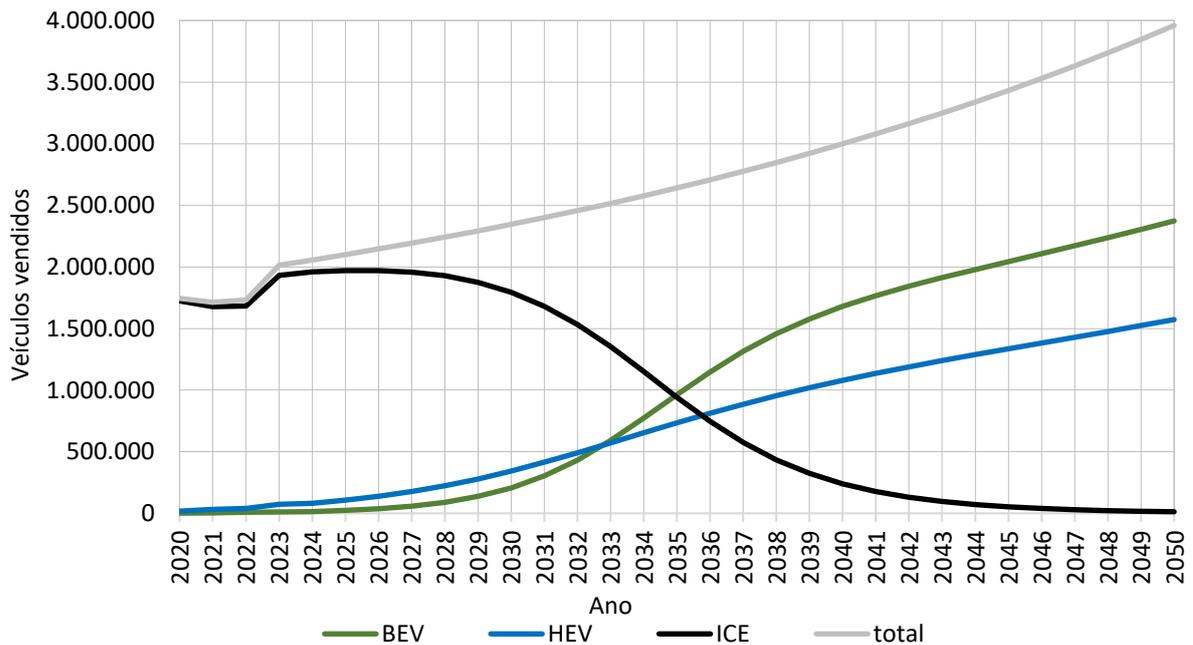


Figura 40 - Cenário Eletrificação: número de veículos vendidos por tipo

Os três cenários anteriormente delineados refletem a dinâmica da produção e comercialização de automóveis novos no Brasil, cujo desempenho está intimamente ligado à capacidade de produção e à evolução da renda da população. Em períodos passados, a indústria automobilística brasileira atingiu uma produção de aproximadamente 3,4 milhões de veículos em 2012, dos quais 3,1 milhões foram licenciados nacionalmente, enquanto o restante foi destinado à exportação. Essa realidade evidencia uma capacidade produtiva subutilizada, considerando-se que a estimativa atual se situa em torno de 4 milhões de veículos. Recentemente, o setor automotivo tem demonstrado otimismo em relação à produção, impulsionado pelo programa Nova Indústria Brasil, lançado em 2023, que prevê investimentos substanciais da ordem de R\$ 100 bilhões nos próximos anos, direcionados à construção de novas instalações industriais e à modernização das existentes, visando atender à demanda por veículos elétricos e híbridos. Essas iniciativas de expansão da capacidade produtiva estão alinhadas com as premissas adotadas neste estudo, que destacam o crescimento da renda como fator primordial para impulsionar as vendas de veículos novos. Conforme projeção deste estudo, estima-se que até 2050 aproximadamente 4 milhões de novos veículos serão licenciados anualmente, sustentando a perspectiva de crescimento do setor.

5.2 Projeção da frota brasileira

No presente estudo, a projeção da frota brasileira de veículos leves de passageiros foi estimada em função dos fatores econômicos (PIB) e do crescimento populacional. Os dados

históricos mostram uma sequência de quedas nas vendas de novos veículos nos últimos 3 anos, o que representou a redução de 38% nas vendas anuais de novos veículos no ano de 2022 em relação ao ano de 2019, o que foi motivado de uma forma geral pelos efeitos da pandemia na economia do país. Os resultados da projeção mostram que a frota brasileira, que no ano de 2022 representava cerca de 44 milhões de veículos, deverá alcançar o 50 milhões de veículos até 2031 (Fig. 41). A estimativa é que a frota brasileira alcance em 2050 o total de 71 milhões de veículos. Este resultado está de acordo com estudo de Kain Glensor (2019), o qual estimou a frota brasileira em 72 milhões de veículos no ano de 2050.

Além da projeção do tamanho da frota, 3 cenários de inclusão de veículos BEV e HEV foram adotados, sendo um cenário de referência (BAU), um cenário de maior inclusão de híbridos (HYB) conforme projeção da EPE (MME/EPE, 2020), e finalmente um cenário de maior eletrificação da mobilidade (ELE).

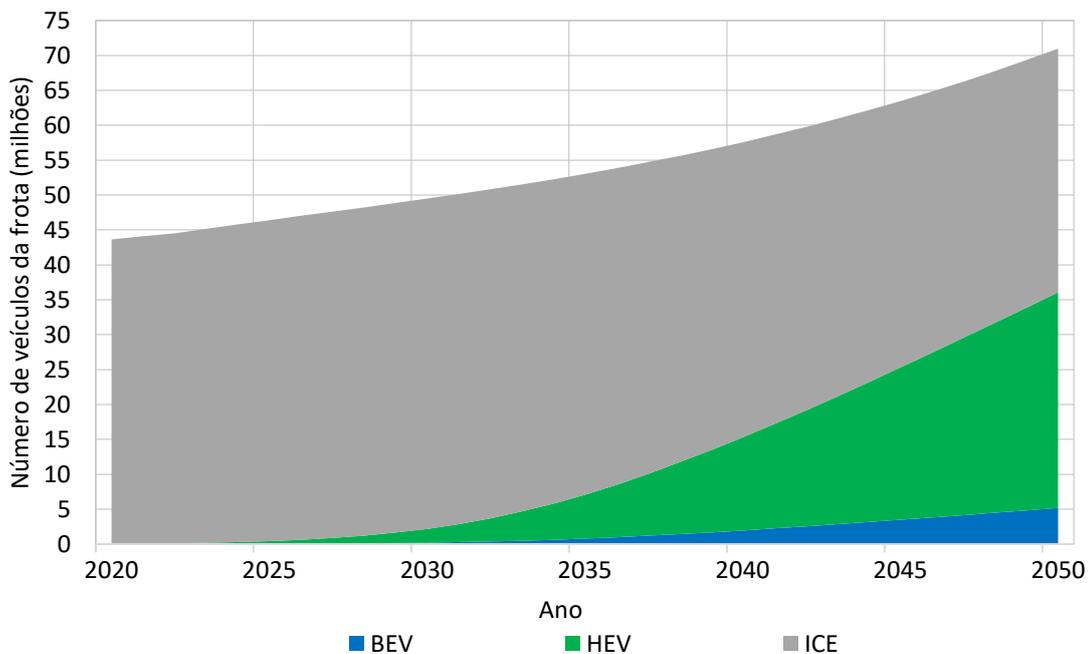


Figura 41 - Cenário BAU: número de veículos por tipo (milhões/ano)

No cenário de referência (BAU), espera-se que em função das limitações existentes atualmente para a inserção dos veículos elétricos no país, tais como os elevados preços dos veículos, a restrita infraestrutura de carregamento e a baixa autonomia, a eletrificação ocorrerá de forma mais lenta, ao se considerar a tendência de maior hibridização dos veículos automotores leves o que corresponderia respectivamente a 30,9 milhões de HEV, 34,9 milhões de ICE e 5,2 milhões de veículos BEV na frota do ano de 2050 (Tab. 19).

Tabela 19 - Cenário BAU: frota de veículos (milhões/ano)

Ano	BEV	HEV	ICE	Total (milhões)
2020	0,0	0,0	43,6	43,6
2030	0,2	2,0	47,3	49,5
2040	2,0	13,3	42,3	57,6
2050	5,2	30,9	34,9	71,0

No cenário de hibridização, espera-se uma transição para a eletromobilidade mais gradual, na qual, os veículos HEV, em função de preços mais acessíveis e maior eficiência, substituiriam rapidamente os ICE. O cenário de hibridização (Fig. 42) representa elevada inserção dos veículos híbridos na frota e maior participação dos BEV, cujo percentual de participação nas novas vendas em 2050 corresponderia respectivamente a 85 % (HEV) e a 15% (BEV).

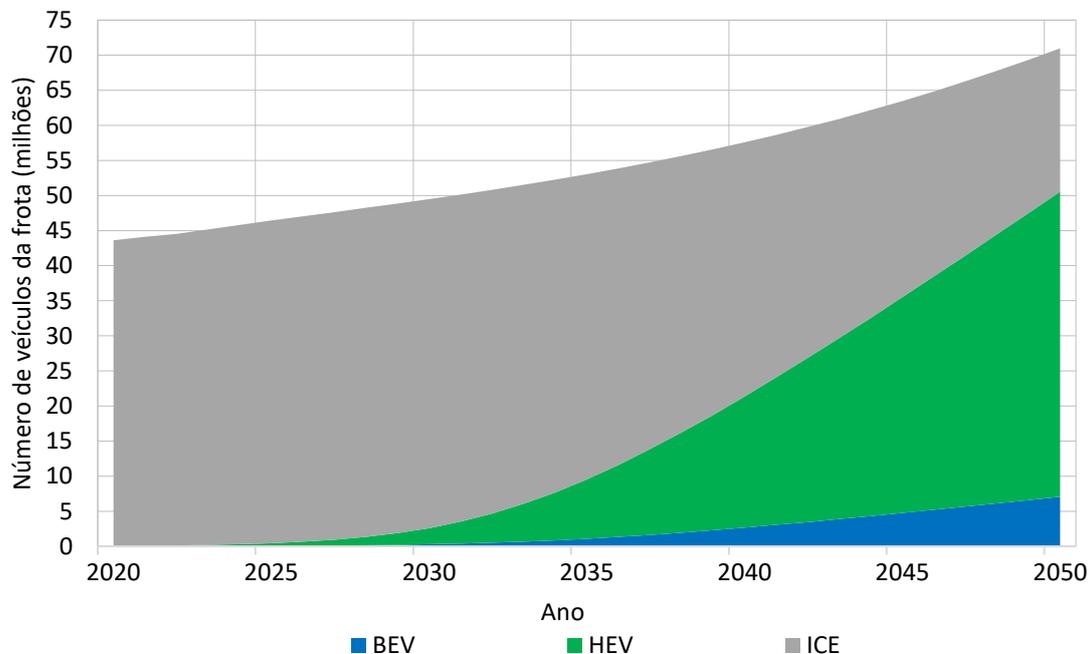


Figura 42 - Cenário Hibridização: número de veículos por tipo (milhões/ano)

Os resultados mostram que a frota brasileira no Cenário Hibridização seria formada por 43,5 milhões de veículos HEV e 7,1 milhões de BEV (Tab. 20) no ano de 2050.

Tabela 20 - Cenário HYB: frota de veículos (milhões/ano)

Ano	BEV	HEV	ICE	Total (milhões)
2020	0,0	0,0	43,6	43,6
2030	0,3	2,3	46,9	49,5
2040	2,7	18,7	36,2	57,6
2050	7,1	43,5	20,4	71,0

No cenário de eletrificação (Fig. 43), os desafios para a eletromobilidade no país seriam superados de forma mais rápida, por meio de políticas públicas efetivas e forte

incentivos fiscais, além de maiores investimentos em pesquisa e desenvolvimento e inovação por parte da indústria. Neste cenário, o país estaria inserido em um contexto mundial de forte eletrificação da frota de veículos leves, que representaria as participações no mercado de venda de novos veículos no ano de 2050, respectivamente de 60% de BEV e 40% HEV.

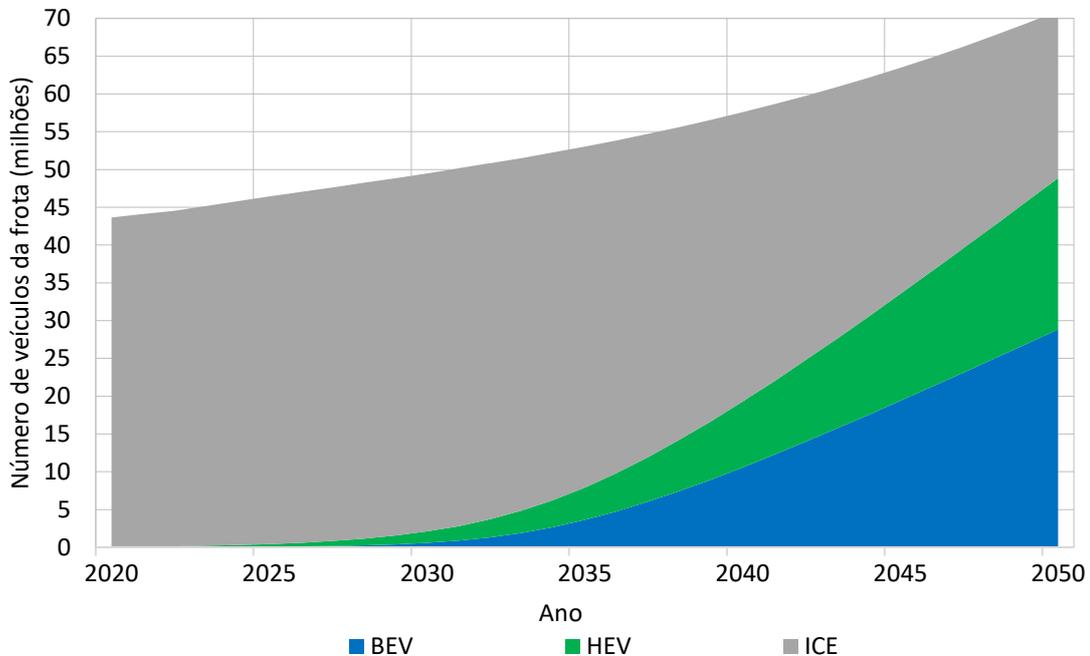


Figura 43 - Cenário de Eletrificação: número de veículos por tipo (milhões/ano)

No cenário de eletrificação, a frota seria representada por 20 milhões de veículos HEV e 28,8 milhões de BEV em 2050 (Tab. 21) que em termos percentuais representaria 41% de veículos BEV, 28% de HEV e 31% de ICE.

Tabela 21 - Cenário ELE: frota de veículos (milhões/ano)

Ano	BEV	HEV	ICE	Total (milhões)
2020	0,0	0,0	43,6	43,6
2030	0,6	1,5	47,4	49,5
2040	10,6	8,7	38,3	57,6
2050	28,8	20,0	22,1	71,0

Diante dos três cenários delineados, surgem oportunidades e desafios intimamente ligados à urgência de aumentar os investimentos em políticas públicas e em pesquisa e desenvolvimento no setor. Nos cenários de referência (BAU) e de Híbridização (HYB), a persistência e a ampliação do uso de motores de combustão interna exigirão investimentos substanciais nessa tecnologia para aprimorar sua eficiência energética. Além disso, será necessário otimizá-la para a utilização de biocombustíveis, visando atender às metas de descarbonização do setor de transportes. No cenário de Eletrificação (ELE), a rápida e contínua eletrificação da frota demandará incentivos e investimentos expressivos para superar os

desafios tecnológicos e de infraestrutura. Nesse contexto, é crucial que sejam estabelecidas regulamentações e realizados investimentos substanciais em infraestrutura de carregamento, de forma a suprir a demanda tanto em volume quanto em distribuição geográfica adequada.

5.3 Consumo energético na produção (WTT) e uso (TTW) dos combustíveis por diferentes veículos

O consumo de energia WTW para cada tipo de veículo foi simulado no ciclo de direção urbana padrão brasileiro (FTP75) e os resultados são mostrados na Fig. 44. Os resultados do consumo energético no uso (TTW) do veículo BEV, 0,16 kWh/km, se mostraram compatíveis com os resultados publicados em modelo desenvolvido por Miri et al. (2021) na faixa de 0,158 a 0,176 kWh/km no ciclo padrão de velocidade americano.

Os resultados mostram que, em termos de consumo energético por quilômetro rodado, os veículos com motores à combustão interna movidos a gasolina (ICEg) tiveram o maior consumo energético, cerca de 0,50 kWh/km, seguidos pelos veículos à combustão interna movidos a bioetanol (ICEe), 0,46 kWh/km, enquanto os veículos elétricos (BEV) tiveram o menor consumo, cerca de 0,19 kWh/km. A propósito do consumo energético no uso (TTW), os veículos com motores a combustão interna (ICEg e ICEe) apresentaram o maior consumo energético, cerca de 0,42 kWh/km.

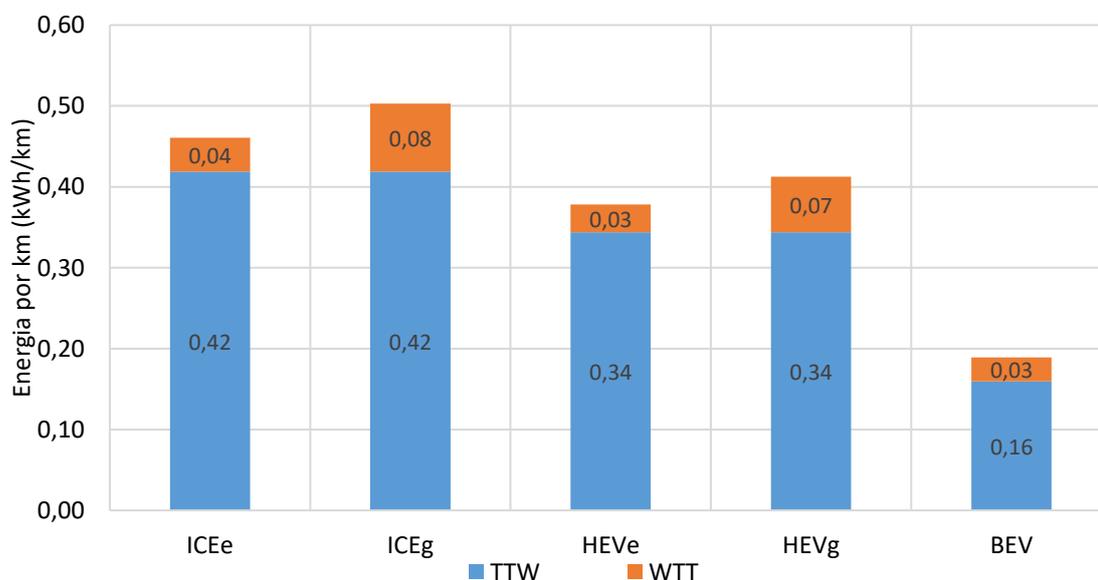


Figura 44 – Consumo energético por tipo de veículo (WTT)

De fato, quando se trata de eficiência energética, os sistemas de propulsão elétricos destacam-se por sua eficiência, especialmente quando combinados com a eficiência energética da geração elétrica no Brasil, o que torna os veículos elétricos a bateria (BEV) insuperáveis em

termos de eficiência energética. Por outro lado, os veículos híbridos elétricos a bioetanol (HEV) possuem um grande potencial para avanços tecnológicos destinados a otimizar seu desempenho, em especial, os motores flex-fuel atuais têm a capacidade teórica de aumentar seu rendimento se forem projetados exclusivamente para operar com bioetanol.

5.4 Impacto na demanda da geração elétrica no uso dos veículos elétricos em cenários de inserção

A demanda de eletricidade da rede foi projetada para os três cenários de inserção de veículos elétricos e híbridos (Fig. 45) e o consumo projetado se refere unicamente à demanda da frota de veículos elétricos (BEV) diretamente transmitida pela rede elétrica. Na primeira década (2020), em função no número insignificante de BEV, não haveria impacto significativo na demanda elétrica, porém, estima-se que a demanda crescerá nas décadas seguintes, em especial, nos cenários de maior inclusão de veículos BEV (ELE). As projeções mostram que neste cenário de Eletrificação (ELE), as frotas dos anos de 2030, 2040 e 2050, equivaleriam a 0,6, 10,6 e 28,8 milhões de veículos, cujo consumo de energia elétrica dos veículos BEV representaria respectivamente, 1,4 TWh, 26,6 TWh e 67,7 TWh por ano. Tendo como referência, o consumo de energia elétrica no ano de 2022 (586 TWh), os percentuais de consumo de energia elétrica seriam de aproximadamente 0,15%, 2,04 % e 11,65%, nos anos de 2030, 2040 e 2050. Nesse cenário de transição energética, caracterizado pela redução da participação das termelétricas a combustíveis fósseis, o crescimento da participação das fontes solar e eólica supriria a maior parte da demanda adicional pela inserção dos veículos elétricos, destacando-se a participação de 94% das renováveis fontes na composição do mix no ano de 2050. No entanto, outros desafios técnicos permaneceriam, como a infraestrutura de rede e o gerenciamento do horário de carregamento.

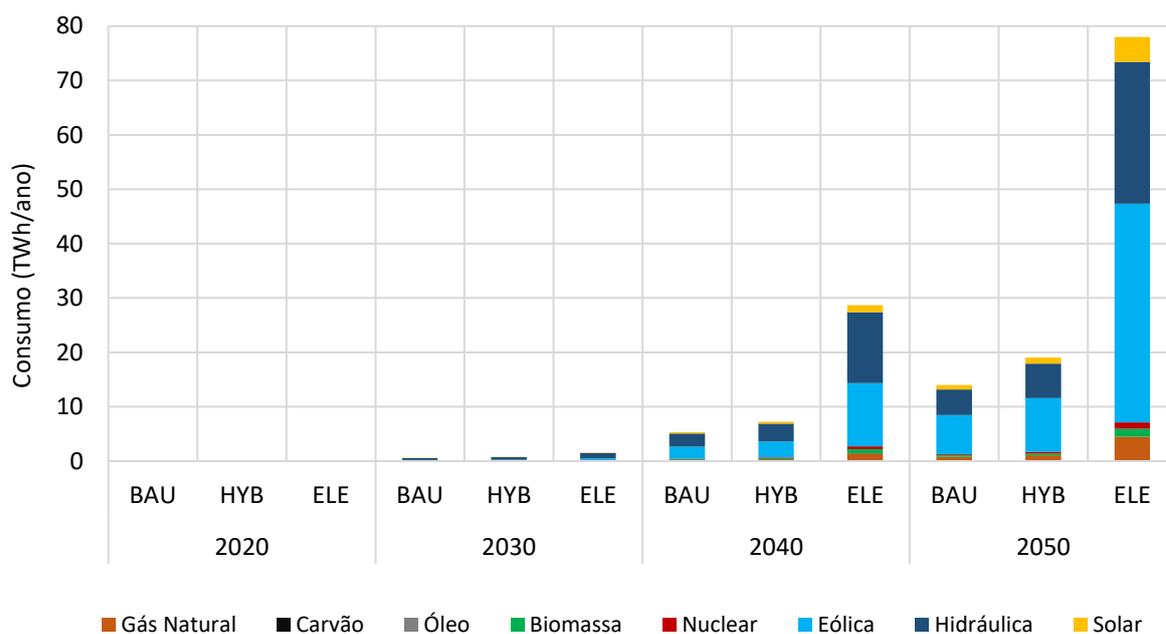


Figura 45 - Previsão do consumo de eletricidade pela frota de BEV nos cenários

O pico de demanda na rede elétrica em função do carregamento descoordenado dos veículos BEV é uma questão essencial que vem sendo tratada em diversos estudos. Z. Wang & Paranjape (2014) destacaram que o carregamento descoordenado com a inclusão de veículos BEV na rede pode resultar em um aumento da demanda no horário de pico em até 53%. Neste sentido, é fundamental que o carregamento inteligente seja regulamentado no país, o que requer um planejamento criterioso por parte do setor elétrico, de forma que o processo seja otimizado de acordo com as limitações da rede e com vistas à utilização das disponibilidades de fontes renováveis e intermitentes, tais como, solar e eólica. Por outro lado, os veículos elétricos a bateria, podem ser vistos como uma oportunidade para o aproveitamento das fontes não despacháveis (como solar e eólica), uma vez que possuem a desejada capacidade de armazenamento de energia elétrica nas baterias, o que mitigaria as desvantagens comparativas das fontes intermitentes quanto a capacidade de armazenamento.

5.5 Consumo energético total no uso dos veículos (TTW) e produção dos combustíveis (WTT) em cenários de inserção

Um dos desafios do setor de transportes no Brasil é a descarbonização voltada à neutralidade climática até o ano de 2050, sendo uma das principais medidas a adotar neste sentido, a transição energética de fontes fósseis para uma matriz de fontes renováveis. A Fig. 46 apresenta a projeção do consumo energético relacionado à produção dos combustíveis e uso dos veículos nos 5 cenários deste estudo.

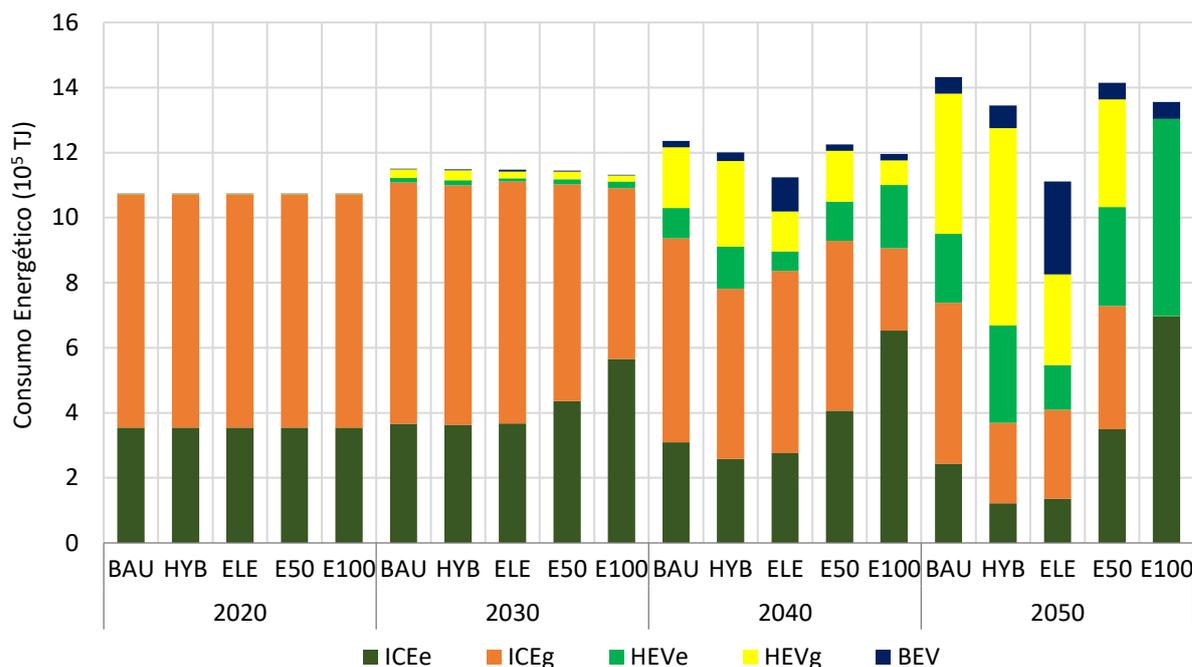


Figura 46 – Projeção do consumo energético nos cenários (WTW)

De acordo com os resultados deste estudo, o consumo energético na produção e uso (WTW) apresenta tendência de aumento nas próximas décadas, motivada pelo aumento da frota no longo prazo, porém, proporcionalmente ao número de veículos, os cenários mostram a redução do consumo energético por veículo, cujo consumo médio por veículo deve reduzir em até 36% no cenário mais favorável (ELE) até o ano de 2050, em função de maior participação de veículos BEV e HEV, que apresentam maior eficiência energética.

Em análise comparativa referente ao ano de 2050, o cenário de eletrificação (ELE) apresentou o melhor resultado para o consumo energético comparativamente ao cenário padrão (BAU), com menor aumento do consumo energético total de 4%, o que representa redução no consumo específico por veículo de cerca de 36%, frente às reduções de consumo específico de 23% no cenário HYB e 22% no E100. Por outro lado, os cenários com maior participação do bioetanol na matriz energética apresentaram a maior participação de fontes renováveis, o cenário E100 alcançando a participação de 99% de fontes renováveis, seguido pelo cenário ELE com 51% e o cenário E50 com 49% de participação de fontes renováveis no ano de 2050.

O cenário E100 se mostra desafiador do ponto de vista do volume de produção de bioetanol necessário para suprir toda a demanda dos veículos com motores à combustão interna, pois corresponderia à participação de 100% do bioetanol no ano de 2050, como fonte energética dos veículos ICE e HEV, sendo o volume total da demanda estimada para atender a frota de 62 bilhões de litros de bioetanol ao ano. Dados da EPE estimam que a produção total de bioetanol

no ano de 2023 no Brasil foi de cerca de 35 bilhões de litros, enquanto a projeção de oferta para o ano de 2031 é de 46 bilhões de litros, com crescimento anual da oferta de cerca de 4% (EPE/MME, 2021). Os resultados da projeção da EPE mostram que seria viável a oferta de bioetanol para suprir toda a demanda do cenário E100 se o crescimento médio da oferta de bioetanol no Brasil for de pelo menos 2% ao ano.

5.6 Potencial de aquecimento global na fabricação dos diferentes tipos de veículos

O processo de fabricação se configura como uma das principais etapas envolvendo o ciclo de vida de um veículo com potencial de geração de gases de efeito estufa, em geral, provenientes dos processos de produção das fontes energéticas utilizadas na rota de produção do veículo, bem como, na produção de insumos e materiais, tais como, aço, alumínio, plástico, vidro, e especial, no caso dos veículos elétrico e híbridos com participação significativa de metais nobres como lítio, cobalto, níquel e manganês.

Neste estudo, foi estimado o potencial de aquecimento global (GWP) ao longo do ciclo de vida dos três modelos de veículos selecionados (ICE, BEV e HEV), considerando a energia consumida durante o processo de fabricação. Essa estimativa foi conduzida utilizando-se dados da matriz energética do Brasil para a produção dos veículos em questão, conforme mostrado na Fig. 47. Os dados de emissões são apresentados em 3 partes principais do veículo, qual seja, a carroceria, o grupo motopropulsor e a bateria (lítio-íon).

A propósito das emissões de gases de efeito estufa na fabricação, o veículo ICE apresentou o menor potencial de aquecimento global (GWP), cerca de 3,3 tCO₂eq, seguido pelos veículos HEV e BEV, com respectivamente, 5,5 tCO₂eq e 6 tCO₂eq por veículo fabricado. Dentre as partes dos veículos analisados, a carroceria é composta pela maior parte dos materiais envolvidos no processo de fabricação, que nos veículos ICE e HEV representam cerca de 85% da massa total do veículo e nos veículos BEV, cerca de 71% da massa total, o que implica em maiores contribuições às emissões, respectivamente 3 tCO₂eq, 4 tCO₂eq e 3,8 tCO₂eq para fabricação da carroceria de cada veículo ICE, HEV e BEV.

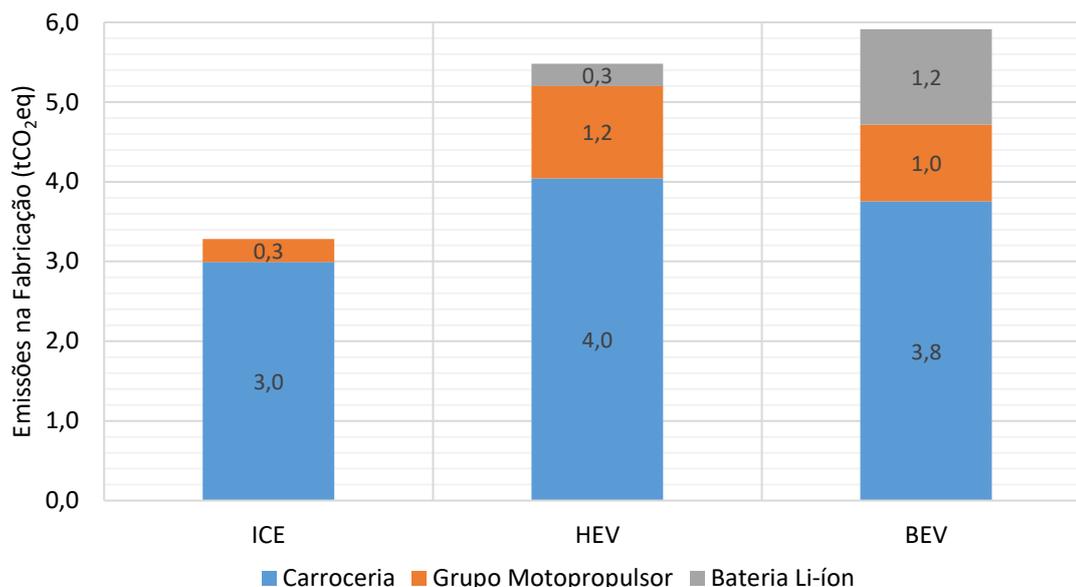


Figura 47 – Emissões de gases efeito estufa na produção das partes principais de cada veículo no cenário da indústria brasileira

As emissões de gases de efeito estufa da fabricação da bateria de lítio-íon representam uma parcela significativa das emissões totais associadas ao ciclo de vida de um veículo elétrico. No caso em estudo, 300 kg de bateria de lítio-íon representam 20% das emissões totais no ciclo de fabricação do BEV. Os veículos híbridos, por sua vez, se caracterizam pela presença de pelo menos dois propulsores, um elétrico e outro à combustão interna, o que eleva as emissões do ciclo de fabricação do grupo motopropulsor, que representa cerca de 21% das emissões totais do ciclo de produção do veículo. Por outro lado, as emissões do ciclo de vida de fabricação do conjunto motopropulsor do veículo ICE, cerca de 0,3 tCO₂eq, são menores que dos veículos HEV (1,2 tCO₂eq) e BEV (1 tCO₂eq), que em geral, utilizam metais de terras raras nos motores elétricos e quantidade maior de metais preciosos para a eletrônica de potência.

De fato, Hawkins et al. (2013) estimaram no cenário europeu, 1,78 tCO₂eq (motor elétrico, inversor e transmissão) e 0,96 tCO₂eq (motor à combustão e transmissão), na produção dos conjuntos motopropulsores de veículos BEV e ICE, respectivamente.

Ao considerar uma análise comparativa com outros estudos, a Tab. 22 apresenta os dados dos principais estudos atuais, envolvendo o potencial de aquecimento global (GWP) nos ciclos de vida da rota de fabricação dos veículos em alguns países. Além disso, são apresentadas as simulações do presente estudo, considerando as emissões na produção pela matriz energética brasileira em comparação à produção em outros países. Os resultados mostram que a fabricação no Brasil apresenta vantagens comparativas aos demais países, uma vez que sua matriz

energética é predominantemente renovável, podendo emitir 3 vezes menos que nos Estados Unidos ou China.

Tabela 22 - Comparativo de emissões na produção dos veículos em diferentes países

Referência	ICE (t CO ₂ eq)	HEV (t CO ₂ eq)	BEV (t CO ₂ eq)	Região/Cenário
Hawkins et al., 2013	6,45	-	13,05 – 14,25	Europa
Qiao et al., 2017	9,17	-	14,64 – 14,74	China
Karaaslan et al., 2018	15,50*	24,50*	30,20*	Estados Unidos
Kawamoto et al., 2019	5,49	-	12,26	Japão
Koroma et al., 2020	7,35	9,60	10,35	Europa
Presente estudo	3,28	5,48	5,91	Brasil
Presente estudo	10,27	17,16	18,51	Estados Unidos
Presente estudo	10,71	17,89	19,30	China

*veículos utilitários esportivos

Os resultados do presente estudo mostram que a produção de veículos no Brasil seria consideravelmente mais sustentável que nos demais países destacados. Em função da matriz energética predominantemente renovável, produzir um veículo BEV totalmente no Brasil, representaria a redução de até 69% das emissões produção em comparação à produção chinesa, o que mostra a vantagem comparativa do Brasil, quando considerado somente o fator emissão de GEE (considerando o fator de emissão médio da matriz elétrica chinesa de 171 g CO₂/MJ).

5.7 Potencial de redução das emissões pela reciclagem das baterias

A reciclagem da bateria de lítio-íon é fundamental do ponto de vista ambiental para a mitigação das emissões e do lado econômico, pelo reaproveitamento dos metais preciosos utilizados na fabricação. Neste estudo, os principais métodos de reciclagem, a pirometalurgia e a hidrometalurgia, foram simulados nos cenários de inserção dos veículos. A fabricação de cada massa de 1g de bateria de lítio-íon (NCM) apresenta o potencial de emissão de cerca de 4 g CO₂eq, havendo potencial de recuperação de 1,9 g CO₂eq no processo de pirometalurgia e de 1,6 g CO₂eq no processo de hidrometalurgia (Fig. 48). O processo de reciclagem por pirometalurgia permite recuperar até 71% dos resíduos de bateria, frente a 85% do processo de hidrometalurgia que, comparativamente, possibilita a recuperação de maior parte dos metais nobres (Fisher et al., 2006).

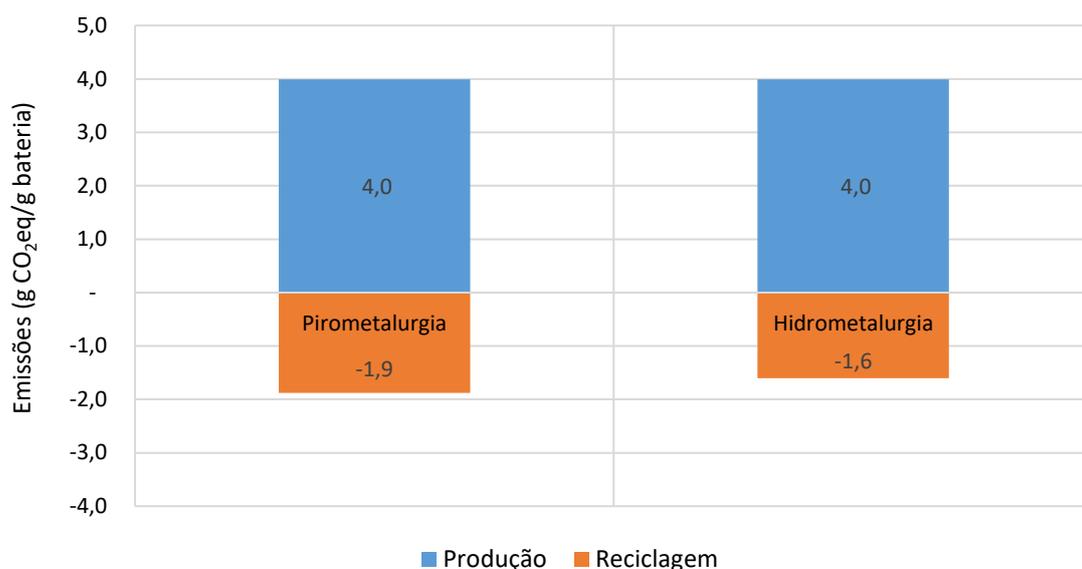


Figura 48 – Recuperação de emissões pelos métodos de reciclagem – Pirometalurgia e Hidrometalurgia

A Fig. 49 apresenta os resultados do potencial de redução de emissões nos 3 cenários de inserção de veículos, por meio do processo de hidrometalurgia. Os resultados mostram que o cenário de maior eletrificação da frota (ELE) seria o mais favorável, em termos do potencial de recuperação de resíduos de bateria e da redução de emissões de gases de efeito estufa. Considerando o recolhimento e reciclagem de 90% das baterias descartadas, seria possível recuperar cerca de 42 ktCO₂eq, 192 ktCO₂eq, 612 ktCO₂eq, 1.607 ktCO₂eq anuais, respectivamente, nos anos de 2035, 2040, 2045 e 2050.



Figura 49 – Potencial de redução de emissões nos cenários com a adoção da reciclagem por hidrometalurgia

Atualmente, não há produção de baterias Lítio-íon no Brasil, porém, à medida que se desenvolva a eletromobilidade, haverá ganho de escala para viabilizar a indústria desse tipo de baterias no país. Neste caso, do ponto de vista socioambiental, deve-se priorizar a construção de plantas industriais mais eficientes na utilização e destinação dos recursos naturais e que apresentem capacidade de reciclagem de baterias recebidas a partir da logística reversa e capacitação de mão de obra especializada. Neste sentido, a reciclagem das baterias estaria de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) que destaca a responsabilidade compartilhada entre o produtor e consumidor, pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa.

5.8 Potencial de emissões em cada tipo de veículo

Para prever as emissões do ciclo de vida de cada um dos tipos de veículos e combustíveis analisados, foi desenvolvida a simulação do uso (TTW), fabricação dos veículos e produção dos combustíveis (WTT) consumidos, considerado o ciclo padrão de velocidade (EPA, 2022) com a finalidade de estimar as emissões de gases de efeito estufa por quilômetro percorrido. Os resultados do estudo comparativo (Fig. 50) mostram que a maior parcela das emissões está relacionada à queima de combustível fóssil seja nos veículos ICE ou HEV, que emitem respectivamente 105,5 gCO₂eq/km e 86,6 gCO₂eq/km. Por outro lado, as maiores emissões no processo de fabricação correspondem à produção dos BEV cerca de 19,3

gCO₂eq/km ou 46% das emissões totais do ciclo de vida, das quais, 20% oriundas do processo de fabricação das baterias de lítio-íon.

Em termos dos combustíveis em estudo, a energia elétrica apresentou o menor volume de emissões por quilômetro percorrido (WTW), cerca de 22,6 gCO₂eq/km em veículos BEV seguido pelo bioetanol em uso nos HEV com cerca de 23,5 gCO₂eq/km. Considerando toda a avaliação do ciclo, os veículos ICE abastecidos a bioetanol apresentaram o menor volume de emissões de gases de efeito estufa, cerca de 39,4 gCO₂eq/km, seguidos pelos veículos HEV a bioetanol, e pelos veículos elétricos, que apresentaram respectivamente, 41,4 gCO₂eq/km e 41,9 gCO₂eq/km.

Poucos estudos no Brasil são focados na avaliação do ciclo de vida dos veículos leves de passeio. Em estudo desenvolvido por De Souza et. Al. (de Souza et al., 2018), no cenário brasileiro, os resultados mostraram semelhantemente que os veículos ICE movidos a bioetanol apresentaram as menores emissões do ciclo de vida, 97 gCO₂eq/km seguidos pelos veículos BEV com cerca de 151 gCO₂eq/km. Entretanto, este estudo ao considerar os PHEV abastecidos somente a eletricidade, se diferencia do presente trabalho no que diz respeito ao combustível utilizado para este tipo de veículo, o que o distancia do atual cenário de uso dos biocombustíveis em veículos flex-fuel.

Gauto et al. (2023) conduziram um estudo de avaliação do ciclo de vida de veículos leves, no qual estimaram as emissões por quilômetro no ciclo de vida dos veículos HEV, BEV e ICE com o uso de bioetanol, de respectivamente, 77,5 gCO₂eq/km, 104,8 gCO₂eq/km e 120,9 gCO₂eq/km. Entretanto, os autores utilizaram uma abordagem diferente, ao considerarem as emissões na queima do bioetanol no volume total de emissões do veículo, o que aparentemente não está em consonância com o protocolo do IPCC para inventários de emissões.

Mera et al. (2023) publicaram um relatório voltado à comparação das emissões do ciclo de vida de carros de passeio com motores à combustão e elétricos, no qual, destacaram os as emissões do ciclo de vida dos veículos BEV no cenário brasileiro (cerca de 60 gCO₂eq/km), como as menores comparativamente aos demais veículos. Porém, o relatório utiliza em sua abordagem, dados da produção do etanol de milho dos Estados Unidos, como fator de emissão pela mudança de uso da terra (MUT) ao bioetanol do Brasil, além de contabilizarem as emissões na queima deste biocombustível nos motores à combustão.

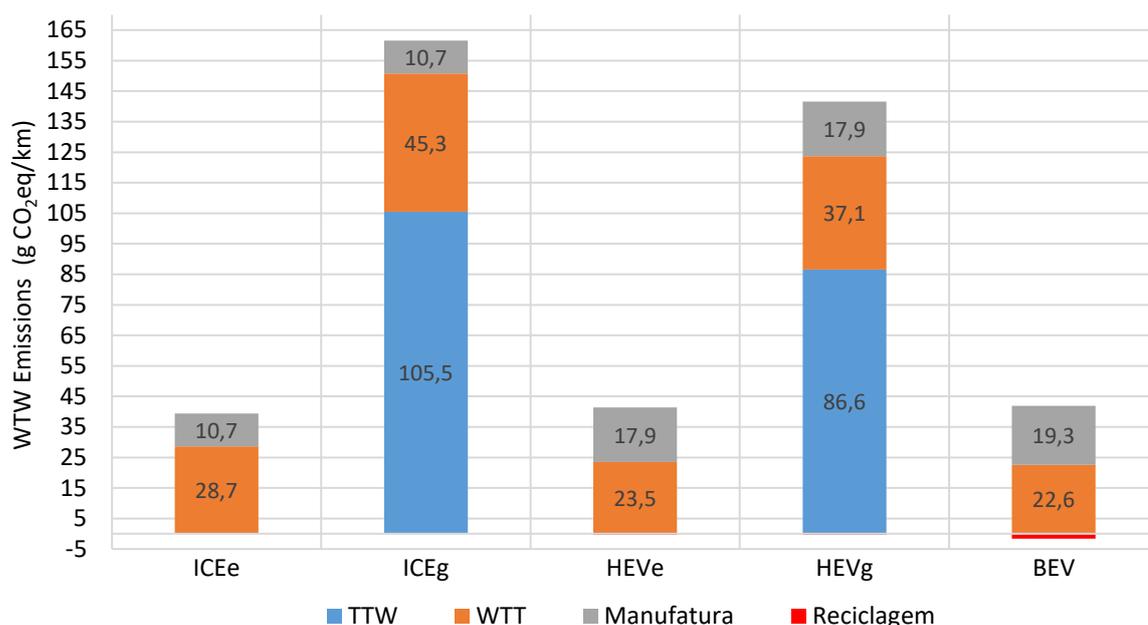


Figura 50 - Potencial de aquecimento global de diferentes veículos e combustíveis por km

Conforme dados apresentados, cabe destacar que nas condições atuais, os veículos BEV e HEV apresentam os processos de fabricação com as maiores emissões de gases de efeito estufa, em função da pegada de carbono da bateria de Lítio-íon e dos demais componentes de controle. Em especial, o veículo HEV, normalmente apresenta uma bateria de Lítio-íon (em geral, de menor porte que do BEV), um motor à combustão interna e um ou mais motores elétricos, além dos sistemas de controle eletrônicos embarcados, o que torna o seu conjunto motopropulsor o de maior carga de emissões durante o processo de fabricação, em comparação aos demais em estudo. Entretanto, espera-se que com o ganho de escala na produção e o incremento tecnológico dos motopropulsores híbridos, essa pegada de carbono venha a ser reduzida.

O processo de reciclagem contribui significativamente com a descarbonização da produção da bateria, pois teria o potencial de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 1,6 gCO₂eq/km no veículo BEV e de 0,4 gCO₂eq/km no HEV, valores correlacionados diretamente com a massa da bateria que nos veículos elétricos apresenta maior porte. Evidentemente, que o sucesso deste processo dependeria da implementação de uma política pública de reciclagem que envolvesse a responsabilidade conjunta do produtor e consumidor, a exemplo do que ocorre atualmente com o processo de reciclagem das baterias de chumbo-ácido do veículo ICE, cujo percentual de reciclagem é próximo a 90%.

Por fim, uma vez que a vida média de uma bateria de Lítio-íon é considerada de 10 anos, e os veículos no Brasil apresentam vida média útil de 20 anos, seria necessária pelo menos uma troca de bateria no veículo BEV ou HEV para cobrir todo o período de vida do veículo, o que duplicaria os valores das emissões de GEE estimadas na produção da bateria de Lítio-íon, que representam cerca de 20% das emissões na fabricação de um veículo BEV.

5.9 Potencial de aquecimento global da fabricação de veículos em cenários

No presente trabalho, foram simulados 5 cenários de avaliação dos impactos das emissões de gases de efeito estufa, sendo 3 envolvendo a inserção de veículos HEV e BEV e 2 cenários voltados especificamente para a análise da participação do bioetanol nas emissões, dada a importância deste biocombustível no cenário brasileiro, sendo que para estes dois últimos cenários foram adotadas as frotas de referência do cenário BAU. A Fig. 51 apresenta os resultados das emissões de gases de efeito estufa resultantes dos processos de fabricação de veículos nos cinco cenários. Conforme tratado na seção da metodologia, os veículos analisados no presente estudo foram selecionados entre os mais comercializados, ou seja, os mais populares, por tipo de conjunto motopropulsor. Cabe ressaltar que a projeção considera uma troca de bateria de Lítio-íon para os veículos BEV e HEV, o que se justifica pela vida útil média de 10 anos bateria, que deve cobrir todo o período de vida média útil de 20 anos dos veículos da frota brasileira.

De forma geral, as projeções mostram uma tendência de crescimento das emissões totais dos processos de fabricação de veículos da frota brasileira, que devem passar de 6,68 MtCO₂eq no ano de referência em 2020, para cerca de 10,88 MtCO₂eq no cenário Business-as-usual (BAU) ou até 12,3 MtCO₂eq no cenário de Eletrificação (ELE) no ano de 2050, o que representaria um aumento de até 85% nas emissões anuais em relação ao ano de referência. Nesse sentido, o cenário Business-as-usual apresentou o menor crescimento das emissões nos processos fabris devido à menor participação dos veículos BEV e HEV, por apresentarem as maiores emissões de GEE na fabricação, conforme visto nas seções anteriores.

De fato, os processos de fabricação de baterias de lítio-íon, especialmente de veículos elétricos e híbridos, representam respectivamente 41% e 31% mais emissões do que um veículo convencional com motor de combustão interna. Em estudo semelhante, Kain Glensor (2019) previu em um cenário do ano 2050 com maior participação de veículos elétricos, emissões anuais do processo de fabricação na ordem de 50 MtCO₂.

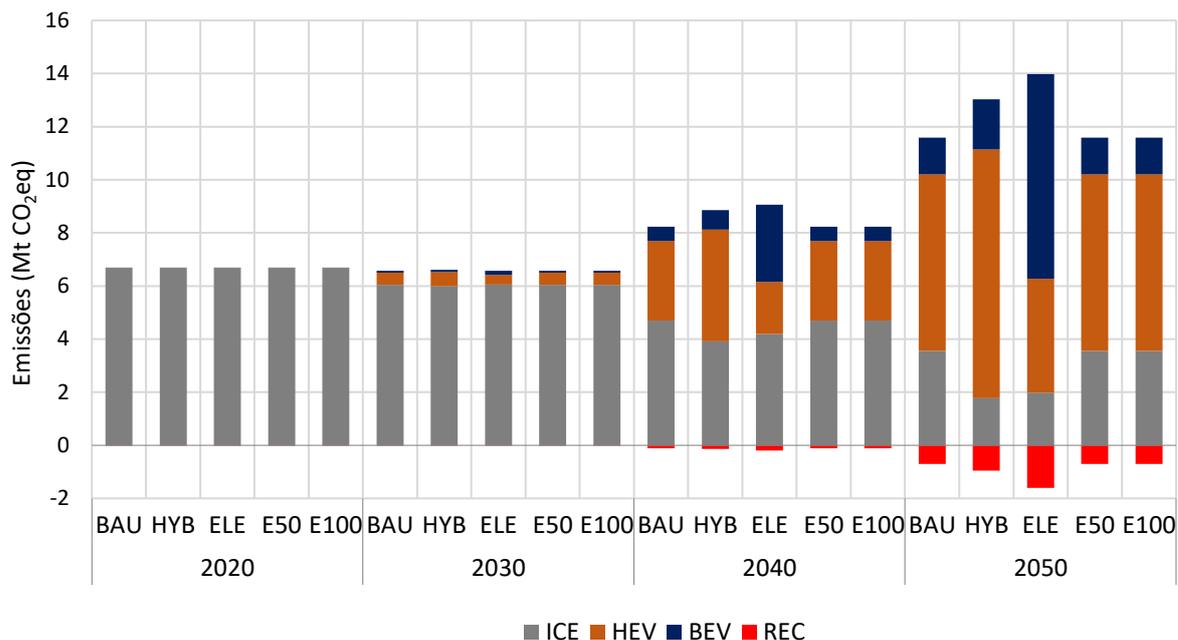


Figura 51 - Projeção do Potencial de Aquecimento Global em cenários de fabricação dos veículos

O processo de reciclagem das baterias de lítio-íon das frotas de veículos HEV e BEV teria o potencial de redução das emissões anuais em 6,08%, 7,33% e 11,5% nos cenários BAU, HYB, ELE no ano de 2050, ou de até 1,6 MtCO₂eq no cenário de maior eletrificação da frota. Considerando os resultados apresentados, o processo de reciclagem se mostra mais uma vez com efeitos significativos na sustentabilidade do processo de produção.

De uma forma geral, os resultados destacam a importância de uma abordagem cuidadosa na adoção de novas tecnologias em veículos elétricos e híbridos, especialmente considerando os impactos ambientais. O potencial aumento nas emissões de gases de efeito estufa devido à pegada de carbono mais elevada na produção de componentes-chave, como o sistema motopropulsor e a bateria, sugere a necessidade de cautela. Para avançar na descarbonização dos processos de fabricação, é essencial integrar práticas sustentáveis, priorizando o desenvolvimento de novos materiais, como alternativas para as baterias, com rotas de produção de menor impacto ambiental. Isso inclui a promoção da reciclagem para reutilização de resíduos e a transição para processos de produção baseados em fontes de energia renovável.

5.10 Potencial de aquecimento global em cenários de uso de veículos e produção de combustível

Na Fig. 52 são apresentados os resultados da projeção das emissões dos gases de efeito estufa decorrentes do uso dos veículos (TTW) e da produção dos respectivos combustíveis considerados neste estudo (WTT) nos 5 cenários adotados.

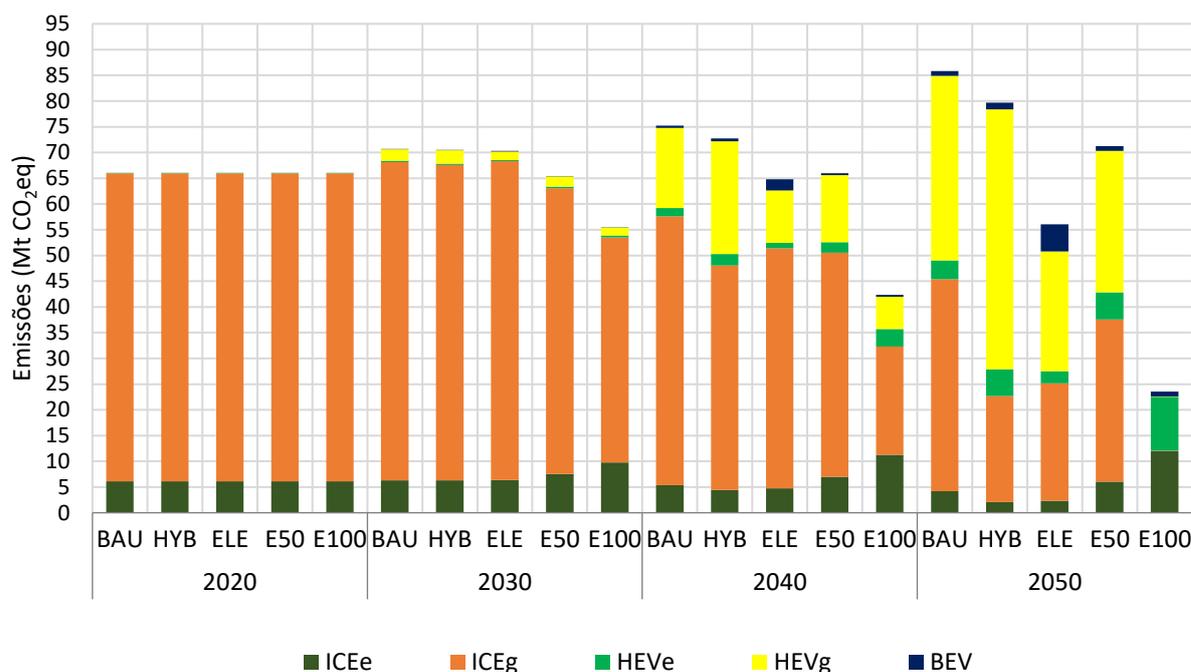


Figura 52 - Projeção do potencial de aquecimento global em cenários de uso de veículos e produção de combustíveis (WTT)

Os resultados do cenário 100% bioetanol (E100) e do cenário de eletrificação da frota (ELE) mostram uma tendência de redução das emissões de gases de efeito estufa da frota até o ano de 2050, cujas reduções são estimadas em 15% no cenário Eletrificação (ELE) e 64% no cenário 100% bioetanol (E100). No cenário Eletrificação (ELE) as reduções nas emissões de GEE ocorrem em decorrência da maior inserção de veículos BEV e HEV caracterizados por melhor eficiência energética (TTW), bem como, pela utilização da energia elétrica que oriunda da matriz geração brasileira predominantemente renovável. O cenário 100% bioetanol (E100) apresenta os melhores resultados quanto a redução das emissões de GEE, em função da menor pegada de carbono na produção do bioetanol frente aos demais combustíveis. Numa análise comparativa das emissões TTW e WTT dos combustíveis entre o ano de referência (2020) e o ano de projeção final (2050), observa-se um aumento das emissões no cenário Business-as-usual (BAU) de 30%, ou seja, no cenário padrão haverá um aumento das emissões anuais de 65,9 Mt CO₂eq/ano para 85,8 Mt CO₂eq/ano.

O cenário com 100% de participação do bioetanol (E100), utilizado nos veículos HEV e ICE, objetiva explorar os limites da participação desse biocombustível na matriz de transportes e suas implicações na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Conforme análise anterior, o cenário E100 se mostra factível do ponto de vista da produção de bioetanol necessário para suprir toda a demanda dos veículos da frota (ICE e/ou HEV) até o ano de 2050, uma vez que o volume da demanda estimada para atender a frota seria de 62 bilhões de litros de bioetanol ao ano em 2050, o que seria atendido de acordo com projeções da (EPE/MME, 2021) se tivermos o crescimento médio da oferta em pelo menos 2% ao ano da produção de bioetanol da cana-de-açúcar, sem contarmos as demais rotas de produção de segunda e terceira geração outrora implementada no País. Além disso, o programa Renovabio apresenta entre seus objetivos a eficiência energética, a redução de emissões de GEE na produção e a promoção da expansão sustentável da produção e do uso do bioetanol na matriz energética nacional deve contribuir significativamente nos próximos anos com a ampliação sustentável da produção deste biocombustível e a sua oferta suficiente para substituir totalmente a gasolina nos motores à combustão interna.

Os cenários E50 e E100 oferecem ainda um alta capacidade para a descarbonização do transporte por veículos leves, em função da potencialidade para o aperfeiçoamento tecnológico tanto de motores à combustão interna, como de motores híbridos, projetados especialmente para o uso do bioetanol, que superariam em termos de eficiência energética, os atuais motores flex-fuel projetados para uso de gasolina. Atualmente, a pesquisa em motores híbridos a bioetanol faz parte do portfólio de pesquisa e desenvolvimento de algumas das grandes montadoras de automóveis presentes no Brasil, o que deverá ser induzido nos próximos anos em função do recente lançamento do programa de Mobilidade Verde – MOVER, que representa a principal política pública do setor automotivo voltada ao desenvolvimento de tecnologias sustentáveis do “berço ao túmulo”.

5.11 Potencial de Aquecimento Global na fabricação e uso dos veículos

A Fig. 53 apresenta os resultados das projeções anuais de emissões em todo o ciclo considerado no presente estudo, seja na fabricação dos veículos, no uso e produção dos combustíveis e reciclagem da bateria de Lítio-íon, em 5 cenários distintos. A projeção considera uma troca de bateria de Lítio-íon para os veículos BEV e HEV, o que é justificado pela vida

útil média de 10 anos da bateria, que deve cobrir todo o período de vida útil média de 20 anos para os veículos da frota brasileira.

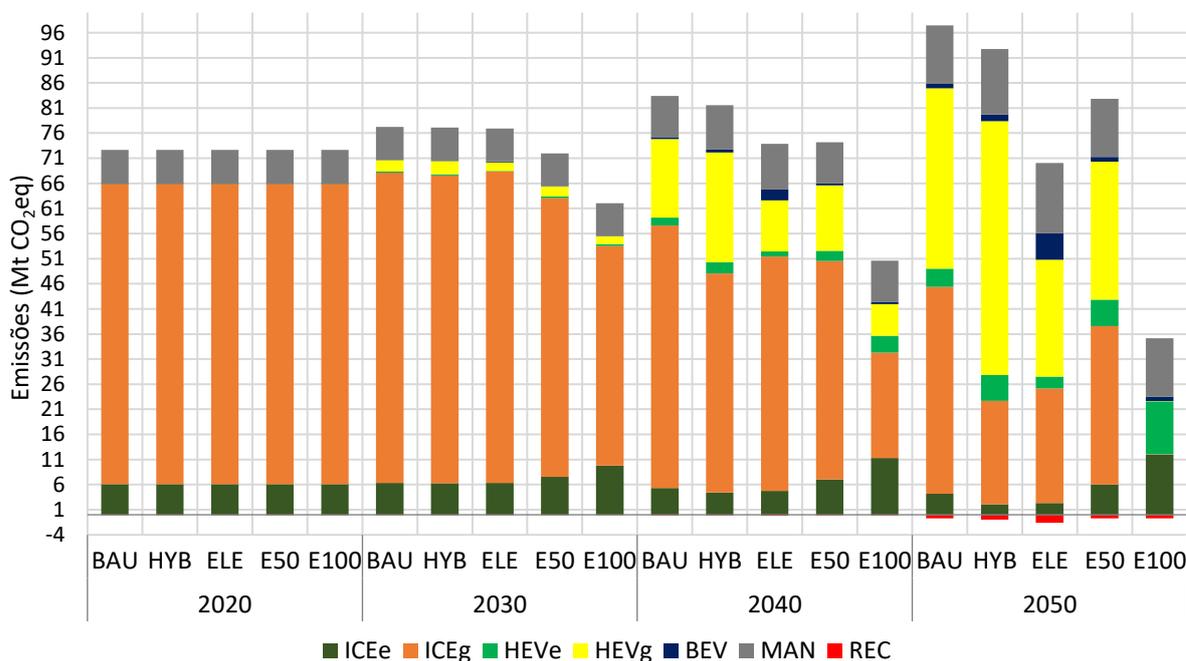


Figura 53 - Potencial de Aquecimento Global da frota em cenários de fabricação e uso dos veículos

Os resultados das projeções mostram que o cenário 100% bioetanol (E100) e o cenário de eletrificação da frota (ELE) apresentaram os melhores resultados em termos da redução de emissões totais de GEE até o ano de 2050. Nestes cenários, a estimativa é que as reduções das emissões totais da frota alcancem 6% no cenário de Eletrificação (ELE) e 53% no cenário 100% bioetanol (E100). No contexto da Eletrificação (ELE), as reduções nas emissões de gases de efeito estufa resultam principalmente da maior adoção de veículos elétricos a bateria (BEV) e híbridos elétricos (HEV), os quais se destacam pela sua eficiência energética superior (TTW), além da utilização de eletricidade proveniente principalmente de fontes renováveis na matriz energética brasileira. Por sua vez, o cenário 100% bioetanol (E100) oferece os melhores resultados em termos de redução das emissões de gases de efeito estufa, devido à menor pegada de carbono associada à produção de bioetanol em comparação com outros combustíveis. No cenário Business-as-usual (BAU), observa-se um aumento das emissões em cerca de 33%, ou seja, no cenário padrão haverá um aumento das emissões anuais de 72,6 Mt CO₂eq/ano para 96,7 Mt CO₂eq/ano.

Poucos estudos voltados ao cenário brasileiro focam nos impactos das emissões devido à eletrificação da frota. Kain Glensor (2019) projetou as emissões de CO₂ de veículos leves, em cenários brasileiros dos anos 2020 a 2050. Neste estudo os resultados do cenário padrão

mostraram emissões anuais de aproximadamente 100 Mt CO₂ e 125 Mt CO₂ por ano em 2020 e 2050. Porém, este estudo considerou a variação dos cenários em função das possibilidades de composição da matriz de geração elétrica, sem focar cenários de composição da frota em veículos elétricos e híbridos.

O cenário de Eletrização (ELE) apresentou o segundo melhor resultado dentre os propostos neste estudo em termos de redução de emissões da frota brasileira até o ano de 2050. Neste cenário, apesar dos desafios tecnológicos e de infraestrutura para implementação que o envolvem, tais como, a infraestrutura de recarga, a autonomia dos veículos, o tempo de recarga, o aumento da demanda na geração elétrica, espera-se no médio prazo o equacionamento de tais questões. Por outro lado, os veículos elétricos apresentam vantagens comparativas em relação aos veículos com motores à combustão interna, como a redução dos ruídos e a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas, uma vez que não emitem GEE pelo escapamento o que contribui com a redução dos impactos negativos à saúde humana. Do ponto de vista energético, a matriz elétrica brasileira passa por uma transição, onde será constituída basicamente por fontes renováveis e intermitentes nas próximas décadas, o que acabará gerando limitações quanto ao armazenamento de energia elétrica, neste caso o carregamento dos veículos a bateria de forma regulamentada e coordenada poderá se apresentar como uma das soluções viáveis para uma resposta à demanda por parte do sistema elétrico relacionada ao armazenamento. Finalmente, é estratégico para o país que exista uma diversificação da matriz energética do setor de transportes, inclusive formada por fontes renováveis, oriundas tanto da geração elétrica e/ou dos biocombustíveis, que possam assegurar a segurança energética, a resiliência frente aos desafios e a redução de riscos ambientais.

6. CONCLUSÃO

Neste estudo, uma análise comparativa dos impactos no consumo energético e emissões de gases de efeito estufa dos principais tipos de veículos leves de passageiros e combustíveis utilizados no Brasil, bem como, os impactos da eletrificação da frota em cenários brasileiros de longo prazo foi realizada, por meio de análises do ciclo de vida com o auxílio da metodologia Well-to-Wheel.

A metodologia se dividiu em quatro eixos principais, a projeção da frota por meio de ferramenta de aprendizado de máquina, a simulação do uso dos veículos e sua fabricação, bem como, a projeção da geração de energia elétrica e a produção dos combustíveis em seus respectivos ciclos de vida. A metodologia se mostrou de fácil implementação, porém, com limitações na obtenção dos dados de avaliação do ciclo de vida e inventários, em especial do cenário brasileiro, o que foi satisfeito pela utilização de dados de publicações recentes. Por meio do algoritmo de aprendizado de máquina foi possível projetar a curva de vendas de novos veículos com coeficiente de determinação de 0,90, o que pode ser considerada uma boa aproximação. A simulação de uso dos diferentes veículos selecionados no perfil padrão de velocidades, permitiu estimar o consumo energético de cada modelo, cujos resultados se aproximaram da avaliação de eficiência energética realizada pelo Inmetro, com diferenças de até 3%, o que mostra uma excelente aproximação dos resultados teóricos comparados aos testes de laboratório realizados pelo Inmetro.

Os dados oficiais mostram a redução do número de novos licenciamentos nos anos recentes, como resultado dos efeitos econômicos da pandemia de COVID-19, que refletiram no baixo crescimento econômico com impacto na redução do poder aquisitivo da população e na redução da mobilidade das pessoas, a partir do ano de 2020. Além disso, a elevação dos preços dos veículos com efeitos globais, é um fator a ser considerado na queda de vendas, que resultará no envelhecimento da frota brasileira de veículos leves nos próximos anos. Entretanto, mantidas as premissas de crescimento da população e de aumento de sua renda média, os resultados da projeção mostraram que a frota brasileira de veículos leves, representada por cerca de 45 milhões de veículos no ano de 2023, tenderá a crescer em termos quantitativos até o ano de 2050, quando representará 71 milhões de veículos,

Os resultados demonstram que o veículo BEV apresenta a melhor eficiência energética no uso, considerando-se o ciclo padrão de velocidade urbano, cerca de 47% do consumo do segundo tipo mais eficiente, o veículo híbrido movido a bioetanol (HEVe), cujos consumos

foram estimados em 0,16 kWh e 0,34 kWh por quilômetro rodado, respectivamente. Esses resultados indicam que os veículos elétricos são uma opção mais eficiente em termos de consumo energético do que os veículos com motores à combustão interna e híbridos, devido ao melhor rendimento do conjunto motopropulsor elétrico, frente aos demais, constatação importante para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a melhoria da eficiência energética dos transportes.

Em relação às projeções anuais, considerando 2020 como ponto de referência, é esperado que o consumo total de energia (WTW) da frota de veículos leves aumente nas próximas décadas em todos os cenários, devido ao crescimento da frota. No entanto, o cenário de eletrificação (ELE) se destaca, mostrando os melhores resultados em termos de consumo energético comparado aos outros cenários. Nesse cenário, o aumento do consumo energético total é de apenas 4%, representando uma redução no consumo específico por veículo de cerca de 36%, em comparação com as reduções de consumo específico de 23% no cenário HYB e 22% no cenário E100. Isso evidencia a vantagem competitiva do cenário de eletrificação em relação aos demais, concluindo-se que a inserção de veículos elétricos é favorável do ponto de vista energético. Em contrapartida, os resultados mostraram a necessidade de ampliação da oferta de energia na geração elétrica projetada para 2050, em até 11,65% do total em função do aumento da participação dos veículos elétricos novos na frota de veículos leves. Devido a redução da participação das usinas movidas a combustível fóssil, estima-se que o grande potencial de crescimento da participação das fontes solar e eólica supriria a maior parte da demanda adicional necessária para a introdução de energia elétrica veículos. Neste sentido, o mix de fontes de produção de eletricidade composto essencialmente por fontes renováveis, cerca de 94% do total para o ano de 2050, revela-se um indicador favorável à transição energética, bem como, à sustentabilidade do setor de transportes. Por outro lado, os resultados apresentados indicam que o aumento da frota de BEV exigirá investimentos na infraestrutura de energia elétrica, como linhas de transmissão e subestações, sendo fundamental o planejamento do setor elétrico para comportar a demanda adicional. Ademais, será necessário desenvolver mecanismos de gerenciamento de carga, como a utilização de tarifas diferenciadas de energia ou a adoção de sistemas inteligentes de controle de consumo, para evitar sobrecargas na rede elétrica, principalmente nos horários de maior demanda de consumo de energia elétrica.

As emissões para cada tipo de veículo e combustível foram normalizadas e analisadas comparativamente nas etapas do ciclo de vida. A etapa de utilização ou queima de combustível fóssil em motores à combustão (TTW) apresentou as maiores emissões de gases de efeito estufa,

o que representa uma vantagem comparativa dos biocombustíveis, em especial do bioetanol devido às suas características renováveis, que permeiam todo o seu processo produtivo. No ciclo completo de uso e produção dos combustíveis (WTW), a energia elétrica usada em veículo BEV apresentou melhor rendimento com emissões de 22,6 gCO₂eq/km, comparativamente menor que o segundo melhor rendimento, o veículo HEV a bioetanol com emissões de 23,5 gCO₂eq/km. Então, no que se refere ao potencial de aquecimento global (GWP) na produção dos combustíveis e uso dos veículos (WTW), pode-se concluir que o conjunto veículo ICEg e HEVg abastecidos a gasolina apresentaram os piores resultados, em função das emissões no processo de produção da gasolina (8%) e principalmente na queima do combustível no motor à combustão interna (92%), além das características não renováveis, razão pela qual, devem ter sua substituição gradual, planejada e induzida em políticas públicas para o setor de transportes.

O processo de fabricação se destaca com uma das etapas do ciclo de vida com o maior volume de emissões de gases de efeito estufa, em especial, nos veículos híbridos e elétricos. Neste estudo, os resultados mostraram que as emissões na fabricação do HEV representaram 43% (17,9 gCO₂eq/km), enquanto no BEV 46% (19,3 gCO₂eq/km) do total das emissões por quilômetro percorrido durante o ciclo de vida. Os resultados apresentados indicam a importância de processos produtivos ambientalmente sustentáveis para a redução da pegada de carbono no ciclo de vida de fabricação de veículos, por meio da melhoria da eficiência do processo produtivo, da utilização de fontes de energia renováveis e da adoção de políticas públicas voltadas à reciclagem de materiais. Neste sentido, a reciclagem de materiais é uma prática que poderá contribuir para a redução da pegada de carbono no ciclo de vida de fabricação de veículos. O lítio e o cobalto, por exemplo, são matérias-primas de alto valor que podem ser reaproveitadas após o fim da vida útil das baterias. De fato, os resultados mostram que a reciclagem dessas baterias apresentam potencial de contribuir para a redução de até 8% das emissões relacionadas ao processo de produção de veículos BEV e de cerca de 2% para veículos HEV.

Neste estudo foram projetados 5 cenários de inserção dos diferentes tipos de veículos e de participação do bioetanol na matriz energética de transportes no período do ano de 2020 a 2050. Os resultados das projeções permitem concluir que o cenário com maior inserção do bioetanol (E100) seguido do cenário de maior eletrificação da frota (ELE) apresentaram os maiores potenciais de redução das emissões de gases de efeito estufa (GWP) ao longo do período em estudo. De fato, no longo prazo, o cenário com maior participação do bioetanol (E100) mostrou-se o mais favorável à redução das emissões anuais ao apresentar uma queda

das emissões totais em cerca de 64% em comparação ao ano de 2020, seguido pelo cenário de maior eletrificação (ELE), com redução de cerca de 15%. Diante dos resultados apresentados, visualizam-se duas oportunidades estratégicas para o direcionamento do planejamento do setor de transportes de veículos leves no País, com vistas à sua descarbonização. A primeira estaria relacionada ao potencial de produção de biocombustíveis no Brasil em vista da necessidade de substituição dos combustíveis fósseis, por meio da ampliação da produção sustentável, que é induzida atualmente pelas diretrizes do programa Renovabio. De forma complementar, espera-se o investimento em pesquisa, desenvolvimento e inovação voltada ao desenvolvimento tecnológico tanto de motores à combustão interna, como de motores híbridos, projetados especialmente para o uso do bioetanol, que em teoria, superariam em termos de eficiência energética, os atuais motores flex-fuel projetados para uso de gasolina. Em segundo lugar, conhecidas as vantagens competitivas dos veículos elétricos comparativamente aos veículos com motores à combustão interna, tais como, a melhor eficiência energética, a redução dos ruídos, a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas, e em especial, do ponto de vista energético, a capacidade de armazenamento e de uso das fontes renováveis e intermitentes que tendem a ampliar a sua participação na matriz de geração elétrica brasileira nas próximas décadas, espera-se a inclusão da mobilidade elétrica de forma planejada e coordenada às diretrizes do setor elétrico, nas políticas públicas e iniciativas voltadas ao cumprimento das metas de redução das emissões de gases de efeito estufa.

Finalmente, diante dos resultados e conclusões apresentados no presente estudo, algumas recomendações no âmbito do planejamento de políticas futuras voltadas aos veículos leves de passageiros podem ser consideradas: (i) a necessidade de ampliação da oferta de energia elétrica em até 11,5% para comportar os veículos BEV no cenário de maior eletrificação; (ii) indução da ampliação da produção e participação do bioetanol em função da sua vantagem comparativa aos demais combustíveis do ponto de vista das emissões; (iii) ampliação de incentivos à participação dos veículos HEV e ICE com motopropulsor desenvolvido para o uso do bioetanol, em função das vantagens comparativas deste biocombustível; (iv) incentivos ao desenvolvimento de processos eficientes do ponto de vista energético e sustentáveis ambientalmente na fabricação dos veículos híbridos e elétricos objetivando a redução da pegada de carbono; (v) implementação de políticas públicas de reciclagem dos componentes veiculares, e em especial, da bateria de lítio-íon por apresentar potencial de redução das emissões do processo de fabricação de um veículo elétrico em até 8%.

6.1 Limitações do Estudo

Algumas limitações deste estudo podem ser destacadas. O presente estudo se propõe a avaliar as emissões de gases de efeito estufa em função da eletrificação da frota no longo prazo. Entretanto, se limita a considerar as tecnologias em uso na atualidade sem avaliar o desenvolvimento de tecnologias disruptivas e/ou seu aperfeiçoamento que poderia mudar o curso das tendências do setor de transportes.

O escopo deste estudo se limita a avaliar o ciclo de vida de veículos leves de passageiros, porém, este estudo poderia ser ampliado de forma a avaliar outras categorias de veículos de acordo com o tamanho, outras tecnologias de motorização e diferentes tipos de combustíveis, de forma a permitir uma visão mais ampla das emissões do setor.

Por fim, com relação à produção de biocombustíveis, dada a complexidade ambiental associada à produção de biocombustíveis, seria pertinente expandir as fronteiras do sistema para incluir considerações sobre os impactos ambientais relacionados a monocultura do plantio da cana de açúcar, o uso da terra e sua degradação, bem como o desmatamento e a poluição dos cursos d'água.

6.2 Recomendações para estudos futuros

Tendo em vista o aprimoramento e ampliação dos resultados deste estudo, algumas recomendações podem ser feitas para estudos futuros como:

- Avaliar os impactos ambientais da inserção de novos combustíveis sustentáveis na matriz de transporte, como o hidrogênio verde ou o bioetanol em células a combustível.
- Desenvolver um modelo para prever a evolução tecnológica dos veículos atualmente em uso, com a incorporação e simulação de cenários alternativos, poderia permitir uma melhor aproximação dos resultados às tendências futuras do setor de transportes.
- Avaliar os impactos da utilização de novas tecnologias de processos de fabricação de veículos na mitigação dos impactos energéticos e ambientais.
- Ampliar o escopo do estudo com outros indicadores de impactos ambientais, tais como, o potencial de toxicidade humana, o potencial de ecotoxicidade aquática e o potencial de ecotoxicidade terrestre.

- Utilizar a modelagem de avaliação do ciclo de vida em um software (Gabi/Umberto) e comparar os resultados com o presente estudo.

Publicações em Periódicos

Carvalho, E. N., Brasil Junior, A. C. P. & Brasil, A. C. M (2023). Energy impact assessment of electric vehicle insertion in the Brazilian scenario, 2020 - 2050: a machine learning approach to fleet projection. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, v. 4, p. 100184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prime.2023.100184>

CARVALHO, ENIO NASCIMENTO DE; PINHO BRASIL JÚNIOR, ANTÔNIO CÉSAR ; BRASIL, AUGUSTO CÉSAR DE MENDONÇA . Impact of electric vehicle emissions in the Brazilian scenario of energy transition and use of bioethanol. *ENERGY REPORTS*, v. 10, p. 2582-2596, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723012908>

Apresentação em Congresso

Carvalho, E. N., Brasil, A. C. P. & Brasil, A. C. M (2023). Insertion of Electric Vehicles and Energy Consumption in the Long-term Brazilian Scenario. 2022. SDEWES 2022 – 3rd Latin American Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.

REFERÊNCIAS

- ABRABAT. (2019). *Acordo Setorial para implementação de sistema de logística reversa de Baterias Chumbo Ácido*. https://iberbrasil.org/uploads/downloads/1607452495-acordo_setorial_baterias_chumbo_acido_AGO19.pdf
- ANFAVEA. (2021). *Vehicle Time Series*. National Association of Motor Vehicle Manufacturers. <https://anfavea.com.br/site/issues-in-excel/?lang=en>
- ANFAVEA. (2022). *National Association of Vehicle Manufacturers: vehicles – production, licensing and exports*. National Association of Vehicle Manufacturers. <https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-excel/>
- ANFAVEA. (2024). *História da Indústria de Automóveis no Brasil*. ANFAVEA. <https://anfavea.com.br/site/historia-2/>
- ANP. (2022a). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2022*. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/anuario-2022.pdf>
- ANP. (2022b). *Historical Fuel Price Survey Series*. Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>
- ANP. (2023). *Programa Renovabio*. Sobre o RenovaBio. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/sobre-o-renovabio>
- BACEN. (2023). *Estatísticas do Banco Central do Brasil*. Estatísticas Do Banco Central Do Brasil. <https://www3.bcb.gov.br/sgspub/localizarseries/localizarSeries.do?method=prepararTelaLocalizarSeries>
- Barros, M. V., Piekarski, C. M., & De Francisco, A. C. (2018). Carbon footprint of electricity generation in Brazil: An analysis of the 2016-2026 period. *Energies*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/en11061412>
- Baumann, R. (1990). Biefix: efeitos internos de um incentivo à exportação. *Revista Brasileira de Economia*, 44(2).
- Bordonal, R. de O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., de Figueiredo, E. B., de Oliveira, B. G., & La Scala, N. (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy*

- for Sustainable Development*, 38(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>
- Buchert, M. (2015). *Ökobilanzen zum Recyclingverfahren EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien*.
- Buchert, M., Jenseit, W., Merz, C., & Schüler, D. (2011). Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). *Öko-Institut e.V., Freiburg*, 1(0), 1–114. <https://www.oeko.de/oekodoc/1500/2011-068-de.pdf>
- Buchert, M., & Sutter, J. (2016). *Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien*. 56. <https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2017-01/LithoRec-II-LCA-Update-2016.pdf>
- Capaz, R. S. (2009). *Estudo do desempenho energético da produção de biocombustíveis: Aspectos metodológicos e estudo de caso*. 121. <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0035020.pdf>
- CarrosNaWeb. (2024). *carrosnaweb*. <https://www.carrosnaweb.com.br/>
- Cavalett, O., & Chagas, M. F. (2013). *Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods*. 647–658. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0465-0>
- CETESB. (2013). *Intensity of Use Curves by Type of Vehicle Fleet of the City of São Paulo*. Companhia Ambiental Do Estado de São Paulo. São Paulo. <https://cetesb.sp.gov.br/home/wp-content/uploads/sites/11/2015/02/curvas-intensidade-uso-veiculos-automotores-cidade-sao-paulo.pdf>
- CETESB. (2019). *Vehicle Emissions in the State of São Paulo 2019*. Companhia Ambiental Do Estado de São Paulo. São Paulo. <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf>
- Choma, E. F., & Ugaya, C. M. L. (2017). Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet. *Journal of Cleaner Production*, 152, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.091>
- CONAB. (2023). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. 2023/24 - Terceiro levantamento*. (Vol. 11). <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>
- Dallmann, T., & Façanha, C. (2017). *International Comparison of Brazilian Regulatory Standards for Light-duty Vehicle Emissions*. April.
- 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*, 203, 444–468. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.236>
- Dranka, G. G. & Ferreira, P. (2020). Electric Vehicles and Biofuels Synergies in the Brazilian Energy System. *Energies*, 13, 4423. <https://doi.org/10.3390/en13174423>
- Draper, M., Rodriguez, E., Kaminsky, P., Sidhu, I., & Tenderich, B. (2008). *Economic Impact of Electric Vehicle Adoption in the United States*. 1–13.
- Duarte Castro, F., Cutaia, L., & Vaccari, M. (2021). End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030. *Resources, Conservation and Recycling*, 169(October 2020), 105522. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105522>
- Ecoinvent. (2023). *Ecoinvent v3.4*. <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-4/>
- Enrique, E., & Jorges, M. (2022). *Recycling Lithium Batteries , a viable industrial process* (Issue December). Universidade de Lisboa.
- EPA. (2022). *Vehicle and Fuel Emissions Testing*. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules#FTP>
- EPA. (2023). *Emission Standards for Light-Duty Vehicles and Trucks and Motorcycles*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks-and>
- EPE/MME. (2021). *Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 Oferta de Biocombustíveis*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/PDE 2031 - Oferta de Biocombustiveis_06dez2021.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/PDE%2031%20-%20Oferta%20de%20Biocombustiveis_06dez2021.pdf)
- EPE. (2020). *Brazilian Energy Balance 2021*. Empresa de Pesquisa Energética. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>
- Fisher, K., Wallén, E., Laenen, P. P., & Collins, M. (2006). Battery Waste Management Life Cycle Assessment Battery Waste Management Life Cycle Assessment. *Final Report for*

Publication, October, 0–3.

- 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*, 76(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101261>
- Gonçalves, D. N. S., Goes, G. V., & D'Agosto, M. de A. (2019). *Transportes no Brasil - Panorama e Cenários Prospectivos para atendimento da Contribuição Nacionalmente Determinada*. https://ibts.eco.br/src/uploads/2019/12/transportes-no-brasil_relatorio-de-referencia.pdf
- 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*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- Held, M., Rosat, N., Georges, G., Pengg, H., & Boulouchos, K. (2021). Lifespans of passenger cars in Europe: empirical modelling of fleet turnover dynamics. *European Transport Research Review*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00464-0>
- Hendrickson, T. P., Kavvada, O., Shah, N., Sathre, R., & D Scown, C. (2015). Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California. *Environmental Research Letters*, 10(1), 14011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014011>
- Henrique, M., Silva, R., Eduardo, E., Lora, S., Augusto, L., Nogueira, H., Montagnana, M., Leme, V., Luiza, M., Renó, G., & Almazán, O. (2014). Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions : A meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 435–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.036>
- Hernandes, T. A. D., Duft, D. G., Luciano, A. C. dos S., Leal, M. R. L. V., & Cavalett, O. (2021). Identifying suitable areas for expanding sugarcane ethanol production in Brazil under conservation of environmentally relevant habitats. *Journal of Cleaner Production*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125318>
- IBGE. (2022). *Brazilian Population Projection*. Brazilian Institute of Geography and Statistics. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=resultados>
- Ibusuki, U., Kobayashi, H., & Jin, Y. (2013). Asian automobile manufacturers strategies in

- Brazil: Impact of the new automotive policy (INOVAR-AUTO). *In 21st International Colloquium of GERPISA*.
- IEA. (2020). *World Energy Balances*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>
- IEA. (2021). *Electric Vehicles - Tracking Report*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>
- INMETRO. (2022). *Brazilian Energy Efficiency Assessment Program*. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>
- IPCC. (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, vol. 2 and 3, Energy*. The Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report | UNEP - UN Environment Programme. Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- ISO. (2006). ISO. 14040 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. *Technical Committee : ISO/TC 207/SC 5 Life Cycle Assessment*.
- Kain Glensor, M. R. M. (2019). Life-Cycle Assessment of Brazilian Transport Biofuel and Electrification Pathways. *Sustainability* 2019, 11, 6332. <https://doi.org/10.3390/su11226332>
- 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*, 23(2), 333–347. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1315-x>
- Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. (2019). Estimation of CO2 Emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. *Sustainability (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/su11092690>
- Keshavarzmohammadian, A., Henze, D. K., & Milford, J. B. (2017). Emission Impacts of Electric Vehicles in the US Transportation Sector Following Optimistic Cost and Efficiency Projections. *Environmental Science and Technology*, 51(12), 6665–6673.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04801>

- Kobayashi, S., Plotkin, S., & Ribeiro, S. K. (2009). Energy efficiency technologies for road vehicles. *Energy Efficiency*, 2(2), 125–137. <https://doi.org/10.1007/s12053-008-9037-3>
- Koroma, M. S., Brown, N., Cardellini, G., & Messagie, M. (2020). Prospective environmental impacts of passenger cars under different energy and steel production scenarios. *Energies*, 13(23), 1–17. <https://doi.org/10.3390/en13236236>
- Lecoals, H. (2000). ISO 14043: Environmental Management - Life Cycle Assessment. *Editorial: ISO14043*, 4(5), 86899.
- MathWorks Inc. (2021). *Matlab* (No. R2021a). <https://www.mathworks.com/>
- MDIC. (2023). *Mover - Programa de Mobilidade Verde*. Ministério Do Desenvolvimento, Indústria e Comércio. <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-aco-es-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>
- Mera, Z., Bieker, G., Rebouças, A. B., & Cieplinsk, A. (2023). *Comparação das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Ciclo De Vida de Carros de Passeio a Combustão e Elétricos no Brasil* (Issue September). <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A4-PORT-v4.pdf>
- Miri, I., Fotouhi, A., & Ewin, N. (2021). Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 501–520. <https://doi.org/10.1002/er.5700>
- MMA. (2013). *National Inventory of Atmospheric Emissions by Automotive Vehicles - 2013*. Ministério Do Meio Ambiente. https://antigo.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Inventario_de_Emissoes_por_Veiculos_Rodoviaros_2013.pdf
- MME/EPE. (2005). *Potencial de Redução de Emissões de CO2 em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-304/EPE_2o_Biocombustiveis_x_MDL%5B1%5D.pdf
- MME/EPE. (2020). *National Energy Plan 2050*. Ministério Das Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio_Final_do

PNE 2050.pdf

- Mohr, M., Peters, J. F., Weil, M., & Baumann, M. (2020). *Towards a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes. Supporting Information for: SI-2*. 1–18. www.wileyonlinelibrary.com/journal/jie
- Niquito, T. W., & Carraro, A. (2021). *Efeitos do Programa Inovar-Auto sobre a indústria de veículos no Brasil*.
- Ntombela, M., Musasa, K., & Moloi, K. (2023). A Comprehensive Review for Battery Electric Vehicles (BEV) Drive Circuits Technology, Operations, and Challenges. *World Electric Vehicle Journal*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/wevj14070195>
- Olofsson, Y., & Romare, M. (2013). *Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries for Plug-in Hybrid Buses*.
- ONS. (2023). *National Interconnected System*. Operador Nacional Do Sistema Eletrico. <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>
- Orsi, F., Muratori, M., Rocco, M., Colombo, E., & Rizzoni, G. (2016). A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. *Applied Energy*, 169, 197–209. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.039>
- Pascoal, E. T., Augusto, F., Marins, S., & Duggins, R. (2022). *The Role of Public Policies in the Development of the Brazilian Automotive Industry*. 17(4).
- Pelegrina, J., & Stoeber, T. (2023). *Will Rota 2030 deliver sustainable innovation? Comparing the ends and means of Brazilian and German auto industry innovation policies*. 20(3), 227–243. <https://doi.org/10.1108/INMR-01-2021-0015>
- Pokharel, S., Sah, P., & Ganta, D. (2021). Improved prediction of total energy consumption and feature analysis in electric vehicles using machine learning and shapley additive explanations method. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/wevj12030094>
- Protocol, G. (2023). *Global Warming Potential Values*. [https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb 16 2016%29_1.pdf](https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb%2016%29_1.pdf)
- Qiao, D., Wang, G., Gao, T., Wen, B., & Dai, T. (2021). Potential impact of the end-of-life batteries recycling of electric vehicles on lithium demand in China: 2010–2050. *Science*

- of the Total Environment*, 764. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142835>
- Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., Jiang, S., & Hao, H. (2017). Comparative Study on Life Cycle CO₂ Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China. *Energy Procedia*, 105, 3584–3595. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.827>
- R. Edwards, J-F. Larivé, J.-C. B. (2011). *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context* (Issue July). <https://doi.org/10.2788/78759>
- Rosenberg, S., Kurz, L., Huster, S., Wehrstein, S., Kiemel, S., Schultmann, F., Reichert, F., Wörner, R., & Glöser-Chahoud, S. (2023). Combining dynamic material flow analysis and life cycle assessment to evaluate environmental benefits of recycling – A case study for direct and hydrometallurgical closed-loop recycling of electric vehicle battery systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 198(January). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107145>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Santos, A. M. M. M., & Burity, P. (2002). Histórias setoriais: O complexo automotivo. *BNDES*. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/12914>
- Sathre, R., & Gustavsson, L. (2021). A lifecycle comparison of natural resource use and climate impact of biofuel and electric cars. *Energy*, 237, 121546. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121546>
- Schapiro, M. G. (2017). O estado pastor e os incentivos tributários no setor automotivo. *Revista de Economia Política*, 37(147), 437–455.
- Schill, W. P., & Gerbaulet, C. (2015). Power system impacts of electric vehicles in Germany: Charging with coal or renewables? *Applied Energy*, 156(2015), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.012>
- Seabra, J. E. A., Macedo, I. C., & Leal, M. R. L. V. (2014). Greenhouse Gases Emissions Related To Sugarcane Ethanol. *Sugarcane Bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*, 291–300. https://doi.org/10.5151/blucheroa-sugarcane-sugarcanebioethanol_29
- Sheng, M. S., Sreenivasan, A. V., Sharp, B., & Du, B. (2021). Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions and energy consumption for electric vehicles: A comparative

- study in Oceania. *Energy Policy*, 158(August).
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112552>
- SINDIPEÇAS. (2020). *Brazilian Current Fleet Report*. Sindicato Nacional Da Indústria de Componentes Para Veículos Automotores. Associação Brasileira Da Indústria de Autopeças.
https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2021/RelatorioFrotaCirculante_Marco_2021.pdf
- Spielmann, M., Bauer, C., Dones, R., Scherrer, P., & Tuchschnid, M. (2007). Transport Services. e-coinvent report No. 14. *Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf*, 3(5), 202–207. [https://doi.org/10.1016/0140-3664\(80\)90150-4](https://doi.org/10.1016/0140-3664(80)90150-4)
- Tsiropoulos, I., Faaij, A. P. C., & Seabra, J. E. A. (2014). *Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil*. 1049–1067.
<https://doi.org/10.1007/s11367-014-0714-5>
- Un-Noor, F., Padmanaban, S., Mihet-Popa, L., Mollah, M. N., & Hossain, E. (2017). A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. *Energies*, 10(8).
<https://doi.org/10.3390/en10081217>
- UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. United Nations Climate Change.
https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- UNFCCC. (1997). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *CONFERENCE OF THE PARTIES Third Session Kyoto, 1-10 December 1997 Agenda Item 5*, 1–24.
- Vidhya, S. D., & Balaji, M. (2019). Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 52(9–10), 1420–1433. <https://doi.org/10.1177/0020294019858212>
- Walter, A., Dolzan, P., Quilodrán, O., De Oliveira, J. G., Da Silva, C., Piacente, F., & Segerstedt, A. (2011). Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy*, 39(10), 5703–5716. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.07.043>
- Wang, M., Han, J., Dunn, J. B., Cai, H., & Elgowainy, A. (2015). Well-to-wheels energy use and greenhouse gas emissions of ethanol from corn, sugarcane and cellulosic biomass for

- US use. *Efficiency and Sustainability in Biofuel Production: Environmental and Land-Use Research*, 249–280. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045905>
- Wang, Z., & Paranjape, R. (2014). An evaluation of electric vehicle penetration under demand response in a multi-agent based simulation. *Proceedings - 2014 Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2014*, 220–225. <https://doi.org/10.1109/EPEC.2014.14>
- Weiss, M. A., Heywood, J. B., Drake, E. M., Schafer, A., & AuYeung, F. F. (2000). ON THE ROAD IN 2020 - A life-cycle analysis of new automobile technologies. *Energy Laboratory Report, EL 00-003*(October), 3–6 to 3–14. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2000/10/MIT-EL-00-003.pdf>
- Winslow, K. M., Laux, S. J., & Townsend, T. G. (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(July 2017), 263–277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.001>
- Wu, T., Zhao, H., & Ou, X. (2014). *Vehicle Ownership Analysis Based on GDP per Capita in China: 1963–2050*. 4877–4899. <https://doi.org/10.3390/su6084877>
- Wu, Y., Yang, L., Tian, X., Li, Y., & Zuo, T. (2020). Temporal and spatial analysis for end-of-life power batteries from electric vehicles in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 155(January), 104651. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104651>
- Yazdanie, M., Noembrini, F., Heinen, S., Espinel, A., & Boulouchos, K. (2016). Well-to-wheel costs, primary energy demand, and greenhouse gas emissions for the production and operation of conventional and alternative vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 63–84. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.002>
- Yu, P., Li, M., Wang, Y., & Chen, Z. (2022). Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: A Review of Topologies and Energy Management Strategies. *World Electric Vehicle Journal*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/wevj13090172>
- Yudhistira, R., Khatiwada, D., & Sanchez, F. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. *Journal of Cleaner Production*, 358(April). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131999>
- Yue, H., Zhang, S., Tang, X., & Wang, W. (2021). Energy Consumption, Pollutant Emissions and Cost of Electric Vehicles and Fuel Vehicles. *E3S Web of Conferences*, 308, 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130801018>
- Zhuang, W., Li (Eben), S., Zhang, X., Kum, D., Song, Z., Yin, G., & Ju, F. (2020). A survey of

powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. *Applied Energy*, 262(December 2019), 114553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114553>

Ziemann, S., Müller, D. B., Schebek, L., & Weil, M. (2018). Modeling the potential impact of lithium recycling from EV batteries on lithium demand: A dynamic MFA approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 133(July 2017), 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.031>

APÊNDICE A: Código Fonte da Simulação

Link para acesso à pasta com os códigos fonte do algoritmo da simulação em Matlab:

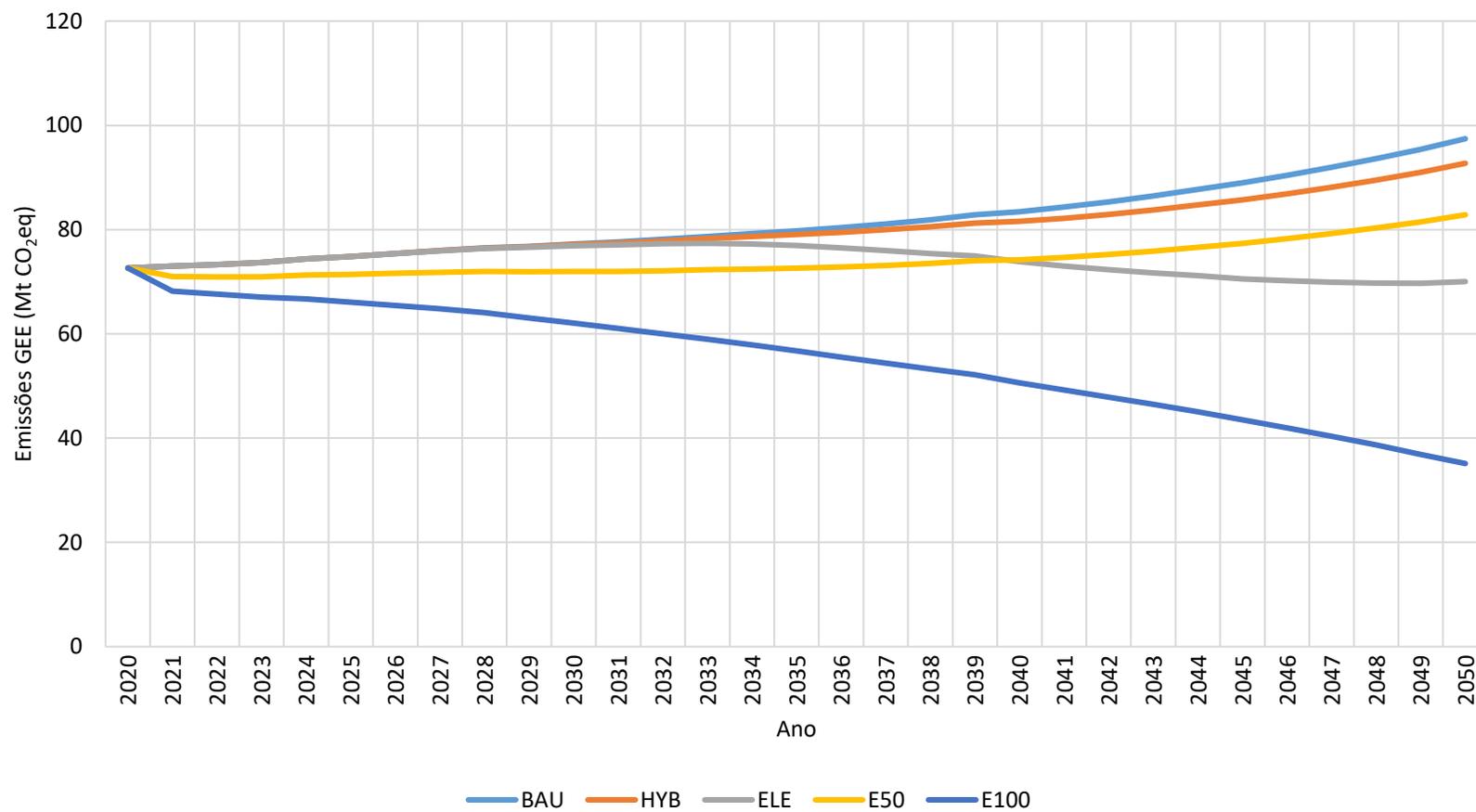
https://unbbr-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/190053836_aluno_unb_br/EjBs7Juvr-JFux9tA3t0JdcBZDLox5Cb3odkXje8HVE9cw?e=w6R9ya

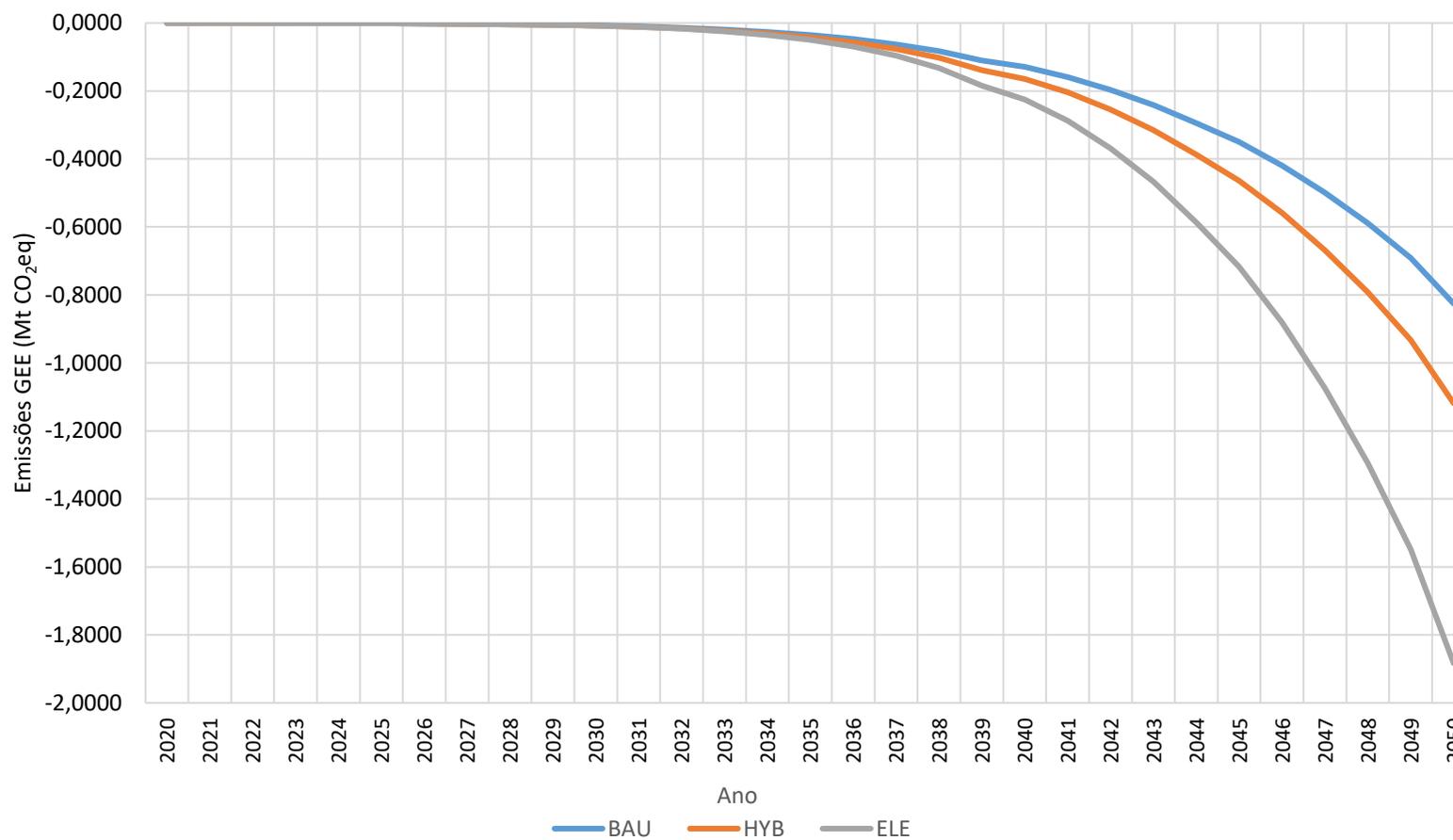
Instrução para a execução em Matlab: baixar todos os arquivos na mesma pasta e executar o arquivo **SimuladorEmissoesGWP2050v17_11_23.m**

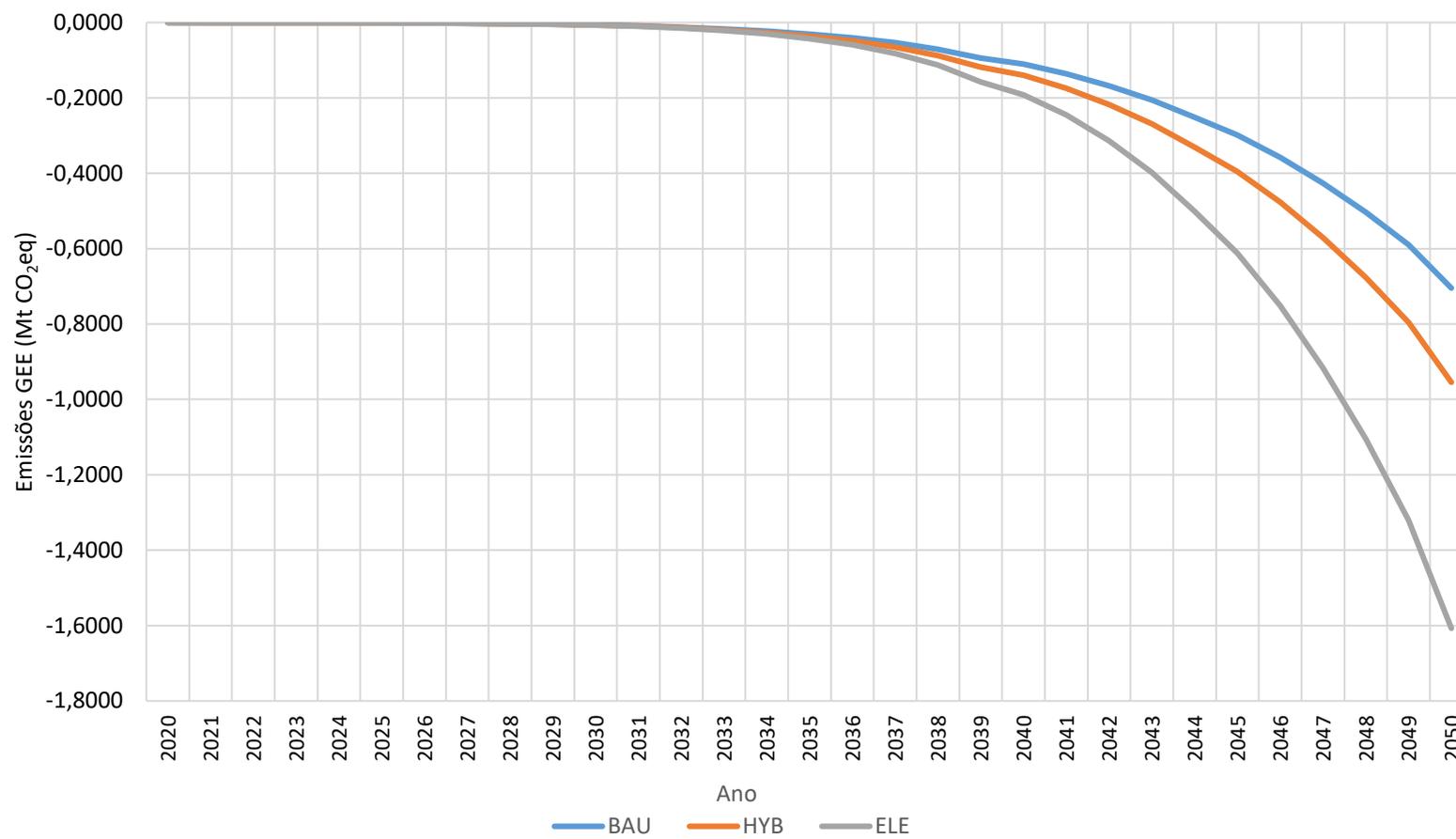
APÊNDICE B: Séries Históricas e Dados de Entrada

Link para acesso à pasta séries históricas e dados de entrada:

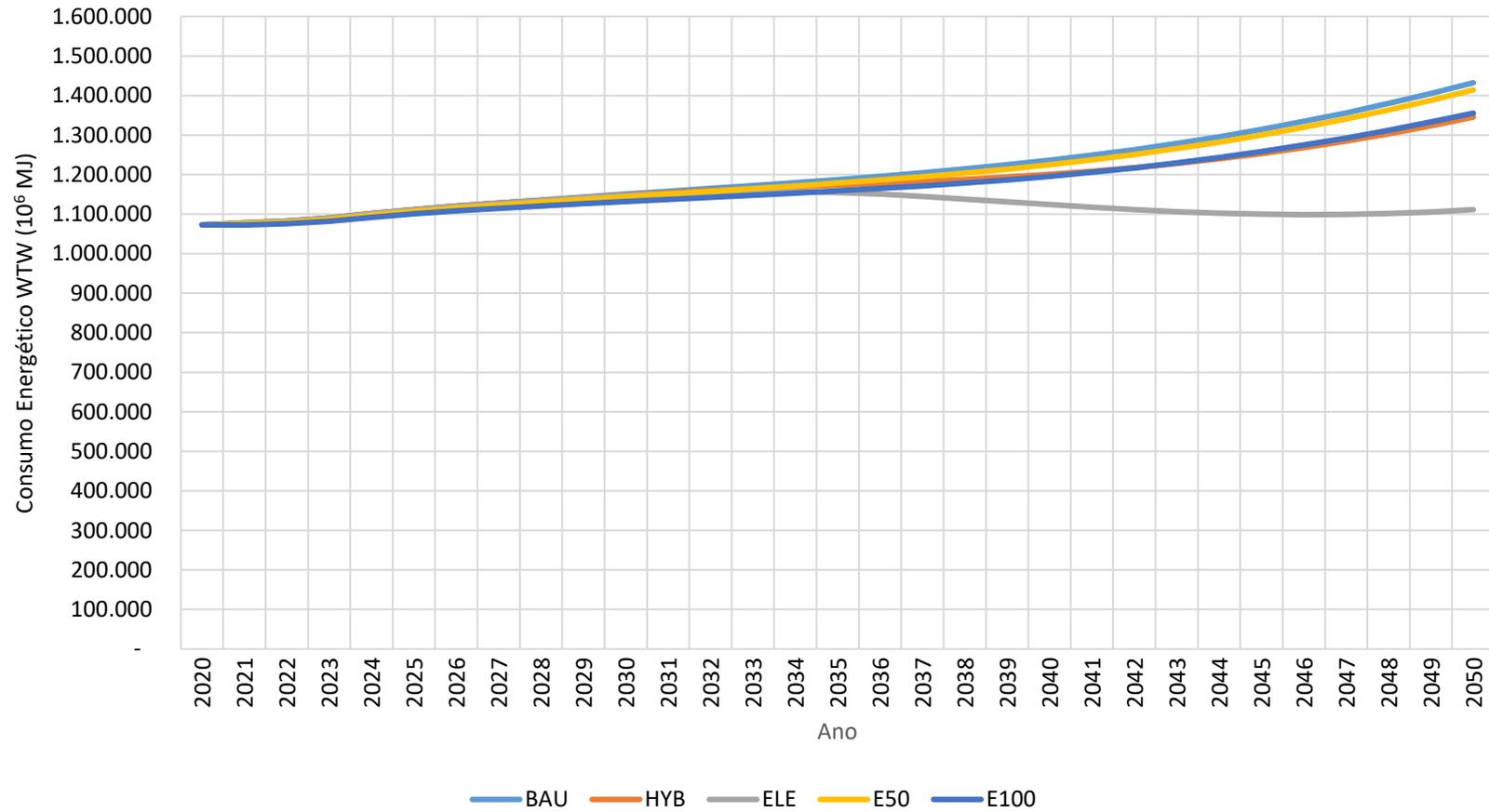
https://unbbr-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/190053836_aluno_unb_br/EnTncnuJ47hEsCLYMqL-HGwBctAVBTG5696XdmWhABSM9Q?e=mAfpaz

APÊNDICE C: Gráfico GWP total nos cenários

APÊNDICE D: Gráfico Potencial de redução das emissões da pirometalurgia nos cenários

APÊNDICE E: Gráfico potencial de redução das emissões da hidrometalurgia nos cenários

APÊNDICE F: Gráfico consumo energético na produção dos combustíveis e uso dos veículos nos cenários



**APÊNDICE G: Projeção Emissões GEE na produção e uso dos veículos e combustíveis e potencial de recuperação da reciclagem da
bateria**

MtCO _{2eq}	2020					2030					2040					2050				
	BAU	HYB	ELE	E50	E100	BAU	HYB	ELE	E50	E100	BAU	HYB	ELE	E50	E100	BAU	HYB	ELE	E50	E100
ICEe	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1	6,3	6,3	6,3	7,5	9,8	5,3	4,5	4,8	7,0	11,3	4,2	2,1	2,3	6,0	12,0
ICEg	59,8	59,8	59,8	59,8	59,8	61,8	61,3	62,0	55,6	43,8	52,3	43,6	46,6	43,5	21,0	41,1	20,6	22,8	31,5	0,0
HEVe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	1,6	2,2	1,0	2,1	3,4	3,7	5,2	2,4	5,3	10,5
HEVg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	2,6	1,7	2,0	1,6	15,6	21,9	10,2	13,0	6,3	35,9	50,6	23,2	27,5	0,0
BEV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4	0,5	2,1	0,4	0,4	0,9	1,3	5,3	0,9	0,9
MAN	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	8,2	8,9	9,1	8,2	8,2	11,6	13,0	14,0	11,6	11,6
REC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,7	-1,0	-1,6	-0,7	-0,7
Total	72,6	72,6	72,6	72,6	72,6	77,2	77,1	76,9	72,0	62,1	83,3	81,4	73,7	74,1	50,5	96,7	91,8	68,4	82,1	34,4

APÊNDICE H: Projeção do consumo de energia elétrica no cenário de maior eletrificação

TWh	2020			2030			2040			2050		
	BAU	HYB	ELE	BAU	HYB	ELE	BAU	HYB	ELE	BAU	HYB	ELE
Gás Natural	0,0003	0,0003	0,0003	0,0259	0,0342	0,0670	0,2563	0,3487	1,3854	0,8007	1,0916	4,4682
Carvão	0,0001	0,0001	0,0001	0,0033	0,0043	0,0084	0,0082	0,0111	0,0442	0,0000	0,0000	0,0000
Óleo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Biomassa	0,0003	0,0003	0,0003	0,0240	0,0317	0,0620	0,1422	0,1936	0,7690	0,2676	0,3649	1,4936
Nuclear	0,0001	0,0001	0,0001	0,0155	0,0204	0,0400	0,1008	0,1372	0,5450	0,2054	0,2800	1,1460
Eólica	0,0004	0,0004	0,0004	0,1287	0,1701	0,3329	2,1434	2,9168	11,5881	7,2062	9,8240	40,2137
Hidráulica	0,0034	0,0034	0,0034	0,3683	0,4868	0,9525	2,4192	3,2922	13,0792	4,6819	6,3826	26,1267
Solar	0,0000	0,0000	0,0000	0,0116	0,0154	0,0300	0,2346	0,3192	1,2682	0,8141	1,1098	4,5428
Consumo Total	0,0046	0,0046	0,0046	0,5773	0,7630	1,4927	5,3047	7,2188	28,6790	13,9759	19,0528	77,9910
Geração Total	669,3	669,3	669,3	968,7	968,7	968,7	1.403,8	1.403,8	1.403,8	1.819,9	1.819,9	1.819,9

APÊNDICE I: Consumo energético e emissões por tipo de veículo por quilômetro rodado

Consumo energético

kWh/km	ICEe	ICEg	HEVe	HEVg	BEV
TTW	0,42	0,42	0,34	0,34	0,16
WTT	0,04	0,08	0,03	0,07	0,03
Total	0,46	0,50	0,38	0,41	0,19

Emissões de GEE por km rodado

gCO ₂ eq/km	ICEe	ICEg	HEVe	HEVg	BEV
TTW	0,0	105,5	0,0	86,6	0,0
WTT	28,7	45,3	23,5	37,1	22,6
Manufatura	10,7	10,7	17,9	17,9	19,3
Reciclagem	0,0	0,0	-0,4	-0,4	-1,6
Total	39,4	161,5	41,4	141,6	41,9

APÊNDICE J: Composição de células de bateria de Lítio-íon (Mohr et al., 2020)

Table S1.1: Mass composition of battery cell, metal requirements (Peters and Weil 2018; Weil et al. 2018; Peters et al. 2016)

Item	NCA	NMC	NMC622	NMC811	LFP	SIB
Li	2.1 %	2.6 %	2.60%	2.60%	2.0 %	
Al	7.4 %	4.6 %	4.60%	4.60%	1.9 %	9.1 %
Cu	14.6 %	21.7 %	21.70%	21.70%	4.7 %	
Ni	13.6 %	7.0 %	12.52%	16.63%		4.6 %
Co	2.5 %	7.0 %	4.18%	2.09%		
Mn		6.5 %	3.88%	1.93%		7.2 %
Fe					15.2 %	8.0 %
P					8.4 %	
Mg						0.3 %
Tl						0.7 %
Total	40. 2%	49.4 %			32.2 %	29.9 %

Table S1.2: Mass composition of battery cell, component-wise (Peters and Weil 2018; Peters et al. 2016)

Item	Parameter	NCA	NMC	LFP	SIB
Anode					
	Active material	19.34 %	15.64 %	17.59 %	35.42 %
	Current collector	14.67 %	21.59 %	4.79 %	6.10 %
	Binder	0.49 %	0.65 %	2.19 %	1.53 %
	Cond. carbon	0.58 %	0.00 %	0.00 %	1.15 %
Cathode					
	Active material	27.14 %	34.94 %	43.93 %	28.00 %
	Current collector	7.35 %	4.59 %	1.98 %	2.98 %
	Binder	0.49 %	1.49 %	2.91 %	1.19 %
	Cond. carbon	0.58 %	0.74 %	2.81 %	0.60 %
Separator		8.22 %	2.14 %	1.87 %	2.57 %
Electrolyte		18.34 %	15.54 %	19.26 %	17.80 %
Cell housing					
	Plastic	0.53 %	0.53 %	0.53 %	0.53 %
	Aluminum	1.12 %	1.12 %	1.12 %	1.12 %
	Copper	1.02 %	1.02 %	1.02 %	1.02 %
Total		99.87 %	100.00 %	100.00 %	97.33 %

Table S1.3: Cell energy densities (Wh/kg) (Peters and Weil 2018; Peters et al. 2016)

NCA (Bauer)	NMC (Ellingsen)	LFP (Zackrisson)	SIB (Peters)
173.42	169.86	108.08	162.48

APÊNDICE K: Processamento pirometalúrgico de baterias de lítio: dados de entrada e saída por tonelada de bateria (Fisher et al., 2006)

Item	Quantidade	Unidade	Premissas e observações
ENTRADA			
Resíduos de baterias	1000	kg	Classificado e desmontado ao nível da célula
NaOH	210	kg	
Energia Elétrica (rede)	800	kWh	Energia elétrica do SIN
Água	1000	l	
SAÍDA			
Produtos			
Cobalto em pó (60% CoO ₂ e 40% C)	192	kg	Considerada somente a parcela de cobalto
Aço para a indústria siderúrgica	270	kg	
Metais não ferrosos	240	kg	Alumínio e cobre
Pó de MnO ₂ para reciclar	10	kg	
Emissões gasosas			
SO ₂	48	g	
Material particulado	208	g	
Resíduos líquidos			
SO ₂	40	kg	
Cl	40	kg	
Água para esgoto	1000	l	
Resíduos sólidos			
Plásticos para incinerador	200	kg	Plásticos para incineração

APÊNDICE L: Processamento hidrometalúrgico de baterias de lítio: dados de entrada e saída por tonelada de bateria (Fisher et al., 2006)

Item	Quantidade	Unidade	Premissas e observações
ENTRADA			
Resíduos de baterias	1000	kg	
Reagentes	25	kg	Produtos químicos inorgânicos genéricos.
Energia Elétrica (rede)	140	kWh	Energia elétrica do SIN
Água	720	l	
H ₂ SO ₄	126	l	
Ca(OH) ₂	116	kg	
SAÍDA			
Produtos			
Sal de cobalto (CoCO ₃)	340	kg	180 kg de cobalto
Sal de lítio (Li ₂ CO ₃)	198	kg	30 kg de lítio
Aço e ferro para a indústria siderúrgica	165	kg	
Metais não ferrosos	150	kg	Reciclagem do alumínio
Emissões gasosas			
SO ₂	4,5	g	
Compostos Orgânicos Voláteis	2,5	g	
Resíduos líquidos			
Suspensão sólida	12	g	
Oxigênio químico	30	g	
Hidrocarboneto total	0,01	g	
Cu+Co+Ni	0,05	g	
Fluoreto	0,03	g	
Água para esgoto	337	kg	
Resíduos sólidos			
Papel e plástico para refino	130	kg	
Resíduos para aterro	202	kg	
Gesso (CaSO ₄) para aterro	339	kg	