



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



JOÃO MARCELO FERNANDES GUALBERTO DE GALIZA

Rumo a um Futuro Sustentável: análise das emissões e custos
associados à operação do Renault Kwid E-Tech e Kwid Intense
flex

JOÃO PESSOA

Abril, 2024

JOÃO MARCELO FERNANDES GUALBERTO DE GALIZA

Rumo a um Futuro Sustentável: análise das emissões e custos associados à operação do Renault Kwid E-Tech e Kwid Intense flex

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof.^a. Dra. Monica Carvalho

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

JOÃO PESSOA

Abril, 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G161r Galiza, João Marcelo Fernandes Gualberto de.
Rumo a um Futuro Sustentável: análise das emissões e custos associados à operação do Renault Kwid E-Tech e Kwid Intense flex / João Marcelo Fernandes Gualberto de Galiza. - João Pessoa, 2024.
80 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Poluição Veicular. 2. Avaliação do Ciclo de Vida.
3. Pegada de Carbono. 4. Valor Presente Líquido. 5.
Payback. I. Carvalho, Monica. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

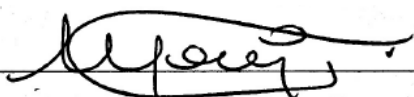
CDU 621(043.2)

JOÃO MARCELO FERNANDES GUALBERTO DE GALIZA

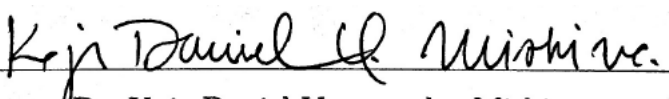
**RUMO A UM FUTURO SUSTENTÁVEL: ANÁLISE DAS
EMISSIONES E CUSTOS ASSOCIADOS À OPERAÇÃO DO
RENAULT KWID E-TECH E KWID INTENSE FLEX**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
banca examinadora do Departamento de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como
parte das exigências à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

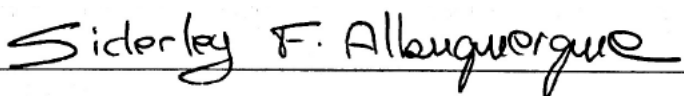
Aprovada em João Pessoa, 30 de abril de 2024.



Dra. Monica Carvalho
Universidade Federal da Paraíba
Professor orientador



Dr. Koji Daniel Vasconcelos Mishina
Universidade Federal da Paraíba
Examinador



Dr. Siderfey Fernandes Albuquerque
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

Dedico a todos os que ousaram sonhar e se aventurar nesse mundo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a minha família. A Deus por todas as graças a mim concedidas. À minha super-mãe Elizabeth Fernandes e a meu pai José Tadeu Galiza Gualberto, por terem sempre me dado condições de estudo e de vida. À minha irmã, Marília Fernandes, por cuidar de mim desde os meus 14 anos, por sempre me ajudar, apoiar nas minhas escolhas e dividir sorrisos e memes.

Aos meus avós maternos, Neumann e Antônio, bem como os paternos, Maria Raquel (Terezinha) e Cosme (*in memoriam*), pela generosidade, afeto e valiosos ensinamentos.

Aos meus tios maternos e paternos por sempre me apoiarem. Especialmente a Tia Chica, Tio Luizinho e Tia Claudia, por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos. Aos meus primos, especialmente a Iza, João Gentil, Marianna e Lyvia, por sempre me apoiarem desde sempre em tudo que almejo.

À minha orientadora, Profa. Dra. Monica Carvalho, por todo o conhecimento que compartilhou comigo. Sua paixão pela docência e pesquisa é inspiradora, e sua calma, especialmente quando eu estava nervoso, foi reconfortante. Muito obrigado por tudo!

Aos meus amigos e sobreviventes da graduação na UFPB, especialmente a Jaqueline Lima, Juliana Pádua, Letícia Estevan, Michelli Medeiros, Sóstenys Henrique, Suely Correia, Tamires Maria, Terence Kutzner, Victor Borges e tantos outros que tive o prazer de conhecer.

Aos meus amigos do ensino médio no Reino Infantil, em especial à Maria Clara Ribeiro e Natália Pupo e aos que me receberam em João Pessoa de braços e portas abertas.

À professora Dra. Ana Hermínia Andrade e Silva (DE - UFPB) por sempre me dar suporte com as minhas coisas e sempre buscando me dar oportunidades. Foi minha mãe durante meu período na UFPB. Aos professores, Dr. Fagner Dias Araruna (DM - UFPB) e Dr. Fábio Leal de Melo Dahia (DF-UFPB). Ao professor Dr. Raphael Abrahão (DERR - UFPB), aos professores do DEM - UFPB, em especial: Halane Maria Braga Fernandes Brito, Koje Daniel Mishina, João Bosco Aquino e José Carlos de Lima Junior.

To my friends/family from my exchange period in Portugal, specially for: Adrianna Zakrzewicz (*ploteczki*), Adam Majbour (*mój byk*), Benedetta Zullo (*dream team*), Borna Rosić (*moje leto*), Gabriel Olejniczak (*mountain guy*), Júlia Aguiar (*presente da UTFPR*), Laissa Saldanha (*instrutora de yoga*), Leonie Stieber (*flowers*), Magdalena Borecka (*plotkara*), Marcin Filapek (*connor price guy*), Mareike Aust (*dream team*), Nika Rijavec (*flowers*), Oliwia Pisarska (*plotkara - brazylia / polska*), Paula Correcher (*bombonet*), Szymon Pawluczuk (*najlepszy sędzia*), Zofia Jankowiak (*ploteczki*) and to everyone else.

*"In un mondo di John e di
Paul, io sono Ringo Starr"*
- Pinguini Tattici Nucleari

RESUMO

A preocupação com a poluição veicular é crescente em todo o mundo, refletida tanto em políticas públicas mundiais quanto em ações de grandes montadoras. Este trabalho realiza uma análise ambiental e financeira de dois automóveis, um Renault Kwid E-Tech e um Kwid Intense *flex*, durante o período de uso do veículo. Foram coletados dados referentes à operação para geração de inventários, processos e custos para ambos os veículos durante um período de cinco anos, 20.000 quilômetros anualmente. No caso do Kwid Intense *flex*, foram considerados dois regimes de combustível distintos: gasolina e etanol. Os três cenários foram postos em cinco grupos para fins comparativos entre as regiões do Brasil, sendo quatro grupos formados pelos subsistemas elétricos brasileiro e o quinto sendo uma visão geral do Brasil. A avaliação ambiental baseou-se na metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), utilizando o software *SimaPro* v.9.5.0.1 para quantificar as pegadas de carbono conforme o IPCC 2021 GWP 100a. Para a avaliação financeira foram utilizadas técnicas como o método de Custeio do Ciclo de Vida (CCV) para utilizar o método do Valor Presente Líquido (VPL) e Tempo de Retorno de Investimento (Payback). As emissões de carbono para os mixes energéticos de cada grupo foram assimétricas, onde o nordeste possui uma pegada de 0,066 kg CO₂-eq/kWh e o sul com 0,292 kg CO₂-eq/kWh, possuindo a maior pegada de carbono de energia elétrica. Na maioria dos cenários, o veículo *flex* à gasolina mostrou-se economicamente mais viável, embora mais poluente do que o etanol e o E-Tech em grupos como o nordeste e sudeste. O veículo a etanol revelou-se viável tanto financeira quanto economicamente, mostrando um potencial promissor para a redução de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Poluição veicular; Avaliação do Ciclo de Vida; Pegada de carbono; Valor Presente Líquido; Payback.

ABSTRACT

The increasing concern regarding vehicular pollution worldwide is reflected in both global public policies and actions taken by major automotive manufacturers. This study conducts an environmental and financial analysis of two automobiles, a Renault Kwid E-Tech and a Kwid Intense *flex*, throughout their period of use. Data regarding operational processes and costs for both vehicles were collected over a five-year period, with an annual mileage of 20.000 kilometers. In the case of the Kwid Intense *flex*, two distinct fuel regimes were considered: gasoline and ethanol. These scenarios were categorized into five groups for comparative purposes across regions in Brazil, with four groups representing Brazilian electric subsystems and the fifth providing a general overview. Environmental assessment relied on the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, utilizing the *SimaPro* v.9.5.0.1 software to quantify carbon footprints according to the IPCC 2021 GWP 100a. Financial evaluation employed techniques such as the Life Cycle Costing (LCC) method to apply the Net Present Value (NPV) and Payback Period. Carbon emissions for each energy mix varied asymmetrically among groups, with the northeast exhibiting a footprint of 0,066 kg CO₂-eq/kWh and the south with 0,292 kg CO₂-eq/kWh, representing the highest carbon footprint from electric energy. In most scenarios, the gasoline *flex* vehicle proved economically more viable, although more polluting, than ethanol and E-Tech counterparts in regions like the northeast and southeast. The ethanol-powered vehicle demonstrated both financial and economic viability, showing promising potential for greenhouse gas reduction.

Keywords: Vehicular pollution; Life Cycle Assessment; Carbon footprint; Net Present Value; Payback.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Agenda 2030: os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.	18
Figura 2 – Consumo de CO ₂ vs PIB per capita dos países que compõem o G19 - 2020.	20
Figura 3 – Geração de energia em 2022.	21
Figura 4 – Primeiro veículo elétrico - Flocken Elektrowagen.	22
Figura 5 – Participação de veículos elétricos nos registros de carros de passeios novos.	23
Figura 6 – Tipos de baterias para veículos elétricos.	24
Figura 7 – Impactos econômicos e ambientais da produção de carros elétricos na Indonésia.	26
Figura 8 – Evolução da produção de biocombustíveis no mundo.	27
Figura 9 – Início do ProÁlcool.	29
Figura 10 – Emissões de gases de efeito estufa por combustível.	30
Figura 11 – Subsistemas brasileiros de energia	31
Figura 12 – Rede Interligada de Energia	32
Figura 13 – Etapas da ACV.	34
Figura 14 – Exemplo de inventário de ciclo de vida de um processo da linha de lavagem de garrafas PET.	36
Figura 15 – Categorias de impactos de pontos médios e danos para o método Im- pact2002+.	37
Figura 16 – Avaliação <i>cradle-to-grave</i> : fases de uma avaliação do ciclo de vida de veículos.	39
Figura 17 – Pegada de carbono em cada etapa da fabricação de um VE e VCI. . . .	40
Figura 18 – Relação VPL, TMA e TIR.	42
Figura 19 – Variáveis envolvidas no custo de operação e manutenção de um veículo pelo TCO.	44
Figura 20 – Elementos referentes ao CCV.	45
Figura 21 – Renault Kwid 2024: Intense flex (à esquerda) e E-Tech (à direita). . . .	46
Figura 22 – Comparação da eficiência da bateria de um Renault Kangoo e da média dos outros carros elétricos computados pelo Geotab.	50
Figura 23 – Emissões associadas ao carregamento do VE ao longo de cinco anos. - Nordeste, Norte e Sudeste.	59
Figura 24 – Emissões associadas ao carregamento do VE ao longo de cinco anos. - Sul e Brasil.	60
Figura 25 – Pegada de carbono associada ao uso e manutenção dos veículos ao longo de cinco anos.	61

Figura 26 – Payback: Kwid E-Tech versus Intense <i>flex</i>	69
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ficha técnica básica dos modelos.	47
Tabela 2 – Valor das revisões <i>preço fechado</i> Renault Kwid Intense <i>flex</i>	48
Tabela 3 – Valor das revisões <i>preço fechado</i> Renault Kwid E-Tech	48
Tabela 4 – Inventário de custos associados com a troca de itens na revisão e extras.	49
Tabela 5 – Valor médio do litro de etanol e gasolina em cada grupo de 24/12 a 30/12/2023.	50
Tabela 6 – Eficiência da bateria do Kwid e-Tech no respectivo ano.	51
Tabela 7 – Valor médio da tarifa de energia elétrica em cada grupo.	51
Tabela 8 – Custos médios de IPVA para cada grupo analisado.	52
Tabela 9 – Composição do mix de energia elétrica para o ano de 2023 - Valores absolutos.	53
Tabela 10 – Composição do mix de energia elétrica para o ano de 2023 - Participação de cada combustível.	53
Tabela 11 – Inventário de recursos utilizados durante a vida útil dos veículos.	54
Tabela 12 – Resultados da Análise de Inventário - Consumo de Materiais.	56
Tabela 13 – Pegada de carbono das fontes de energia.	57
Tabela 14 – Resultados da Análise de Inventário - Consumo de Energia.	58
Tabela 15 – Emissões para cada cenário ao longo de cinco anos.	61
Tabela 16 – Custo Base Geral do Kwid E-Tech sem custos de energia elétrica e incidência de IPVA.	62
Tabela 17 – Custo Base Geral do Kwid Intense <i>flex</i> sem custos de combustíveis e incidência de IPVA.	63
Tabela 18 – Custos com combustíveis e IPVA para os cenários em cada grupo.	64
Tabela 19 – Custo total e VPL do Kwid E-tech ao longo dos cinco anos.	65
Tabela 20 – Custo total e VPL do Kwid Intense <i>flex</i> à gasolina ao longo dos cinco anos.	65
Tabela 21 – Custo total e VPL do Kwid Intense <i>flex</i> a etanol ao longo dos cinco anos.	66
Tabela 22 – Economia Média Anual e Payback: Kwid E-Tech versus Intense <i>flex</i>	67
Tabela 23 – Economia Média por quilômetro e Payback: Kwid E-Tech versus Intense <i>flex</i>	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CCV	Custo do Ciclo de Vida
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2eq}	Dióxido de Carbono Equivalente
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPSA	Índice de Preço de Seguro Automotivo
ISO	International Organization for Standardization
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
ONS	Operador Nacional do Sistema
ProÁlcool	Programa Nacional do Álcool
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIN	Sistema Interligado Nacional
TCO	Total Custo de Propriedade
TIR	Taxa Interna de Retorno
UE	União Europeia

VCI	Veículo a Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Objetivo Geral	16
1.2	Objetivos Específicos	16
1.3	Estrutura do Trabalho	17
2	Fundamentação teórica	18
2.1	Mobilidade Sustentável	18
2.1.1	Eletrificação Veicular	21
2.1.2	Combustíveis e Biocombustíveis	26
2.2	Sistema Interligado Nacional	30
2.3	Avaliação de Ciclo de Vida	33
2.3.1	ACV aplicada a veículos elétricos	38
2.4	Análise de Investimentos	41
3	Materiais e Métodos	46
3.1	Escolha do modelo	46
3.1.1	Manutenção	47
3.1.2	Operacional	49
3.1.3	Seguro Automotivo, Depreciação e Desvalorização do Automóvel	51
3.1.4	Imposto sobre a Propriedade dos Veículos Automotivos	52
3.2	Composição de energia elétrica	52
3.3	Avaliação ambiental	53
3.4	Avaliação financeira	55
4	Resultados e Discussões	56
4.1	Avaliação de Ciclo de Vida	56
4.2	Avaliação Financeira	62
5	Conclusão	70
	Referências	72

1 INTRODUÇÃO

Globalmente, o setor de transportes é um emissor significativo de gases de efeito estufa (GEEs), representando aproximadamente 16% das emissões totais (RITCHIE, 2020). Essa porcentagem fica atrás apenas do setor de produção de eletricidade e aquecimento, que contribui com 31%. Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, em 2022 as emissões do setor de transporte no Brasil atingiram aproximadamente 216,9 MtCO₂, representando 9,43% das emissões totais de gases de efeito estufa no Brasil, que foram de 2300 MtCO₂ (SEEG, 2023).

O transporte rodoviário desempenha um papel central nas emissões antropogênicas globais de dióxido de carbono (CO₂), com uma notável e crescente contribuição (SEEG, 2023). Sua dependência quase exclusiva de combustíveis derivados do petróleo não apenas o expõe a flutuações nos preços do petróleo, como também há interrupções no fornecimento de bens e prestações de serviços. Além disso, o uso de combustíveis derivados de petróleo em motores de combustão interna gera emissões de poluentes pelo escapamento, como partículas em suspensão, CO₂, óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros, que são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente (OFFER et al., 2010).

A eletrificação veicular trouxe uma mudança no nosso sistema atual, sendo uma opção mais alinhada aos objetivos da transição energética do que os carros a combustíveis fósseis (ELZINGA et al., 2014). Isso está em sintonia com as políticas públicas para energia mais limpa, mas requer uma infraestrutura elétrica mais forte e flexível, estimulando assim a inovação em armazenamento de energia, distribuição e tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

A crescente preocupação mundial com a poluição veicular é evidente não apenas nos países desenvolvidos, mas também nas ações de grandes

montadoras (PLUMER; TABUCHI, 2021). Prefeitos de cidades como Paris, Madri, Atenas e Cidade do México assumiram compromissos conjuntos para gradualmente eliminar todos os carros e caminhões a diesel em suas localidades até 2025, visando aprimorar a qualidade do ar (PRINS, 2016). Na vanguarda da adoção de veículos híbridos e elétricos, países como Noruega e Suécia se destacam globalmente. Em 2022, aproximadamente 80% da frota de novos carros registrados na Noruega era composta por veículos elétricos (VEs) ou híbridos (NEOCHARGE, 2022). Além disso, a Noruega planeja proibir a venda de todos os carros movidos a combustíveis fósseis até 2025 (VIA 3, 2016). Em Estocolmo, a circulação de carros movidos a gasolina ou diesel será proibida no centro da cidade a partir de 2025, como parte dos esforços para melhorar a qualidade do ar na região (ESTADÃO, 2023).

Uma das metodologias mais consolidadas para a realização de análises ambientais é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que consegue estimar os potenciais impactos ambientais associados a um produto, processo ou atividade (GUINÉE et al., 2011). A ACV é regulamentada pelas normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) e tem sido amplamente utilizada para comparar diferentes produtos, processos ou atividades em termos de seus impactos ambientais. No contexto de transição energética, a ACV pode ajudar no processo de decisão, indicando as opções com menos impactos ambientais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar os custos financeiros e emissões de GEEs associadas à operação de um Renault Kwid Intense *flex* 1.0 (gasolina e etanol) e ao mesmo veículo na versão elétrica (E-Tech).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Estabelecer o inventário de atividades, processos e custos relacionados

- à aquisição e operação do Kwid Intense *flex*, considerando as variações existentes no território nacional, por meio dos subsistemas elétricos brasileiros;
2. Estabelecer os mesmo pontos do item 1 para o Kwid E-Tech;
 3. Quantificar as emissões de GEEs para os inventários dos itens 1 e 2 por meio da metodologia da ACV;
 4. Quantificar os custos associados aos inventários dos itens 1 e 2;
 5. Analisar os custos financeiros e ambientais para os veículos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso conta, além desse capítulo introdutório, com outros quatro capítulos:

- No capítulo 2 - Fundamentação Teórica, são apresentados os conceitos necessários para o entendimento do conteúdo deste trabalho;
- No capítulo 3 - Materiais e Métodos, é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho;
- No capítulo 4 - Resultados, os resultados obtidos são apresentados e discutidos;
- No capítulo 5 - Conclusão, são descritas as conclusões obtidas a partir de todo o desenvolvimento deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOBILIDADE SUSTENTÁVEL

Em 1987, o conceito de “Desenvolvimento Sustentável” foi introduzido por Gro Harlem Brundtland, ex-primeira-ministra da Noruega, em um relatório apresentado à Organização das Nações Unidas (ONU). Nesse documento, ela define o desenvolvimento sustentável como um tipo de crescimento que atende às demandas do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades (BRUNDTLAND et al., 1987). Essa definição estabeleceu as bases para a compreensão e ações em prol da sustentabilidade em escala global.

Ao longo dos anos e de diversas ressignificações do conceito de desenvolvimento sustentável (ESTENDER; PITTA, 2008), entende-se atualmente que o desenvolvimento sustentável é constituído por três pilares de mesma importância: social, econômico e ambiental. Com o intuito de a humanidade poder coletivamente dissociar o crescimento econômico da pobreza, da desigualdade e das mudanças climáticas, a ONU desenvolveu os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), contemplando temas ambientais, sociais, econômicos e institucionais (ONU, 2015). A Figura 1 apresenta todos os 17 ODS.

Figura 1 – Agenda 2030: os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



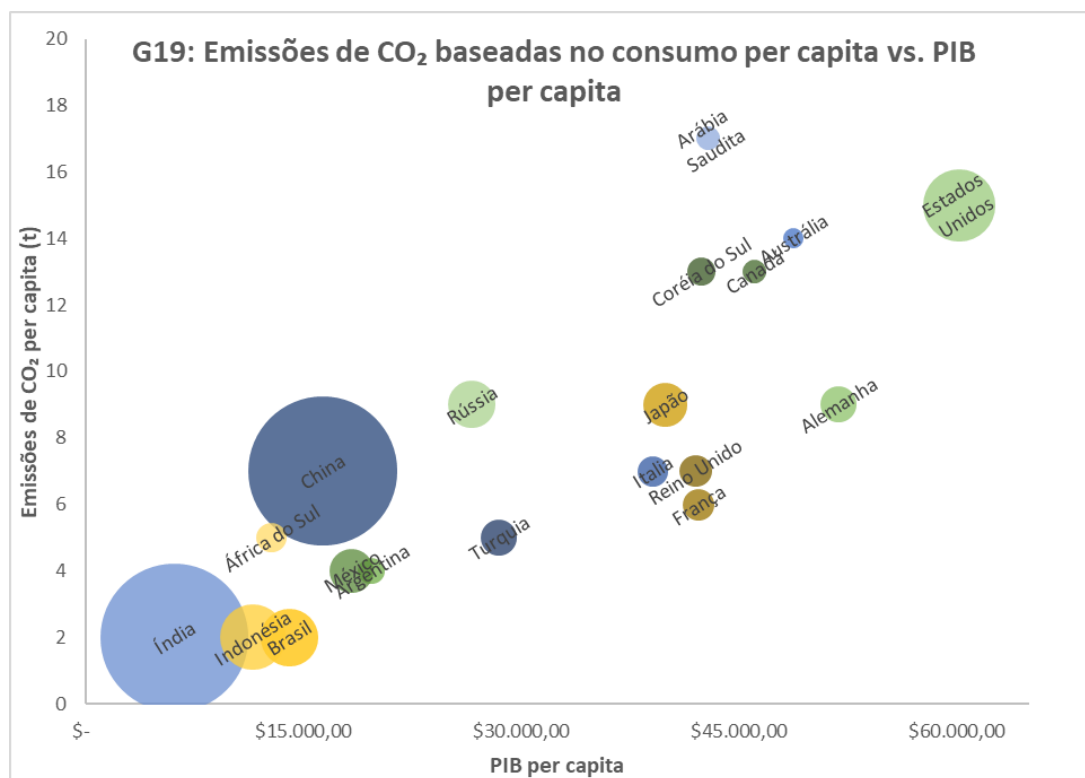
Fonte: (ONU, 2015).

Embora nenhum ODS contemple explicitamente o tema “transporte”, há necessidade de investimentos em transporte sustentável para promover a Agenda 2030. Segundo levantamento elaborado por (MAGALHÃES; SANTOS, 2021), os ODSs 3, 7, 9, 11, 12 e 13 são os mais vinculados ao setor de transportes.

A mobilidade sustentável aborda tanto o uso e ocupação do solo quanto a gestão do transporte, para garantir um acesso eficiente aos bens e serviços para todos os cidadãos, preservando ou até mesmo aprimorando a qualidade de vida da população (CAMPOS, 2006). Não envolve somente a locomoção nas cidades de um modo que seja eficiente, mas também que não comprometa a capacidade de atender às necessidades das futuras gerações.

A redução de GEEs é um dos pilares da mobilidade urbana sustentável (CAMPOS, 2006). A adoção de meios de transporte mais limpos, como o incentivo à mobilidade ativa (deslocamento de forma não motorizada), VEs e biocombustíveis, é uma saída para a redução de GEEs na atmosfera. Vários países já adotam medidas para facilitar a inserção de carros elétricos para a população (HALLACK, 2014). Segundo a comissão europeia, um dos principais motivos para essa situação é que boa parte da energia do transporte na Europa é fornecida por combustíveis à base de petróleo (EEA, 2023). Não só medidas focadas em VEs como também em biodiesel, etanol, hidrogênio, metanol, gás natural e outros, além de esforços para redirecionar os motoristas dos automóveis pessoais para o transporte público e transferir o transporte de carga das estradas para as ferrovias devem ser realizados (GÜNGÖR et al., 2023).

Em contrapartida, o crescimento econômico pleno de um país demanda um maior consumo de CO₂ (CEDERBORG; SNÖBOHM, 2016), o que pode ser um percalço no desenvolvimento de políticas mais sustentáveis. Entretanto, investimentos e esforços para conter o avanço da emissão de GEEs em setores como indústria e energia auxiliam no desenvolvimento econômico e na redução das emissões de CO₂, conforme a Figura 2 (LAMB et al., 2022).

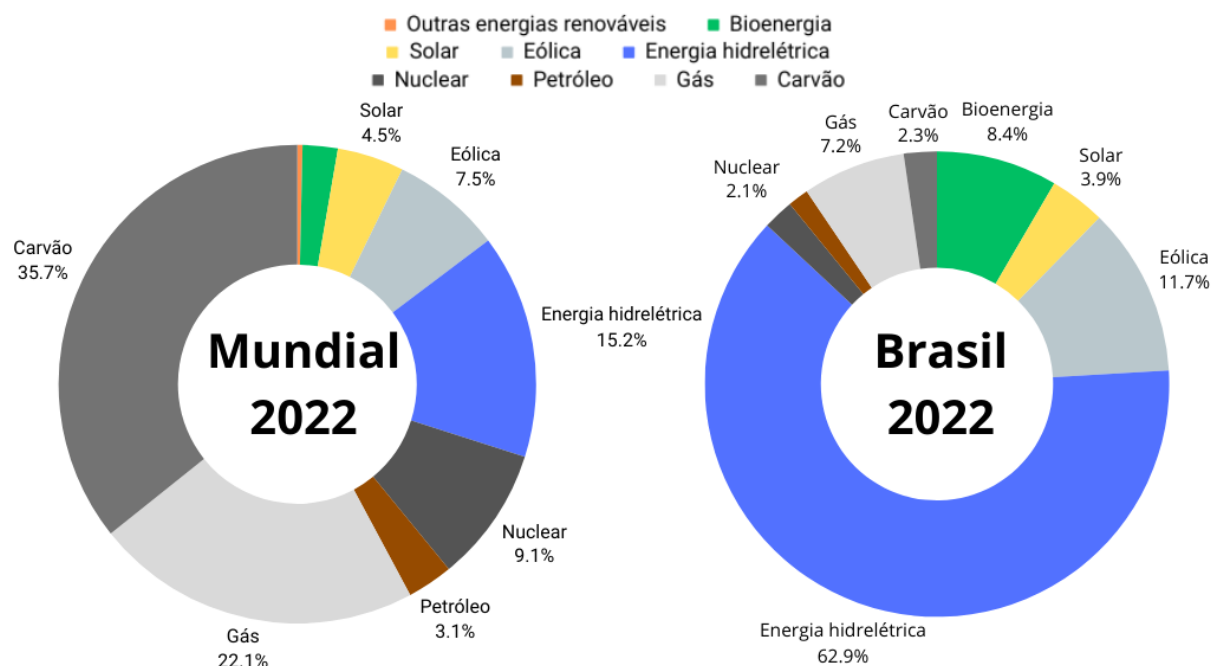
Figura 2 – Consumo de CO₂ vs PIB per capita dos países que compõem o G19 - 2020.

Fonte: Adaptado de (ENERGY INSTITUTE, 2023).

No contexto brasileiro, tem-se uma matriz elétrica que se destaca por sua dependência em fontes de energia renovável, diferenciando-se da composição global da matriz elétrica (EPE, 2023). Essa característica é vantajosa para o Brasil, não apenas devido aos custos operacionais mais baixos associados, mas também porque as usinas que utilizam fontes renováveis tendem a emitir significativamente menos GEEs.

Essa abordagem tem implicações positivas tanto em termos econômicos quanto ambientais, contribuindo para a sustentabilidade e a redução das emissões de poluentes no setor energético do país. A Figura 3 evidencia que, em 2022, aproximadamente 87% da energia elétrica gerada no Brasil foi proveniente de fontes renováveis, em contraste com uma proporção de aproximadamente 30% globalmente (ENERGY INSTITUTE, 2023).

Figura 3 – Geração de energia em 2022.



Fonte: Adaptado de (ENERGY INSTITUTE, 2023).

Uma das principais estratégias para a descarbonização não é somente através da eletrificação dos veículos, mas também com o uso de etanol e biocombustíveis (GLENSOR; B., 2019). Para as empresas envolvidas na descarbonização, a eletrificação terá um papel importante - porém a maneira mais rápida e com menos custos financeiros é utilizar etanol e biomassa (UNICA, 2023). Há evidências de que o uso de etanol pode ser mais eficiente na redução de emissão de CO₂ que os carros 100% elétricos (BENVENUTTI et al., 2023).

Destacamo-nos por manter uma das mais favoráveis relações entre a qualidade da gasolina e as emissões de gases, sendo considerada uma das mais ambientalmente limpas do mundo (KOVARSKY, 2020) e por boa parte da frota de veículos brasileiros utilizar etanol, o que diminui significativamente a emissão de GEEs.

2.1.1 ELETRIFICAÇÃO VEICULAR

A eletrificação veicular refere-se à transição do uso de veículos movidos tradicionalmente por motores a combustão interna para aqueles que utilizam

sistemas de propulsão elétricos. Esse conceito está alinhado com os esforços globais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e a dependência de combustíveis fósseis, promovendo a adoção de tecnologias mais limpas e sustentáveis no setor de transporte (BOULANGER et al., 2011).

O desenvolvimento dos carros elétricos remonta a Segunda Revolução Industrial, onde a substituição do trabalho manual pelo uso de máquinas automáticas estava no cerne das inovações (KRÜGER, 2001). Em 1888, surgiu o primeiro automóvel elétrico, o *Flocken Elektrowagen*, criado pelo inventor alemão Andreas Flocken. A Figura 4 ilustra o projeto inicial de uma charrete de quatro rodas, equipada com um motor de 0,7 kW e uma bateria de 100 kg, capaz de atingir uma velocidade máxima de 15 km/h. A partir desse marco inicial, diversos tipos de veículos movidos a eletricidade foram desenvolvidos e aprimorados.

Figura 4 – Primeiro veículo elétrico - Flocken Elektrowagen.



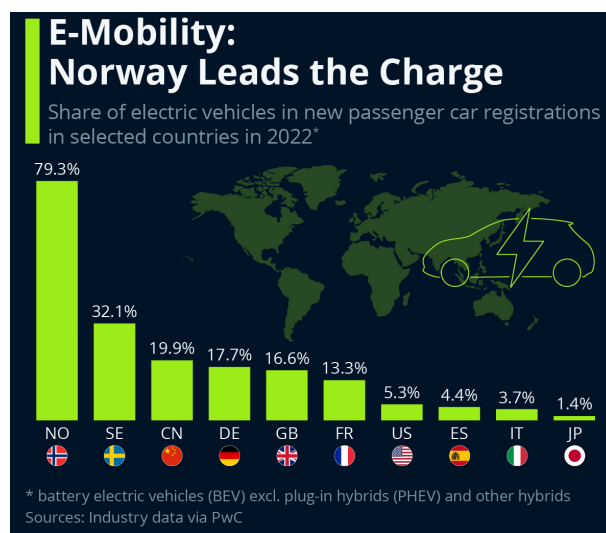
Fonte: (DEUTSCHES MUSEUM, 1903).

Entre as duas Grandes Guerras Mundiais, os VEs enfrentaram um período desafiador. Apesar de seu potencial inovador, o desenvolvimento desses veículos não era tão atraente devido à necessidade de recursos financeiros consideráveis para sua produção e à sua eficiência relativamente baixa em comparação com as fontes de energia convencionais, como o

petróleo e o carvão (SOUSA, 2015). Somente na década de 70, com a Crise do Petróleo, os VEs voltam a ganhar destaque com uma desestruturação na economia mundial. A conjuntura econômica e o desenvolvimento da conscientização ambiental implicaram em novas ideias, dentre elas estão a utilização de energias limpas e dos VEs, em especial dos utilizados para o transporte público (GUENTHER; PADILHA, 2016).

A partir dos anos 90 o estímulo ao uso de carros elétricos e híbridos foi só aumentando. Novas tecnologias começaram a surgir e os países começaram a incentivar o uso por via de leis e de regalias (CASTRO; FERREIRA, 2010). Atualmente, a Noruega é o país que possui a maior frota de VEs per capita do mundo, introduziu vários benefícios para a popularização desses veículos: isenção de impostos, estacionamento públicos grátis, vagas reservadas, isenção de pedágios em todas as rodovias e faixa exclusiva nas principais cidades (CORREIA; SIMIONI, 2021). A Figura 5 ilustra a Noruega como o país com a maior proporção de VEs ou híbridos registrados no ano de 2022.

Figura 5 – Participação de veículos elétricos nos registros de carros de passeios novos.



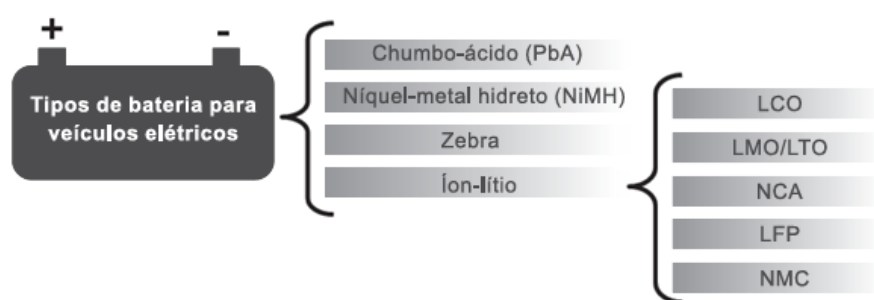
Fonte: (STATISTA, 2023).

O princípio de funcionamento do motor elétrico é converter energia elétrica em energia mecânica usada para tracionar e gerar movimento. Diferentemente dos veículos convencionais, os veículos puramente elétricos não tem um motor a combustão, sendo impulsionados exclusivamente por

energia elétrica. Essa energia pode ser proveniente de diversas fontes, como baterias recarregáveis, células de combustível, módulos solares ou até mesmo através da conexão direta à rede elétrica (CASTRO; FERREIRA, 2010). Entre esses, a maioria dos lançamentos das grandes montadoras tem se concentrado em veículos movidos a bateria.

A bateria é um componente central em VEs, responsável por armazenar energia e alimentar o motor elétrico para subsequente geração de movimento. Embora exista em veículos a combustão interna (VCI), uma bateria destinada à tração do veículo possui características diferentes das baterias tradicionais, além de sua função principal. Há quatro tipos que disputam o estabelecimento de um padrão para a indústria automobilística: as de chumbo-ácido (PbA), as de níquel-hidreto metálico (NiMH), as de sódio níquel (zebra) e as de íon-lítio, ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Tipos de baterias para veículos elétricos.



Fonte: (CASTRO; FERREIRA, 2010).

As baterias automotivas mais frequentes são as de chumbo-ácido, utilizadas nos VCIs para o acionamento de partes elétricas, como ignição eletrônica, injeção eletrônica, ar condicionado e outras. Por conter componentes perigosos (chumbo e ácido sulfúrico), há normas ambientais que disciplinam seu recolhimento, descarte e eventual reciclagem. Apresentam curto ciclo de vida, são pesadas e têm alto custo, mas são uma tecnologia madura e confiável, e o chumbo possui um dos processos de reciclagem mais eficientes entre os materiais.

As de uso mais promissor são atualmente as de íon-lítio. Apresentam

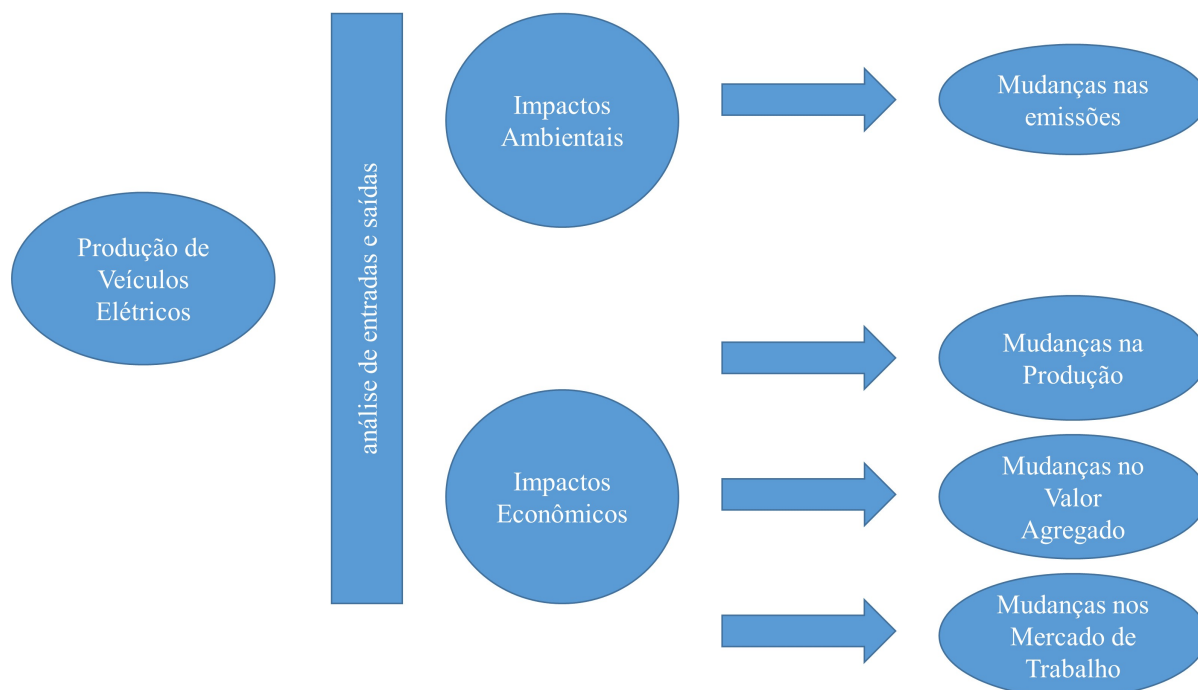
maior densidade energética, sendo assim pequenas e mais leves, maior eficiência e vida útil, menos riscos ambientais associados e menor custo do metal, comparando-se com outros tipos de baterias. Entretanto, há um alto custo de aquisição e dos materiais, pode ser inflamável dependendo do eletrólito e não aceitam sobrecargas.

Segundo (IMPINNISI, 2010), o custo de uma bateria íon-lítio é de 5 vezes o custo de uma bateria chumbo-ácido e apresenta um maior problema de segurança, pois contém maiores níveis de energia em pequenas quantidades.

Além das baterias, os VEs apresentam vários outros componentes que são distintos dos encontrados nos VCIs. Entre os novos componentes essenciais, incluem-se um motor elétrico, um inversor de potência, uma transmissão de velocidade única e um carregador embarcado, os quais passam a constituir uma parcela significativa dos custos envolvidos na produção de um automóvel elétrico (CASTRO; FERREIRA, 2010). Da mesma forma, elementos associados ao funcionamento do motor a combustão, como o sistema de exaustão e o tanque de combustível, não fazem parte da estrutura de um veículo puramente elétrico.

A Indonésia possui a maior reserva de níquel no mundo, matéria-prima para baterias, o que beneficia uma série de processos na fabricação de automóveis elétricos no país, barateando-os, agregando valor aos produtos da indústria indonésia, empregando mão de obra local e diminuindo a importação de combustíveis do país (PIRMANA et al., 2023). Dessa forma, a fabricação de carros elétricos não afeta apenas a mobilidade e questões ambientais, mas também desenvolve a tecnologia, economia e o mercado de trabalho de um país. Essa relação é ilustrada na Figura 7.

Figura 7 – Impactos econômicos e ambientais da produção de carros elétricos na Indonésia.



Fonte: (PIRMANA et al., 2023).

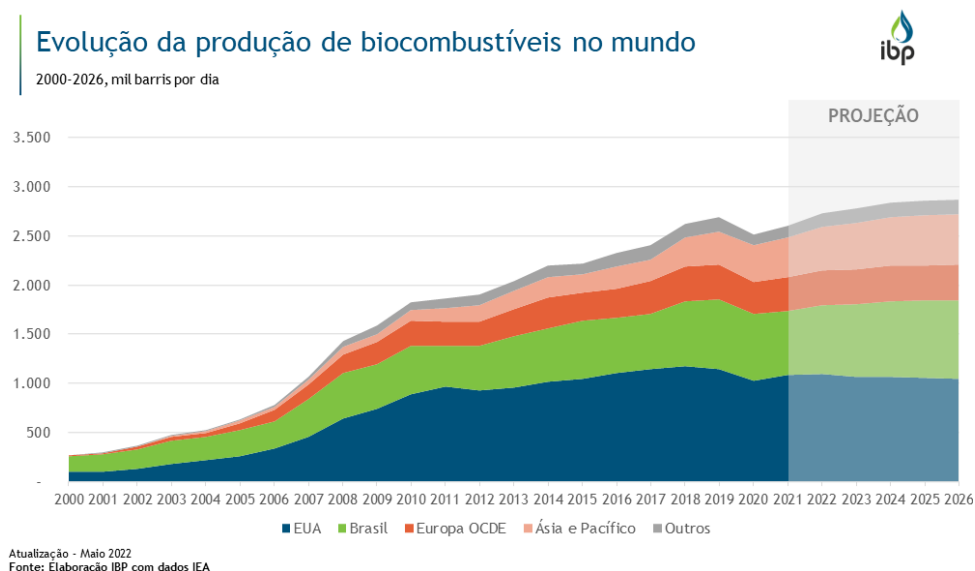
2.1.2 COMBUSTÍVEIS E BIOCOMBUSTÍVEIS

A União Europeia (UE) aprovou a decisão de proibir a comercialização de carros a combustão a partir de 2035 (CNN, 2022). A medida implica que, a partir dessa data, não serão mais disponibilizados no mercado veículos movidos por combustíveis fósseis, como gasolina e diesel. Essa nova regulamentação abre espaço para a adoção de alternativas, incluindo combustíveis sintéticos e biocombustíveis, ambos neutros em termos de emissões de CO₂.

Conforme estabelecido na Lei nº 12.490/2011, biocombustíveis são substâncias derivadas de biomassa renovável, tal como biodiesel, etanol e outras substâncias estabelecidas em regulamento da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que podem ser empregadas diretamente ou mediante alterações em motores a combustão interna ou para outro tipo de geração de energia, podendo substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (BRASIL, 2011). Os biocombustíveis mais conhecidos são etanol, biomassa, biometano e biodiesel, sendo

produzidos a partir de cana-de-açúcar, milho, soja, semente de girassol, madeira, celulose e outras fontes. A Figura 8 apresenta a trajetória da produção de biocombustíveis em diferentes grupos e demonstra um crescimento significativo ao longo do tempo.

Figura 8 – Evolução da produção de biocombustíveis no mundo.



Fonte: (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2022).

Os combustíveis mais consumidos no Brasil são o óleo diesel e a gasolina, no grupo de combustíveis fósseis, e o etanol e o biodiesel, como biocombustíveis (ANP, 2024a). Encontram-se no mercado brasileiro duas variantes de gasolina: A e C. Enquanto a gasolina C é enriquecida com etanol pelos distribuidores antes de chegar aos postos de combustíveis, a gasolina A é comercializada sem adição de etanol e é fornecida exclusivamente pelos produtores (ANP, 2013). Podendo ser ainda comum ou aditivada, onde a aditivada contém detergentes e dispersantes em sua formulação, possuindo maior octanagem.

A gasolina é um combustível líquido derivado do petróleo, produzido por meio de processos de refinamento e craqueamento, e consiste em uma mistura de hidrocarbonetos. Já o óleo diesel é outro combustível líquido derivado do petróleo, composto principalmente por hidrocarbonetos de cadeia mais longa em comparação com a gasolina, e pode conter em menor quantidade nitrogênio, enxofre e oxigênio (PETROBRÁS, 2023).

O etanol é um biocombustível produzido por meio da fermentação de amido e outros açúcares, sendo a cana-de-açúcar uma das principais fontes, sendo obtido também a partir de milho, mandioca, beterraba, batata e outros. O biodiesel também é um biocombustível, sendo derivado de biomassa renovável que passa por reação de transesterificação (converte o óleo ou gordura em ésteres de ácidos graxos) que constitui o biodiesel. Suas principais fontes incluem soja, mamona, canola, palma, girassol, óleos vegetais e resíduos de gorduras animais.

O Brasil foi o primeiro país a usar o etanol/álcool em larga escala como combustível de automóvel. Essa conquista remonta a 1975, quando foi lançado o Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool) (DIAS, 2012). O principal objetivo desse programa foi a produção de etanol anidro para a adição à gasolina, representando inicialmente uma parcela entre 10% e 22% da mistura. Tal medida foi adotada devido a quase completa dependência do país em relação à importação de gasolina, especialmente em um cenário de aumento dos preços no mercado internacional. Atualmente, a proporção de etanol anidro na gasolina brasileira é de 27,5% (E27). Embora seja insuficiente para redução do efeito estufa, essa estratégia tem desempenhado um papel fundamental na redução das emissões poluentes originadas pelo setor de transporte (VIANNA et al., 2009). A Figura 9 apresenta o início do ProÁlcool.

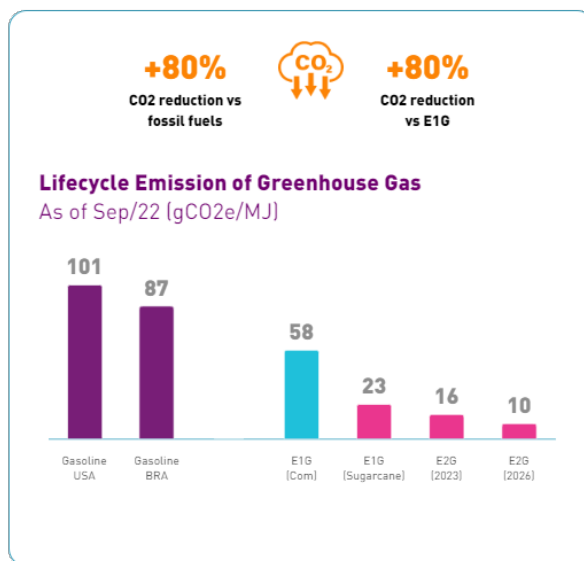
Figura 9 – Início do ProÁlcool.



Fonte: (O GLOBO, 1976).

O avanço das tecnologias na área energética é crescente e a busca por fontes mais limpas se intensifica, nesse contexto o etanol de segunda geração (E2G) está ganhando cada vez mais espaço (RAÍZEN, 2022). o E2G Trata-se de um biocombustível avançado que tem a mesma composição química do etanol comum (E1G), mas que utiliza o bagaço restante da produção do açúcar e etanol comum para a produção de mais etanol, levando a um maior aproveitamento energético da cana-de-açúcar, resultando em uma maior eficiência agrícola. Além disso, o E2G apresenta um índice 30% menor de emissão de gases do efeito estufa comparado ao E1G e de 80% comparado à gasolina, conforme a Figura 10.

Figura 10 – Emissões de gases de efeito estufa por combustível.



Fonte: (RAÍZEN, 2024).

Como estratégia para mitigar a emissão de poluentes provenientes de veículos automotores, foi implementado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) (BRASIL, 1986). Este programa estabelece padrões de emissão a serem seguidos pelos veículos produzidos e comercializados no país, impulsionando o desenvolvimento e a adoção de tecnologias mais limpas e eficientes. A partir de 2023, entrou em vigor a oitava fase do PROCONVE (P8), equiparada ao sistema *Euro 6* utilizado na Europa. Um dos principais pontos de melhoria do P8 em comparação com as edições anteriores é a obrigação do desenvolvimento de motores cada vez mais eficientes e com sistema inteligente para redução das emissões (APTA, 2023).

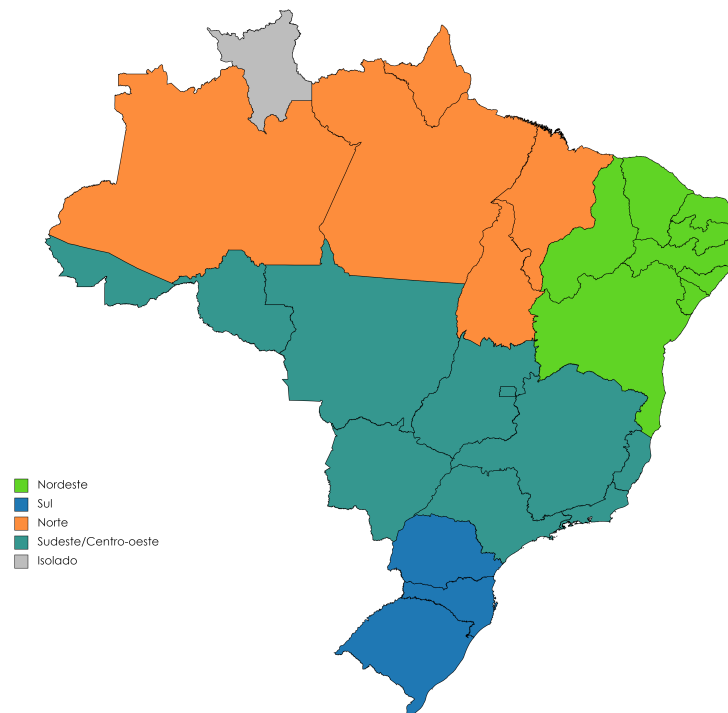
2.2 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Os sistemas de transmissão são os responsáveis pela interligação das regiões de produção de energia elétrica às regiões de consumo. No Brasil, não existe competição entre as empresas que provêm esse tipo de serviço. A partir da reformulação do setor energético na década de 90, este segmento passou a ser controlado por regras que têm por objetivo regulamentar a atividade das empresas detentoras das concessões (NUNES

et al., 2022). O Sistema Interligado Nacional (SIN) representa a espinha dorsal do setor elétrico de um país, desempenhando um papel crucial na garantia do fornecimento confiável e eficiente de energia elétrica.

Trata-se de uma rede abrangendo extensas áreas do território nacional e conectando uma variedade de usinas de geração, desde hidrelétricas até parques eólicos e termelétricas, por intermédio da sua malha de transmissão, fica responsável por redistribuir a energia produzida de forma equilibrada por todo país. Organizado em quatro extensos subsistemas (Nordeste, Norte, Sudeste/Centro-Oeste e Sul), denominados também como submercados ou subsistemas, é administrado sob a coordenação do Operador Nacional do Sistema (ONS). Essa supervisão é efetuada por meio de quatro centros regionais e um centro principal, situado em Brasília. A Figura 11 apresenta os quatro subsistemas.

Figura 11 – Subsistemas brasileiros de energia



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Os subsistemas de energia são divididos em:

- Nordeste: Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio

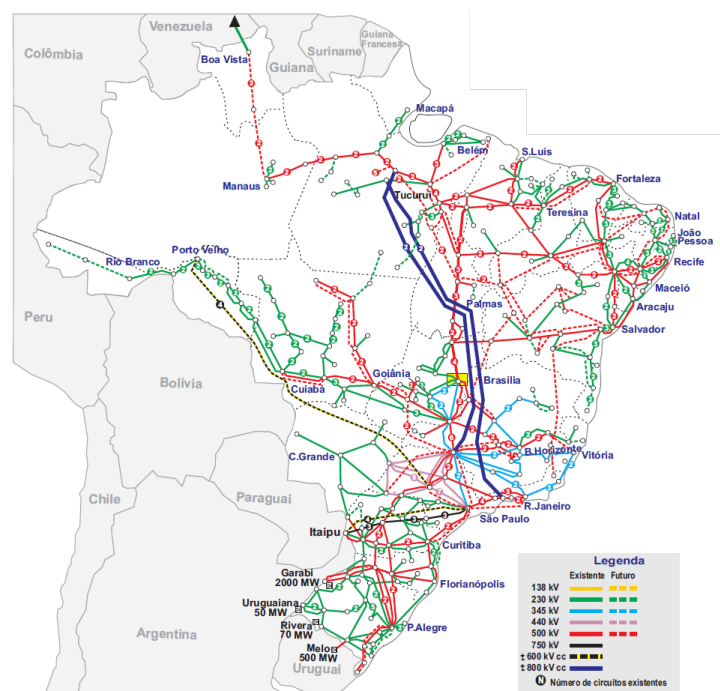
Grande do Norte e Sergipe;

- Norte: Amapá, Amazonas, Maranhão, Pará e Tocantins;
- Sudeste/Centro-Oeste: Acre, Distrito Federal, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Rondônia e São Paulo;
- Sul: Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Apenas o estado de Roraima não está integrado à rede elétrica nacional devido aos inviáveis custos de conexão da região ao sistema.

A trajetória do SIN se entrelaça com a formação e estabelecimento do sistema elétrico brasileiro, em meados da década de 60 (NUNES et al., 2022). Esse marco é caracterizado pela criação da Eletrobras e por estudos que resultaram na implementação de linhas de transmissão inter-regionais e interestaduais, além da construção de expressivas hidrelétricas, delineando assim a estrutura fundamental do SIN. A figura 12 apresenta as linhas de transmissão em território nacional.

Figura 12 – Rede Interligada de Energia



Fonte: (ONS, 2024).

2.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta para a análise da carga ambiental de produtos, processos e serviços em todos os estágios de seu ciclo de vida - desde a extração de recursos, passando pela produção de materiais, peças do produto e o próprio produto, e o uso do produto até o gerenciamento após o descarte (GUINÉE, 2002). Sendo, portanto, uma metodologia que avalia a cadeia produtiva, buscando apresentar e mensurar os impactos ambientais causados durante todo o processo, viabilizando a busca pelas opções mais eficazes para alcançar o desejado desenvolvimento sustentável (MOTTA, 2013).

A ACV tem o potencial de resolver ou, no mínimo, diminuir os desafios ambientais presentes na cadeia produtiva examinada, identificando oportunidades para reduzir ou até mesmo eliminar os impactos ambientais resultantes dessa atividade e dos processos associados. Qualquer sistema que busca melhorar o desempenho ambiental de um processo deve ser avaliado por uma ACV (LALAU et al., 2022).

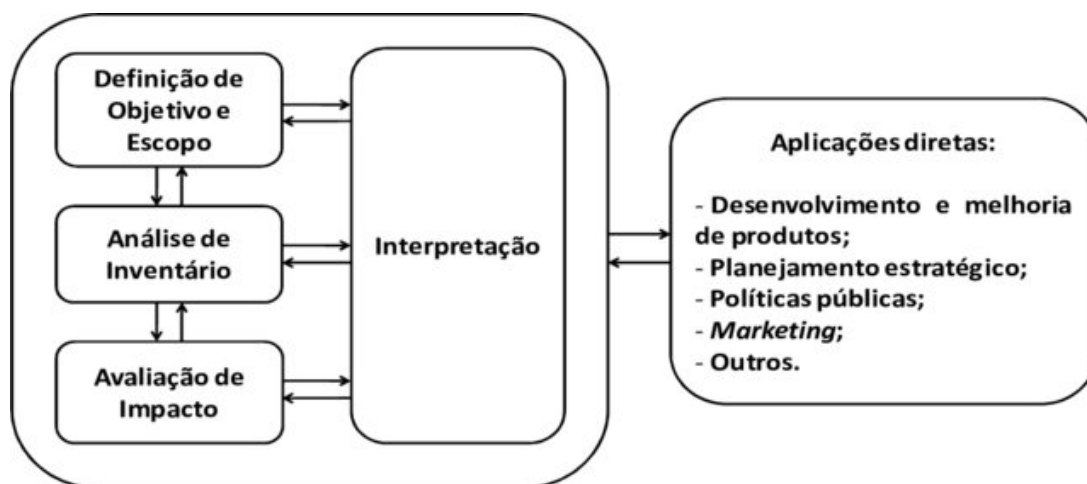
Esse tipo de avaliação surgiu nos anos 1970, quando a empresa Coca-Cola se interessou em comparar os diferentes tipos de embalagens de refrigerante e selecionar quais deles eram os mais adequados sob os pontos de vista ambiental e de desempenho na preservação dos recursos naturais, quantificando a utilização dos recursos naturais e a geração de emissões (KYLILI; SEDUIKYTE; FOKAIDES, 2018). Após, várias empresas passaram a analisar os seus produtos, utilizando de seus números em propagandas para atrair clientes. Diante da diversidade de abordagens na ausência de métodos padronizados, surgiu a demanda por uma norma que orientasse e estabelecesse diretrizes para a ACV.

Mundialmente, a normatização acerca da ACV é conduzida pela International Organization for Standardization (ISO) por meio da série de normas ISO 14040 (ISO 14040, 2006). No Brasil, a ACV é regida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), conforme estabelecido

em 2014 (NBR ABNT 14040, 2014). A ABNT NBR ISO 14040 estabelece os princípios e estrutura para a realização de estudos de ACV, fornecendo diretrizes importantes para o desenvolvimento de práticas de gestão ambiental. As diretrizes delineadas por essa série normativa abrangem a estrutura, princípios, requisitos e orientações essenciais para a condução de estudos de ACV. Este método distingue-se pelo seu elevado nível de interação entre quatro fases fundamentais: a definição de objetivo e escopo, a análise de inventários, a avaliação de impactos e a interpretação. Ao incorporar uma abordagem abrangente e sistemática, a ACV facilita a compreensão dos impactos ambientais associados a produtos e processos, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões sustentáveis em níveis local e global.

A ACV, seguindo as diretrizes estabelecidas pela ISO, possui quatro etapas principais: a definição do objetivo e escopo, a análise de inventário, a avaliação de impacto e a interpretação dos resultados. Sendo as etapas interdependentes, permitindo a flexibilidade de retornar a qualquer uma delas durante o curso do estudo, conforme a Figura 13.

Figura 13 – Etapas da ACV.



Fonte: (ISO 14040, 2006).

O primeiro passo para dar início a ACV é a *definição do objetivo e escopo do estudo*. Essa etapa consiste na especificação clara do objetivo do estudo, delimitando o plano de trabalho, especificar a unidade funcional, as unidades de processo e as fronteiras do sistema (NBR ABNT 14040, 2014).

A NBR 14040 define cada uma desses termos:

- Sistema de estudo: conjunto de unidades de processo, conectadas material e energeticamente, que realiza uma ou mais funções definidas;
- Unidade funcional: promove uma referência a qual se relacionem as entradas e as saídas do sistema, apresentando papel quantificador;
- Unidades de processo: menor porção de um sistema de produto para a qual são coletados dados;
- Fronteiras do sistema: interface definida entre um sistema de produto e seu entorno, compreendendo o meio ambiente e outros sistemas de produto.

O escopo deve delinear todos os meios para que o objetivo seja alcançado. Sendo considerada uma fase introdutória, os resultados dessa etapa formam a entrada para a próxima fase (GUINÉE, 2002).

Após estabelecido o planejamento do estudo, dá-se início à segunda fase: a *análise de inventário*. Essa fase está relacionada com a coleta dos dados, compilação e quantificação das entradas e saídas de um dado sistema em termos de energia, emissões e recursos naturais alocados, além de definir o método de estudo empregado. Todas as entradas e saídas de cada unidade de processo são avaliadas a fim de avaliar quais são as mais significativas para a modelagem dos dados (COSTA; QUINTANA; VILAR, 2007). A Figura 14 apresenta a fase de análise de inventário para o processo de lavagem de garrafas PET.

Figura 14 – Exemplo de inventário de ciclo de vida de um processo da linha de lavagem de garrafas PET.

Fluxos de Entrada	Unidade Funcional (un./t de flake)	un.
Alimentício / Técnico / Verde		
Consumo de Energia		
Recursos Energéticos não-renováveis		
gás natural, consumido na caldeira	72,7 / 69,5 / 71,7	kg
GLP, consumido pelas empilhadeiras	1,13	kg
diesel, consumido pela minicarregadeira	0,89	kg
Energia elétrica	1.265 / 1.257 / 1.231	MJ
Consumo de Materiais		
Recursos Materiais não-renováveis		
garrafas incolores	1.157 / 1.150 / N.A.	kg
garrafas de óleo	229 / 191 / N.A.	kg
garrafas verdes	N.A. / N.A. / 1.209	kg
soda cáustica+meio filtrante+detergente+anti-espumante	31 / 31 / 31	kg
Recursos Materiais renováveis		
água	5.820	kg

Fonte: (GILENO et al., 2020).

Após todo o processo de coleta e tratamento dos dados, obtêm-se aspectos ambientais associados ao ciclo de vida de forma quantificada, o que leva para a terceira etapa.

A *avaliação de impacto do ciclo de vida* (AICV) constitui a terceira etapa da ACV. A AICV utiliza os dados da fase anterior e torna os resultados mais relevantes, compreensíveis e fáceis de comunicar por meio da compreensão dos dados e dos impactos envolvidos, reduzindo o número de parâmetros e categorias para comparação entre os sistemas avaliados (COLTRO et al., 2007). A norma ISO 14044 destaca a necessidade de incorporar três elementos essenciais nesta fase:

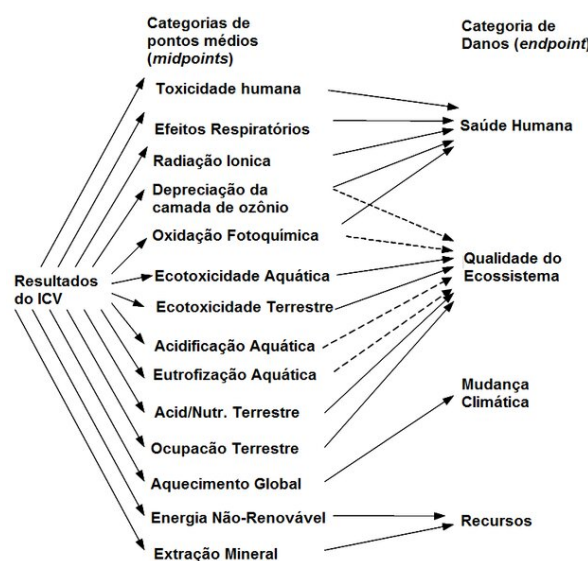
- Seleção das Categorias de Impacto: Identifica os pontos críticos de preocupação ambiental, especificando as categorias e os indicadores a serem utilizados no estudo;

- Classificação: seleção e atribuição dos dados a categorias de impacto específicas;
- Caracterização: multiplicação dos dados do inventário por fatores de equivalência para cada categoria de impacto, convertendo os resultados dos indicadores para uma base comum entre as diferentes categorias.

A importância da fase de avaliação dos impactos reside na simplificação dos resultados, tornando-os não apenas mais acessíveis, mas também facilmente comunicáveis, proporcionando uma compreensão mais clara e acessível aos envolvidos (SAADE et al., 2014).

Para a avaliação de impacto ambiental, existem vários métodos, como o Impact2002+, o Eco-Indicator 99 e o CML 2001 (PIEKARSKI et al., 2012). Os métodos de avaliação de impacto ambiental podem ser divididos em midpoint e endpoint (KÄGI et al., 2016). Os métodos midpoint atribuem o impacto orientado a ponto médio na cadeia de danos, como, por exemplo, a emissão de gases de efeito estufa. Os métodos endpoint são orientados a ponto final, e os fluxos são classificados conforme as áreas de impacto, como danos à saúde humana, ecossistemas, disponibilidade de recursos e mudanças climáticas. A Figura 15 relaciona os métodos midpoint e endpoint.

Figura 15 – Categorias de impactos de pontos médios e danos para o método Impact2002+.



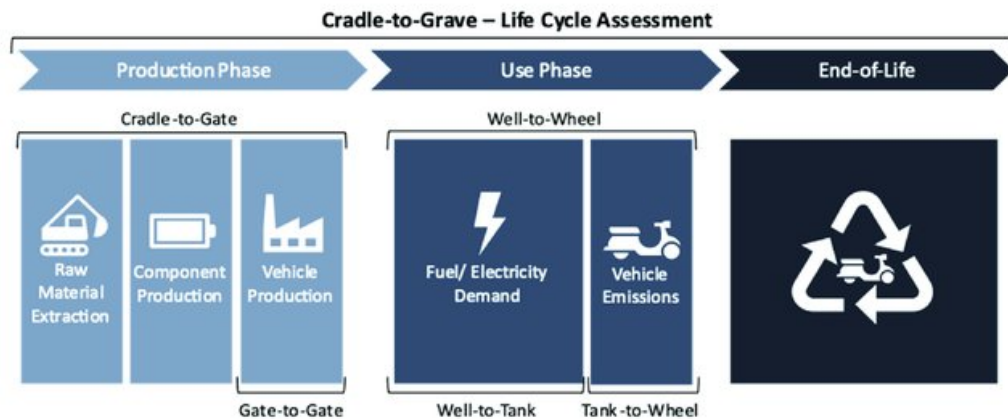
Fonte: (PIEKARSKI et al., 2013).

Por fim, a etapa de *interpretação de resultados* analisa os desdobramentos da análise de inventário e avaliação de impacto são minuciosamente correlacionados com os objetivos e escopo do estudo, resultando em conclusões perspicazes e recomendações substanciais. As conclusões da ACV são direcionadas a apontar melhorias ambientais através da identificação, avaliação e seleção de opções que permitam atingir esse fim (FONSECA et al., 2020).

2.3.1 ACV APLICADA A VEÍCULOS ELÉTRICOS

O setor automobilístico está confrontando uma série de obstáculos significativos, as flutuações no preço do petróleo, a turbulência resultante da crise financeira global e as exigências crescentes da legislação ambiental e de segurança impõem desafios substanciais às fábricas de veículos e componentes (WELLS, 2013). Essas pressões estão moldando um cenário dinâmico, forçando a indústria a se reinventar para atender às demandas emergentes. Ao adotarem uma “política verde” dentro de suas fábricas, empregando tecnologias para redução de emissão de poluentes e práticas sustentáveis, elas visam aumentar o seu lucro e expandir suas práticas (SANTOS, 2015).

A ACV desempenha um papel fundamental na análise de VEs, abrangendo todas as fases do seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima (berço - *cradle*), passando pela produção, transporte e uso, até o fim da vida útil (túmulo - *grave*) (SCHELTE et al., 2021). Quando aplicada a meios de transporte, essa metodologia envolve diversas etapas cruciais, a Figura 16 apresenta todas essas etapas.

Figura 16 – Avaliação *cradle-to-grave*: fases de uma avaliação do ciclo de vida de veículos.

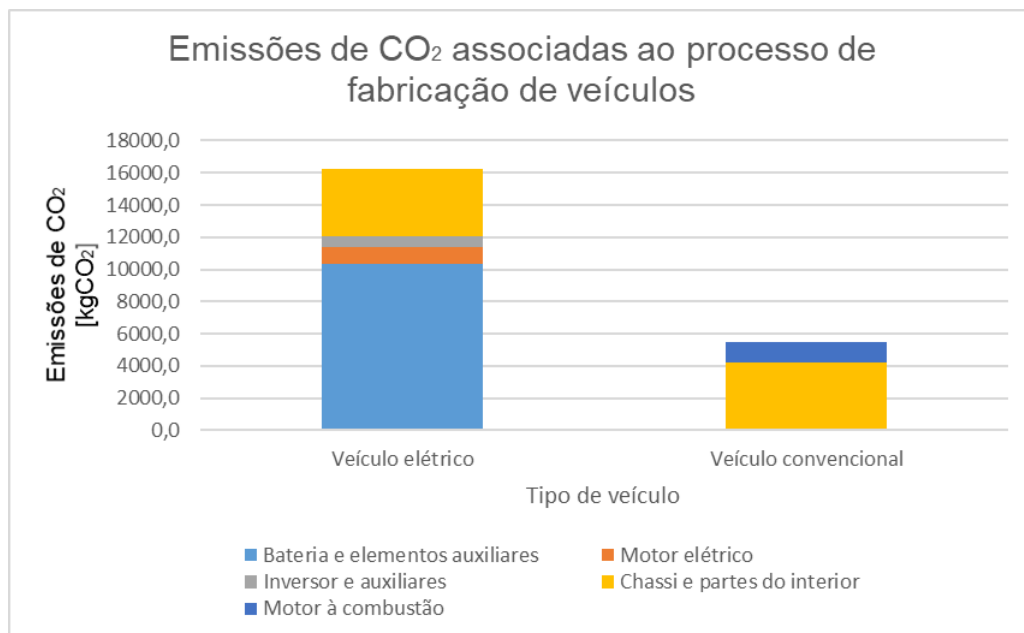
Fonte: (SCHELTE et al., 2021).

- Cradle-to-Gate (berço ao portão): constitui toda a fase de produção do veículo, considera a fabricação do veículo, desde a extração de materiais, a fabricação de peças e componentes até o portão da fábrica, ou seja, antes de ser transportado para o consumidor;
- Gate-to-Gate (portão ao portão): parte da abordagem Cradle-to-Gate, considera-se apenas a fabricação do veículo;
- Well-to-Wheel (bem-a-roda): constitui toda a fase de uso do veículo, considera a vida útil do veículo;
- Well-to-Tank (bem-para-tanque): parte da abordagem Well-to-Wheel, inclui o fornecimento de geração de energia de acionamento;
- Tank-to-Wheel (tanque-a-roda): parte da abordagem Well-to-Wheel, inclui a conversão em energia cinética para operar o veículo;
- End-of-Life (fim de vida): tratamento ou a reciclagem do veículo e de seus componentes para recuperar matérias-primas.

Embora os VEs possuam a vantagem de não emitirem gases de escape, o impacto ambiental proveniente do ciclo de vida das baterias, como sua fabricação, é maior do que o dos VCIs (COX et al., 2018), o que antecipa o ônus ambiental da etapa de uso para a etapa de produção. Na Espanha, onde

a composição atual do mix elétrico é majoritariamente composta por cerca de 42% de energia renovável, a utilização de VEs pode ser menos atrativa do que a utilização de VCIs quando se analisam as emissões emitidas durante o ciclo de vida do veículo (BAUTISTA, 2023). A Figura 17 expõe a pegada de carbono de cada etapa do processo de fabricação.

Figura 17 – Pegada de carbono em cada etapa da fabricação de um VE e VCI.



Fonte: (BAUTISTA, 2023).

Conforme (FARIA et al., 2013), a produção de VEs e seus componentes, especialmente a fabricação de baterias, representa a etapa mais crítica em termos de emissões de GEEs, contribuindo com até 30-50% das emissões ao longo do ciclo de vida, dependendo da capacidade da bateria e da matriz de geração elétrica. Para os VCIs, a fase de uso demonstrou ser a maior fonte de emissões de GEE, entre 85 e 90%. Por outro lado, quando a matriz elétrica de um país é predominantemente fóssil, a geração de eletricidade se destaca como a maior contribuinte, representando mais de 75% das emissões de GEEs ao longo do ciclo de vida.

2.4 ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

A análise e avaliação financeira desempenha um papel crucial na análise de investimentos, sendo um componente essencial para a tomada de decisões informadas. Seu principal propósito é traçar um mapa das expectativas de valores futuros (CVM, 2014), fundamentando-se em uma variedade de técnicas que podem ser aplicadas de forma integrada ou isolada. Métodos de análise de investimentos se baseiam nos fluxos de caixa associados a cada projeto em estudo, oferecendo uma visão clara das oportunidades e desafios que se apresentam (PUCCINI, 2011).

Para se fazer um estudo econômico adequado é necessário haver alternativas de investimento, que devem ser expressas em dinheiro, além disso, só as diferenças entre as alternativas são relevantes (KOPITTKKE; FILHO, 2010). Métodos exatos e não exatos podem ser utilizados para realização da avaliação de investimentos e devem resultar na mesma decisão, se realizados de forma correta. Quanto a métodos exatos, temos, por exemplo, Método do Valor Presente Líquido (VPL) e Método da Taxa Interna de Retorno (TIR). Para um método não exato, temos o Tempo de Recuperação do Capital Investido (Payback).

O Método do VPL consiste em, a partir dos fluxos de caixa de um projeto, trazer todos os valores futuros para a data presente, e dessa forma, designar o VPL através do resultado da soma de todas as entradas e saídas (FILHO; KOPITTKKE, 2010). O critério do VPL corresponde a uma comparação entre o investimento realizado e o valor presente dos fluxos de caixa líquidos futuros que se espera obter pelo investimento (PINDYCK; RUBINFELD; RABASCO, 2006). Para a aceitação de um projeto, o VPL deve ser maior que zero e apontam para o seu cálculo, a Equação 2.1.

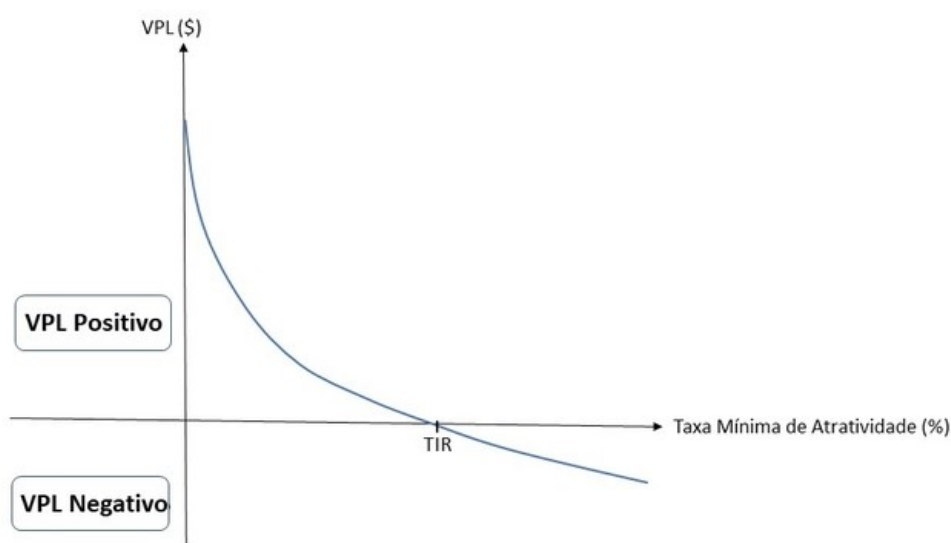
$$VPL = \sum_{t=1}^n \left(\frac{FC_t}{(1+k)^t} \right) - FC_0, \quad (2.1)$$

onde FC_t é o fluxo de caixa obtido no final do período t , k representa a taxa de desconto, também denominada taxa mínima de atratividade (TMA), n é a quantidade de períodos analisados e FC_0 representa o investimento

inicial alocado. Dessa forma, calculando-se o VPL vemos o quanto vale o capital de um investimento no presente.

A TMA é a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo ganhos com o investimento (KOPITTKKE; FILHO, 2010). Em geral, a definição da TMA se baseia em taxas de investimentos de baixo risco como poupança, taxas de títulos públicos, taxa Selic, índice IPCA, entre outros. A Figura 18 mostra graficamente a relação entre o VPL e a TMA.

Figura 18 – Relação VPL, TMA e TIR.



Fonte: (DICIONÁRIO FINANCEIRO, 2017).

A interpretação do VPL é direta: um VPL positivo indica que o investimento é rentável, enquanto um VPL negativo sugere o contrário. Além disso, os valores do VPL podem variar dependendo da taxa utilizada. Para um fluxo de caixa constante, um aumento na TMA resulta em um VPL menor, e o oposto também é verdadeiro.

A TIR é um indicador essencial na avaliação de projetos de investimento, revelando a rentabilidade associada ao capital alocado ao longo do tempo (CAMARGOS, 2013). Ela quantifica a taxa de retorno que iguala o VPL dos fluxos de caixa do projeto a zero, oferecendo uma medida para a tomada de decisões quanto à viabilidade financeira e atratividade do investimento.

O método de Payback é uma das mais populares técnicas de análise de investimento (ROSS et al., 2015). O payback é um método que avalia o tempo de recuperação do capital investido (NOGUEIRA, 2017). Ou seja, avalia quanto tempo demora para um investimento ser ressarcido. Dessa forma, se o tempo de retorno do capital investido na alternativa em análise estiver dentro do prazo estabelecido pela empresa, a alternativa será viável.

O payback simples (P_{bs}) determina o período necessário para recuperar o investimento inicial até que o retorno acumulado iguale-se ao valor investido, dado pela Equação 2.2.

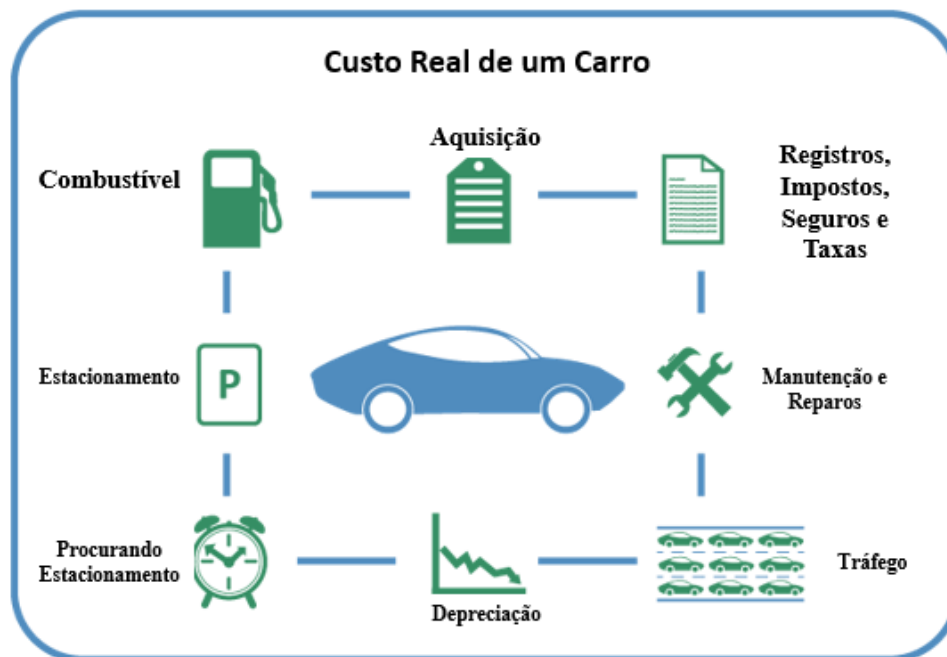
$$P_{bs} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho do período}} \quad (2.2)$$

Este método destaca-se pela sua simplicidade, facilidade de compreensão e cálculo direto (CARVALHO et al., 2020). No entanto, sua desvantagem reside na omissão do valor do dinheiro ao longo do tempo, o que pode afetar a precisão da análise de investimento.

A análise da aquisição de um bem durável deve ser realizada com base no custeio e no seu ciclo de vida, com o intuito de encontrar o custo total do consumidor do mesmo, abordando todos os custos desde sua fabricação até o descarte do bem (CUNHA; FERNANDES, 2007). Nesta vertente, há duas principais metodologias, o Custo Total de Propriedade e o Custeio do Ciclo de Vida.

O Custo Total de Propriedade (*Total Cost of Ownership* - TCO) é um método estruturado para a determinar o custo total associado com a aquisição e uso de um determinado item ou serviço (CARR; ITTNER, 1992). Dessa forma, ao incluir gastos de aquisição, operacionais, de manutenção do sistema, de falhas e reparos técnicos, o TCO facilita a tomada de decisão para novas aquisições, tornando-a mais assertiva. A Figura 19 evidencia algumas variáveis envolvidas no TCO.

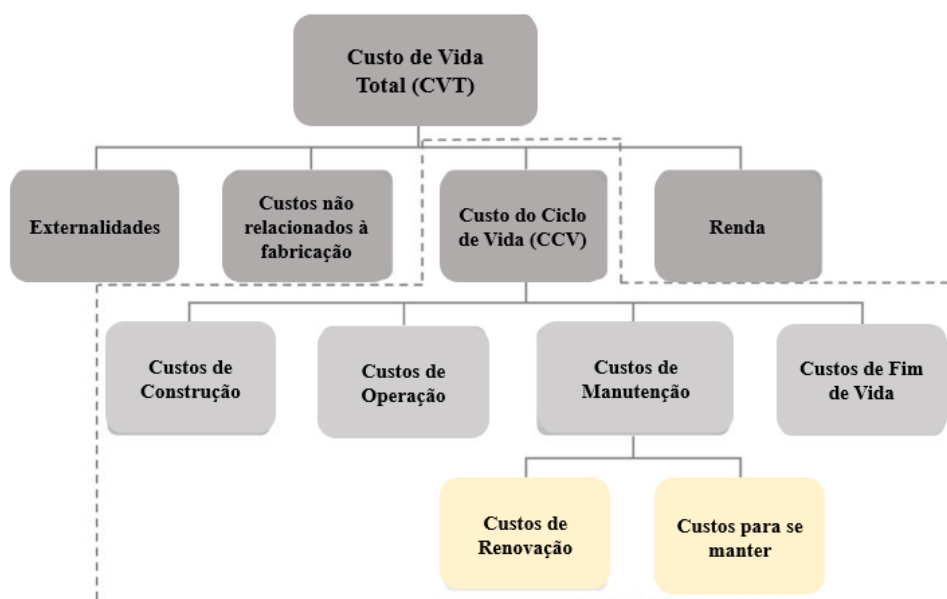
Figura 19 – Variáveis envolvidas no custo de operação e manutenção de um veículo pelo TCO.



Fonte: (AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS, 2024).

Por outro lado, o Custeio do Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost* - CCV) se concentra exclusivamente na vida útil do produto, oferecendo uma ferramenta gerencial para a seleção de componentes (SAKURAI, 1997). O CCV contabiliza os custos totais do sistema em análise desde a sua concepção até o fim de sua vida útil, ou seja, ao longo de seu ciclo de vida. Apesar de muitas vezes ser confundido com o TCO, o CCV é mais específico, enquanto o TCO é mais abrangente, abarcando assistência técnica, custos de falhas, custos administrativos, manutenção e custos de ciclo de vida (ELLRAM; SIFERD, 1998). A Figura 20 expõe os custos envolvidos no CCV.

Figura 20 – Elementos referentes ao CCV.



Fonte: (FARSI et al., 2018).

Ambas as técnicas são utilizadas para prever os custos associados a um produto, abrangendo todas as áreas e tipos de produtos e serviços. No entanto, as análises geralmente se concentram em bens de capital, devido à sua vida útil mais longa em comparação com os bens de consumo (SOUTES, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia elaborada para este estudo pode ser segmentada em cinco fases distintas: (i) a escolha do modelo de automóvel para fins comparativos, estabelecimento e coleta de dados dos processos e custos associados à aquisição e operação dos veículos, (ii) obtenção de dados relativos à geração de energia elétrica no Brasil, (iii) quantificação das emissões de GEES nos cenários envolvidos e (iv) análise financeira para ambos os veículos nas condições estudadas.

3.1 ESCOLHA DO MODELO

A escolha do modelo de automóvel a ser usado neste trabalho foi feita através da possibilidade de se comparar o mesmo modelo de carro com dois tipos de motores diferentes: *flex* e elétrico. Segundo a revista *Auto Esporte*, o Renault Kwid E-Tech conquistou a posição de segundo carro elétrico mais acessível até o final de 2023, solidificando sua presença como parte significativa da frota de VEs no Brasil (QUATRO RODAS, 2023) e o Kwid 1.0 12V SCE *flex* Intense manual foi selecionado por ser o modelo intermediário entre as demais versões *flex*. Ambos os veículos estão apresentados na Figura 21 e a Tabela 1 expõe informações dos modelos.

Figura 21 – Renault Kwid 2024: Intense flex (à esquerda) e E-Tech (à direita).



Fonte: (RENAULT, 2024)

Tabela 1 – Ficha técnica básica dos modelos.

Modelo	Kwid Intense <i>flex</i>		Kwid E-Tech
	Etanol	Gasolina	
Câmbio	Manual	Manual	Elétrico
Autonomia Média (km)	414	589	185
Tanque (L)	38	38	-
Bateria (kWh)	-	-	26,8
Potência máxima	71 cv - 5500 rpm	68 cv - 5500 rpm	65 cv - 4 rpm

Fonte: (RENAULT, 2024).

Para expressar o preço médio do veículo no mercado nacional, foi considerado o valor disponibilizado pela Renault Brasil. Em janeiro de 2024, os preços médios foram R\$ 74.090,00 e R\$ 149.990,00 para os modelos *flex* e elétrico, respectivamente (RENAULT, 2024).

A determinação do custo operacional de um veículo engloba as despesas associadas à sua utilização em condições apropriadas para uso, abrangendo despesas relacionadas a combustível, manutenção, reparos, depreciação, seguro, impostos e taxas (MACAGNAN, 2018). Este trabalho adota um período de análise correspondente a 100.000 quilômetros percorridos ao longo de um intervalo de 5 anos.

3.1.1 MANUTENÇÃO

Para o estudo, a periodicidade das manutenções foi a sugerida pela Renault, sendo realizada a cada 10.000 km e realizada pela concessionária. Logo o valor será considerado apenas quando o carro alcançar as quilômetros estipuladas. Os custos entre as manutenções variam em função da avaliação de componentes específicos realizada em cada revisão. Os itens que compõem a revisão-base do Kwid Intense *flex* são: diagnóstico eletrônico, lubrificação, verificação de pontos de controle, filtro de óleo, filtro de combustível e filtro de habitáculo, filtro de ar e anel.

Os valores para revisões regulares do Kwid Intense *flex* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valor das revisões *preço fechado* Renault Kwid Intense *flex*

Periodicidade	Valor da respectiva revisão	Revisão extra de item
10.000 km ou 1 ano	R\$ 499,00	-
20.000 km ou 2 anos	R\$ 562,00	-
30.000 km ou 3 anos	R\$ 562,00	-
40.000 km ou 4 anos	R\$ 912,00	Velas
50.000 km ou 5 anos	R\$ 626,00	-
60.000 km ou 6 anos	R\$ 908,00	Correia de acessórios
70.000 km ou 7 anos	R\$ 626,00	-
80.000 km ou 8 anos	R\$ 912,00	Velas
90.000 km ou 9 anos	R\$ 626,00	-
100.000 km ou 10 anos	R\$ 626,00	-

Fonte: Adaptado de (RENAULT, 2024).

Os valores apresentados fazem parte do pacote *revisão preço fechado* da Renault. Esse pacote oferece pacotes de serviços de revisão com preço fixo em todas as suas oficinas. Os itens que compõem a revisão-base do Kwid E-Tech são: diagnóstico eletrônico, verificação de pontos de controle, filtro do habitáculo e garantia das peças trocadas. Os valores para revisões regulares do Kwid E-Tech são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valor das revisões *preço fechado* Renault Kwid E-Tech

Periodicidade	Valor da respectiva revisão	Revisão extra de item
10.000 km ou 1 ano	R\$ 156,00	-
20.000 km ou 2 anos	R\$ 198,00	-
30.000 km ou 3 anos	R\$ 198,00	-
40.000 km ou 4 anos	R\$ 921,00	Bateria 12 V
50.000 km ou 5 anos	R\$ 241,00	-
60.000 km ou 6 anos	R\$ 241,00	-
70.000 km ou 7 anos	R\$ 241,00	-
80.000 km ou 8 anos	R\$ 1421,00	Líquido de arrefecimento Fluido de freio Bateria 12 V
90.000 km ou 9 anos	R\$ 241,00	-
100.000 km ou 10 anos	R\$ 241,00	-

Fonte: Adaptado de (RENAULT, 2024).

Nota-se a diferença dos custos entre a manutenção dos dois tipos de motores. VEs tem manutenções mais baratas que seus pares devido à quantidade de componentes ser bem inferior ao dos carros convencionais,

mas necessita de uma mão de obra mais especializada para realizar reparos no carro elétrico.

Com base em dados obtidos de sites especializados em automóveis, foram determinados os preços de itens que não estão incluídos nos pacotes de revisão *preço fechado*. Todos os itens, custos e frequência de reparos utilizadas durante a vida útil estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Inventário de custos associados com a troca de itens na revisão e extras.

Componente	Custo	Frequência
<i>Kwid E-Tech</i>		
Lubrificação	R\$ 80,00	2x ao ano
Troca de filtro de habitáculo	-	2x ao ano
Fluido de freios	R\$ 80,00	2x ao ano
Líquido de arrefecimento	R\$ 20,00	2x (2025 e 2027)
Bateria 12 V	-	2x (2025 e 2027)
Conjunto de pneus	R\$ 1.320,00	1x (2027)
<i>Kwid Intense flex</i>		
Lubrificação	-	2x ao ano
Troca de filtro de óleo	-	2x ao ano
Troca de filtro de combustível	-	2x ao ano
Troca de filtro de habitáculo	-	2x ao ano
Troca de filtro de ar	-	2x ao ano
Anel	-	2x ao ano
Vela	-	1x ao ano
Correia	-	2x (2025 e 2027)
Fluido de freios	R\$ 80,00	2x ao ano
Líquido de arrefecimento	R\$ 20,00	3x (2025, 2027 e 2028)
Bateria 12 V	R\$ 800,00	2x (2025 e 2027)
Conjunto de pneus	R\$ 1.320,0	1x (2027)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

3.1.2 OPERACIONAL

O Kwid Intense possui um consumo a gasolina de 15,7 km/L na estrada e 15,3 km/L na cidade (INMETRO, 2023). O mesmo veículo apresenta um consumo a etanol de 11,0 km/L na estrada e 10,8 km/L na cidade. Para o presente estudo foi utilizado como consumo médio à gasolina 15,5 km/L e, para o etanol, 10,9 km/L, referente à média aritmética entre as duas situações.

Para designar o custo inicial da gasolina e do etanol por litro em cada região, utilizou-se dados levantados pela ANP durante a última semana do ano de 2023 (24/12/2023 - 30/12/2023). A Tabela 5 expõe uma média do valor de cada estado e cada estado foi realocado para o seu subsistema elétrico.

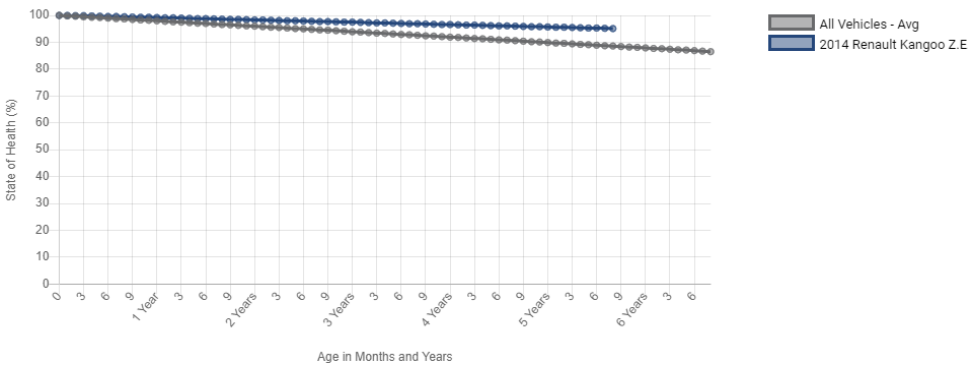
Tabela 5 – Valor médio do litro de etanol e gasolina em cada grupo de 24/12 a 30/12/2023.

Grupo	Etanol (R\$/L)	Gasolina (R\$/L)
Nordeste	R\$ 4,00	R\$ 5,55
Norte	R\$ 4,41	R\$ 5,61
Sudeste	R\$ 3,75	R\$ 5,58
Sul	R\$ 4,12	R\$ 5,71
Brasil	R\$ 4,07	R\$ 5,61

Fonte: Adaptado de (ANP, 2024b).

Já o Kwid E-Tech possui uma autonomia média de 185 km. Devido à ausência de dados acerca da degradação da bateria do Kwid E-Tech ao decorrer do tempo, a eficiência da bateria do Renault Kwid levou em consideração dados de outro modelo da Renault que possui o mesmo tipo de bateria (íon-lítio), o Renault Kangoo, visto na Figura 22.

Figura 22 – Comparação da eficiência da bateria de um Renault Kangoo e da média dos outros carros elétricos computados pelo Geotab.



Fonte: (GEOTAB, 2024).

Utilizaram-se as eficiências da bateria durante o período de estudo conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Eficiência da bateria do Kwid e-Tech no respectivo ano.

Ano	2024	2025	2026	2027	2028
Eficiência (%)	100,00	99,20	98,30	97,50	96,60

Fonte: Adaptado de (GEOTAB, 2024).

A tarifa de energia elétrica é composta por diversos valores que correspondem aos investimentos e operações técnicas realizados pelos agentes envolvidos na produção de energia, englobando custos desde o processo de geração, transmissão e distribuição até o de comercialização. Para designar o valor da tarifa de energia elétrica de cada grupo, utilizou-se dados levantados pela ANEEL em 2023. Tirou-se uma média do valor de cada estado e cada estado foi realocado para o seu subsistema elétrico, visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Valor médio da tarifa de energia elétrica em cada grupo.

Grupo	Tarifa de energia elétrica (R\$/kWh)
Nordeste	R\$ 0,73
Norte	R\$ 0,80
Sudeste	R\$ 0,75
Sul	R\$ 0,64
Brasil	R\$ 0,73

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2024).

3.1.3 SEGURO AUTOMOTIVO, DEPRECIAÇÃO E DESVALORIZAÇÃO DO AUTOMÓVEL

O custo do seguro para o veículo modelo Kwid E-Tech e Kwid Intense *flex* demonstrou ser altamente variável. Dessa forma, utilizou-se como valor anual do seguro o equivalente a 6,6% do valor do veículo atualizado, sendo uma média da cotação de seguros conforme o Índice de Preços do Seguro Automóvel (IPSA).

Conforme dados da Receita Federal, a depreciação total do veículo ocorre ao longo de um período de cinco anos (RECEITA FEDERAL, 2017). Para o cálculo de desvalorização do automóvel usou-se a Tabela FIPE, comparando-se os modelo Intense e E-Tech da versão atual com as três últimas versões (FIPE, 2024). Os valores considerados para desvalorização

anual foi de 9,3% ao ano para o Kwid Intense *flex* e de 12,3% para o E-Tech.

3.1.4 IMPOSTO SOBRE A PROPRIEDADE DOS VEÍCULOS AUTOMOTIVOS

O Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) é variável de estado para estado. Além disso, há estados que reduzem ou até isentam o pagamento de IPVA para carros elétricos. A Tabela 8 mostra um levantamento realizado pela empresa *Zapay* das alíquotas de IPVA para cada estado levando em conta veículos de passeio zero-quilômetro.

Tabela 8 – Custos médios de IPVA para cada grupo analisado.

Grupo	Alíquota de IPVA	
	<i>Carro flex</i>	Carro elétrico
Nordeste	3,00%	2,50%
Norte	2,80%	2,20%
Sudeste	3,40%	2,41%
Sul	3,00%	0,67%
Brasil	3,05%	1,95%

Fonte: Adaptado de (ZAPAY, 2023).

3.2 COMPOSIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os dados acerca da geração de energia em território nacional foram obtidos pelo ONS e disponibilizados em www.ons.org.br. Para este estudo, utilizaram-se como regiões os estados que estão situados no mesmo subsistema elétrico. O estado de Roraima não foi considerado neste estudo por ser desconectado do SIN. Neste caso, as divisões foram: *nordeste*, *norte*, *sudeste*, *sul* e *brasil*.

Foram coletados dados referentes ao tipo de energia e o combustível utilizado na obtenção de energia elétrica para analisar e quantificar a composição de cada subsistema durante o ano de 2023. As Tabelas 9 e 10 mostram a composição do mix energético dos grupos analisados para 2023.

Tabela 9 – Composição do mix de energia elétrica para o ano de 2023 - Valores absolutos.

Combustível	Produção de energia (GWh)				
	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Gás	1.698,64	8.281,78	4.608,47	25,08	14.596,50
Hidráulica	28.977,74	66.437,91	215.636,92	63.106,31	374.049,26
Óleo	408,52	3,04	65,15	38,12	517,07
Carvão	0,00	7,10	40,72	6.153,43	6.266,65
Nuclear	0,00	0,00	13.054,78	0,00	13.001,70
Biomassa	796,87	143,07	18.816,63	977,09	20.671,52
Eólica	73.652,75	1.320,09	49,88	4.620,59	80.069,33
Solar	14.321,42	1.811,20	20.650,04	6.510,56	43.377,86
Total	119.855,94	78.004,20	272.922,59	81.431,18	552.549,89

Fonte: Adaptado de (ONS, 2024).

Tabela 10 – Composição do mix de energia elétrica para o ano de 2023 - Participação de cada combustível.

Combustível	Participação de cada combustível na geração de energia (%)				
	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Gás	1,42	10,62	1,69	0,03	2,64
Hidráulica	24,18	85,17	79,01	77,50	67,70
Óleo	0,34	0,00	0,02	0,05	0,09
Carvão	0,00	0,01	0,01	7,56	1,13
Nuclear	0,00	0,00	4,78	0,00	2,35
Biomassa	0,66	0,18	6,89	1,20	3,74
Eólica	61,45	1,69	0,02	5,67	14,49
Solar	11,95	2,32	7,57	8,00	7,85
Total	-	-	-	-	100,00

Fonte: Adaptado de (ONS, 2024).

3.3 AVALIAÇÃO AMBIENTAL

O inventário para a *fase de uso e manutenção*, abordagem Well-to-Wheel, ao longo dos cinco anos, foi estabelecido conforme demonstrado na Tabela 11, considerando uma unidade funcional de 100 mil quilômetros.

Tabela 11 – Inventário de recursos utilizados durante a vida útil dos veículos.

Fluxos de Entrada	Unidade funcional (100.000 km)	Unidade	Material
Consumo de energia			
Kwid E-Tech	14732,76	kWh	Energia elétrica
Kwid Intense flex Etanol	9174,31 - 7238,53	L - kg	Etanol mono-hidratado (10,9 km/L)
Kwid Intense flex Gasolina	6451,61 - 4767,58	L - kg	Gasolina E27 (15,5 km/L)
Consumo de materiais			
<i>Kwid E-Tech</i>			
Lubrificação	8,00 - 7,20	L - kg	Óleo sintético
Filtro de habitáculo	4,00	kg	Papel de celulose
Fluido de freios	5,00 - 3,09	L - kg	Glicóis + aditivos
Líquido de arrefecimento	1,60 - 1,68	L - kg	Etilenoglicol + aditivos
Bateria 12 V	26,00	kg	69% Pb - 8 % H ₂ SO ₄
Pneu	26,00	kg	Borracha
<i>Kwid Intense</i>			
Lubrificação	8,00 - 7,20	L - kg	Óleo sintético
Filtro de óleo	1,70	kg	Aço inoxidável
Filtro de combustível	1,00	kg	Aço blindado
Filtro de habitáculo	4,00	kg	Papel de celulose
Filtro de ar	2,07	kg	Papel de celulose
Anel	0,02	kg	Aço galvanizado
Velas	0,20	kg	Níquel
Correias	0,23	kg	Borracha
Fluido de freios	5,00 - 3,09	L - kg	Glicóis + aditivos
Líquido de arrefecimento	2,4 - 2,52	L - kg	Etilenoglicol + aditivos
Bateria 12 V	26,00	kg	69% Pb - 8 % H ₂ SO ₄
Pneu	26,00	kg	Borracha

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A ACV foi desenvolvida com auxílio do software SimaPro versão 9.5.0.1 (PRé Sustainability, 2019), utilizando a base de dados Ecoinvent 3.9 (Swiss Center for Life Cycle Inventories, 2019). Devido a preocupações com as mudanças climáticas, selecionou-se o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2021 GWP 100a (IPCC, 2021), que agrupa as emissões de gases de efeito estufa numa métrica comum (CO₂-eq) ao longo de 100 anos.

3.4 AVALIAÇÃO FINANCEIRA

Foram considerados três cenários:

- Cenário 1: Kwid E-Tech;
- Cenário 2: Kwid Intense *flex* 100% gasolina;
- Cenário 3: Kwid Intense *flex* 100% etanol.

Para cada um dos cenários, foram calculados o VPL a partir dos dados coletados no CCV, considerando os ajustes regionais mencionados nas subseções 3.1.2, 3.1.3 e 3.1.4. Essa análise abrangeu diversos aspectos, como aquisição do veículo, custo do combustível (tarifas de energia elétrica, gasolina e etanol), despesas com manutenção, seguro automotivo anual, IPVA, depreciação e o valor de revenda do veículo ao final do período. Dentre esses elementos, apenas o custo do combustível e o IPVA apresentaram variações significativas entre as diferentes regiões consideradas.

Para este trabalho a TMA foi definida com base no cálculo da taxa real a partir da taxa Selic (T_{selic}) e do índice IPCA ($T_{inflação}$) conforme Equação 3.1:

$$TMA = \frac{T_{selic} - T_{inflação}}{1 - T_{inflação}} \quad (3.1)$$

A taxa Selic e o índice IPCA foram definidos como a média das taxas estabelecidas pelo boletim FOCUS dos anos de 2024 a 2027 (horizonte de 4 anos estipulado pelo estudo), resultando em uma taxa Selic anual de 8,60%, um índice IPCA anual de 3,60% (BCB, 2024). Resultando assim em uma TMA de 5,18%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Como descrito na seção anterior, a análise do inventário foi feita em duas fases: *consumo de materiais* e *consumo de energia* (Gasolina E27, Etanol e Energia Elétrica).

A Tabela 12 especifica as pegadas de carbono dos itens do *consumo de materiais*.

Tabela 12 – Resultados da Análise de Inventário - Consumo de Materiais.

Fluxos de Saída	Pegada de Carbono (kg CO ₂ -eq/kg)	Unidade funcional (kg CO ₂ -eq/100.000 km)
Consumo de materiais		
<i>Kwid E-Tech</i>		
Lubrificação	1,37	9,75
Filtro de habitáculo	2,92	11,70
Fluido de freios	2,30	7,11
Líquido de arrefecimento	2,02	3,40
Bateria 12V	0,86	44,95
Pneu	2,72	70,73
Total		147,63
<i>Kwid Intense</i>		
Lubrificação	1,37	9,75
Filtro de óleo	5,20	8,85
Filtro de combustível	2,16	2,16
Filtro de habitáculo	2,92	11,70
Filtro de ar	2,92	6,05
Anel	1,68	0,03
Velas	17,15	3,43
Correias	2,72	0,63
Fluido de freios	2,30	7,11
Líquido de arrefecimento	2,02	5,10
Bateria 12V	22,47	44,95
Pneu	2,72	70,73
Total		170,48

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Observa-se que tanto para o Kwid E-Tech quanto para o Kwid Intense *flex*, a substituição de pneus (com uma contribuição de 47,91% e 41,49%, respectivamente) e a troca da bateria (com 30,44% e 26,36%, respectivamente) são os principais fatores que influenciam as emissões associadas ao consumo de materiais durante o período de uso.

É interessante notar que as baterias de chumbo-ácido, devido ao seu processo de fabricação intensivo e ao uso de materiais como o chumbo, demonstram uma pegada de carbono relativamente alta em comparação com outras tecnologias de bateria. Por outro lado, no caso dos pneus, sua produção requer uma quantidade considerável de energia e resulta em emissões de GEEs, especialmente durante a fabricação dos compostos de borracha e no processo de vulcanização.

Tabela 13 – Pegada de carbono das fontes de energia.

Fatores de emissão	Pegada de Carbono (kg CO ₂ -eq/kWh)
Gás	0,756
Hidráulica	0,098
Óleo	1,434
Carvão	2,697
Nuclear	0,016
Biomassa	0,161
Eólica	0,020
Solar	0,106

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

A Tabela 13 apresenta a pegada de carbono associada a cada tipo de fonte de energia usada na geração de eletricidade. Entre as fontes de energia limpas, destacam-se as energias nuclear, eólica, hidráulica e solar, com fatores de emissão significativamente baixos. Por outro lado, as fontes de energia sujas, como o carvão e o óleo, apresentam fatores de emissão muito mais altos, contribuindo significativamente para uma pegada de carbono maior.

As pegadas de carbono associadas ao *consumo de energia* estão expostas na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da Análise de Inventário - Consumo de Energia.

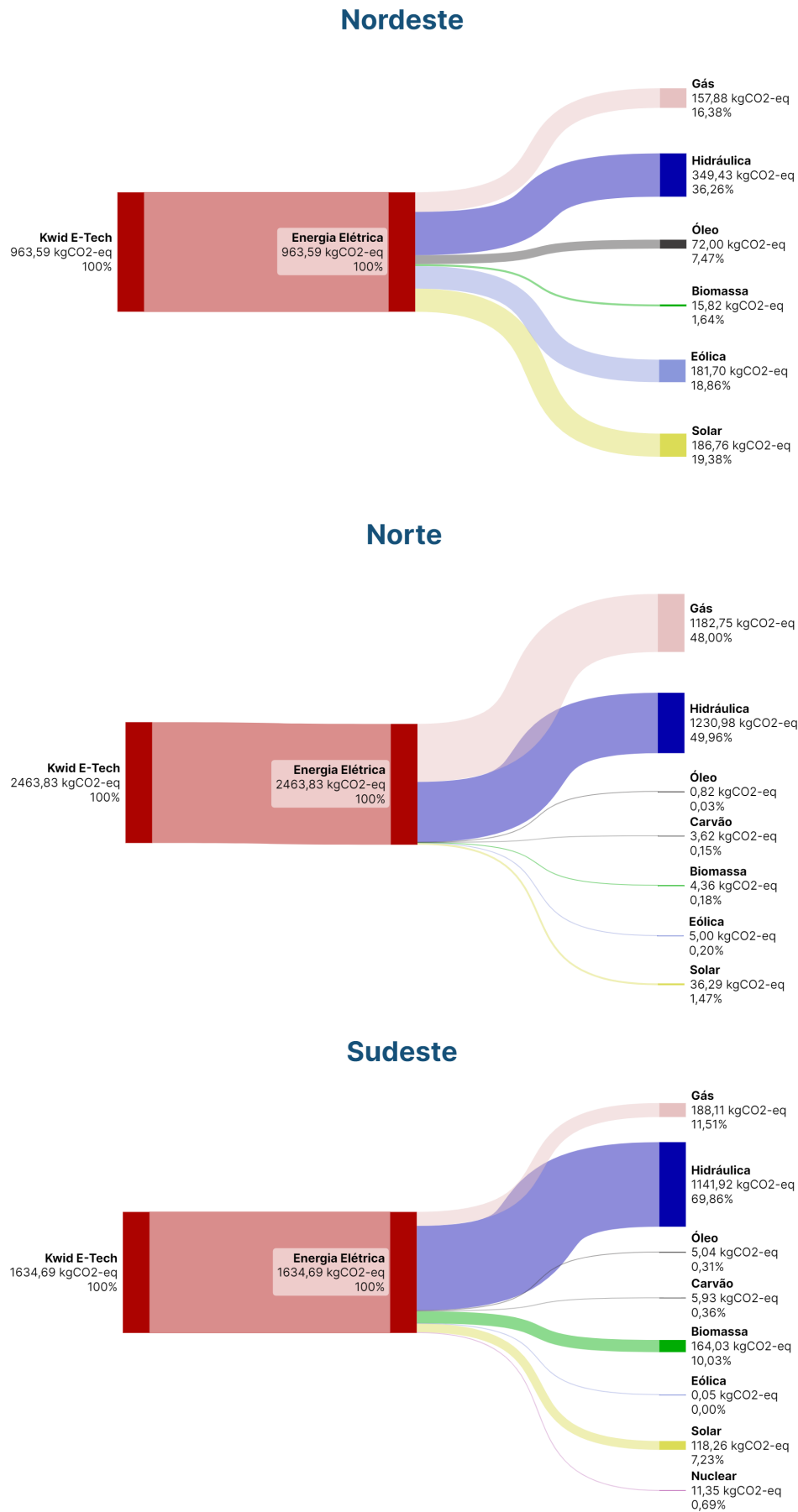
Fluxos de Saída	Pegada de Carbono	Unidade funcional (kg CO ₂ -eq / 100.000 km)
Consumo de energia		
Etanol	0,146 kg CO ₂ -eq/kg	1058,67
Gasolina E27	0,403 kg CO ₂ -eq/kg	1921,72
Energia Elétrica - Nordeste	0,065 kg CO ₂ -eq/kWh	963,59
Energia Elétrica - Norte	0,167 kg CO ₂ -eq/kWh	2463,83
Energia Elétrica - Sudeste	0,111 kg CO ₂ -eq/kWh	1634,69
Energia Elétrica - Sul	0,292 kg CO ₂ -eq/kWh	4305,81
Energia Elétrica - Brasil	0,136 kg CO ₂ -eq/kWh	2003,15

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Ao analisar as emissões de diferentes fontes de energia, percebe-se uma grande variação entre as fontes de combustível utilizadas. O etanol se destaca com uma das pegadas de carbono mais baixas, sendo uma alternativa notável aos combustíveis fósseis. Em comparação com a gasolina brasileira, o etanol emite cerca de 45% menos carbono, reforçando seu potencial como uma escolha mais ecológica.

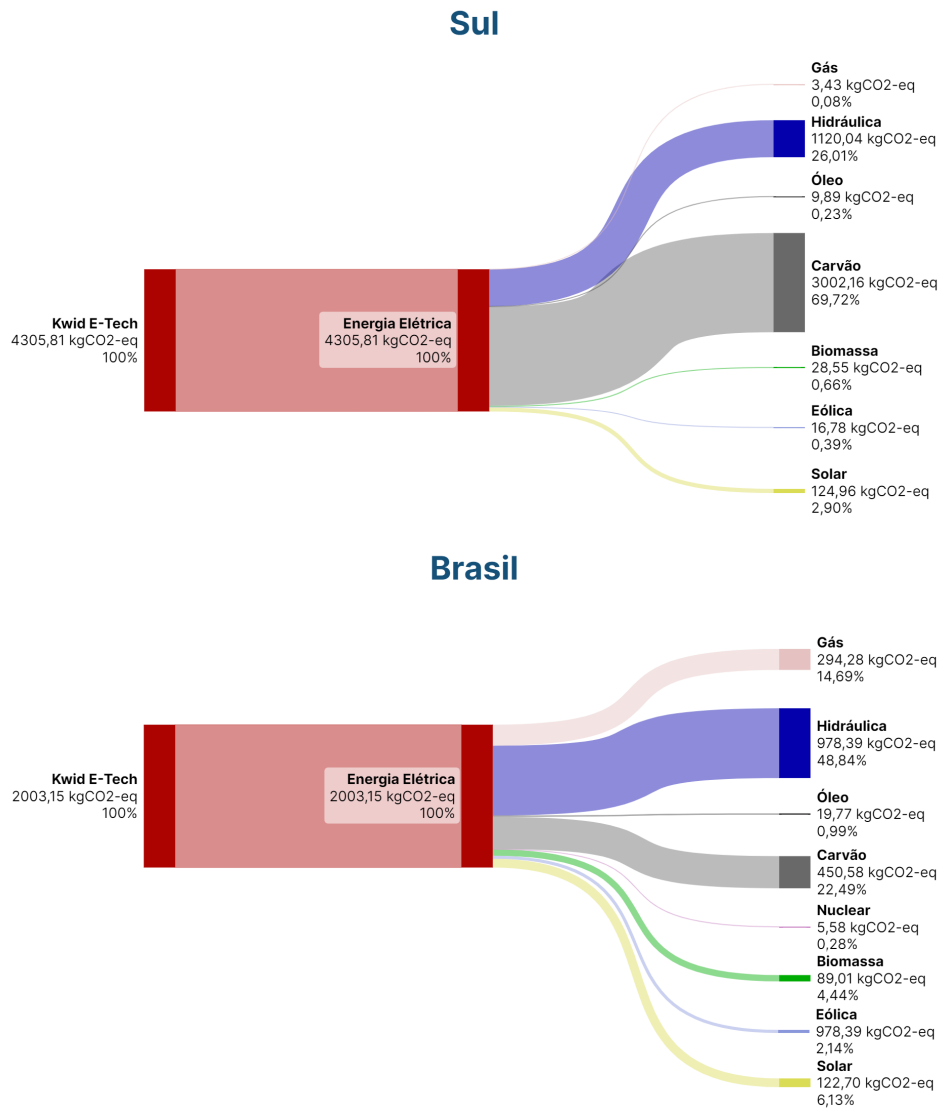
As pegadas de carbono da energia elétrica de cada grupo explorado são influenciadas pela geração de energia em cada área. As figuras 23 e 24 traçam um diagrama de fluxo de cada fonte de energia nas emissões totais durante o carregamento do VE, destacando como o mix energético de cada região desempenha um papel fundamental nesse aspecto. É importante destacar que as pegadas de carbono da energia elétrica de cada grupo foram calculadas para o mix energético vigente em 2023.

Figura 23 – Emissões associadas ao carregamento do VE ao longo de cinco anos. - Nordeste, Norte e Sudeste.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Figura 24 – Emissões associadas ao carregamento do VE ao longo de cinco anos. - Sul e Brasil.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

No cenário observado, o grupo *nordeste* se destaca pela menor pegada de carbono, atribuído principalmente à considerável proporção de energia eólica em sua matriz energética, apresentando a segunda menor pegada de carbono entre as fontes analisadas (0,02 kg CO₂-eq/kWh). Assim, a região apresenta potencial promissor para o desenvolvimento de uma matriz energética mais verde e livre de carbono.

As emissões provenientes da geração hidrelétrica dominam em todos os grupos, com exceção do *sul*, onde o carvão é a fonte que ganha destaque.

Apesar de 7,56% da energia gerada no *sul* ser originária de carvão, este foi responsável por 69,72% das emissões de GEEs associadas ao VE nessa região devido à sua alta pegada de carbono (2,697 kg CO₂-eq/kWh). O grupo *norte*, com a segunda maior pegada de carbono dos mix energéticos (0,167 kg CO₂-eq/kWh), é fortemente influenciado pelo uso de gás na geração de energia, representando uma participação de 48,00% em suas emissões. Dessa forma, destaca-se a necessidade urgente de transições para fontes de energia mais limpas e sustentáveis em ambos os grupos.

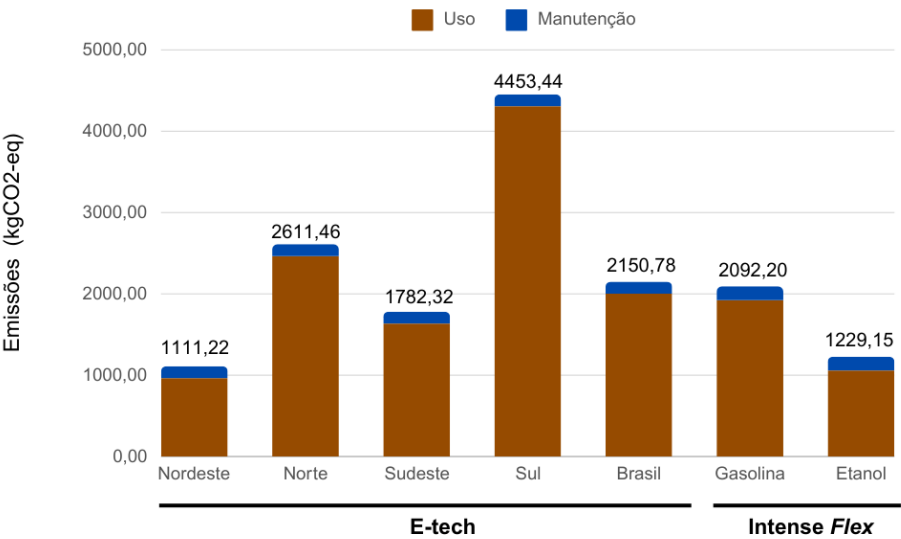
A Tabela 15 e a Figura 25 trazem a pegada de carbono para ambos os veículos nas condições submetidas para toda a *fase de uso e manutenção*.

Tabela 15 – Emissões para cada cenário ao longo de cinco anos.

	Kwid E-Tech (kg CO ₂ -eq)					Intense <i>flex</i> (kg CO ₂ -eq)	
	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil	Gasolina	Etanol
Uso	963,59	2463,83	1634,69	4305,81	2003,15	1921,72	1058,67
Manutenção	147,63	147,63	147,63	147,63	147,63	170,48	170,48
Total	1111,22	2611,46	1782,32	4453,44	2150,78	2092,20	1229,15

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Figura 25 – Pegada de carbono associada ao uso e manutenção dos veículos ao longo de cinco anos.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

O Kwid E-Tech no *nordeste* possui as emissões mais baixas do que os demais, seguido pelo Kwid Intense *flex* a etanol. No pior cenário, temos o Kwid E-Tech no *sul*, impactado pela pegada de carbono associada ao uso de carvão de seu mix energético.

Através do inventário proposto para a etapa de manutenção dos veículos, observa-se que o Kwid E-tech possui um potencial de redução de emissões de 13,40% em comparação com o Intense *flex*. Entretanto, percebe-se que o impacto ambiental da manutenção do veículo ao longo do tempo tem impacto inferior ao combustível utilizado para utilização do mesmo. Por exemplo, um Kwid E-Tech no *nordeste* possui 13,29% das suas emissões totais ocasionadas pela manutenção do veículo, enquanto no Sul essa porcentagem equivale a 3,31%.

4.2 AVALIAÇÃO FINANCEIRA

Com base nos dados coletados e conforme a metodologia apresentada, foram tabulados os valores obtidos durante o ciclo de vida do carro ao longo dos cinco anos. As Tabelas 16 e 17 trazem os custo base geral de cada veículo, onde estes valores são válidos para todo o território nacional.

Tabela 16 – Custo Base Geral do Kwid E-Tech sem custos de energia elétrica e incidência de IPVA.

Kwid E-Tech	Custo Anual (em R\$)					
	Aquisição	2024	2025	2026	2027	2028
Investimento Inicial	149.990,00	-	-	-	-	-
Manutenção	-	674,00	1.511,52	2.277,53	2.203,85	923,88
Seguro	-	9.899,34	8.994,26	8.171,94	7.424,79	6.745,96
Depreciações	-	29.998,00	29.998,00	29.998,00	29.998,00	29.998,00
Total	149.990,00	40.571,34	40.503,79	40.447,47	39.626,65	37.667,83
						348.807,08

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Tabela 17 – Custo Base Geral do Kwid Intense *flex* sem custos de combustíveis e incidência de IPVA.

Kwid Intense <i>flex</i>	Custo Anual (em R\$)					
	Aquisição	2024	2025	2026	2027	2028
Investimento Inicial	74.090,00	-	-	-	-	-
Manutenção	-	1.221,00	2.542,34	3.234,91	2.799,85	1.649,61
Seguro	-	4.889,94	4.594,84	4.317,55	4.057,00	3.812,17
Depreciações	-	14.818,00	14.818,00	14.818,00	14.818,00	14.818,00
Total	149.990,00	40.571,34	40.503,79	40.447,47	39.626,65	20.279,78
						181.299,22

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Devido aos seguros automotivos serem calculados com base no valor de aquisição e na desvalorização do veículo ao longo do tempo, os custos com seguro para o modelo elétrico são consideravelmente mais elevados em comparação com sua contraparte *flex*.

No que diz respeito à manutenção, ambos os modelos seguiram os preços estabelecidos pelo programa *revisão fechada*. Quanto à depreciação contábil, foi considerada uma perda total do valor do carro ao longo de cinco anos. Entretanto, considerou-se que o Kwid E-Tech sofreu uma desvalorização anual de 12,3%, chegando a ser revendido por aproximadamente 51,88% do seu valor inicial. Enquanto isso, o Intense *flex* teve uma depreciação anual de 9,3%, alcançando uma revenda de cerca de 61,38% de seu valor inicial.

A Tabela 18 traz o custo com combustíveis e IPVA para cada grupo.

Tabela 18 – Custos com combustíveis e IPVA para os cenários em cada grupo.

Grupo	Custo anual (em R\$)					Total
	2024	2025	2026	2027	2028	
<u>Brasil</u>						
Energia Elétrica	2.116,79	2.211,63	2.310,56	2.413,75	2.521,37	11.574,09
Gasolina	7.240,82	7.501,48	7.771,54	8.051,31	8.341,16	38.906,31
Etanol	7.468,12	7.736,97	8.015,50	8.304,06	8.603,01	40.127,66
IPVA - Kwid E-Tech	2.917,31	2.558,48	2.243,78	1.967,80	1.725,76	11.413,13
IPVA - Kwid Intense flex	2.259,75	2.049,59	1.858,98	1.686,09	1.529,29	9.383,69
<u>Nordeste</u>						
Energia Elétrica	2.125,56	2.220,80	2.320,14	2.423,75	2.531,82	11.622,06
Gasolina	7.159,68	7.417,43	7.684,45	7.961,09	8.247,69	38.470,34
Etanol	7.344,04	7.608,42	7.882,33	8.166,09	8.460,07	39.460,94
IPVA - Kwid E-Tech	3.749,75	3.288,53	2.884,04	2.529,30	2.218,20	14.669,83
IPVA - Kwid Intense flex	2.222,70	2.015,99	1.828,50	1.658,45	1.504,22	9.229,86
<u>Norte</u>						
Energia Elétrica	2.313,41	2.417,07	2.525,19	2.637,96	2.755,58	12.649,19
Gasolina	7.238,71	7.499,30	7.769,28	8.048,97	8.338,74	38.895,00
Etanol	8.095,41	8.386,85	8.688,77	9.001,57	9.325,63	43.498,23
IPVA - Kwid E-Tech	3.299,78	2.893,91	2.537,96	2.225,79	1.952,02	12.909,45
IPVA - Kwid Intense flex	2.074,52	1.881,59	1.706,60	1.547,89	1.403,93	8.614,53
<u>Sudeste</u>						
Energia Elétrica	2.176,08	2.273,58	2.375,28	2.481,36	2.592,00	11.898,30
Gasolina	7.201,43	7.460,69	7.729,27	8.007,52	8.295,79	38.694,71
Etanol	6.873,39	7.120,84	7.377,19	7.642,77	7.917,91	36.932,09
IPVA - Kwid E-Tech	3.614,76	3.170,14	2.780,22	2.438,25	2.138,34	14.141,71
IPVA - Kwid Intense flex	2.519,06	2.284,79	2.072,30	1.879,58	1.704,78	10.460,51
<u>Sul</u>						
Energia Elétrica	1.852,09	1.935,08	2.021,64	2.111,92	2.206,08	10.126,81
Gasolina	7.363,44	7.628,52	7.903,15	8.187,67	8.482,42	39.565,20
Etanol	7.559,63	7.831,78	8.113,72	8.405,82	8.708,43	40.619,38
IPVA - Kwid E-Tech	1.004,93	881,33	772,92	677,85	594,48	3.931,51
IPVA - Kwid Intense flex	2.222,70	2.015,99	1.828,50	1.658,45	1.504,22	9.229,86

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Nota-se uma discrepância inicial grande ocasionada pelo custo de

aquisição do VE, o que impacta diretamente nos custos com IPVA e seguro automotivo. Entretanto, pode-se notar que o mesmo possui custos de manutenção e operacionais bem menores, como uma redução de 74 – 75% dos custos com combustível na região *sul* se comparado à gasolina ou a etanol na mesma região.

As tabelas 19, 20 e 21 destacam o custo total de cada veículo em todos os cenários avaliados. Os valores em vermelho representam as despesas, enquanto os valores verdes indicam fontes de receita devido à venda do veículo após o uso. Dado que os veículos avaliados não geram receitas ao longo do período analisado, exceto na revenda do carro, apenas incorrem em despesas, a TIR não foi considerada.

Tabela 19 – Custo total e VPL do Kwid E-tech ao longo dos cinco anos.

Kwid E-Tech	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Custo Base Geral (R\$)	348.807,08	348.807,08	348.807,08	348.807,08	348.807,08
Custo Combustível (R\$)	11.622,06	12.649,19	11.893,30	10.126,81	11.574,10
Custo IPVA (R\$)	14.669,83	14.669,83	14.141,71	3.931,51	11.413,13
Revenda (R\$)	77.814,45	77.814,45	77.814,45	77.814,45	77.814,45
Custo Total (R\$)	297.284,52	298.311,65	297.027,64	285.050,95	293.979,86
VPL (R\$)	283.902,97	283.247,32	283.678,91	273.246,27	281.018,87

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Tabela 20 – Custo total e VPL do Kwid Intense *flex* à gasolina ao longo dos cinco anos.

Kwid Intense <i>flex</i> (Gasolina)	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Custo Base Geral (R\$)	181.299,22	181.299,22	181.299,22	181.299,22	181.299,22
Custo Combustível (R\$)	38.470,34	38.895,00	38.694,71	39.565,20	38.906,31
Custo IPVA (R\$)	9.229,86	8.614,53	10.460,51	9.229,86	9.383,69
Revenda (R\$)	45.477,44	45.477,44	45.477,44	45.477,44	45.477,44
Custo Total (R\$)	183.521,98	183.331,31	184.976,99	184.616,84	184.111,78
VPL (R\$)	172.253,71	172.082,92	173.517,08	173.193,69	172.761,85

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Tabela 21 – Custo total e VPL do Kwid Intense *flex* a etanol ao longo dos cinco anos.

Kwid Intense <i>flex</i> (Etanol)	Nordeste	Norte	Sudeste	Sul	Brasil
Custo Base Geral (R\$)	181.299,22	181.299,22	181.299,22	181.299,22	181.299,22
Custo Combustível (R\$)	39.460,94	43.498,23	36.932,09	40.619,38	40.127,66
Custo IPVA (R\$)	9.229,86	8.614,53	10.460,51	9.229,86	9.383,69
Revenda (R\$)	45.477,44	45.477,44	45.477,44	45.477,44	45.477,44
Custo Total (R\$)	184.512,58	187.934,54	183.214,38	185.671,02	185.333,13
VPL (R\$)	173.104,17	176.034,94	172.003,82	174.098,73	173.810,42

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Pode-se perceber que em todas as análises, exceto no grupo *sudeste*, o carro à gasolina foi mais rentável do que os outros. Vale destacar que o grupo *sul* apresentou a melhor situação para o Kwid E-Tech, sendo explicado pelo preço médio das tarifas de energia do grupo estarem abaixo da média nacional, aliado à isenção de IPVA para carros elétricos em dois dos três estados (Paraná e Rio Grande do Sul). Esses são fatores que contribuem para atrair o uso de VEs para a região.

Através do VPL, analisam-se as variações nos custos do Kwid Intense *flex* entre abastecer com gasolina ou etanol, oscilando entre 2,3% no *norte* (caso mais favorável) e 0,49% no *nordeste*, enquanto no *sudeste* registrou-se um valor negativo de -0,87%, tornando o etanol uma opção viável nesse grupo. Ao abastecer o veículo com etanol no *sudeste*, observa-se um custo total e VPL mais favoráveis em comparação com o abastecimento com gasolina, devido ao preço mais baixo do etanol nessa região, 7,86% abaixo da média nacional.

Ao compararmos a aquisição de um Kwid E-Tech com um Intense *flex*, tem-se um investimento extra de R\$75.900,00. Com esse investimento inicial, exploramos o retorno desse investimento ao analisar o período necessário para recuperá-lo, desconsiderando a revenda do produto e as depreciações contábeis presentes em ambos. A Tabela 22 traz a economia média anual de despesas que o VE proporciona, através da diminuição de custo com combustível e alíquotas de IPVA e o payback:

Tabela 22 – Economia Média Anual e Payback: Kwid E-Tech versus Intense *flex*.

Grupo	Aquisição	Combustível	Economia média (R\$/ano)	Payback (anos)
Nordeste	E-Tech	Gasolina	1.140,09	66,57
	E-Tech	Etanol	1.338,21	56,72
Norte	E-Tech	Gasolina	1.248,61	60,79
	E-Tech	Etanol	2.169,25	34,99
Sudeste	E-Tech	Gasolina	1.481,47	51,23
	E-Tech	Etanol	1.128,94	67,23
Sul	E-Tech	Gasolina	3.805,78	19,94
	E-Tech	Etanol	4.016,61	18,90
Brasil	E-Tech	Gasolina	1.900,99	39,93
	E-Tech	Etanol	2.145,26	35,38

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Observa-se assim a inviabilidade financeira ao optar pela aquisição do VE em vez do *flex* em um cenário de curto e médio prazo. Em todos os casos analisados, os paybacks estão entre 18,90 anos, utilizando o veículo a etanol no *sul*, e 67,23 anos, utilizando o veículo a etanol no *sudeste*. Essa inviabilidade sempre recai na diferença de investimento inicial, pois impacta diretamente outros custos recorrentes, como seguro automotivo, IPVA, entre outros.

A Tabela 23 traz a economia média e o payback ao considerar apenas o investimento extra para a aquisição do Kwid E-tech e a fonte combustível utilizada.

Tabela 23 – Economia Média por quilômetro e Payback: Kwid E-Tech versus Intense *flex*.

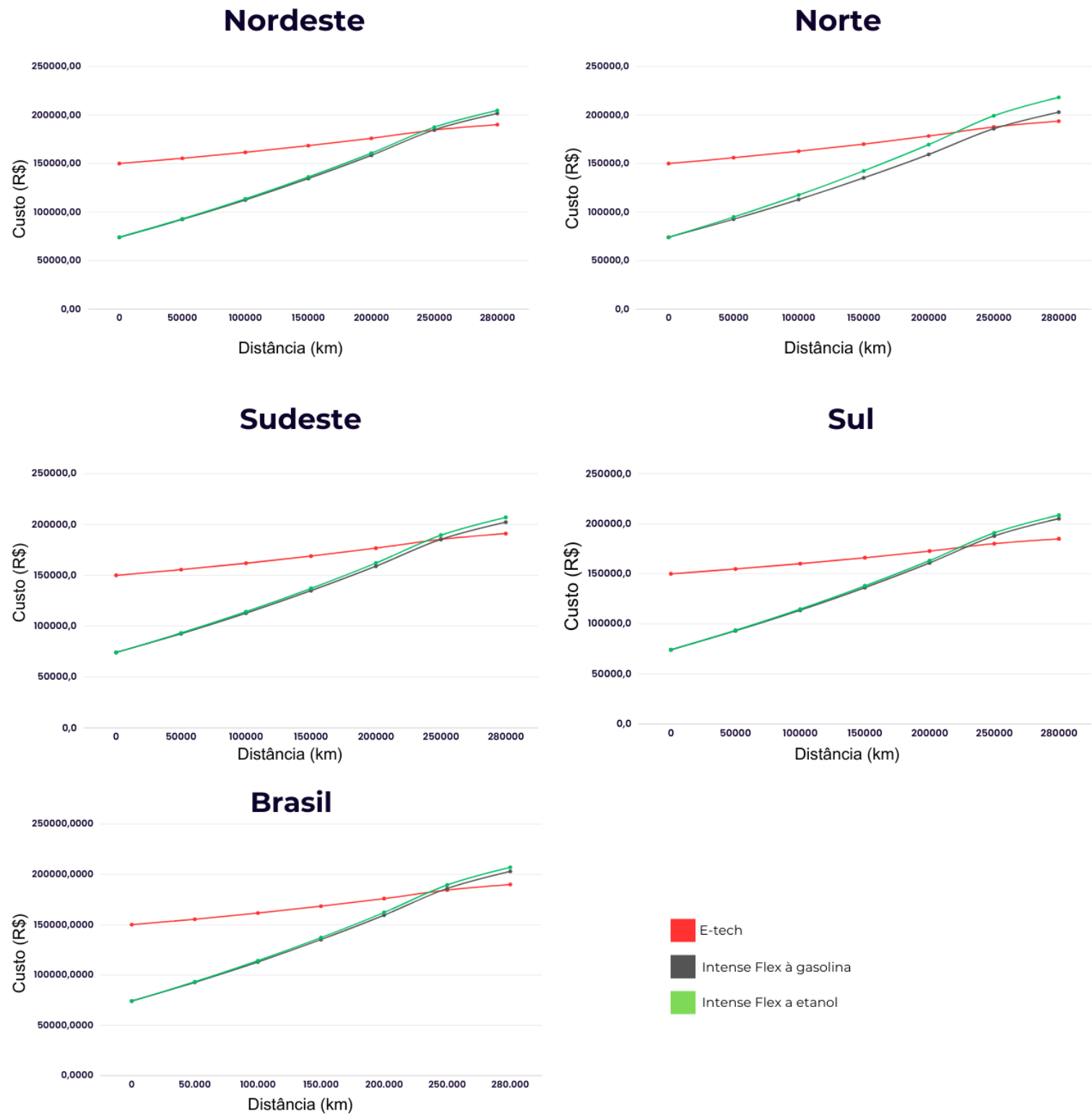
Grupo	Aquisição	Combustível	Economia média por km (R\$)	Payback (km)
Nordeste	E-Tech	Gasolina	0,30	249.538,57
	E-Tech	Etanol	0,32	240.528,78
Norte	E-Tech	Gasolina	0,30	255.708,42
	E-Tech	Etanol	0,35	217.001,91
Sudeste	E-Tech	Gasolina	0,30	250.119,77
	E-Tech	Etanol	0,32	237.235,15
Sul	E-Tech	Gasolina	0,33	226.873,48
	E-Tech	Etanol	0,35	218.938,73
Brasil	E-Tech	Gasolina	0,31	245.039,06
	E-Tech	Etanol	0,32	234.408,39

Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

Ao considerar somente gastos com aquisição e combustíveis, em um horizonte de distância, tem-se uma visão mais positiva da redução de custos associadas ao uso de VEs. Economias médias vão de 0,30 R\$/km utilizando o veículo à gasolina no *nordeste*, *norte* e *sudeste*, a de 0,35 R\$/km utilizando o veículo a etanol no *norte* e *sul*.

Nesse contexto, o *sul* novamente se destaca como o cenário mais vantajoso, onde os custos do veículo elétrico e do flex a etanol se igualam após percorrer 218.939 km, enquanto para o flex a gasolina essa equivalência ocorre após 226.873 km. O *norte* se destaca como sendo o grupo menos vantajoso e notavelmente divergente dos demais quando se analisa o payback, onde os custos com o etanol se equiparam após percorrer 217.002 km, enquanto com a gasolina essa equivalência só é alcançada após 255.708 km. A Figura 26 fornece uma comparação visual entre os cenários em cada grupo.

Figura 26 – Payback: Kwid E-Tech versus Intense *flex*.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

5 CONCLUSÃO

Este estudo baseou-se em uma avaliação ambiental e econômica comparativa entre a utilização do VCI Renault Kwid Intense *flex* 2024 com o VE Renault Kwid E-Tech 2024 simulados em diferentes regiões no Brasil durante o seu ciclo de vida. Para a avaliação ambiental, foi utilizada a metodologia de análise de ciclo de vida, onde a unidade funcional definida foi de 100.000 km, 5 anos de uso do veículo, e as fontes emissoras para os veículos estavam no abastecimento, deslocamento e nas manutenções e trocas de peças realizadas em ambos os carros durante o período. As menores pegadas de carbono são provenientes da energia elétrica nos grupos *nordeste* (0,065 kgCO₂-eq/kWh) e *sudeste* (0,111 kgCO₂-eq/kWh), já nos combustíveis fósseis o etanol (0,146 kgCO₂-eq/kg) possui uma pegada de carbono inferior à gasolina. As emissões de GEEs do período de manutenção e troca de peças tem um peso pequeno se comparado às emissões totais desse período, variando de 3% a 13% do todo.

Para a avaliação financeira, foram levantados dados acerca dos custos de combustíveis, impostos, seguros automotivos, depreciações e manutenção para cada grupo. Após, analisou-se mediante técnicas de análise de investimento, como o Método do Valor Patrimonial Líquido (VPL) e o método do Payback simples, a viabilidade do investimento do VE com o *flex*. Ao considerar o VPL, o Intense *flex* à gasolina se sai mais viável em todos os cenários, exceto no *sudeste*, perdendo para o etanol. Ao considerar o payback, o E-tech tem, na melhor hipótese, 18,90 anos para se pagar. Ao excluir todos os gastos e focando na aquisição e nos combustíveis, o Kwid E-tech apresenta-se viável após percorrer de 217.001 a 255.708 km, o que mostra sua inviabilidade em todos os cenários para um projeto de curto-médio prazo.

Destaca-se também que, em relação ao custo entre etanol e gasolina, a diferença é mínima, variando de -0,87% a 2,3%, o que torna o etanol uma

opção viável não apenas para a economia financeira, mas também como uma alternativa sustentável para a redução das emissões de GEEs. Assim, o etanol emerge como uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis amplamente utilizados na atualidade.

Para estudos futuros, recomenda-se realizar análises de sensibilidade para examinar a influência do mix energético e outras variáveis no valor de uso dos veículos. Além disso, sugere-se ampliar a avaliação ambiental para incluir outras categorias de impacto, como indicadores de qualidade do ar, uso de recursos naturais e geração de resíduos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Ranking das tarifas. 2024. Disponível em: www.portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/rankingtarifas. Acesso em: 7 de jan de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução nº 40/13. 2013. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-40-2013->. Acesso em: 15 de fev de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2023. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2023>. Acesso em: 15 de fev de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Levantamento de preços de combustíveis. 2024. Disponível em: www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas. Acesso em: 7 de jan de 2024.

APTA. *Proconve P8: O que é, qual é o objetivo e quando entra em vigor*. 2023. Disponível em: <https://www.aptacaminhoes.com.br/2023/02/09/proconve-p8-o-que-e-qual-e-o-objetivo-e-quando-entra-em-vigor/>. Acesso em: 9 de fev. de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações*. 46 p. (Norma ABNT NBR ISO 14044). 2014. Disponível em: <https://abnt.org.br/>.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Relatório de mercado - 16/02/2024. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>. Acesso em: 25 de fev. de 2024.

BAUTISTA, A. L. *Cicle de vida d'un automòbil elèctric*. Dissertação (B.S. thesis) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2023.

BENVENUTTI, L. M. M. et al. Electric versus ethanol? a fleet-based well-to-wheel system dynamic model for passenger vehicles. *Transportation*

Research Part D: Transport and Environment, Elsevier, v. 115, p. 103604, 2023.

BOULANGER, A. G. et al. Vehicle electrification: Status and issues. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, n. 6, p. 1116–1138, 2011.

BRASIL. Resolução conama nº 18. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 1986.

BRASIL. Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12490.htm.

BRUNDTLAND, G. H. et al. *Our common future ; by world commission on environment and development*. Oslo: Oxford University Press, 1987.

CAMARGOS, M. A. d. Matemática financeira: aplicada a produtos financeiros e à análise de investimentos—. *São Paulo: Saraiva*, v. 1, 2013.

CAMPOS, V. B. G. Uma visão da mobilidade urbana sustentável. *Revista dos transportes públicos*, v. 2, n. 99 – 106, p. 4, 2006.

CARR, L. P.; ITTNER, C. D. Measuring the cost of ownership. *Journal of Cost Management*, v. 6, n. 3, p. 42–51, 1992.

CARVALHO, Y. de A. et al. Viabilidade econômica dos veículos híbridos: Uma análise comparada baseada no payback. *Gestão da Produção em Foco Volume 44*, p. 6, 2020.

CASTRO, B. H. R. d.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. *BNDES Setorial*, n. 32, set. 2010, p. 267-310, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010.

CEDERBORG, J.; SNÖBOHM, S. *Is there a relationship between economic growth and carbon dioxide emissions?* Dissertação (B.S. thesis) — Södertörns University - Institution of Social Sciences, 2016.

CNN. *União Europeia aprova proibição de novos carros a combustão a partir de 2035*. 2022. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/uniao-europeia-aprova-proibicao-de-novos-carros-a-combustao-a-partir-de-2035/>.

COLTRO, L. et al. Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão. *Campinas: Cetea/Ital*, v. 1, 2007.

COMISSÃO DE VALORES MOBILIÁRIOS. *Mercado de Valores Mobiliários*. Rio de Janeiro, 2014.

- CORREIA, G. M. C.; SIMIONI, C. Políticas ambientais e uma possível mudança na matriz energética da indústria automobilística na noruega. *Caderno da Escola Superior de Gestão Pública, Política, Jurídica e Segurança*, v. 4, n. 1, p. 50–64, 2021.
- COSTA, G. F.; QUINTANA, A. H.; VILAR, M. T. M. Análisis de ciclo de vida (i): Desarrollo sostenible y acv. *Ingeniería Química*, p. 153–161, 2007. Disponível em: www.api.semanticscholar.org/CorpusID:106503892.
- COX, B. et al. Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles. *Environmental science & technology*, ACS Publications, v. 52, n. 8, p. 4989–4995, 2018.
- CUNHA, R. K. C. da; FERNANDES, B. V. R. Custeio do ciclo de vida: aplicação do custo total do consumidor na aquisição de um ativo imobilizado. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Custos*. Rio de Janeiro: ABCustos, 2007.
- DIAS, J. d. S. O uso do etanol como combustível no brasil vai completar um século! Agroenergia em Revista, ano 3, n. 5, p. 12-13, dez. 2012., 2012.
- DICIONÁRIO FINANCEIRO. *O que 'e' Valor Presente Líquido (VPL) e como calcular*. 2017. Disponível em: www.dicionariofinanceiro.com/valor-presente-liquido/. Acesso em: 05 de fev. de 2024.
- ELLRAM, L. M.; SIFERD, S. Total cost of ownership: a key concept in strategic cost management decisions. *Materials Engineering*, v. 19, n. 1, p. 55–84, 1998.
- ELZINGA, D. et al. Energy technology perspectives 2014: harnessing electricity's potential. *International Energy Agency (IEA), Paris, France*, 2014.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Matriz Energética e Elétrica*. 2023. Disponível em: www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica.
- ENERGY INSTITUTE. Statistical review of world energy: Electricity production by source, world. 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>.
- ESTADÃO. Suécia quer proibir carros a gasolina ou diesel na capital; entenda o porquê. 2023. Disponível em: www.estadao.com.br/economia/suecia-anuncia-plano-proibir-carros-gasolina-diesel-centro-estocolmo-nprei.

ESTENDER, A. C.; PITTA, T. d. T. M. O conceito do desenvolvimento sustentável. *Revista Terceiro Setor & Gestão de Anais-UNG-Ser*, v. 2, n. 1, p. 22–28, 2008.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Chegou a hora de mudar de velocidade no setor dos transportes. 2023. Disponível em: www.eea.europa.eu/pt/sinais-da-aea/sinais-2022/artigos/chegou-a-hora-de-mudar.

FARIA, R. et al. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 24, p. 271–287, 2013.

FARSI, M. et al. Conceptualising the impact of information asymmetry on through-life cost: case study of machine tools sector. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 16, p. 99–106, 2018.

FILHO, N. C.; KOPITKE, B. Investment analysis: Financial mathematics, economic engineering, decision making, business strategy. *São Paulo*, 2010.

FONSECA, R. C. Z. d. et al. O pvc e a sustentabilidade ambiental: marcos históricos e o caso amanco brasil. Universidade Federal de Alfenas, 2020.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS. *Consulta de carros e utilitarios pequenos*. 2024. Disponível em: <https://veiculos.fipe.org.br/>. Acesso em: 10 de jan. de 2024.

GILENO, L. A. et al. Avaliação do ciclo de vida da reciclagem de garrafas pet em contexto brasileiro: rotas b2b (bottle-to-bottle) e b2f (bottle-to-fiber). Universidade Federal de Alfenas, 2020.

GLENSOR, K.; B., M. R. M. Life-cycle assessment of brazilian transport biofuel and electrification pathways. *Sustainability*, v. 11, n. 22, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/22/6332>.

GUENTHER, P. R.; PADILHA, T. D. Estudo de viabilidade para substituição de veículos a combustão por veículos de tração elétrica em uma linha de ônibus de curitiba. *TCC (Engenharia elétrica)*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

GUINÉE, J. B. *Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards*. Leiden: Springer Science & Business Media, 2002. v. 7.

GUINÉE, J. B. et al. *Life cycle assessment: past, present, and future*. Leiden: ACS Publications, 2011.

- GÜNGÖR, A. G. C. et al. Optimization of sustainable urban transport vehicle fleets electrification. 2023.
- HALLACK. *Grupo de Economia da Energia Blog Infopetro*. 2014.
- IMPINNISI, P. R. Baterias para ve. In: *Conferência proferida no Seminário sobre Veículo Elétrico Híbrido editada em CD, Blue Tree Convention, São Paulo, SP, Brasil*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 27.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate change 2021: The physical science basis. *Agenda*, v. 6, n. 07, p. 280, 2021.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 14040: Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. 2006. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=P-0aMwAACAAJ>.
- KÄGI, T. et al. Session “midpoint, endpoint or single score for decision-making?” — setac europe 25th annual meeting, may 5th, 2015. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Springer, v. 21, p. 129–132, 2016.
- KOPITTKKE, H. B.; FILHO, N. C. Análise de investimentos. *São Paulo: Atlas*, 2010.
- KOVARSKY, P. *Etanol - Uma solução brasileira sim, e das boas*. 2020. Disponível em: www.editorabrasilenergia.com.br/etanol-uma-solucao-brasileira-sim-e-das-boas. Acesso em: 9 de jan. de 2024.
- KRÜGER, E. L. Uma abordagem sistêmica da atual crise ambiental. *Desenvolvimento e Meio ambiente*, v. 4, 2001.
- KYLILI, A.; SEDUIKYTE, L.; FOKAIDES, P. A. *Recycling of polyurethane foams: Life cycle analysis of polyurethane foam wastes*. *Plastics Design Library*: Elsevier, 2018. 97–113 p.
- LALAU, Y. et al. Energy analysis and life cycle assessment of a thermal energy storage unit involving conventional or recycled storage materials and devoted to industrial waste heat valorisation. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 330, p. 129950, 2022.
- LAMB, W. F. et al. Countries with sustained greenhouse gas emissions reductions: An analysis of trends and progress by sector. *Climate Policy*, Taylor & Francis, v. 22, n. 1, p. 1–17, 2022.

- MACAGNAN, A. M. Viabilidade econômica do carro próprio em relação ao uber. Universidade Federal de Santa Maria, 2018.
- MAGALHÃES, I.; SANTOS, E. O setor dos transportes e os objetivos do desenvolvimento sustentável da agenda 2030. In: *Congresso de Pesquisa e Ensina em Transporte*. Online: ANPET, 2021. v. 35, p. 231 – 242.
- MOTTA, W. H. Análise do ciclo de vida e logística reversa. *X SEGeT*, 2013.
- NEOCHARGE. Confirma alguns países que já prometem o fim dos carros a combustão. 2022. Disponível em: www.neocharge.com.br/blogs/post/fim-carros-combustao. Acesso em: 5 de jan. de 2024.
- NOGUEIRA, E. *Introdução à engenharia econômica*. São Carlos, São Paulo: EdUFSCar, 2017.
- NUNES, G. dos S. et al. Avaliação da capacidade preditiva de modelos arima e var-vec: o caso da demanda por energia elétrica no rio grande do sul. *Exacta*, v. 20, n. 2, p. 307–335, 2022.
- OFFER, G. et al. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy*, v. 38, n. 1, p. 24–29, 2010. ISSN 0301-4215.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Histórico da operação - geração de energia. 2024. Disponível em: www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 5 de jan. de 2024.
- PETROBRÁS. Óleo diesel - informações técnicas. 2023. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/oleo-diesel>. Acesso em: 05 de fev. de 2024.
- PIEKARSKI, C. M. et al. Aplicação da acv na matriz elétrica brasileira: Uma análise multi cenários em termos de mudança climática, qualidade de ecossistema, saúde humana e recursos. *Espacios*, v. 34, n. 4, p. 1–9, 2013.
- PIEKARSKI, C. M. et al. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. *Revista Gestão Industrial*, v. 8, n. 3, 2012.
- PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L.; RABASCO, E. *Microeconomia ed.* Rua Nelson Francisco, 26. São Paulo – SP, Brasil: Pearson Educación, 2006.

PIRMANA, V. et al. Economic and environmental impact of electric vehicles production in indonesia. *Clean Technologies and Environmental Policy*, Springer, p. 1–15, 2023.

PLUMER, B.; TABUCHI, H. *6 Automakers and 30 Countries Say They'll Phase Out Gasoline Car Sales*. 2021. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2021/11/09/climate/cars-zero-emissions-cop26.html>. Acesso em: 9 de jan. de 2024.

PRINS. *Four major cities move to ban diesel vehicles by 2025*. 2016. Disponível em: www.prinsautogas.com/en/news/four-major-cities-move-ban-diesel-vehicles-2025. Acesso em: 23 de dez. de 2023.

PRé Sustainability. *SimaPro*. 2019. Disponível em: <https://simapro.com/>.

PUCCINI, E. C. Matemática financeira e análise de investimentos. *Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração - UFSC*, 2011.

QUATRO RODAS. Quanto custa manter um renault kwid e-tech. 2023. Disponível em: www.quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/quanto-custa-manter-um-renault-kwid-e-tech-r-139-990. Acesso em: 23 de dez. de 2023.

RAÍZEN. Etanol: o que é e como é usado no brasil. 2022. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol#:~:text=%C3%89%20o%20famoso%20etanol%20comum,e%20o%20restante%20de%20%C3%A1gua>.

RENAULT. Versões e preços. 2024. Disponível em: www.renault.com.br/veiculos-de-passeio/kwid/versoes-e-precos. Acesso em: 23 de dez. de 2023.

RITCHIE, H. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? *Our World in Data*, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.

ROSS, S. A. et al. *Administração financeira*. Escola de Administração da UFRGS: AMGH Editora, 2015.

SAADE, M. R. et al. A avaliação do ciclo de vida–acv, e a etapa de avaliação de impactos ambientais: considerações sobre o uso de diferentes métodos e seus reflexos nos resultados finais. *Natureza on line*, v. 12, n. 3, p. 109–116, 2014.

SAKURAI, M. *Gerenciamento integrado de custos*. São Paulo: Atlas, 1997.

- SANTOS, G. S. A indústria automobilística e o meio ambiente: uma visão sustentável. *Anais do VII SIMPROD*, Departamento de Engenharia de Produção-Universidade Federal de Sergipe, 2015.
- SCHELTE, N. et al. Life cycle assessment on electric moped scooter sharing. *Sustainability*, MDPI, v. 13, n. 15, p. 8297, 2021.
- SECRETARIA DA RECEITA FEDERAL. Instrução normativa rfb nº 1700, de 14 de março de 2017. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2017.
- SEEG. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 - 2022. 2023.
- SOUSA, M. M. d. L. C. *Veículos elétricos: a rede de inovação da pesquisa e desenvolvimento no Brasil*. Tese (Doutorado) — UNICAMP, 2015.
- SOUTES, D. O. Custo total de propriedade (tco): É importante? para quem? *Ciências Sociais Aplicadas em Revista*, v. 7, n. 13, p. 83–105, 2007.
- Swiss Center for Life Cycle Inventories. *Ecoinvent*. 2019. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>.
- UNICA. *Indústria vê etanol como principal rota para descarbonização*. 2023. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/industria-ve-etanol-como-principal-rota-para-descarbonizacao/>. Acesso em: 9 de jan. de 2024.
- UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS - SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. p. 16301, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.
- VIA 3 AUTOMÓVEIS. *Noruega vai proibir venda de carros a gasolina e diesel em 2025*. 2016. Disponível em: www.via3.com.br/noruega-vai-proibir-venda-de-carros-a-gasolina-e-diesel-em-2025. Acesso em: 13 de jan. de 2024.
- VIANNA, J. et al. O papel do etanol na mitigação das emissões de poluentes no meio urbano. *II Jornada Luso-Brasileira de Ensino e Tecnologia em Engenharia-JBLE*, 2009.
- WELLS, P. Sustainable business models and the automotive industry: A commentary. *IIMB Management Review*, Elsevier, v. 25, n. 4, p. 228–239, 2013.

ZAPAY. Ipva 2024: o que você precisa saber. 2023. Disponível em: www.blog.usezapay.com.br/ipva/ipva-2024. Acesso em: 5 de jan. de 2024.