

mover fundep fundação de apoio da UFMG



do berço
ao portão

PEGADA DE CARBONO DE VEÍCULOS LEVES FABRICADOS NO BRASIL

Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil: Resultados e premissas do Projeto "Do Berço ao Portão"

FGV EAESP
CENTRO DE ESTUDOS
EM SUSTENTABILIDADE



UNICAMP



FEM

Expediente

REALIZAÇÃO



APOIO



PROJETO

**Do berço ao portão:
Pegada de Carbono de veículos leves fabricados no Brasil**

RELATÓRIO

Produto 3.4 – Relatório Técnico com os resultados do projeto “Do berço ao portão”

COORDENAÇÃO GERAL

Mario Prestes Monzoni Neto
Fernanda Cassab Carreira

COORDENAÇÃO EXECUTIVA

Juliana Ferreira Picoli
Guarany Ipê do Sol Osório

AUTORES

Juliana Ferreira Picoli
Lucas Cesilla de Souza
Tiago Zillio Soares
Letícia Missiatto Gavioli
Layla Nunes Lambiasi
Rafael Fernandes Mosquim
Paulo Sergio Pinheiro Lima
Guarany Ipê do Sol Osório

André Pereira de Carvalho
Luís Henrique Rigato Vasconcellos
Arnaldo César da Silva Walter
Carla Kazue Nakao Cavaliero
Joaquim Eugênio Abel Seabra
Mario Prestes Monzoni Neto

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

José Roosevelt Junior | Mediacts

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da “Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – FUNDEP, MOVER – Linha V, que financiou o projeto supracitado. Agradecemos também à equipe técnica do Projeto, aos bolsistas, ao Comitê Consultivo, às empresas parceiras e associações setoriais, pelas valiosas contribuições durante a elaboração deste documento.

Empresas parceiras: Becomex, Bosch, Braskem, Gerdau, General Motors, Honda, Jaguar Land Rover, Metalpó, Nissan, Prolind Alumínio, Stellantis, Toyota, Tupy, Usiminas, Volkswagen

Associações parceiras: ABAL, Abipeças/Sindipeças, ABIPLAST, ABIT, ABIVIDRO, ABTB, AEA, ANFAVEA, IABR, IQA, Rede ACV.

Bolsistas: Alissa Guttmann, Cecília Cerantola, Cecília Guizzo, Constance Land, Eugênia de Paula, Guilherme de Figueiredo Rodrigues, Diogo Tavano, Leonardo Pastre, Kim Sena, Luis Vasconcellos, Mariana Rosenstock, Marina Rossi, Pedro Podolsky Cantusio.

CITAR COMO

FGVces, FEM-UNICAMP. Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil: Resultados e premissas do Projeto “Do Berço ao Portão”. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas e Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, p. 139. 2026.

PARTICIPANTES



PROGRAMA PRIORITÁRIO - LINHA V:
**BIOCOMBUSTÍVEIS, SEGURANÇA
E PROPULSÃO VEICULAR**





Sumário

Expediente	2
1 Sobre este documento	11
2 Avaliação do ciclo de vida e a importância dos inventários de ciclo de vida	14
3 Definição de objetivo e escopo	18
3.1. Revisão Crítica de Terceira Parte	24
3.1.1 Equipe de Revisão Crítica	24
3.1.2 Escopo e Procedimentos da Revisão	24
3.1.3 Resultados da Revisão Crítica	25
3.2. Metodologia de cálculo	25
3.3. Principais limitações do estudo	27
4 Coleta de dados	29
4.1. Engajamento da cadeia automobilística e coleta de dados primários	29
4.2. Coleta de dados secundários e adaptação de inventários do ciclo de vida	32
5 Inventários consolidados de ciclo de vida para veículos leves	34
5.1. Inventários de ciclo de vida para a produção e montagem de veículos leves	34
5.1.1 Processo produtivo	34
5.1.2 Modelagem dos veículos no cenário base	35
5.1.3 Dados de nacionalização da produção dos veículos e componentes	41
5.2. Inventário de ciclo de vida da produção, processamento e transporte dos materiais	43
5.2.1 Aço	43
5.2.2 Alumínio	49
5.2.3 Polímeros	54
5.2.4 Borracha	59
5.2.5 Ferro fundido	59
5.2.6 Magnésio	59
5.2.7 Zinco	60
5.2.8 Níquel	60
5.2.9 Chumbo	60
5.2.10 Cobre	60
5.2.11 Vidro	60
5.2.12 Têxteis	61
5.2.13 Baterias	61
5.2.14 Outros metais especiais e outros compostos	62
5.2.15 Outros materiais	62
5.2.16 Outras informações relevantes: Logística e transporte dos materiais	62
5.3. Inventário de ciclo de vida da produção e transmissão da eletricidade brasileira	63

5.3.1	Modelagem da eletricidade brasileira no cenário base	64
5.3.2	Modelagem da eletricidade brasileira nos cenários de maior participação e menor participação de renováveis	65
5.4.	Avaliação da qualidade dos dados dos inventários de ciclo de vida	65
6	Fatores de emissão consolidados	69
7	Resultados e discussão	72
7.1.	Resultado geral por veículo	72
7.2.	Fases do ciclo de vida	74
7.3.	Análise de contribuição de materiais	75
7.4.	Análise de contribuição de sistemas	77
7.5.	Análise comparativa internacional	78
8	Simulação de cenários e análise de sensibilidade	82
8.1.	Cenário de rotas alternativas: nacionalização	82
8.2.	Cenário de rotas alternativas: materiais de menor intensidade de carbono	83
8.3.	Cenário de rotas alternativas: maximização de materiais reciclados	84
8.4.	Análise de sensibilidade: eletricidade	85
8.5.	Análise de sensibilidade: perdas de aço	87
8.6.	Outras análises de sensibilidade	87
8.7.	Verificação de consistência	91
8.8.	Verificação de incertezas	92
9	Considerações finais e recomendações	94
	Referências	97
	A) Anexo I – Estudo de caso: do berço à roda	101
	B) Anexo II – Lista de materiais dos veículos	108
	C) Anexo III – Veículos mais vendidos	113
	D) Anexo IV – Detalhamento da modelagem do aço	115
	E) Anexo V – Detalhamento dos fatores de emissão e requisitos da qualidade dos dados (Planilha Excel)	127
	F) Anexo VI - Modelo de massas	128
	G) Anexo VII – Formulários de coleta de dados enviados (Planilha Excel)	135
	H) Anexo VIII – Revisão Crítica	136

Lista de figuras

Figura 1.1 –	Produtos elaborados pelo projeto	12
Figura 2.1 –	Principais etapas do ciclo de vida de um produto	14
Figura 2.2 –	Estrutura da ACV: principais fases	15
Figura 3.1 –	Ciclo de vida de um veículo leve e escopo do projeto “Do berço ao portão”	19
Figura 3.2 –	Fronteira do sistema de produto avaliado pelo projeto	20
Figura 3.3 –	Veículos simulados pelo projeto “Do berço ao portão” para o cálculo da Pegada de Carbono	21
Figura 3.4 –	Fluxo de estruturação dos inventários para o cálculo da PC dos veículos	25
Figura 4.1 –	Atores envolvidos no projeto	30
Figura 4.2 –	Processo de criação e adaptação de inventários do ciclo de vida	32
Figura 4.3 –	Árvore de decisão adotada no projeto para adaptações de inventários	33
Figura 5.1 –	Esquemático do simulador de massas para criação dos 12 veículos do projeto	36
Figura 5.2 –	Relação entre as tabelas de inventário de ciclo de vida dos veículos avaliados pelo projeto	37
Figura 5.3 –	Principais rotas de produção de aço	44
Figura 5.4 –	Configuração dos processamentos utilizados pelo projeto	46
Figura 5.5 –	Produção mundial de alumínio primário em 2023	49
Figura 5.6 –	Processo produtivo de produtos semimanufaturados de alumínio	50
Figura 5.7 –	Produção de polipropileno e polietileno	57
Figura 5.8 –	Perdas no setor elétrico brasileiro	64
Figura 7.1 –	Pegada de carbono do Berço ao Portão dos doze veículos do projeto	72
Figura 7.2 –	Pegada de carbono dos doze veículos do projeto por massa	73
Figura 7.3 –	Contribuição por etapa do ciclo de vida para a pegada de carbono dos doze veículos do projeto	74
Figura 7.4 –	Pegada de carbono do Berço ao Portão dos doze veículos do projeto por etapa do ciclo de vida	75
Figura 7.5 –	Pegada de carbono dos doze veículos do projeto por material	76
Figura 7.6 –	Contribuição relativa dos materiais para a pegada de carbono dos doze veículos do projeto	76
Figura 7.7 –	Contribuição dos sistemas dos veículos para a pegada de carbono, do berço- ao- portão	77
Figura 7.8 –	Contribuição dos sistemas dos veículos para a pegada de carbono, do berço-ao-portão	78
Figura 7.9 –	Comparação internacional da pegada de carbono do veículo ICEV-SUV em tCO ₂ eq/veículo	79
Figura 7.10 –	Comparação internacional da pegada de carbono do veículo BEV-SUV em tCO ₂ eq/veículo	80
Figura 7.11 –	Contribuição de impacto média dos materiais para veículos leves	80
Figura 7.12 –	Contribuição de impacto média dos componentes dos veículos leves mapeados	81
Figura 8.1 –	Pegada de carbono dos veículos SUV para diferentes cenários de nacionalização	82
Figura 8.2 –	Resultados da pegada de carbono considerando cenários de materiais de menor intensidade de carbono no Brasil	84
Figura 8.3 –	Resultados da pegada de carbono considerando cenários de maximização de reciclados no Brasil	85
Figura 8.4 –	Variação da pegada de carbono do veículo referentes à análise de sensibilidade da eletricidade	86

Figura 8.5 –	Varição da pegada de carbono para o cenário de perdas do aço	87
Figura 8.6 –	Análise de sensibilidade para a pegada de carbono veículo ICEV-SUV	89
Figura 8.7 –	Análise de sensibilidade para a pegada de carbono veículo HEV-SUV	90
Figura 8.8 –	Análise de sensibilidade para a pegada de carbono veículo BEV-sedan	90
Figura D.1 –	Esquema de reaproveitamento de gases de processo em usina siderúrgica integrada	116
Figura F.1 –	Equação de estimativa de massa dos sistemas	129
Figura F.2 –	Parâmetros de estimativa de massa	130
Figura F.3 –	Comparação entre o Peso Simulado e o Peso Real de 26 Veículos Representativos	132

Lista de tabelas

Tabela 2.1 –	Componentes do critério de representatividade dos dados do ICV	16
Tabela 3.1 –	Análise de cenários e sensibilidades simulados pelo projeto “Do berço ao portão”	22
Tabela 3.2 –	Principais contornos metodológicos empregados neste estudo	22
Tabela 4.1 –	Principais informações requeridas por meios dos formulários de coleta de dados primários para os diferentes segmentos da cadeia automobilística	31
Tabela 5.1 –	Caracterização dos veículos considerados pelo projeto	38
Tabela 5.2 –	Distribuição de peso dos veículos avaliados pelo projeto, por sistemas (kg)	38
Tabela 5.3 –	Inventário de ciclo de vida dos veículos avaliados pelo projeto	39
Tabela 5.4 –	Inventário de ciclo de vida das etapas fabris de montagem de 1 veículo leve no Brasil	40
Tabela 5.5 –	Inventário de ciclo de vida das etapas fabris de montagem de 1 veículo leve importado	40
Tabela 5.6 –	Percentual de importação de materiais e processos por tipo de veículo considerados no cenário base do estudo	41
Tabela 5.7 –	Simulação da manufatura do aço – principais parâmetros	46
Tabela 5.8 –	Parâmetros da modelagem adaptados para o contexto brasileiro	48
Tabela 5.9 –	Configuração do aço de menor intensidade de carbono para o cenário 2035	49
Tabela 5.10 –	Fatores de emissão do aço nos cenários avaliados pelo projeto, em kg CO ₂ e/kg de aço	49
Tabela 5.11 –	Considerações do mix de eletricidade para a produção do alumínio primário em 2023	51
Tabela 5.12 –	Distribuição percentual das fontes energéticas na produção do alumínio primário	51
Tabela 5.13 –	Dados utilizados para o cálculo do valor percentual de alumínio reciclado adotado	52
Tabela 5.14 –	Principais Inventários de Ciclo de Vida adaptados para o contexto brasileiro	52
Tabela 5.15 –	Parâmetros adaptados para o contexto brasileiro	53
Tabela 5.16 –	Parâmetros considerados nos cenários avaliados pelo projeto	53
Tabela 5.17 –	Composição do plástico médio dos veículos leves	54
Tabela 5.18 –	Inventários de processamento dos polímeros	55
Tabela 5.19 –	Lista de polímeros e adaptações	56
Tabela 5.20 –	ICV da produção de etileno e propileno a partir do craqueamento de nafta	58
Tabela 5.21 –	Estimativa de composição dos metais especiais para diferentes motorizações	62
Tabela 5.22 –	Distâncias e inventários utilizados para transporte dos materiais secundários	63
Tabela 5.23 –	Geração total de eletricidade no Brasil entre 2019 e 2023, em GWh	63
Tabela 5.24 –	Fator de emissão ponderado para a geração de eletricidade brasileira no cenário base	64
Tabela 5.25 –	Composição da matriz elétrica brasileira para diferentes cenários	65
Tabela 5.26 –	Matriz Pedigree utilizada para avaliação da qualidade dos dados do projeto	66
Tabela 5.27 –	Resultados dos indicadores gerais de qualidade dos dados dos principais inventários de ciclo de vida utilizados no projeto	67
Tabela 6.1 –	Fatores de emissão estimados pelo projeto, em kg CO ₂ e por fluxo (kg ou unidade de produto)	69
Tabela 7.1 –	Pegada de carbono, em kg CO ₂ e por parcela (fóssil, biogênico e MUT)	73
Tabela 7.2 –	Emissões dos principais GEE, em kg de GEE	74

Tabela 7.3 –	Pegada de carbono para os 12 veículos do projeto de acordo com a nacionalização dos materiais	79
Tabela 8.1 –	Composição da matriz elétrica brasileira consideradas na análise de sensibilidade	86
Tabela 8.2 –	Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do ICEV-SUV	88
Tabela 8.3 –	Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do HEV-SUV	89
Tabela 8.4 –	Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do BEV-sedan	89
Figura A.1 –	Fronteiras do sistema do estudo de caso, do berço-à-roda	102
Tabela A.2 –	Parâmetros utilizados para o cálculo das emissões de GEE, do berço-à-roda	103
Tabela A.3 –	Estudo de caso da pegada de carbono dos veículos analisados pelo projeto, do berço à roda	104
Tabela A.4 –	Estudo de caso da pegada de carbono dos veículos analisados pelo projeto, do berço à roda.	105
Tabela A.5 –	Ponto de break-even e emissões cumulativas dos veículos do segmento SUV, em relação ao veículo ICEV Flex-combinado	105
Tabela A.6 –	Ponto de break-even e emissões cumulativas dos veículos do segmento SUV	106
Tabela B.1 –	Composição de materiais por sistemas	108
Tabela B.2 –	Relação de materiais do IMDs e datasets utilizados pelo projeto	110
Tabela C.1 –	Informações dos veículos leves mais vendidos em 2023	113
Tabela D.1 –	Modelo de inventário utilizado	115
Tabela D.2 –	Inventário do processo de autoprodução de eletricidade	116
Tabela D.3 –	Inventário do processo de produção do coque	117
Tabela D.4 –	Inventário do processo do Alto Forno a carvão mineral	118
Tabela D.5 –	Inventário do processo do Alto forno a carvão vegetal	118
Tabela D.6 –	Inventário do processo de produção de vapor	119
Tabela D.7 –	Inventário do processo de produção do nitrogênio	119
Tabela D.8 –	Inventário do processo de produção do oxigênio	119
Tabela D.9 –	Inventário do processo de produção de cal virgem	120
Tabela D.10 –	Inventário do processo de produção de cal dolomítica	120
Tabela D.11 –	Inventário do processo de produção de Sínter	120
Tabela D.12 –	Inventário do processo de produção de Pellet	121
Tabela D.13 –	Inventário do processo EAF	121
Tabela D.14 –	Inventário do processo de Aciaria (BOF)	122
Tabela D.15 –	Inventário do processo de conformação contínua	122
Tabela D.16 –	Inventário do processo de conformação em aço plano - Hot Rolling	123
Tabela D.17 –	Inventário do processo de conformação em aço plano - Cold Rolling	123
Tabela D.18 –	Inventário do processo de conformação em aço longo	123
Tabela D.19 –	Inventário do processo de tratamento térmico	123
Tabela D.20 –	Inventário do processo de zincagem por imersão	124
Tabela D.21 –	Inventário do processo de zincagem eletrolítica	124
Tabela D.22 –	Inventário do processo de fundição/extrusão	125
Tabela D.23 –	Inventário do processo de usinagem	126
Tabela D.24 –	Consumo de matérias-primas do anuário estatístico 2024 do Instituto Aço Brasil	125
Tabela F.1 –	Grupos de sistemas do GREET	129

Lista de siglas e abreviações

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AEA	Associação Brasileira de Engenharia Automotiva
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
BEV	Veículo Elétrico a Bateria
BF-BOF	Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace
CO₂eq.	Dióxido de carbono equivalente
DRI	Direct Reduced Iron
EAF	Electric Arc Furnace
EOF	Energy Optimizing Furnace
EV	Veículos Elétricos
FGV	Fundação Getulio Vargas
FGVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HEV	Veículos Elétricos Híbridos
IABR	Instituto Aço Brasil
ICEV	Veículos com Motor de Combustão Interna
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ISO	Organização Internacional de Padronização
LFP	Fosfato de ferro-lítio
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços
MOVER	Programa Nacional de Mobilidade Verde e Inovação
NCM	Óxido de lítio-níquel-magnésio-cobalto
ONS	Operador Nacional do Sistema
PA	Poliamida
PC	Pegada de Carbono
PE	Polietileno
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido Plug-in
PP	Polipropileno
PUR	Poliuretano
SUV	Veículo Utilitário Esportivo
UF	Unidade Funcional
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

1. Sobre este documento

O projeto “Do berço ao portão”: Pegada de Carbono de veículos leves fabricados no Brasil” faz parte da Linha V do programa Mover e é coordenado pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas (FGVces – FGV EAESP) em parceria com o Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (FEM – UNICAMP). Saiba mais em: <https://mover.fundep.ufmg.br/berco-ao-portao/>

Este relatório técnico-científico apresenta os resultados finais do estudo da Pegada de Carbono da produção de veículos leves analisadas pelo projeto “Do berço ao portão” dentro do escopo proposto. O objetivo central do projeto esteve em calcular as emissões de GEE associadas à produção de veículos leves no Brasil, desde a extração da matéria-prima até sua fabricação nas montadoras, ou seja, do Berço ao Portão da fábrica.

Nesse sentido, o estudo se enquadra como uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de categoria única – mudança do clima – seguindo os requisitos das normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009. A adoção das normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e 14044:2009 como referências metodológicas principais respeita as diretrizes do edital de pesquisa que originou o projeto. Além disso, as referidas normas fornecem um arcabouço metodológico mais abrangente para as diferentes etapas de desenvolvimento do projeto, como a definição de escopo, a modelagem, a elaboração dos inventários e a interpretação de resultados, possibilitando estudos futuros que incluam a ampliação de escopo e/ou outras categorias de impacto ambiental relevantes.

Embora a norma ABNT NBR ISO 14067:2015 estabeleça requisitos específicos para a quantificação e comunicação de estudos de pegada de carbono de produto – sendo frequentemente utilizada como referência em iniciativas de rotulagem ambiental, verificação e certificação –, esta é baseada nas normas ISO 14040 e 14044, de forma que o estudo não deixa de contemplar sua aplicação. Adicionalmente, aspectos da ISO 14067 foram incorporados em análises pontuais, especialmente nas fases de elaboração de ICV e AICV, como no tratamento da eletricidade, na apresentação dos resultados de emissões discriminados por tipos de gases do efeito estufa e na escolha do método de avaliação de impacto.

Ressalta-se que neste estudo, o termo “pegada de carbono” é utilizado para se referir ao indicador que representa a soma das emissões de gases de efeito estufa ao longo das etapas do ciclo de vida consideradas, conforme as diretrizes das normas ISO 14040 e 14044 adotadas, não representando, portanto, referência direta a estudo conduzido estritamente sob a ISO 14067.

A partir desta análise, foi possível realizar o mapeamento das principais fontes de emissão e oportunidades de redução ao longo da cadeia de suprimentos automotiva, além de identificar diferenças em relação à produção de veículos em outros países (benchmarking internacional). O projeto tem duração prevista de 36 meses, com finalização em junho de 2026. Os produtos entregues no âmbito do projeto são ilustrados na **Figura 1.1**.

→| **Figura 1.1 – Produtos elaborados pelo projeto**



Fonte: Elaboração própria.

Conforme previsto no Plano de Trabalho, na Etapa 3 - Estudo da pegada de carbono (PC) de veículos leves fabricados no Brasil, o projeto contempla a análise dos resultados e simulações de rotas alternativas dentro do escopo berço-ao-portão.

Nesse sentido, as informações apresentadas neste relatório oferecem suporte ao rastreamento das emissões de GEE associadas a todas as atividades significativas relacionadas ao ciclo de vida de veículos leves, tipo automóveis, fabricados no território nacional, desde a extração de matérias-primas até a montagem. Além disso, devem alimentar a ferramenta setorial de pegada de carbono a ser disponibilizada ao setor automobilístico brasileiro e demais atores envolvidos. Dessa forma, os resultados deste relatório compõem a entrega final quantitativa do projeto, não sendo previstos ajustes adicionais até seu encerramento em junho de 2026. Todas as atividades envolvendo a modelagem dos dados foram completadas antes da consolidação do conteúdo apresentado, incluindo: coleta de dados primários, validação de inventários, revisão metodológica e refinamento de cenários. Em relação à ferramenta setorial, estão sendo conduzidos testes para a consolidação de sua interface, de forma que as informações que irão alimentar seu modelo de cálculo serão provenientes deste relatório.

Os resultados aqui apresentados têm potencial para contribuir com a regulamentação do Programa Mover, trazendo desdobramentos relevantes para a indústria automobilística nacional. Considerando o escopo técnico das entregas previstas pelo projeto "Do berço ao portão", a Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA) manifestou a intenção de utilizar os fatores de emissão aqui estimados como referência para a definição dos parâmetros e metodologias de cálculo da pegada de carbono dos veículos no âmbito do Programa Mover.

Essa metodologia está sendo desenvolvida pela AEA a pedi-

do do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), conforme estabelecido no Ofício SEI nº 3219/2024/MDIC, de 14 de maio de 2024. A adoção dos resultados do projeto como insumo técnico reforça sua relevância estratégica e seu potencial contribuição para apoiar a formulação de políticas públicas baseadas em evidências.

Apesar de sua importância estratégica no âmbito das políticas públicas e aderências aos objetivos propostos, os resultados do projeto e, principalmente, os fatores de emissão obtidos refletem as premissas, a disponibilidade de dados e as escolhas metodológicas adotadas, configurando-se, assim, como um recorte técnico específico – não devendo ser interpretados como valores gerais ou genéricos representativos de todo e qualquer veículo leve. Nesse sentido, ainda que os resultados sejam estimativas importantes para a definição de estratégias regulatórias e ações de descarbonização, estes não devem ser empregados para uso como referências de valores universais, normativas ou absolutas. Além disso, o escopo do projeto – definido pela fronteira berço-ao-portão e com foco em uma única categoria de impacto ambiental, a de mudança do clima – não permite a ampla consideração de todos os aspectos ambientais influenciando o ciclo de vida de veículos leves, que podem incluir outras categorias não consideradas, como uso de recursos, toxicidade, acidificação e eutrofização. Assim, os resultados do estudo não devem ser entendidos em relação ao desempenho ambiental global de veículos leves, mas somente com respeito às emissões de GEE associadas à sua produção. Essa delimitação, segundo a ABNT NBR ISO 14040 e 14044, se constituiu como uma limitação inerente à estudos de ACV de categoria única.

Assim, este relatório apresenta os principais resultados de Pegada de Carbono obtidos para os produtos estudados, bem como os Inventários de Ciclo de Vida elaborados no âmbito do projeto "Do Berço ao Portão". Os capítulos que compõem este

documento apresentam a abordagem metodológica e os fatores de emissão adotados a partir da elaboração de inventários do ciclo de vida, além dos resultados modelados para a pegada de carbono de veículos leves, sendo descritos a seguir:

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), abordando sua relevância no contexto da pegada de carbono e os principais conceitos que orientam a construção dos inventários. Já o Capítulo 3 define o objetivo e o escopo do estudo, detalhando os limites do sistema, a unidade funcional adotada e os diferentes cenários modelados.

No Capítulo 4, são descritas as estratégias adotadas para a coleta de dados primários e secundários, incluindo o processo de engajamento com empresas da cadeia automobilística e as principais dificuldades enfrentadas. O Capítulo

5 reúne os resultados dos inventários adaptados, divididos entre a produção dos materiais e etapas fabris de montagem dos veículos, a produção e transporte de materiais, e a geração de eletricidade, enquanto no Capítulo 6 são apresentados os principais fatores de emissão obtidos pelo projeto, sintetizando os valores adotados a partir da adaptação dos inventários.

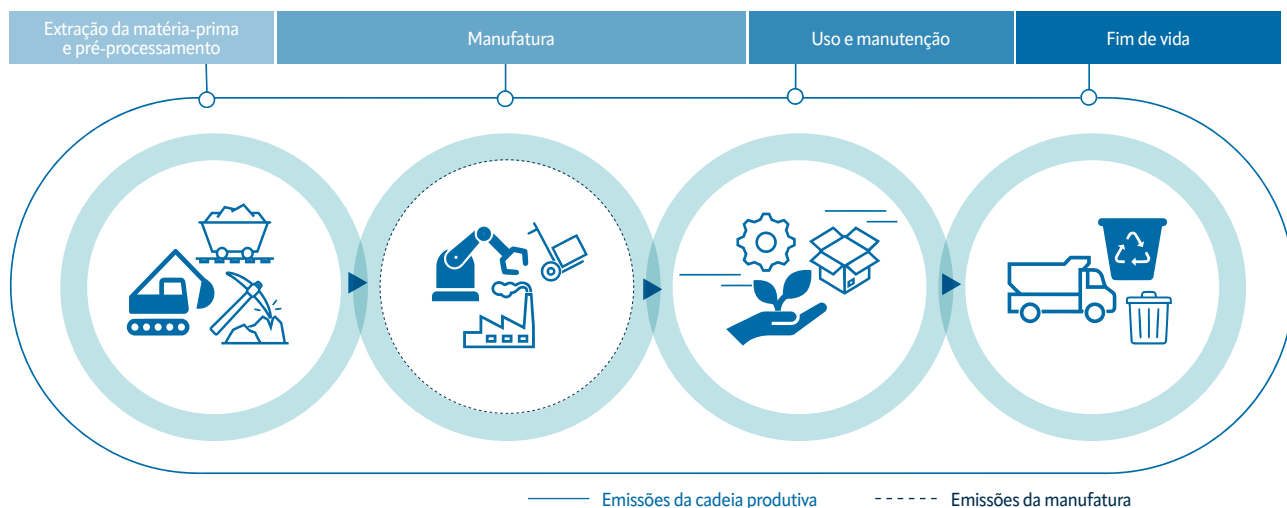
O Capítulo 7 apresenta os resultados e discussão do projeto, trazendo análises da pegada de carbono dos 12 veículos avaliados pelo projeto, bem como a contribuição de materiais, sistemas e a análise comparativa internacional. Já o Capítulo 8 discute a simulação de cenários e análise de sensibilidade, trazendo importantes recomendações para a descarbonização do setor automotivo. Por fim, o Capítulo 9 traz as considerações finais do estudo e encerra este relatório.

2. Avaliação do ciclo de vida e a importância dos inventários de ciclo de vida

No atual contexto global de busca por padrões de produção mais limpa, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) surge como uma importante ferramenta analítica de mapeamento e quantificação dos impactos ambientais associados a um determinado produto ou serviço, abrangendo etapas que vão desde a extração de matérias-primas necessárias à produção, até a disposição final, uma vez esgotadas as possibilidades

de uso e manutenção. A **Figura 2.1** apresenta as principais etapas que compõem o ciclo de vida de um produto. Assim, por meio do cálculo extensivo e sistemático de impactos ambientais – expressos por meio de categorias de impactos e indicadores de categorias – a ACV orienta para potenciais melhorias de processo, apoiando decisões estratégicas no âmbito da sustentabilidade.

→| **Figura 2.1 – Principais etapas do ciclo de vida de um produto**



Fonte: Adaptado de (ABNT, 2009a, 2009b) e (HYUNDAI, 2022).

A realização de estudos de ACV é orientada por padrões internacionais – adaptadas e implementadas no Brasil pela ABNT –, como a ABNT NBR ISO 14040 e 14044, que delimitam terminologias e conceitos, estabelecendo uma estrutura com requisitos claros para a condução de uma ACV e garantindo, em parte, consistência, transparência e comparabilidade entre resultados. Por

meio de uma estrutura composta por quatro fases, a abordagem da ACV, apresentadas na Figura 2.2, inclui: 1) a definição de objetivo e escopo; 2) a elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV); 3) a condução da Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV); e 4) a interpretação dos resultados, que ocorre de forma transversal à realização das etapas anteriores (ABNT, 2009a, 2009b, 2015).

→| **Figura 2.2 – Estrutura da ACV: principais fases**



Fonte: Adaptado de ABNT (2014a, 2014b) e HYUNDAI (2022).

Na primeira fase de uma ACV, que envolve a definição do objetivo e escopo do estudo, são estabelecidos elementos conceituais e metodológicos essenciais para a avaliação dos impactos de ciclo de vida. A definição do objetivo dentro de um estudo de ACV, consiste em definir alguns conceitos essenciais para fundamentar a definição do escopo e as próximas fases. Segundo a norma ABNT NBR ISO 14044, define-se o objetivo ao se especificar: 1) qual a aplicação pretendida com a análise; 2) quais as razões para a realização do estudo, nomeando os fatores de estímulo; 3) qual o público-alvo, ou seja, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo; e por fim, 4) se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

Ao se definir o escopo do estudo, devem ser considerados, dentre outros itens, o sistema de produto a ser estudado, as funções do sistema, a unidade funcional e a fronteira do sistema. O sistema de produto é composto pelo conjunto de processos e fluxos que representam o ciclo de vida do produto. O produto, entendido como qualquer bem ou serviço analisado, deve ter uma função claramente estabelecida — ou seja, que visa atender a uma necessidade específica identificada. Para tornar a análise mensurável e comparável, a unidade funcional quantifica a função do produto em termos de características de desempenho, servindo como base de referência para todas as entradas e saídas do sistema. A partir disso, determina-se o fluxo de referência, que corresponde à quantidade necessária do produto para cumprir a função descrita pela unidade funcional. Por fim, as fronteiras do sistema delimitam quais

processos e fluxos serão incluídos ou excluídos da análise, em conformidade com os objetivos do estudo e a relevância identificada. Assim, esses conceitos estruturam a ACV, garantindo a consistência dos resultados.

Definido o objetivo e o escopo da ACV, a fase seguinte consiste na elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), caracterizada pela coleta de dados e informações pertinentes aos processos que compõem o sistema de produto e subsequente quantificação de todas as entradas e saídas mapeadas. Nesse contexto, o ICV deve refletir de forma acurada a realidade representada pelas fronteiras do sistema, oferecendo uma base de dados detalhada e transparente, além de alinhada com o objetivo e escopo do estudo. Assim, cada matéria-prima que adentra um processo de produção, por exemplo, terá um inventário de ciclo de vida associado, que detalha, por sua vez, todos os insumos (energia, materiais), produtos (coprodutos, resíduos) e emissões (para o solo, água e ar), além de outros aspectos ambientais, implicados na sua aquisição e pré-processamento. O mesmo deverá ser levantado para todos os processos que fazem parte das demais etapas do ciclo de vida de um produto, tendo cada um seu inventário correspondente. Dessa forma, os resultados da ACV estarão diretamente conectados à qualidade do ICV.

Apesar de sua relevância, as normas mencionadas não detalham procedimentos específicos, incluindo aqueles relacionados ao formato e procedência das bases de dados, de forma a preservar a flexibilidade do profissional em cada contexto. Não

obstante, a importância da autonomia quanto às especificidades de um estudo, a complexidade da ACV, em conjunto com a grande variabilidade existente na qualidade e disponibilidade de informações, pode implicar em diferenças importantes entre estudos similares. Em vista disso, é recomendado que a estruturação dos dados de um ICV deve observar quatro critérios centrais: representatividade, completude, precisão e adequação (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020).

A representatividade, assim como a adequação, está relacionada à capacidade dos dados e, portanto, do ICV, de reproduzir de maneira fiel os impactos associados ao sistema de produto modelado (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020). Em termos de representatividade, o ICV deve refletir com precisão

aspectos tecnológicos, geográficos e temporais pertinentes à análise, simulando sua realidade física, descritos na **Tabela 2.1**. Por outro lado, a adequação diz respeito especificamente ao quanto o conjunto de dados empregado corresponde às verdadeiras características do processo sendo representado. Adicionalmente, o critério de completude pressupõe a inclusão de todos os fluxos relevantes para o sistema de produto, justificando eventuais exclusões, enquanto a precisão do ICV evidencia a confiabilidade das informações levantadas, indicando fatores como variabilidade estatística e fontes de incerteza (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020). A partir disso, dados de qualidade estarão principalmente relacionados à representatividade do ICV, isto é, o quanto ele de fato retrata o que ocorre no ciclo de vida do produto estudado.

Tabela 2.1 – Componentes do critério de representatividade dos dados do ICV

Tecnológica	Representatividade das características tecnológicas e técnicas apresentadas no inventário, indicando com precisão como uma tecnologia é utilizada e operada, por exemplo, no que se refere às diferentes rotas para a produção de uma matéria-prima.
Geográfica	Representatividade do escopo geográfico adotado, de forma a refletir as principais características do local e dos fatores relevantes nesse contexto, como matriz energética nacional e requisitos legais específicos.
Temporal	Representatividade do período considerado para a coleta de dados, estando conectada à representatividade tecnológica (que pode mudar ao longo do tempo), de forma que as informações levantadas devem estar de acordo com as características técnicas e operacionais reproduzidas.

Fonte: Elaborado com base em (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020).

Para tanto, dados aderentes à realidade modelada são essenciais, bem como a correta caracterização dos processos elementares que compõem o sistema de produto. Nesse sentido, observando os critérios de qualidade discutidos anteriormente, duas categorias de dados são consideradas para a classificação das informações inseridas no ICV. Dados primários são aqueles oriundos de medições ou registros do processo produtivo, coletados a partir do contato direto com uma realidade específica. Por outro lado, dados secundários se referem às informações obtidas por meio de fontes externas consolidadas, como bases de dados – como oecoinvent – literatura científica ou inventários públicos (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020). A possibilidade de incluir dados primários confere maior robustez para a ACV, uma vez que dados secundários se caracterizam por serem mais genéricos, representando, em geral, valores médios e menos detalhados.

Dessa forma, quanto maior a disponibilidade de dados primários, maior a probabilidade de a ACV representar a realidade com precisão. No contexto da formulação de políticas públicas, o emprego de resultados de estudos de ACV pode influenciar aspectos de competitividade nacional, sendo necessário que tais resultados reflitam a conjuntura do país de forma adequada. Assim, os tipos de dados a serem levantados incluem entradas e saídas de inventário, informações técnicas

sobre os sistemas e processos modelados, valores de mercado, entre outros, devendo estar regionalizados para o sistema de produto em análise.

A etapa de coleta de dados é a de maior demanda dentro da ACV, com diferentes autores estimando que entre 70 e 80% do tempo e dos recursos são consumidos nesta fase (MIAH, JAMAL HUSSAIN; KOH, LENNY; STONE, DAVID; SWEET, 2018). Apesar disso, lacunas de informações de ciclo de vida permanecem como um dos maiores desafios no campo da ACV (HELLWEG, STEFANIE; MILÀ I CANALS, 2014). De fato, a obtenção de dados primários pode implicar em diversas dificuldades operacionais e barreiras organizacionais (REBITZER, GERALD; EKVALL, TOMAS; FRISCHKNECHT, ROLF; HUNKELER, DANIEL; NORRIS, GREGORY; RYDBERG, TOMAS; SCHMIDT, WOLF-PETER; SUH, SANGWON; WEIDEMA, BO; PENNINGTON, 2014).

Como a ACV normalmente envolve um número elevado de processos, muitas vezes é necessário um período de aprendizado e alinhamento técnico prévio. Além disso, frequentemente deve ser feito contato com diferentes organizações, que, por sua vez, apresentam departamentos responsáveis distintos. Outros desafios incluem a uniformidade dos dados e padronização de nomenclatura, o que irá garantir a coerência

e a comparabilidade dos resultados (REBITZER, GERALD; EK-VALL, TOMAS; FRISCHKNECHT, ROLF; HUNKELER, DANIEL; NORRIS, GREGORY; RYDBERG, TOMAS; SCHMIDT, WOLF-PETER; SUH, SANGWON; WEIDEMA, BO; PENNINGTON, 2014). Adicionalmente, dados primários podem, eventualmente, envolver informações sensíveis de processos produtivos específicos, resultando em resistência para o compartilhamento. Esses fatores tornam o processo de coleta de dados primários trabalhoso e, muitas vezes, limitado pela disponibilidade de informações consistentes e acessíveis.

Como exemplo, o relatório “Panorama da pegada de carbono de veículos leves: Resultados do estado da arte”, entregue em abril de 2024 no âmbito do projeto “Do berço ao portão”, mostrou que o uso de dados em estudos de ACV ainda enfrenta desafios significativos, especialmente no contexto brasileiro. A escassez de dados primários específicos e transparentes sobre a etapa de produção de veículos e de baterias compromete a representatividade dos inventários e limita a confiabilidade dos resultados. A maior parte dos estudos ainda dependem de dados secundários de bases internacionais – como os do GREET ou ecoinvent –, que nem sempre refletem as particularidades da matriz energética, dos processos industriais ou dos materiais utilizados no Brasil (FGVCS, 2024).

Por fim, as últimas fases da ACV incluem a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e a interpretação dos resultados. A AICV estuda a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto por meio de categorias de impactos e indicadores de categorias, por exemplo mudança do clima e dióxido de carbono equivalentes (CO₂ eq.) ou escassez hídrica e metros cúbicos equivalentes (m³ eq.). Quando apenas a categoria de impacto ambiental Mudança do Clima é analisada na ACV, a denominação para os resultados de emissões de GEE a serem obtidos é Pegada de Carbono (PC). O estudo da Pegada de Carbono contribui para a melhor gestão dos processos produtivos, direcionando para ações de redução das emissões de GEE e, conseqüentemente, mitigação dos impactos associados à mudança do clima. Por esse motivo, a Pegada de Carbono enquanto ferramenta de gestão de emissões é amplamente difundida no setor industrial, sendo empregada também na formulação de políticas públicas.

A interpretação da ACV é a consideração e análise de todas as constatações obtidas no inventário e na avaliação de impacto. Compete a essa fase o fornecimento de resultados consistentes com o objetivo e o escopo já definidos, chegando a conclusões e prevendo possíveis recomendações.

3. Definição de objetivo e escopo

O objetivo do estudo de Avaliação de Ciclo de Vida no âmbito do projeto “Do berço ao portão” foi quantificar as emissões de GEE associadas à produção de veículos leves fabricados no Brasil, considerando todas as atividades relevantes dentro da fronteira adotada, desde a extração das matérias-primas até a montagem final nas montadoras. Adotando uma abordagem do berço-ao-portão, o estudo concentrou-se exclusivamente nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas até a fase de produção, não abrangendo as etapas de uso, fim de vida ou a queima de combustíveis/electricidade durante a operação dos veículos.

Além disso, o projeto também teve como objetivo investigar a tendência de comportamento das emissões de GEE em função de uma maior nacionalização da fabricação de componentes e materiais, de forma a investigar o potencial da produção nacional em relação ao contexto global. Com isso, os resultados do estudo pretendem contrapor diferentes realidades produtivas, revelando contrastes e potencialidades. Apesar de seus elementos comparativos, a análise não deve embasar generalizações para além das afirmações estabelecidas neste relatório, dado que os resultados refletem escolhas metodológicas próprias e não se aplicam diretamente a conjunturas distintas.

É importante ressaltar ainda que a escolha pela fronteira berço-ao-portão e a análise comparativa com a produção internacional foram estabelecidas pelas diretrizes do edital de pesquisa que originou o projeto, sendo assim recortes próprios do foco científico estabelecido.

A partir deste recorte, potenciais aplicações incluem: identificação de oportunidades para a redução das emissões de GEE ao longo da cadeia de suprimentos automotiva e integração da pegada de carbono enquanto estratégia para a descarbonização do setor automotivo, comparação entre o desempenho de diferentes materiais e avaliação de alternativas tecnológicas,

apoio à formulação de políticas públicas por meio de subsídio técnico e avaliação das emissões associadas a diferentes veículos. Além destas, aplicações específicas podem abranger: apoio técnico à regulamentação do Programa Mover, elaboração de ferramenta setorial e estabelecimento de referências técnicas em âmbito nacional para o cálculo da pegada de carbono da produção de veículos leves do berço ao portão da fábrica.

Nesse sentido, este relatório técnico-científico pode ser útil a profissionais que buscam uma melhor compreensão das emissões de GEE ao longo das etapas de fabricação de veículos, especialmente no âmbito de estudos de ACV e pegada de carbono, com foco em veículos leves. Assim, o público-alvo são pesquisadores, acadêmicos, profissionais da indústria automotiva, profissionais envolvidos em tomadas de decisão tanto no setor público quanto privado e demais interessados, que encontrarão neste relatório informações que poderão ser utilizadas para orientar pesquisas futuras, práticas empresariais sustentáveis e iniciativas governamentais.

Diante do apresentado, ressalta-se que o estudo não tem por objetivo que seus resultados sejam utilizados para afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente, principalmente em relação a potencial superioridade ambiental de diferentes motorizações, segmentos de veículos ou condições produtivas específicas. Por conta da variação na disponibilidade e qualidade de dados, não foi possível assumir premissas equivalentes entre os 12 tipos de veículos analisados, ainda que os resultados apontem caminhos importantes para a gestão de emissões de GEE no setor. Da mesma forma, a análise das emissões associadas à fabricação de veículos em diferentes países não indica vantagem absoluta de uma determinada região, uma vez que o contexto pode variar no tempo e no território.

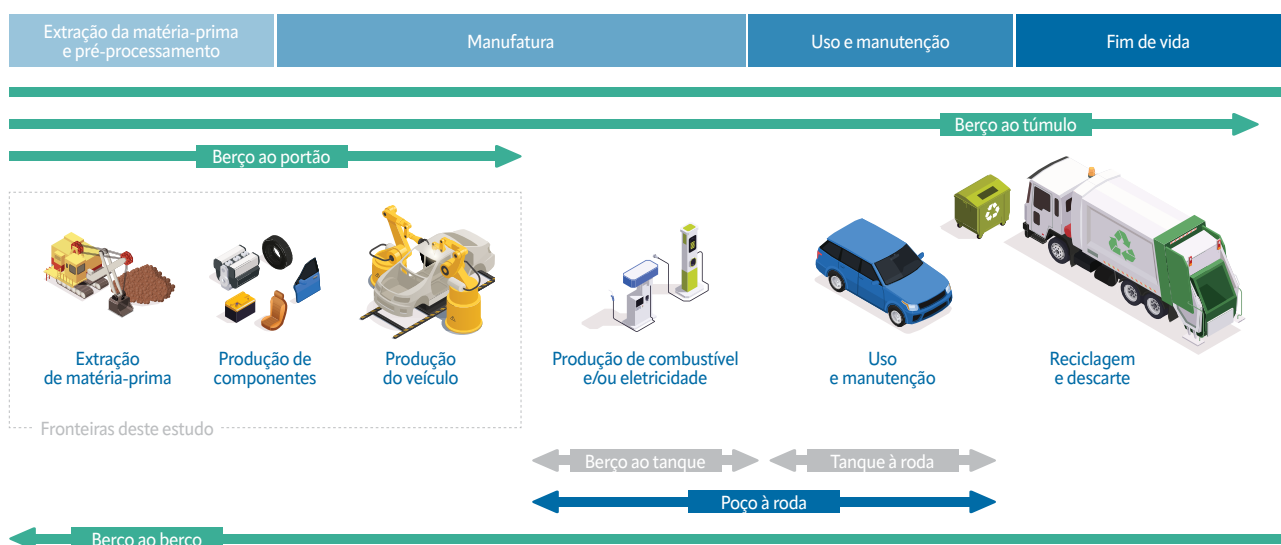
Embora o objetivo do estudo explicita que os resultados não se destinam à formulação de afirmações comparativas

a serem divulgadas publicamente, especialmente quanto à superioridade ambiental entre produtos, reconhece-se que a análise desenvolvida envolve a comparação entre alternativas tecnológicas, porém, apenas com fins analíticos e de apoio à tomada de decisão. Nesse sentido, as comparações apresentadas devem ser interpretadas como avaliações contextualizadas, conduzidas sob premissas e delimitações específicas de escopo, não configurando afirmações comparativas no sentido normativo estabelecido pela ISO 14040 e ISO 14044.

Além disso, considerando que os resultados possuem aplicação externa, incluindo o apoio à formulação de políticas públicas e ao desenvolvimento de regulações no âmbito do Programa Mover, o estudo foi submetido, com o objetivo de garantir maior robustez, à revisão crítica de terceira parte, detalhada no item 3.1 deste relatório.

A **Figura 3.1** apresenta o ciclo de vida de um veículo leve em relação ao escopo do projeto “Do berço ao portão” e demais fronteiras possíveis para um estudo de ACV no setor automotivo.

→| **Figura 3.1 – Ciclo de vida de um veículo leve e escopo do projeto “Do berço ao portão”**



Fonte: Adaptado de Verma *et al* (2022) e Xia e Li (2022).

O foco do projeto esteve na análise detalhada dos processos de manufatura (*core*) e dos processos a montante (*upstream*), abrangendo a extração de matérias-primas e o pré-processamento de materiais, a fabricação de componentes e sistemas — como corpo e estrutura, sistema de *powertrain*, sistema de transmissão, baterias e demais partes do veículo — além das operações logísticas envolvidas. Ao delimitar este escopo, o estudo buscou gerar dados consistentes e específicos sobre a pegada de carbono da produção automotiva nacional dentro da fronteira berço-ao-portão, subsidiando estratégias de redução de emissões de GEE e apontando caminhos para o aumento da competitividade da indústria brasileira. Esta abordagem também responde a uma lacuna significativa da literatura, que até o momento apresenta escassez de informações aprofundadas e dados primários sobre a etapa de produção de veículos no Brasil, especialmente sob a perspectiva do ciclo de vida com foco do Berço ao Portão. Apesar de sua relevância, os resultados não representam uma análise do desempenho ambiental global dos veículos, dado que apenas considera uma única categoria de impacto dentro da fronteira berço-ao-portão adotada. Para uma análise abrangente no contexto de aprimoramento do setor e de apoio à formulação de políticas

públicas, outras categorias de impacto devem ser consideradas, bem como as demais fases que compõem o ciclo de vida do produto, que incluem uso, manutenção e fim de vida

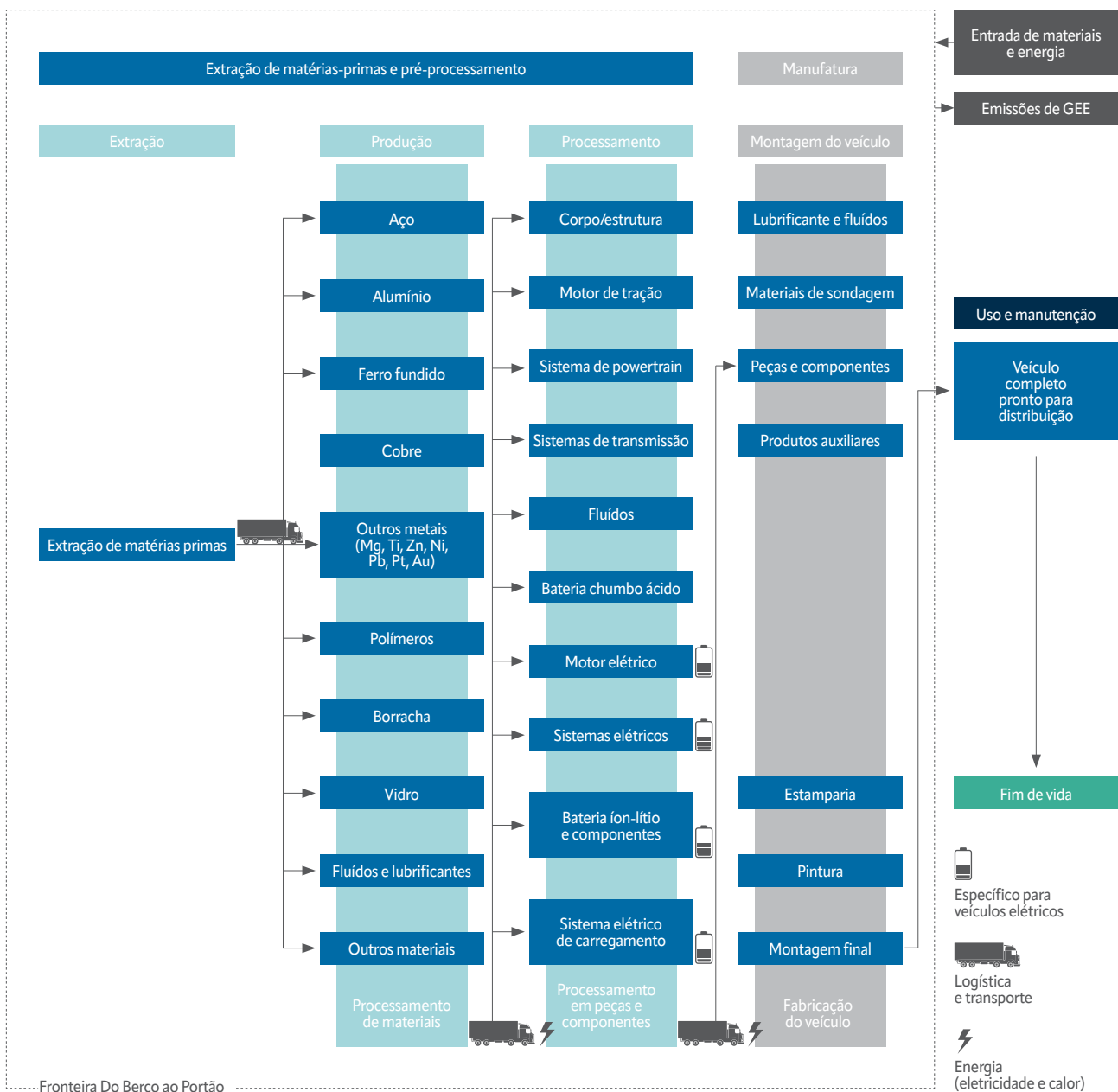
Assim, a função estabelecida é o transporte de passageiros por uma determinada distância. A unidade funcional foi definida então como o transporte de até 5 passageiros por 160.000 km, e o fluxo de referência como um veículo leve. Considerando que as fronteiras do estudo foram definidas como berço-ao-portão, os consumos associados às fases de uso e manutenção, bem como os impactos de fim de vida, não foram incluídos no escopo. Essa delimitação implica em uma limitação inerente, característica de estudos de ACV conduzidos sob esse tipo de recorte, a qual é discutida em capítulos subsequentes. Diante dessa definição de escopo, a especificação completa da função e da unidade funcional torna-se menos determinante para a interpretação dos resultados, de forma que se adotou como fluxo de referência a produção de uma unidade de veículo até a etapa de fabricação e disponível em montadoras no Brasil em 2023.

Conforme destacado pela revisão sistemática de literatura,

apresentada no relatório citado na seção anterior, ao adotar um veículo como unidade de análise, o estudo garante coerência e comparabilidade de resultados entre as diferentes tecnologias de propulsão que pretende explorar, além de estar alinhado às práticas empregadas por outros estudos em âmbito internacional (FGVCEs, 2024). Ademais, essa escolha dialoga com a lacuna de dados primários identificada para a etapa de manufatura no contexto brasileiro, onde a matriz energética mais limpa pode representar uma vantagem comparativa. Assim, o uso de um veículo como fluxo de referência possibilita uma modelagem robusta, consistente com o objetivo do estudo e com a realidade da indústria automotiva no Brasil.

Dessa forma, as fronteiras do sistema de produto avaliado consideram todos os processos produtivos necessários para a fabricação de um veículo leve completo, desde a extração de matérias-primas até a saída da montadora, incluindo: extração/síntese das matérias-primas/insumos, transformação da matéria-prima em insumos da montadora ou autopeças; transformação/manufatura dos componentes, subsistemas e sistemas que compõem o veículo; transformação do insumo até as etapas fabris de montagem do veículo (estampagem, solda, pintura, montagem); e fabricação dos sistemas propulsores: motor a combustão interna, elétricos, baterias e sistemas de controles, conforme pode ser observado adiante. Mais detalhes sobre os processos produtivos podem ser consultados na [Seção 5](#).

→ **Figura 3.2 – Fronteira do sistema de produto avaliado pelo projeto**

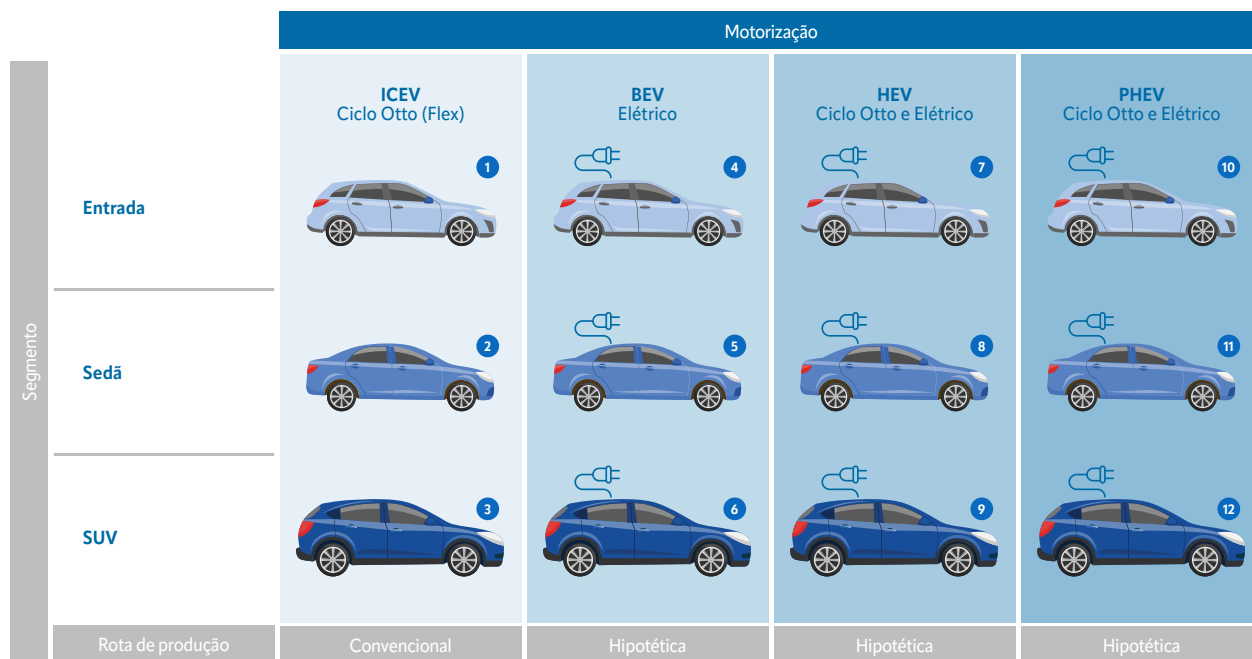


Fonte: Elaboração própria.

A partir disso, o projeto analisou a Pegada de Carbono associada a fabricação de doze veículos leves, sendo três modelos representativos do setor automotivo brasileiro atual com motorização a combustão interna do tipo Ciclo Otto (Flex), dentre eles, um veículo do segmento de hatch, um sedan e um SUV. Além desses, também foram conduzidas simulações de nove veículos

com tecnologias alternativas de motorização. Essas simulações compreenderam versões elétricas (BEV) dos três segmentos (hatch, sedan e SUV), da mesma forma que para versões do tipo híbrido (HEV) e híbrido plug-in (PHEV), que combinam motor elétrico e motor a combustão. A Figura 3.3 apresenta uma síntese dos veículos simulados dentro do escopo do projeto.

→| **Figura 3.3 – Veículos simulados pelo projeto “Do berço ao portão” para o cálculo da Pegada de Carbono**



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 3.1 – Definição dos segmentos e tecnologias dos veículos leves

Tecnologias de motorização		
Veículos com motor de combustão interna	ICEV: <i>internal combustion engine vehicles</i>	Têm motores de combustão interna que são alimentados por combustíveis. Podem ser <i>flex</i> (utilizando gasolina e etanol) ou exclusivamente movidos a gasolina ou etanol ou diesel.
Veículos Elétricos a Bateria	BEV: <i>battery electric vehicles</i>	Funcionam exclusivamente com motores elétricos e são alimentados por baterias recarregáveis.
Veículos Elétricos Híbridos	HEV: <i>hybrid electric vehicles</i>	Combinam um motor de combustão interna um motor elétrico auxiliar. A bateria é recarregada pelo motor de combustão interna e pela energia cinética recuperada durante a frenagem.
Veículos Elétricos Híbridos Plug-in	PHEV: <i>plug-in hybrid electric vehicles</i>	Têm motores elétricos e motores de combustão interna com baterias que também podem ser carregadas através de uma estação de recarga.
Segmentos		
Hatch	<i>Hatch: Hatchback</i>	Veículos leves de dois volumes, com carroceria caracterizada por portamalas integrado ao habitáculo e abertura traseira ampla. Conhecidos pelas suas dimensões compactas e maior eficiência no uso urbano.
Sedan	<i>Sedan</i>	Veículos leve de três volumes, com carroceria caracterizada por portamalas separado do habitáculo. Conhecidos pelo conforto e espaço interno.
SUV	<i>SUV: Sport Utility Vehicle</i>	Veículos utilitários esportivo leves, de dois volumes, com carroceria caracterizada por maior altura do solo. Conhecidos por sua robustez e conforto para diversos terrenos.

Fonte: Elaboração própria.






Adicionalmente, foram avaliados diferentes cenários alternativos de produção com o objetivo de estimar o impacto sobre a pegada de carbono de mudanças estratégicas na cadeia de suprimentos automotiva e nos principais materiais utilizados na produção dos veículos. Os cenários estudados incluíram rotas alternativas que consideraram: I – Nacionalização, explorando alterações na origem dos materiais (100% de nacionalização, em que os materiais seriam produzidos integralmente no Brasil; e 0% de nacionalização, em que estes materiais seriam produzidos integralmente fora do país); II - materiais de menor intensidade de carbono, tendo como foco a adoção de práticas sustentáveis para a produção de aço, alumínio e polímeros com menores impactos ambientais; e III - Maximização de materiais reciclados presente nos principais materiais constitutivos do veículo.

Além dos cenários descritos, uma análise de sensibilidade foi conduzida considerando fatores identificados como relevantes para a variabilidade da pegada de carbono. Nesse sentido,

objetivo esteve em avaliar como a arbitragem de parâmetros-chave para a modelagem das emissões de GEE associadas à fabricação de veículos leves poderia influenciar os resultados obtidos, permitindo uma interpretação mais ampla dos efeitos associados às premissas empregadas no estudo. Dentre eles, a composição da matriz elétrica brasileira, que a depender das condições hidroclimáticas de um determinado ano será composta por uma parcela maior ou menor de fontes renováveis, refletida no fator de emissão associado ao consumo de energia proveniente da rede interligada. Outro fator inclui a porcentagem assumida para as perdas ao longo da cadeia de produção do aço, que poderiam alcançar 50% em alguns contextos.

Tais cenários e sensibilidades permitiram comparar diferentes alternativas tecnológicas e produtivas, fornecendo subsídios para a tomada de decisão na indústria e formulação de políticas públicas voltadas à redução das emissões de GEE provenientes da fabricação de veículos leves no Brasil.

Tabela 3.1 – Análise de cenários e sensibilidades simulados pelo projeto “Do berço ao portão”

Cenários		Nacionalização	<ul style="list-style-type: none"> • Simula a substituição de insumos importados por materiais provenientes de produção nacional. • Avalia impactos relacionados à origem dos materiais/processos fabris. • Compara cenários 100% nacionais (100% BR) e 100% importados (100% GLO)
		Materiais de menor intensidade de carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Considera a substituição de aço, alumínio e plásticos convencionais por alternativas com menor intensidade de carbono • Estima o potencial de mitigação associado à adoção de rotas tecnologias mais eficientes
		Maximização de materiais reciclados	<ul style="list-style-type: none"> • Simula a maior participação de conteúdo reciclado na composição de materiais. • Estima o potencial de mitigação associado à adoção de 100% de material secundário para alumínio e aço, e de 25% para plástico
Sensibilidades		Participação de renováveis na matriz elétrica	<ul style="list-style-type: none"> • Simula diferentes composições para a matriz elétrica brasileira. • Estima o potencial de emissão em períodos de menor participação de renováveis ou maior participação de renováveis.
		Perdas na cadeia do aço	<ul style="list-style-type: none"> • Analisa cenários com diferentes níveis de perdas associados aos processos produtivos e de manufatura. • Evidencia o potencial de mitigação via ganhos de eficiência. • Considera percentuais de perda de 0%, 15% e 50%.

Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 3.2** apresenta os principais contornos metodológicos empregados na avaliação de ciclo de vida do projeto “Do Berço ao Portão”.

Tabela 3.2 – Principais contornos metodológicos empregados neste estudo

Abordagem	Atribucional
Escopo	do berço-ao-portão
Unidade funcional	Um veículo leve destinado ao transporte de passageiros, disponível nas montadoras, no ano de 2023, no Brasil
Fluxo de referência	Um veículo leve completo pronto para distribuição

Tabela 3.2 – Principais contornos metodológicos empregados neste estudo

<p>Fonte de dados da montagem dos veículos</p>	<p>Para as receitas de materiais, utilizou-se como fonte o estudo da análise de mercado conduzido pela consultoria Bright (BRIGHT CONSULTING, 2023) ajustada com dados primários das montadoras, por meio do simulador de massa (ver Anexo VI). Para a caracterização dos veículos, utilizou-se dados primários das montadoras e do simulador de massas desenvolvido pelo projeto. Para as etapas fabris de montagem do veículo, utilizou-se dados primários das montadoras.</p>
<p>Fonte de dados dos processos a montante da montadora</p>	<p>Base de dados ecoinvent v.3.91 (WERNET <i>et al.</i>, 2016), suplementados por dados do GREET (2024), dados primários e/ou relatórios setoriais.</p>
<p>Cobertura temporal</p>	<p>Quando possível, priorizou-se a utilização de informações referentes ao ano de 2023 (ano-base). Para alguns casos, onde se observou variações significativas das informações ao longo do tempo, priorizou-se a adoção de médias, como o caso do mix de geração elétrico BR (utilizado uma média de 2019 a 2023). Para outros casos em que não foi possível obter todas as informações em relação a 2023, foi necessário buscar informações em outros estudos e artigos anteriores a 2023, como o caso do aço e alumínio.</p>
<p>Cobertura geográfica</p>	<p>Para a fabricação dos veículos ICEV e uma parcela dos HEV considerou-se a produção em território nacional. Para PHEV, BEV e uma parcela dos HEV foi considerada produção global. Para os materiais mais relevantes (aço, alumínio e polímeros), foram consideradas informações primárias de importação de componentes automotivos informados pelas montadoras. Para materiais menos relevantes, foram levantados dados de consumo aparente – com diferentes percentuais de produção nacional e importação.</p>
<p>Cobertura tecnológica</p>	<p>Quando possível, priorizou-se a adaptações de inventários para melhor refletir as tecnologias de produção empregadas no território brasileiro. Na indisponibilidade deste, utilizou-se os inventários globais (GLO e/ou 'RoW')¹ disponíveis na base de dados ecoinvent. As principais tecnologias de produção empregadas na produção de materiais, sistemas e veículos foram detalhadas no Capítulo 5, as demais encontram-se descritas na documentação dos inventários da versão 3.9.1 da base de dados ecoinvent.</p>
<p>Tratamento de coprodutos</p>	<p>Para os inventários adaptados a partir da base de dados ecoinvent, manteve-se o critério de alocação utilizado nesta base de dados (alocação econômica). Para os demais inventários criados, sempre que possível, evitou-se a alocação. Quando necessária, foi priorizada alocação energética (produção do aço) ou mássica (produção de polipropileno e polietileno). No caso do aço, a saída de gases de processo para produção de eletricidade interna impossibilita a alocação mássica, enquanto para o polipropileno e polietileno os coprodutos estão todos na unidade mássica, facilitando este critério de alocação neste caso. A escolha de alocação econômica em ambos os casos não foi utilizada pois de acordo com as normas ISO 14040/14044 este critério deve ser evitado, sempre que possível.</p>
<p>Tratamento de resíduos e tratamento de material reciclado</p>	<p>Empregou-se a abordagem "<i>cut-off</i>", também conhecida como "100:0" ou "conteúdo reciclado". Esta abordagem considerada apenas as emissões de GEE ocorridas após a geração do resíduo ou do material reciclado, a partir das etapas de transporte e processamento e não atribui créditos para o material reciclado. Desta forma, o material virgem carrega o ônus da produção, processamento. Já o material reciclado ou o resíduo carregam apenas as emissões do seu transporte e tratamento. Essa abordagem foi escolhida por ser uma abordagem robusta e conservadora, que se adequa à perspectiva dos formuladores de políticas e a padrões estabelecidos pelo setor, uma vez que os impactos ambientais são contabilizados quando de fato ocorrem (EPD, 2024; EUROPEAN COMMISSION <i>et al.</i>, 2020). Adicionalmente, a abordagem <i>cut-off</i> está mais alinhada ao escopo do projeto, do berço-ao-portão, evitando carregar "créditos futuros" (pós-portão) para dentro da fronteira.</p>
<p>Tratamento de eletricidade</p>	<p>Para os inventários criados ou adaptados, empregou-se a abordagem de "rede" (location-based), sendo consideradas informações de autoprodução, quando disponíveis, ou consumo do GRID brasileiro. Mesmo quando disponíveis, as informações referentes aos RECs/contratos de energia renovável foram contabilizadas como provenientes do GRID brasileiro. Para os demais inventários, foram utilizados os valores informados na base de dados ecoinvent, sem adaptações.</p>

¹ As atividades da base de dados ecoinvent são representadas em nível global por meio da localização geográfica global (GLO) ou Resto do Mundo (RoW). GLO refere-se à produção global média, enquanto RoW representa a produção global média (mundo) menos a produção em todas as geografias locais. De acordo com a ecoinvent, essas localizações geográficas também podem ser usadas caso a localização desejada não esteja presente na base de dados.

Tabela 3.2 – Principais contornos metodológicos empregados neste estudo

Tratamento de emissões provenientes da mudança de uso da terra	<p>Não foram consideradas as emissões provenientes da mudança indireta de uso da terra (iLUC), devido à falta de consenso metodológico e ao elevado grau de incertezas, além de garantir maior coerência com a base de dados ecoinvent - que não considera este fator em seus inventários.</p> <p>Para os inventários oriundos da base de dados ecoinvent, adotou-se os valores de emissões provenientes da mudança de uso da terra direta (dLUC) informados na base de dados. Para os inventários criados pelo projeto, não foram consideradas emissões derivadas de dLUC, devido à sua baixa representatividade nos processos industriais modelados.</p>
Critérios de corte	<p>Todas as entradas de materiais (<i>Bill of Materials</i> – BoM) foram consideradas, totalizando o peso integral dos veículos. Nas etapas fabris, fluxos indiretos de baixa relevância para a categoria de Mudança do Clima (como infraestrutura, água e consumíveis) não foram considerados, devido à sua baixa representatividade tanto em termos de massa quanto de significância ambiental para a categoria de impacto avaliada.</p>
Procedimentos para verificação de completeza, consistência e qualidade dos dados	<p>Empregou-se os 5 indicadores da Matriz Pedigree: confiabilidade; completeza; correlação temporal; geográfica e tecnológica.</p> <p>A consistência foi avaliada por meio de uma análise minuciosa de todo o conjunto de dados coletados e de uma avaliação de anomalias, a fim de identificar valores fora do padrão. Nesses casos específicos, os dados foram questionados com os responsáveis pelo preenchimento e/ou descartados. Foi também analisado se as escolhas metodológicas foram avaliadas de forma consistente para todas as alternativas estudadas e se critérios de alocação foram os mesmos para sistemas de produto multifuncionais. Mais detalhes na seção 8.7.</p> <p>Além disso, para avaliar a influência de variações nos pressupostos, métodos e dados sobre os resultados foi conduzida uma verificação de sensibilidade. Mais detalhes na seção 8.8</p>
Método de avaliação de impacto e Tratamento de carbono biogênico	<p>O método de AICV empregado foi o IPCC 2021 GWP 100 disponível no software SimaPro. Além disso, não foram utilizados elementos opcionais como normalização, agrupamento ou ponderação.</p> <p>Vale destacar que a versão do método implementada no software SimaPro considera como simplificação que os fluxos de CO₂ biogênico compõem o ciclo curto do carbono e que possuem um impacto líquido neutro para a mudança do clima, não sendo, portanto, considerados na composição da pegada de carbono. Isso não se aplica para emissões de CO₂ oriundos de mudança no uso da terra, nem para o CH₄ biogênico.</p> <p>Por fim, por não contabilizar as emissões e remoções de CO₂ biogênico a abordagem adotada não está totalmente alinhada com a norma ISO 14067, que recomenda a inclusão desse tratamento na quantificação da pegada de carbono do produto.</p>
Ferramenta de cálculo	SimaPro v. 9.5.0.2

Fonte: Elaboração própria.

▲ 3.1. Revisão Crítica de Terceira Parte

O presente estudo foi submetido a um processo de revisão crítica de terceira parte, conduzido em conformidade com os requisitos estabelecidos pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044. O objetivo da revisão crítica foi identificar conformidades e não conformidades segundo as normas, especialmente quanto a consistência metodológica do estudo, a adequação dos dados e métodos utilizados, a coerência das interpretações com os objetivos definidos e a transparência na apresentação dos resultados.

▲ 3.1.1 Equipe de Revisão Crítica

A revisão crítica foi conduzida pela Fundação Eco+, organização com experiência consolidada na aplicação da abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida. A equipe responsável foi composta por:

- **Eduardo Toshio Sugawara** – Coordenador da revisão crítica, engenheiro civil (Unicamp), com MBA em Gestão e Tecnologias Ambientais e mestrado em Engenharia Química (USP), com experiência na condução de estudos de ACV e pegada de carbono;
- **Ana Carolina Godoy Albino** – Analista de Sustentabilidade Aplicada, bacharel em Engenharia Ambiental (UFSCar), mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis (UFSCar), com experiência em consultoria técnica em Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono.

▲ 3.1.2 Escopo e Procedimentos da Revisão

O processo de revisão crítica contemplou a análise do relatório do estudo, a fim de verificar se:

- os métodos utilizados para conduzir a ACV são consistentes

- com os referenciais;
- os métodos utilizados para conduzir a ACV são científica e tecnicamente válidos;
- os dados utilizados são apropriados e razoáveis em relação ao objetivo do estudo;
- as interpretações refletem as limitações identificadas e o objetivo do estudo; e
- o relatório do estudo é transparente e consistente.

A revisão foi conduzida em rodadas iterativas, incluindo: (i) avaliação inicial do relatório e 1ª Rodada de Comentários, (ii) resposta e ajustes por parte da equipe executora do estudo, (iii) reavaliação do relatório e 2ª Rodada de Comentários; (iv) resposta e ajustes finais por parte da equipe executora do estudo; (v) Parecer Final e elaboração da Declaração da Revisão Crítica. Cabe destacar que a análise teve como objeto o relatório do estudo, não incluindo verificação direta da modelagem em software ou auditoria de bases de dados externas, conforme delimitação acordada no escopo da revisão.

3.1.3 Resultados da Revisão Crítica

Ao longo do processo, foram identificados pontos de melhoria, não conformidades e recomendações, os quais foram sistematizados e respondidos pela equipe responsável pelo estudo. As respostas incluíam ajustes metodológicos, esclarecimentos adicionais e, quando aplicável, justificativas técnicas para a manutenção de determinadas abordagens.

Como resultado do processo, foi emitida uma Declaração de Revisão Crítica, atestando a consistência metodológica e a qualidade técnica do estudo, bem como apresentando conclusões e recomendações finais dos revisores. O parecer final da revisão crítica, bem como o histórico da análise crítica, encon-

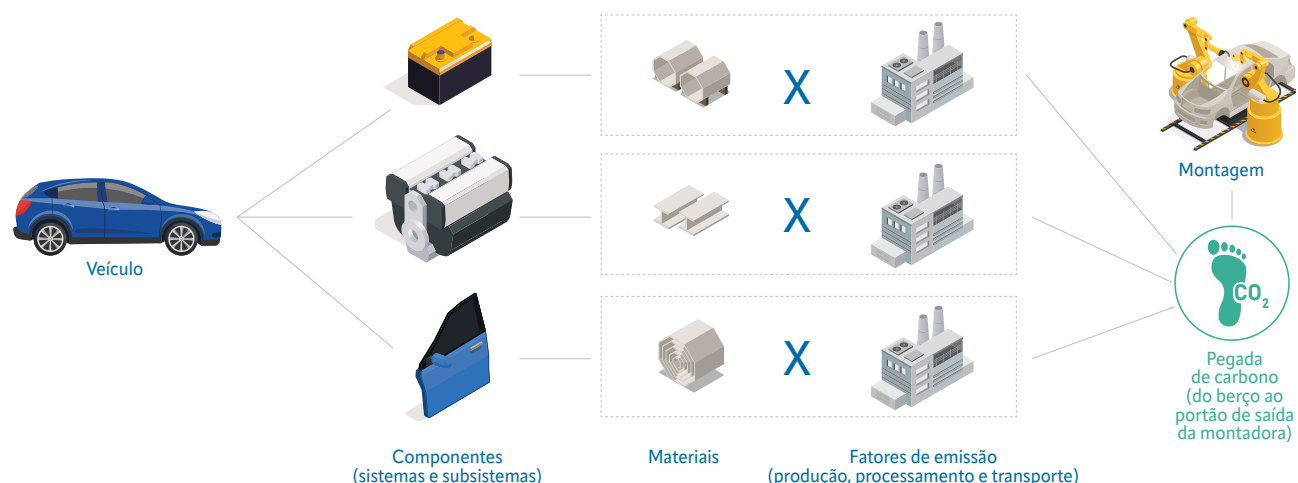
tra-se disponível no Anexo VIII, permitindo a rastreabilidade das conclusões e a transparência do processo.

3.2. Metodologia de cálculo

Respeitando as diretrizes do edital de pesquisa que originou o projeto, a metodologia de cálculo deste estudo segue os requisitos técnicos das normas principais de Avaliação de Ciclo de Vida ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT ISO 14044:2009. A norma que aborda o cálculo da pegada de carbono de produtos, ABNT ISO 14067: 2015, foi utilizada apenas como fonte de orientação para o tratamento e apresentação de dados específicos - conectados ao tratamento de eletricidade, tratamento das emissões de carbono fóssil e biogênico e método para avaliação de impacto do ciclo de vida –, como discutido no Capítulo 1.

Tendo o objetivo, o escopo e o fluxo de referência definidos, bem como os veículos a serem simulados, o cálculo da Pegada de Carbono é estruturado a partir da decomposição do veículo em seus principais sistemas e componentes, como motor, bateria e carroceria. A partir dessa decomposição, são conduzidas três etapas. Primeiramente é realizada a quantificação dos materiais utilizados, o que envolve o levantamento das massas e tipos de materiais que compõem cada sistema do veículo, por exemplo, aço, alumínio, plástico, dentre outros. Na sequência, são mapeadas as etapas de fabricação associadas, contemplando a modelagem dos processos industriais necessários para transformar os materiais em componentes do veículo, considerando insumos, consumo de energia e emissões correspondentes. Por fim e de maneira similar, são contabilizadas as emissões relacionadas às etapas fabris de montagem, somando-se estas aos inventários gerados para cada um dos sistemas e compondo a pegada de carbono total do veículo. A **Figura 3.4** apresenta o fluxo de estruturação descrito.

→| **Figura 3.4 – Fluxo de estruturação dos inventários para o cálculo da PC dos veículos**



Fonte: Elaboração própria.

O cálculo da Pegada de Carbono do veículo, do berço-ao-portão, pode ser então expresso pela **Equação 3.1**:

→ **Equação 3.1 – Cálculo da Pegada de Carbono do projeto Do Berço ao Portão**

$$\begin{aligned} \text{Pegada de Carbono}_{\text{Berço ao Portão}} &= \text{Pegada de Carbono}_{\text{Materiais}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] + \text{Pegada de Carbono}_{\text{Baterias}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] \\ &+ \text{Pegada de Carbono}_{\text{etapas fabricis de montagem}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] \end{aligned}$$

Sendo,

$$\begin{aligned} \text{Pegada de Carbono}_{\text{Materiais}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &= \sum_{\text{sistema}} \text{Massa}_{\text{material}} \left[\frac{\text{kg}_{\text{material}}}{\text{veículo}} \right] \times \\ \{\text{Fator de emissão}_{\text{material, GLO}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &\times \text{Percentual de importação}_{\text{material}} [\%] + \\ \text{Fator de emissão}_{\text{material, BR}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &\times (1 - \text{Percentual de importação}_{\text{material}}) [\%] \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pegada de Carbono}_{\text{Baterias}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &= \text{Massa}_{\text{Bateria chumbo-ácido}} \left[\frac{\text{kg}_{\text{material}}}{\text{veículo}} \right] \times \\ \{\text{Fator de emissão}_{\text{Bateria chumbo-ácido, GLO}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &\times \text{Percentual de importação}_{\text{Bateria}} [\%] + \\ \text{Fator de emissão}_{\text{Bateria chumbo-ácido, BR}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &\times (1 - \text{Percentual de importação}_{\text{Bateria}}) [\%] \} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa}_{\text{Bateria ion-lítio}} \left[\frac{\text{kg}_{\text{bateria}}}{\text{veículo}} \right] &\times \{\text{Fator de emissão}_{\text{Bateria ion-lítio, GLO}} \left[\frac{\text{kg}_{\text{material}}}{\text{veículo}} \right] \times \\ \text{Percentual de importação}_{\text{Bateria}} [\%] &+ \text{Fator de emissão}_{\text{Bateria ion-lítio, BR}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] \times (1 - \\ \text{Percentual de importação}_{\text{Bateria}}) [\%] \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pegada de Carbono}_{\text{Etapas fabricis de montagem}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &= \text{Percentual de importação}_{\text{montagem}} [\%] \times \\ \text{Fator de emissão}_{\text{Etapas fabricis de montagem, GLO}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &+ (1 - \text{Percentual de importação}_{\text{montagem}}) [\%] \times \\ \text{Fator de emissão}_{\text{Etapas fabricis de montagem, BR}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] \end{aligned}$$

3.3. Principais limitações do estudo

Ao longo da execução deste projeto, foram estabelecidas diversas premissas e escolhas metodológicas, necessárias à condução de uma ACV. Como parte desse processo, e por se tratar de um setor extremamente complexo, o estudo contém limitações inerentes.

De forma a garantir maior transparência dos procedimentos adotados e a correta interpretação dos resultados, abaixo são descritas as principais limitações encontradas e as premissas assumidas como consequência. Destaca-se que as demais premissas de projeto estão detalhadas nos capítulos seguintes deste relatório.

- **Fronteiras do estudo:** este estudo segue as diretrizes do edital de pesquisa que originou o projeto. Assim, o escopo está limitado às etapas de produção e processamento dos materiais e fabricação de veículos leves (do berço-ao-portão), não incluindo as etapas de uso e manutenção e fim de vida. Dada a importância em se considerar o desempenho ambiental completo de um produto na tomada de decisão, a delimitação do escopo constituiu uma limitação seguindo a ISO 14040. Logo, a não inclusão de todos os aspectos ambientais de cada veículo nas fases de uso, manutenção e fim de vida não permite conhecer a variação global nos resultados encontrados para berço-ao-portão, portanto, limitando a comparação das alternativas apenas até suas produções. Com o objetivo de complementar a análise conduzida pelo projeto, um estudo de caso simplificado foi realizado considerando a abordagem do berço-à-roda (incluindo, portanto, a fase de uso do veículo). Mais informações se encontram no **Anexo I**;
- **Escopo temporal e tecnológico:** o estudo considera dados e processos representativos de um período específico, o que pode não capturar variações sazonais, evoluções tecnológicas ou alterações no padrão do mercado de veículos leves. Sempre que possível, adotou-se 2023 como ano-base, por se tratar do período com informações mais recentes e completas disponíveis no início da etapa de coleta de dados, em 2024. Uma exceção refere-se ao caso da eletricidade brasileira, no qual foi selecionado uma média de geração de 5 anos entre 2019 e 2023 no intuito de suavizar as variações anuais no fator de emissão do mix elétrico. Destaca-se também que a base de dados ecoinvent v.3.9.1, tem a maioria dos seus inventários com período de validade até 2022. Para outros casos em que não foi possível obter informações em relação ao ano de 2023, foi necessário buscar informações em outros estudos e artigos, como o caso do aço e alumínio – mais detalhes no **Capítulo 5**.
- **Representatividade:** os resultados do estudo representam tão somente a amostra e o escopo analisado confi-

gurando-se, assim, como um recorte técnico específico – não devendo ser interpretados como valores gerais ou genéricos representativos de todo e qualquer veículo leve. Ressalta-se, portanto, que não se deve utilizar os resultados deste estudo para estabelecer valores universais, normativos definitivos ou médias nacionais absolutas. Com relação aos veículos avaliados e as etapas fabris de montagem, o número de veículos considerados na análise foi limitado, tendo sido avaliado 12 veículos responsáveis por 36% do total de vendas de veículos leves em 2023. Portanto, a amostra avaliada não representa a totalidade dos modelos de veículos leves produzidos no país. Ressalta-se também que não foi possível obter informações primárias a respeito da fabricação de veículos de todos os segmentos e motorizações avaliados, especialmente no caso da composição de materiais, teor de nacionalização e etapas fabris de produção de veículos eletrificados. Por exemplo, na lista de materiais dos veículos avaliados, não foi discriminado o consumo de couro – mesmo este sendo um material usualmente empregado em veículos eletrificados e/ou do segmento SUV. Por isso, alguns dos processos modelados pelo estudo dependeram exclusivamente de dados secundários, principalmente de outras regiões geográficas. Nesse sentido, a utilização, ainda que pontual, de dados secundários globais pode interferir na qualidade dos resultados. Com relação a cadeia automotiva, não há dados suficientes para estimar a cobertura do mercado dos dados relacionados ao uso de materiais pelo setor de veículos leves – os dados setoriais disponíveis não especificam quanto dos materiais (como aço, alumínio e polímeros) é efetivamente consumido pelo setor automotivo, especialmente no segmento de veículos leves, logo os dados obtidos por este estudo não podem ser considerados representativos de todo o contexto brasileiro.

- **Análise de impacto:** ainda seguindo as diretrizes do edital de pesquisa, o estudo contempla a avaliação de apenas uma única categoria de impacto ambiental – mudança do clima – não abrangendo outras categorias relevantes como, por exemplo, consumo de água, uso de energia ou depleção de recursos abióticos. Por esse motivo, de forma geral, não se deve realizar afirmações comparativas quanto à superioridade ou equivalência ambiental dos veículos estudados;
- **Análise de cenários e sensibilidades:** o projeto buscou avaliar diferentes cenários e sensibilidades, porém dada a fronteira do estudo, não foram avaliados cenários que consideram o impacto na fase de uso – como o aumento de eficiência, a redução de peso e/ou a substituição de materiais do veículo. Foram avaliadas pelo estudo os cenários e sensibilidades considerados como prioritários pelos pesquisadores e atores do projeto. No entanto, outros elementos metodológicos, como procedimentos de alocação, tratamento de coprodutos e/ou métricas de AICV, são importantes e merecem ser avaliados em estudos futuros. Além disso, para os cenários

avaliados, não foram considerados elementos como a viabilidade econômica e/ou a disponibilidade dos recursos;

- Dados setoriais: em diversas etapas, foi necessário recorrer a dados secundários provenientes de bases setoriais, que podem não representar com precisão as especificidades do setor automotivo. Esta limitação pode impactar a representatividade dos inventários em relação à realidade brasileira.
- Dados de nacionalização de componentes: os dados de nacionalização de componentes e materiais dos veículos foram estimados a partir de informações de quatro veículos ICEVs fornecidos pelas montadoras. O número de veículos considerados na análise foi limitado, portanto, os percentuais estimados de importação dos principais materiais não necessariamente representam a totalidade dos modelos de ICEVs produzidos no país. Assim, os resultados de pegada de carbono do cenário base para os ICEVs podem não refletir todos os veículos produzidos nacionalmente, nem ser representativo para um veículo médio nacional. Ainda assim, os dados primários utilizados oferecem uma aproximação mais realista do conteúdo importado dos principais materiais do setor automotivo quando comparados a análises baseadas exclusivamente em anuários estatísticos intersetoriais.
- Adaptações de inventários para o contexto brasileiro: apesar dos esforços dedicados à construção e/ou adaptação de inventários de ciclo de vida, a indisponibilidade de tempo e de informações detalhadas para materiais menos representativos na composição da pegada de carbono dos veículos, limitou o escopo de adaptações. Assim, os ajustes realizados nesses inventários se concentraram principalmente em mudanças na matriz elétrica e na logística, não tendo sido conduzidas alterações em parâmetros tecnológicos e operacionais, como eficiências, consumos, rendimentos, perdas e emissões diretas de GEE. Essa abordagem pode não capturar variações adicionais na pegada de carbono desses materiais associadas a diferenças tecnológicas ou operacionais específicas do contexto brasileiro.
- Dados das etapas fabris de montagem de veículos: não foi possível obter informações específicas a respeito da fabricação de veículos para todas as motorizações avaliadas, como no caso de veículos eletrificados. Desse modo, o mesmo inventário da etapa de fabricação e montagem no Brasil foi utilizado para todas as motorizações nos cenários de nacionalização. Além disso, o inventário da fabricação e montagem foi elaborado numa abordagem de "caixa preta", isto é, considerando um consumo total de energia e insumos da fábrica, sem distinção por tipo de processo, uma vez que não

foi possível obter essas informações junto às montadoras.

- Tratamento de coprodutos (multifuncionalidade): em conformidade com a norma ISO 14044, o processo de alocação de impactos ambientais foi evitado sempre que possível. No entanto, é importante reconhecer que para processos unitários que não foram passíveis de serem subdivididos, a base de dados utilizada, proveniente doecoinvent, já realiza por padrão um processo de alocação econômica, como por exemplo nos inventários de produção do ouro e da platina em um mesmo sítio de mineração. Para os inventários adaptados do polipropileno e do polietileno, dado que os inventários originais daecoinvent apresentavam somente fluxos elementares, foi estabelecido um inventário de coprodução do propeno e do eteno a partir de uma alocação mássica. Já para o inventário do aço nacional, tanto o processo de produção do coque quanto o de redução do minério de ferro geram coprodutos energéticos (gases de processo) que são amplamente utilizados nas siderúrgicas e que tiveram cargas ambientais alocadas segundo o critério energético pois estes outputs são melhor caracterizados por seus conteúdos energéticos. A utilização de diferentes escolhas de alocação pode afetar negativamente a consistência dos resultados obtidos, embora isto tenha sido realizado no intuito de melhor representar as cargas ambientais ao longo de todo o sistema de produtos. Outro fator que justifica a escolha da alocação física é a hierarquia proposta pelas normas ISO 14040/14044, segundo as quais a alocação econômica deve ser evitada sempre que possível.
- Tratamento de resíduos e tratamento de material reciclado: Neste estudo foi empregado a abordagem "*cut-off*", não sendo conduzido análises de sensibilidade para explorar o uso de outras abordagens, como a "*end-of-life recycling*" ou "*allocation at the point of substitution*". Esta é uma limitação do estudo, uma vez diferentes escolhas metodológicas associadas ao tratamento de reciclagem podem afetar os resultados do estudo, especialmente porque o conteúdo de material reciclado se mostrou um importante fator na pegada de carbono do veículo, conforme explorado no cenário de maximização de materiais reciclados. No entanto, não foi realizada uma comparação destes diferentes métodos de alocação por meio de uma análise de sensibilidade, pois essa análise não foi considerada como prioritária pelos autores do estudo – a abordagem "*cut-off*" é a mais utilizada pelos artigos utilizados como base bibliográfica, não sendo identificado nenhum estudo dentre os avaliados que tenha realizado sensibilidade em termos de métodos de alocação.

4. Coleta de dados

A metodologia adotada no projeto “Do Berço ao Portão” para a construção dos inventários de ciclo de vida (ICV) combina duas abordagens complementares, com o objetivo de garantir maior representatividade, qualidade e aderência ao contexto brasileiro da produção automotiva: (i) Engajamento da Cadeia Produtiva e Coleta de Dados Primários e (ii) Coleta de dados secundários e adaptação de inventários do ciclo de vida.

Com relação aos critérios de corte adotados neste estudo, destaca-se que todas as entradas de materiais que os compõe (*Bill of Materials* – BoM) foram consideradas, de modo que a soma das receitas de materiais dos veículos é equivalente ao seu peso total. No processo de fabricação dos veículos (etapas fabris) e de produção do aço, foram excluídos fluxos indiretos de baixa relevância ambiental para a categoria de impacto de Mudança do Clima (infraestrutura, água, químicos e insumos utilizados em pequenas quantidades).

Para avaliação da qualidade dos dados, empregou-se indicadores da Matriz Pedigree: confiabilidade; completeza; correlação temporal; geográfica e tecnológica. A consistência dos dados foi avaliada por meio de uma análise minuciosa de todo o conjunto de dados coletados e de uma avaliação de anomalias, a fim de identificar valores fora do padrão. Nesses casos específicos, os dados foram questionados com os responsáveis pelo preenchimento e/ou descartados. Além disso, foi também analisado se as escolhas metodológicas foram avaliadas de forma consistente para todas as alternativas estudadas e se critérios de alocação foram os mesmos para sistemas de produto multifuncionais. Para avaliar a influência de variações nos pressupostos, métodos e dados sobre os resultados foi conduzida uma verificação de sensibilidade. Mais detalhes podem ser consultados na seção 5.4 e nas seções 8.7 e 8.8.

▲ 4.1. Engajamento da cadeia automobilística e coleta de dados primários

O processo de engajamento dos setores produtivos para a coleta de dados primários foi um componente importante do projeto, visando garantir maior representatividade e robustez na construção dos inventários de ciclo de vida dos veículos leves.

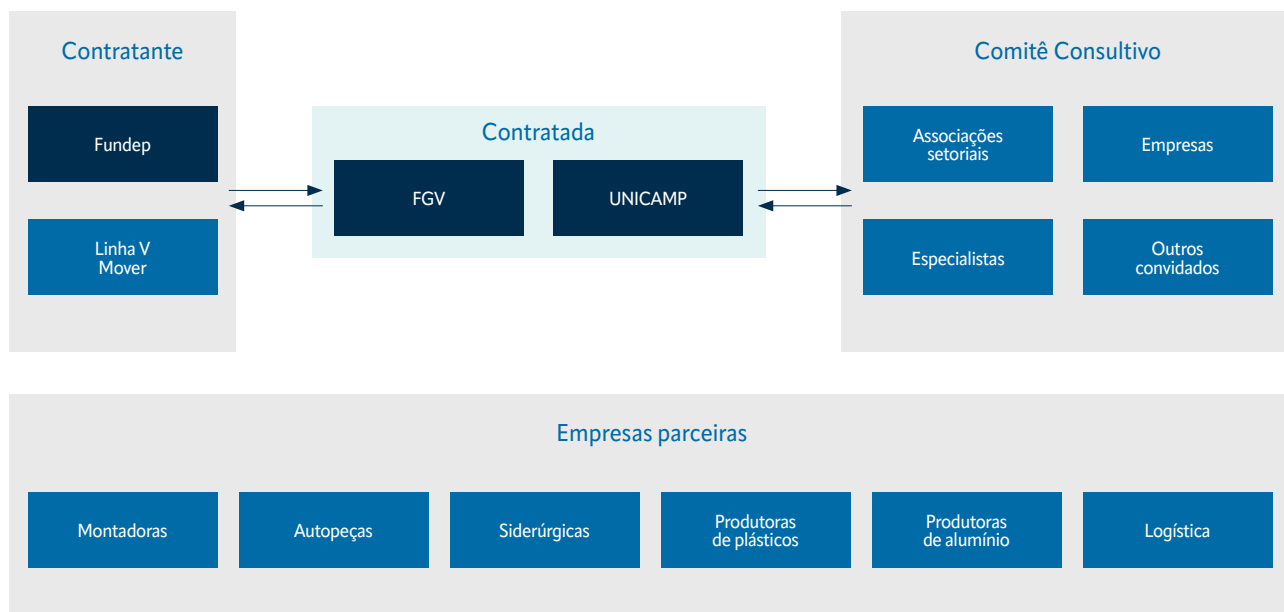
Os esforços empreendidos incluíram diálogos multisetoriais e mobilização transversal de atores, além da estruturação de um processo de compartilhamento de dados seguro e anonimizado. A partir dessas interações foi possível engajar diversos atores do setor automobilístico, incluindo a celebração de Acordos de Cooperação Técnica com sete das principais montadoras do país e oito fornecedores de matérias-primas.

Entre 2023 e 2025, foram realizadas inúmeras reuniões técnicas, além de mais de 10 eventos, workshops e atividades de capacitação, envolvendo diretamente 15 empresas de setores-chave da cadeia automobilística: aço, alumínio, plástico, autopeças e montadoras. Esse esforço colaborativo teve como objetivo alinhar conceitos metodológicos, esclarecer demandas de dados e criar um ambiente de confiança mútua para o compartilhamento de informações sensíveis.

Além das interações técnicas e workshops, o projeto contou com a realização de reuniões do Comitê Diretivo, que desempenharam papel estratégico em sua governança. Esses encontros reuniram representantes da FGV, UNICAMP, FUNDEP e 11 associações setoriais e especialistas, com o objetivo de acompanhar o andamento das atividades, discutir as diretrizes metodológicas e promover o engajamento setorial. Esse processo de aproximação entre atores-chave possibilitou trocas importantes sobre aspectos técnicos dos processos envolvidos, fundamentais para a estruturação da coleta de dados e da modelagem da fabricação de veículos leves no Brasil. A **Figura**

4.1 e o Quadro 4.1 abaixo apresentam os principais atores envolvidos no projeto “Do berço ao portão”

→| **Figura 4.1 – Atores envolvidos no projeto**



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 4.1 – Atores envolvidos no projeto

Associações setoriais	Associação Brasileira de Alumínio (ABAL) Associação Brasileira da Indústria de Autopeças (Abipeças/Sindipeças) Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT) Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO) Associação Brasileira de Tecnologia da Borracha (ABTB) Associação Brasileira Engenharia Automotiva (AEA) Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) Instituto Aço Brasil (IABR)
Empresas parceiras	Becomex (Logística), Bosch (Autopeças), Braskem (Produtora de plásticos), Gerdau (Siderúrgica), General Motors (Montadora), Honda (Montadora), Jaguar Land Rover (Montadora), Metalpó (Autopeças), Nissan (Montadora), Prolind Alumínio (Produtora de alumínio), Stellantis (Montadora), Toyota (Montadora), Tupy (Autopeças), Usiminas (Siderúrgica), Volkswagen (Montadora).
Especialistas	Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida (Rede ACV) Instituto da Qualidade Automotiva (IQA).

Fonte: Elaboração própria.

A etapa de coleta de dados primários do projeto teve início no primeiro semestre de 2024 com o envio de um formulário de coleta às montadoras, tendo sido este aprimorado e complementado ao longo dos meses subsequentes por meio de visitas técnicas às instalações da Toyota, reuniões setoriais e bilaterais, além de pesquisas em relatórios técnicos, publicações acadêmicas e bases de dados secundários relevantes.

Um resultado importante dessa interação foi a padronização do levantamento de dados da composição do veículo (*Bill of*

Materials) seguindo um sistema padronizado chamado International Material Data System (IMDS). Neste sistema, amplamente utilizado por montadoras de diversas regiões do globo, todos os materiais presentes na fabricação de automóveis são coletados e categorizados seguindo uma classificação desenvolvida pela VDA – *Verband der Automobilindustrie* (Associação Alemã da Indústria Automotiva). Em conjunto, IMDS/VDA proporcionam que montadoras e sistemistas padronizem seus processos e troquem informações de forma eficiente, facilitando o mapeamento da lista de materiais (BoM) dos veícu-

los de forma sistemática e padronizada (DXC TECHNOLOGY, 2025). A relação entre os materiais do IMDs e os datasets do projeto pode ser consultada no **Anexo II – Lista de materiais dos veículos**.

No que diz respeito à coleta de dados ao longo da cadeia de valor, foi elaborada uma planilha de coleta específica para o aço automotivo, principal material emissor de gases de GEE dentro do escopo considerado. Essa planilha foi enviada para as siderúrgicas aderentes ao projeto. Adicionalmente, foi realizada uma visita técnica à Usiminas, possibilitando que a equipe do projeto percorresse todas as etapas do processo de produção de aço automotivo. A visita foi fundamental para identificar os parâmetros críticos de processo que influenciam diretamente a pegada de carbono do aço e, conseqüentemente, a dos veículos. Além do aço, foram elaboradas e enviadas planilhas específicas para a coleta de dados nos setores de alumínio, plástico, autopeças e informações logísticas.

Os formulários de coleta de dados específicos foram então desenvolvidos de forma a fornecer insumos consistentes, rastreáveis e compatíveis com a metodologia da ACV, permitindo a replicabilidade e a comparabilidade dos dados recebidos.

Com o objetivo de auxiliar montadoras e demais atores do setor automotivo na coleta sistemática de dados primários, os formulários completos estão disponibilizados no **Anexo VII**. A **Tabela 4.1** sintetiza as principais informações requeridas aos diferentes segmentos da cadeia automobilística no contexto da coleta de dados primários conduzida pelo projeto. A coleta e a disponibilização de informações locais permitiram análises e comparações mais robustas, bem como melhores insumos técnicos para apoio à estruturação de políticas públicas a serem aplicadas no setor. No entanto, é importante ressaltar que as informações primárias coletadas foram de caráter auto-declaratório, não tendo sido realizado nenhum tipo de verificação ou auditoria para assegurar a veracidade das informações fornecidas. Além disso, a fim de não expor os dados sensíveis dos parceiros do projeto, as informações que resultaram da coleta de dados primários foram apresentadas de forma anônima e agrupada, respeitando os acordos de confidencialidade firmados com os parceiros. Para mitigar possíveis impactos na robustez e confiabilidade, foram realizados procedimentos para avaliação da qualidade e consistência dos dados, detalhados na seção 5.4. As considerações quanto à representatividade das informações coletadas estão discutidas na seção 3.3 e ao longo deste relatório.

Tabela 4.1 – Principais informações requeridas por meios dos formulários de coleta de dados primários para os diferentes segmentos da cadeia automobilística

Categoria de dado	Segmentos da cadeia automobilística			
	Aço	Alumínio	Plástico	Montadoras
Identificação da unidade produtiva	Nome da planta, localização, tipo de processo (integrado/semi-integrado), capacidade e ano-base.	Nome da unidade, localização, tipo de processo (primário/reciclado), capacidade e ano-base.	Nome da planta, localização, tipo de processo (injeção/extrusão), capacidade e ano-base.	Nome da planta, localização, capacidade instalada, volume de produção, ano-base.
Descrição do produto	Tipo de aço (ex: longo, plano), rota produtiva (BF-BOF, EAF), aplicação automotiva e coprodutos.	Tipo de produto (lingote, tarugo, peça fundida), liga, aplicação automotiva e coprodutos.	Tipo de resina (PP, PE, PUR), blends, características técnicas, aplicação no veículo e coprodutos.	Etapas fabris de montagem (estamparia, solda, pintura, montagem), tecnologias e equipamentos usados.
Matérias-primas e insumos mais relevantes	Minério de ferro, carvão, coque, calcário, sucata, aditivos; origem e quantidade utilizada.	Alumina, bauxita, sucata, fundentes, aditivos; origem e proporção reciclada.	Resinas, aditivos, cargas minerais; proporção reciclada, nacional/importado.	Insumos diretos (gás, água, tintas, lubrificantes, ar comprimido) utilizados nas etapas de montagem. Lista de materiais que compõe o veículo.
Consumo de energia	Energia elétrica, gás natural, gases de processo; quantidade, fonte e uso por etapa.	Eletricidade, biomassa, combustíveis fósseis; fonte, volume e uso no processo.	Eletricidade, água, outros utilitários por tipo de processo (extrusão/injeção, etc.).	Eletricidade, gás, ar comprimido, água e consumo por etapa do processo produtivo.
Emissões e resíduos	CO ₂ de processo e combustão, resíduos sólidos e efluentes; destinação.	Emissões diretas (CO ₂ , CH ₄), resíduos sólidos/líquidos, rotas de disposição.	Emissões atmosféricas, geração de aparas, reprocessamento, resíduos industriais.	Emissões da planta (GEE, compostos voláteis), geração e destinação de resíduos e efluentes.

Tabela 4.1 – Principais informações requeridas por meios dos formulários de coleta de dados primários para os diferentes segmentos da cadeia automobilística

Categoria de dado	Segmentos da cadeia automobilística			
	Aço	Alumínio	Plástico	Montadoras
Transporte e logística	Modal de entrega ao setor automotivo, distância média percorrida, tipo de combustível usado.	Transporte ao cliente automotivo, tipo de modal, distância média.	Logística até a montadora, modais utilizados, raio de distribuição.	Transporte interno de peças/componentes, distâncias percorridas e energia usada.
Parâmetros ambientais	Reaproveitamento de resíduos, eficiência energética, conteúdo reciclado.	Taxa de reciclagem, reaproveitamento de subprodutos, eficiência energética.	Conteúdo reciclado, perdas de processo, reutilização interna.	Indicadores de reuso de água, eficiência energética, iniciativas de economia circular.

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Coleta de dados secundários e adaptação de inventários do ciclo de vida

Para além dos dados primários, a elaboração dos inventários de ciclo de vida e modelagem da pegada de carbono

reuniu esforços de levantamento de dados secundários que incluem as informações contidas no relatório de estado da arte deste projeto, relatórios técnicos, publicações acadêmicas, relatórios setoriais e bases de dados relevantes.

Figura 4.2 – Processo de criação e adaptação de inventários do ciclo de vida

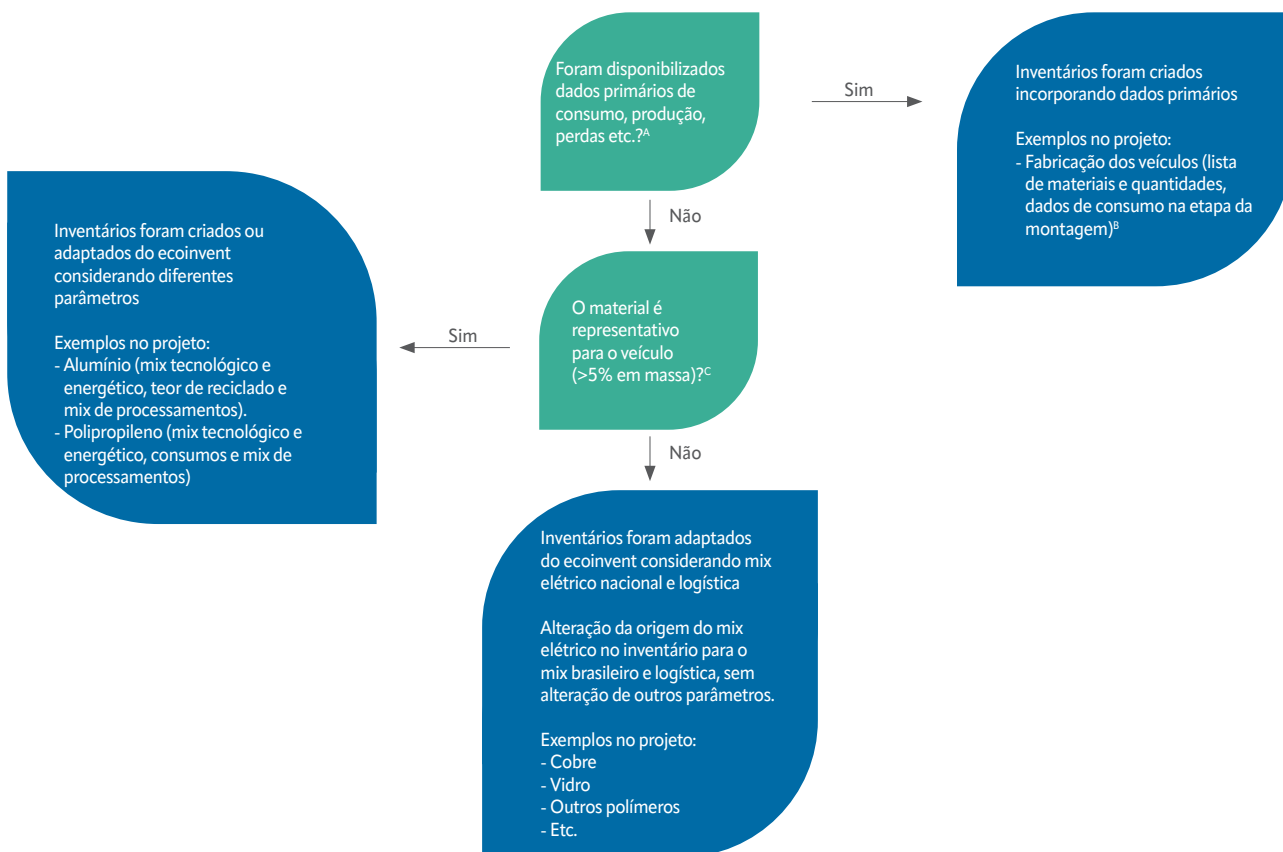


Fonte: Elaboração própria.

Conforme pode ser observado na **Figura 4.2**, o processo de criação e adaptação dos inventários do ciclo de vida se iniciou com uma vasta revisão da literatura científica sobre estudo de ACV de veículos leves, seguido de um mapeamento dos inventários disponíveis majoritariamente na base de dados ecoinvent e em bases de dados auxiliares como GREET. Por fim, buscou-se “tropicalizar” os inventários mapeados com informações nacionais fornecidas por meio de dados primários das empresas parceiras, de consulta à especialistas e consultorias e/ou de dados secundários disponíveis em relatórios setoriais. Para alguns dos processos com maior disponibilidade de da-

dos primários e/ou mais relevantes para a massa do veículo (>5% em massa), como a produção do aço, as etapas fabris de montagem do veículo, produção de alumínio e polipropileno, foram criados inventários com customizações no consumo de energia (eletricidade e/ou calor) e/ou de processos (insumos, rotas de produção, perdas etc.). Já para materiais menos representativos, ou com pouca disponibilidade de dados a nível nacional as adaptações foram mais simples, adaptando inventários da base de dados ecoinvent alterando a origem da matriz elétrica para a matriz brasileira e logística. A **Figura 4.3** ilustra o processo decisório a respeito da tropicalização dos inventários.

→| **Figura 4.3 – Árvore de decisão adotada no projeto para adaptações de inventários**



A Foram considerados somente dados recebidos até o dia 03/12/2025. Dados recebidos após essa data não foram considerados no estudo, por conta do prazo de finalização do projeto.

B Para veículos híbridos e elétricos não foram obtidos dados de lista de materiais primários das montadoras. Neste caso, foi utilizado como referência a lista de materiais levantadas pela consultoria Bright.

C Os plásticos são materiais representativos para o veículo, sendo o PP o mais representativo. Desse modo, foi feita uma adaptação mais específica para o PP. No caso dos veículos elétricos, apesar das baterias terem peso representativo, as adaptações para os cenários de nacionalização foram feitas exclusivamente considerando o mix elétrico brasileiro da etapa de montagem e origem dos materiais que compõem a bateria (ex: aço, alumínio, PP etc.) uma vez que não há informações a respeito de manufatura no Brasil.

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à cobertura dos dados, destaca-se que o estudo combina informações primárias e secundárias, refletindo a natureza complexa da cadeia automotiva. Os dados primários concentram-se principalmente na etapa de montagem dos veículos ICEV, incluindo listas de materiais (*bill of materials*) fornecidas pelas montadoras participantes, bem como informações específicas sobre composição e percentuais de importação de componentes. Adicionalmente,

foram incorporados dados primários pontuais do setor siderúrgico, obtidos junto a produtores nacionais. Por outro lado, as etapas a montante, especialmente a produção de materiais como aço, alumínio, polímeros e demais insumos, são predominantemente representadas por inventários secundários provenientes de bases de dados consolidadas e literatura técnica, eventualmente ajustados para melhor refletir o contexto brasileiro.

5. Inventários consolidados de ciclo de vida para veículos leves

Como mencionado anteriormente, uma das etapas fundamentais de um estudo de ACV é a elaboração de Inventários de Ciclo de Vida (ICV), definidos conjuntos de dados que contabilizam todas as entradas e saídas de material e energia representativas de um sistema de produto, sendo a qualidade e representatividade dos dados coletados nessa etapa determinantes para a robustez dos resultados do estudo. Para tanto, é imprescindível considerar as particularidades regionais do contexto produtivo, como matriz energética, tecnologias empregadas e eficiências operacionais locais, tal qual destacado por Seo e Kulay (2006).

Apesar de existirem inventários de veículos leves em bases de dados de ACV, poucos representam adequadamente a realidade brasileira. No relatório de revisão da literatura conduzido pelo projeto, dos 58 estudos de ACV avaliados, apenas um utilizou como escopo de produção o Brasil (VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019; FGVCES, 2024). A elaboração de inventários específicos para o contexto nacional representa, portanto, um grande desafio, dada a complexidade da cadeia automobilística, a diversidade de materiais envolvidos e as variações entre peças produzidas localmente e importadas. Nesse contexto, as principais diferenças regionais estão relacionadas aos parâmetros técnicos dos processos produtivos e de eficiência energética, nível tecnológico e origem das fontes de energia utilizadas.

Esta seção apresenta os resultados do processo de construção e/ou adaptação de inventários de ciclo de vida para a realidade da produção de veículos leves no Brasil. A lista completa dos datasets criados e/ou adaptados pelo projeto pode ser consultada no Anexo V. Como resultado deste esforço, foram elaborados e/ou adaptados mais de 200 inventários do ciclo de vida, abrangendo:

- Inventários da produção e etapas fabris de montagem de veículos leves;
- Inventários de produção, processamento e transporte dos

principais materiais utilizados (aço, alumínio, plásticos, baterias, entre outros);

- Inventários de produção de eletricidade no contexto nacional;
- Inventários de background (inventários de segundo plano, não específicos do sistema de produto, que utilizam dados genéricos de bases de dados - comoecoinvent).

5.1. Inventários de ciclo de vida para a produção e montagem de veículos leves

Com capacidade instalada de produção de 4,6 milhões de veículos e produção média nos últimos três anos de 2,2 milhões de novos veículos anualmente, o setor automobilístico brasileiro é representado por 26 marcas, 57 fábricas, 498 indústrias de autopeças e 5.044 concessionárias (ANFAVEA, 2023).

Os veículos leves, isto é, veículos de passeio e comerciais leves, compõem a maior parcela da frota brasileira, representando 53% do total de 111 milhões de veículos circulantes (CNT, 2022). Esse segmento é caracterizado por veículos com motor de combustão interna (ICEV) do tipo flex, que representam cerca de 91% das vendas de veículos de passeio (ANFAVEA, 2023). O restante está distribuído entre veículos ICEV movidos exclusivamente a diesel (3%) ou gasolina (3%) e veículos eletrificados (EV) (3%), que podem ser divididos em três categorias: Veículos Elétricos a Bateria (BEV); Veículos Elétricos Híbridos (HEV); Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (PHEV).

A seguir, apresenta-se uma visão geral do processo produtivo de veículos leves, seguida do detalhamento da modelagem adotada para a produção dos veículos no cenário base deste estudo.

5.1.1. Processo produtivo

O ciclo de vida de um veículo tem início com a extração das matérias-primas, seguida da produção dos materiais que com-

õem sua estrutura e seus sistemas. Esses materiais são, então, transformados em componentes nas indústrias de autopeças e posteriormente destinados às linhas de montagem das montadoras, onde ocorre a integração final do veículo.

A fabricação do veículo nas montadoras percorre três etapas principais de uma linha de montagem: corte das chapas de aço que formam a estrutura do automóvel; pintura da carroceria; e montagem dos componentes elétricos, mecânicos e de segurança (MOTOMURA, 2011). As principais etapas fabris do processo de manufatura do veículo são detalhadas a seguir:

Design de produto e desenvolvimento do projeto

Previamente à produção, é desenvolvido o projeto do veículo, que envolve a criação de desenhos técnicos e protótipos. Nessa fase, é comum o uso de tecnologias avançadas, como simulações computacionais e modelagens 3D, que auxiliam na concepção do produto e otimizam processos. Decisões tomadas durante o design impactam diretamente a eficiência da produção e o desempenho do veículo e, conseqüentemente, sua pegada de carbono.

Estamparia

Com o auxílio de máquinas de corte e prensa, chapas de metais, como aço, alumínio e outras ligas, são transformadas em partes da carroceria do automóvel. O metal, que chega em bobinas, passa por diversas prensas até ganhar sua forma específica. Ao final do processo, os componentes do veículo são unidos por meio de pontos de soldas para formar a carroceria, com as aparas de metais sendo enviadas para reciclagem (BLACK, 2021a).

Pintura

Após a montagem da carroceria, o veículo passa pelo processo de pintura. Isso envolve a aplicação de camadas de primer, tinta e verniz para proteção contra corrosão, ferrugem e infiltração e para o acabamento estético, com a cor definitiva do veículo (BLACK, 2021b).

Montagem final

Na montagem final, são inseridos todos os equipamentos internos e externos que compreendem por volta de 3.000 peças. A montagem é realizada em diversas etapas, que incluem a montagem do chassi, da carroceria e a instalação do motor, bem como procedimentos para o acabamento interno e externo. Nesta fase, também são instalados os quadros de instrumentos, carpetes, estofamentos laterais, bancos, para-brisas e elementos elétricos, recebendo, ao final, as rodas e pneus (CARVALHO, 2021).

Antes de ser liberado para a venda, o veículo passa por testes e ins-

peções rigorosas para garantir sua qualidade e segurança (CARVALHO, 2021). Com a etapa de montagem concluída, o veículo é então distribuído para uma das 5.044 concessionárias do país.

É importante notar que a produção de veículos varia entre as montadoras e modelos, e cada empresa pode empregar processos e materiais específicos. Além disso, a indústria automotiva está em constante evolução, buscando sempre alternativas para materiais e tecnologias de forma a aumentar a eficiência e reduzir o impacto ambiental dos veículos.

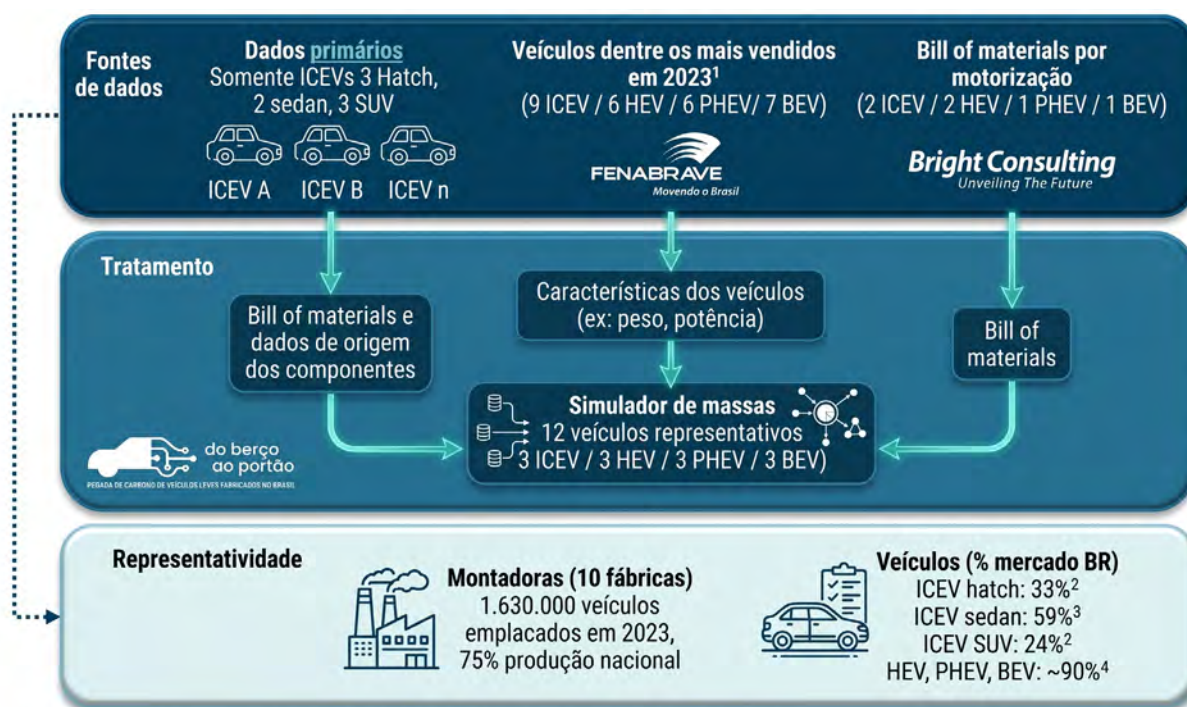
▲ 5.1.2. Modelagem dos veículos no cenário base

Para a elaboração dos inventários da produção e montagem dos veículos leves foram consideradas doze opções de veículos representativos de três diferentes segmentos (hatch, sedan e SUV) e quatro tecnologias de propulsão (ICEV, HEV, PHEV, BEV). As principais características dos veículos representativos adotados no estudo como massa, potência e dimensões estão apresentadas na [Tabela 5.1](#).

Essas características foram definidas a partir da média ponderada das especificações de três modelos de veículos leves dentre os mais vendidos no mercado brasileiro em 2023 para cada segmento (hatch, sedan e SUV) e tecnologia de propulsão, calculadas em função do volume de vendas em 2023, disponível no Relatório Informativo de Emplacamentos de 2023 da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores - FENABRAVE (FENABRAVE, 2023). Mais detalhes no ANEXO III. Essas informações foram complementadas por informações fornecidas pela consultoria Bright.

A partir das características de cada veículo, o estudo desenvolveu um modelo para estimar a massa dos diferentes sistemas de cada veículo (corpo, estrutura, motor de tração, sistema de *powertrain*, sistema de transmissão etc.). Os resultados são expressos na [Tabela 5.2](#). Mais detalhes sobre o modelo de massas podem ser consultados no [Anexo VI - Modelo de massas](#). Com base nas massas estimadas dos sistemas, foram determinadas as respectivas receitas de materiais dos veículos (*Bill of Materials* - BoM). Para isso, utilizaram-se dados primários disponibilizados pelas montadoras participantes do estudo, que forneceram informações para veículos ICEV dos segmentos hatch, sedan e SUV, bem como dados de mercado fornecidos pela consultoria Bright, abrangendo veículos ICEV, HEV, PHEV e BEV. Os inventários de ciclo de vida dos veículos com as entradas de materiais, de componentes e processos estão detalhadas na [Tabela 5.3](#). Para consultar a composição de materiais por sistema do veículo, vide [Anexo II](#) - Lista de materiais dos veículos. A [Figura 5.1](#) apresenta um esquemático da metodologia adotada para a criação dos 12 veículos do projeto.

→| **Figura 5.1 – Esquemático do simulador de massas para criação dos 12 veículos do projeto**



1 Não houve registro de vendas em 2023 do segmento hatch para veículos HEV e PHEV a partir dos dados da Fenabrave.

2 Foram utilizados como referência veículos em que foram obtidos dados primários das montadoras.

3 Foram utilizados como referência veículos em que foram obtidos dados primários das montadoras e as características de um veículo dentre os mais vendidos da lista da Fenabrave em 2023.

4 Foram utilizados como referência apenas características de veículos dentre os mais vendidos em 2023 da Fenabrave, dada a indisponibilidade de dados primários para os veículos eletrificados.

Fonte: Elaboração própria.

Vale destacar que, apesar da crescente participação das vendas de veículos eletrificados no país (5% do total de emplacamentos em 2023), o mercado brasileiro de veículos leves ainda é dominado por veículos com a motorização ICEV, responsáveis por 95% do total de emplacamentos no mesmo ano. Em relação ao tipo de segmento, dados da FENABRAVE indicam uma preferência do mercado pelos modelos SUV – 45% do total de emplacamentos em 2023–, seguidos pelos modelos hatch (36%) e sedan (17%).

Considerando a representatividade dos veículos analisados no âmbito do projeto, observa-se que os doze veículos estudados respondem por aproximadamente 36% do total de vendas de veículos leves no país em 2023 (FENABRAVE, 2023). A cobertura é maior no caso dos veículos eletrificados (HEV, P-HEV e BEV), com valores próximos a 90% das vendas desta tecnologia de motorização, e menor para os veículos ICEVs, representando cerca de um terço do total de veículos a combustão interna comercializados em 2023.

As etapas fabris de montagem do veículo incluem os processos de estampagem, pintura aquecimento, ventilação e ar-condicionado, movimentação de materiais, soldagem e ar comprimido. Mais detalhes sobre a produção dos veículos podem ser consultados no relatório de revisão da literatura do projeto (FGVCES, 2024). No que se refere ao consumo de materiais e energia nessas etapas de fabricação no Brasil, foram empregados dados primários provenientes das montadoras participantes do projeto. A média ponderada do consumo de eletricidade, calor e demais insumos industriais é apresentada na **Tabela 5.4** e foi calculada para dez fábricas, em função do número de veículos produzidos por cada unidade fabril. Cabe destacar que as entradas de materiais que são incorporados ao veículo como aço, alumínio, polímeros, tintas, entre outros, não foram consideradas neste inventário da montagem, mas consideradas diretamente no inventário de ciclo de vida dos veículos, de forma a evitar dupla contagem (**Tabela 5.3**) de modo a se evitar dupla contagem. Ma-

teriais não incorporados ao veículo, que são exclusivamente associados ao processo de fabricação como solventes, óleos lubrificantes para máquinas, gases de solda, combustíveis utilizados nos maquinários e utilidades, bem como consumo de energia da fábrica foram considerados no inventário da montagem. Também cabe destacar que estas 10 unidades fabris que enviaram informações produziram cerca de 1.630.000 de veículos em 2023, representando aproximadamente 75% da produção de veículos leves (automóveis e comerciais leves) no Brasil no mesmo ano (FENABRAVE, 2023), evidenciando a representatividade das montadoras fornecedoras de dados primários recebidos para o contexto brasileiro.

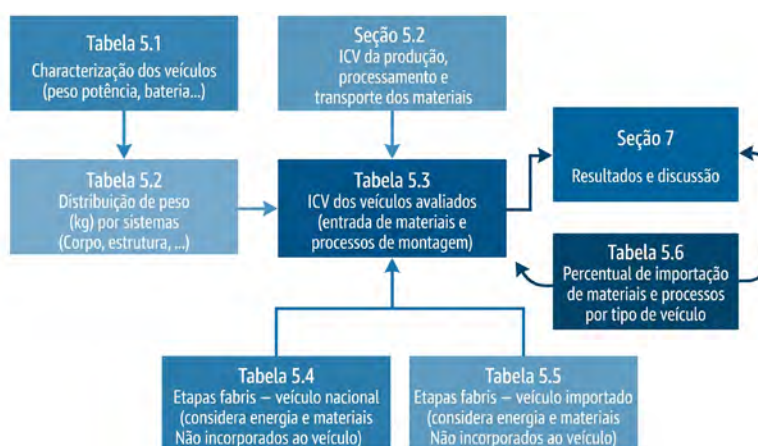
O consumo energético associado às etapas de processamento dos materiais (com exceção da estampagem) não está incluído no inventário da montagem e fabricação do veículo, uma vez que esses processos foram avaliados separadamente, por tipo de material, e incorporados aos inventários de produção dos respectivos materiais. Informações sobre os processamentos considerados para cada material podem ser consultadas na seção 5.2. Também cabe destacar que não foram obtidas informações específicas a respeito da fabricação de veículos por tipo de motorização. Desse modo, o mesmo inventário da etapa de fabricação e montagem foi utilizado para todas as motorizações. Essa é uma premissa também adotada em outros estudos, como o GREET, dada a indisponibilidade de dados primários, a dificuldade em separar dados de consumo por tipo de veículo em uma mesma linha de montagem e a baixa contribuição para a pegada de carbono desta etapa. No cenário base, o inventário de fabricação nacional foi utilizado para os ICEVs e para parte dos HEVs (mais detalhes seção 5.1.3).

Para os veículos importados (PHEVs, BEVs e parte dos HEVs, consultar seção 5.1.3), o estudo utilizou como referência o inventário de montagem do GREET 2024 (*Vehicle Assem-*

bly, Disposal and Recycling), desconsiderando as etapas de produção das tintas, que já é considerada neste projeto por meio da entrada de materiais do veículo, e da disposição final e reciclagem do veículo, que não fazem parte do escopo do estudo. Por se tratar de um inventário secundário, o nível de detalhamento das informações foi menor quando comparado ao inventário da fabricação no Brasil, limitando-se às informações de consumo de calor e eletricidade, conforme **Tabela 5.5**. Também foi possível observar que os valores de consumo de eletricidade e calor na etapa de fabricação no Brasil foram menores que do GREET. Isso pode se explicar por diferenças nos processos de fabricação e temporal dos estudos. O GREET possui como referência informações de 2010 (SULLIVAN; BURNHAM; WANG, 2010), enquanto as informações enviadas das dez unidades fabris pelas montadoras no Brasil foram referentes a 2023 e 2024, com consumos de eletricidade variando de 860 a 3.000MJ/veículo. As variações observadas no consumo de eletricidade das unidades se devem às diferenças nos processos produtivos e eficiências, bem como na quantidade dos veículos produzidos no ano inventariado por cada fábrica. Quanto ao consumo de calor, os maiores valores do inventário do GREET podem ser explicados por condições regionais, uma vez que retrata cenário de fabricação norte americano em climas temperados. Neste caso, o maior consumo de gás natural em relação ao cenário brasileiro pode ser explicado pela maior demanda energética para o aquecimento do ar e água utilizados para climatização dos ambientes, mas especialmente no processo de pintura. Na seção 7.2, é apresentado uma discussão detalhada sobre o impacto nas emissões de GEE da etapa de fabricação e montagem adotados pelo estudo.

A **Figura 5.2** apresenta um esquemático da relação entre as diferentes tabelas e seções deste estudo, de modo a facilitar a compreensão das informações.

→| **Figura 5.2 – Relação entre as tabelas de inventário de ciclo de vida dos veículos avaliados pelo projeto**



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.1 – Caracterização dos veículos considerados pelo projeto

Especificações gerais	ICEV			HEV			P-HEV			BEV		
	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV
Peso em ordem de marcha (kg)	1115,77	1176,89	1218,53	1238,18	1512,66	1468,54	1578,39	2003,37	1873,07	1429,72	2050,89	1727,50
Potência do motor a combustão (kW)	79,10	92,92	93,85	79,10	127,88	82,82	79,10	173,60	106,20	0,00	0,00	0,00
Potência do motor elétrico (kW)	0,00	0,00	0,00	40,00	18,53	61,80	79,10	111,91	136,66	77,19	323,67	134,94
Tipo de bateria	-	-	-	NMC811	NMC811	NMC811	LFP	LFP	LFP	LFP	LFP	LFP
Capacidade da bateria íon-lítio (kWh)	0,00	0,00	0,00	2,00	1,95	1,32	22,00	22,27	16,17	44,97	74,52	56,74
Peso da bateria íon-lítio (kg)	0,00	0,00	0,00	13,45	13,10	8,91	190,04	192,37	139,71	388,50	643,70	490,14

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.2 – Distribuição de peso dos veículos avaliados pelo projeto, por sistemas (kg)

Tecnologia de motorização	ICEV			HEV			P-HEV			BEV			
	Segmento Veículo	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV
Corpo		557	582	598	579	713	706	628	791	789	597	687	692
Estrutura		268	280	304	294	363	359	319	402	401	303	349	352
Motor de tração		-	-	-	9	3	17	23	38	50	23	161	49
Sistema de powertrain		176	193	195	204	272	209	233	359	278	28	46	35
Sistema de transmissão		57	63	64	70	86	76	78	124	100	21	55	30
Gerador		-	-	-	-	-	18	18	-	18	-	-	-
Controlador eletrônico		-	-	-	21	14	26	30	36	40	29	64	40
Bateria auxiliar (chumbo-ácido)		15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	19,5	15,3	15,3	19,5	15,3
Bateria principal (íon-lítio)		-	-	-	13,4	13,1	8,9	190,0	192,4	139,7	388,5	643,7	490,1
Fluídos		43	43	43	33	33	33	43	43	43	25	25	25
Total		1116	1177	1219	1238	1513	1469	1578	2003	1873	1430	2051	1728

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.3 – Distribuição de materiais dos veículos avaliados pelo projeto (em kg)

VDA/ IMDS	Material (nomenclatura do estudo)	Und.	ICEV			HEV			P-HEV			BEV		
			Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV	Hatch	Sedan	SUV
1.1	Aço não ligado	kg	756,71	795,99	695,21	717,59	890,35	860,24	806,22	1059,35	1.014,37	627,57	818,56	744,07
1.1.2	Aço alta liga	kg	0,00	0,00	0,00	0,14	0,05	0,25	0,28	0,45	0,59	0,23	1,61	0,49
1.2	Ferro fundido	kg	16,98	18,96	20,09	49,38	65,83	50,67	53,17	81,85	63,30	0,00	0,00	0,00
2.1	Alumínio fundido sem liga	kg	29,73	32,74	41,53	35,49	43,80	41,51	38,94	54,18	49,37	26,39	36,77	31,87
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	kg	50,17	54,54	68,70	78,12	89,58	98,34	97,86	125,65	126,97	56,75	124,37	75,92
2.2	Magnésio fundido	kg	0,27	0,28	0,57	0,55	0,68	0,68	0,60	0,76	0,76	0,57	0,66	0,66
3.1	Cobre	kg	11,90	13,08	15,05	39,97	46,61	51,98	54,23	69,02	69,64	37,50	73,86	49,07
3.3	Zinco	kg	0,00	0,00	0,00	0,19	0,12	0,24	0,34	0,41	0,46	0,32	0,73	0,44
3.4	Níquel	kg	0,00	0,00	0,00	0,04	0,02	0,05	0,05	0,07	0,08	0,05	0,15	0,08
3.5	Chumbo	kg	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	10,56	13,42	10,56	10,56	13,42	10,56
4.1	Platina	kg	0,0035	0,0039	0,0039	0,0020	0,0027	0,0021	0,0030	0,0047	0,0036	0,0000	0,0000	0,0000
4.2	Outros metais especiais	kg	0,00	0,00	0,00	0,25	0,09	0,46	0,66	1,06	1,39	0,64	4,55	1,38
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	kg	112,49	119,52	211,11	156,94	193,73	188,20	171,12	220,22	214,08	154,58	187,91	180,83
5.3	Borracha sintética	kg	41,09	43,35	66,34	60,84	75,35	73,37	66,21	84,65	82,83	58,28	67,44	67,59
6.1	Tinta eletrostática	kg	0,00	0,00	0,00	0,12	0,04	0,22	0,21	0,34	0,45	0,19	1,37	0,41
6.2	Adesivos	kg	13,79	13,79	13,79	13,88	13,88	13,88	18,08	18,08	18,08	13,48	13,48	13,48
7.2	Vidro	kg	24,75	25,87	27,19	26,31	32,43	32,10	28,57	35,94	35,87	27,14	31,25	31,45
	Fibra de vidro	kg	9,84	10,50	12,48	7,51	9,08	9,11	8,13	10,23	10,15	7,73	9,15	8,95
7.3	Outros compostos	kg	4,92	5,14	3,33	4,37	4,86	5,30	4,83	6,12	6,13	4,35	6,13	5,23
9.2	Óleo lubrificante	kg	14,96	14,96	14,96	4,79	4,79	4,79	6,24	6,24	6,24	0,83	0,83	0,83
9.3	Fluído de freio	kg	0,92	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	1,21	1,21	1,21	0,90	0,90	0,90
9.4	Etilenoglicol	kg	10,57	10,57	10,57	10,64	10,64	10,64	13,86	13,86	13,86	7,09	7,09	7,09
9.6	Água	kg	6,12	6,12	6,12	6,14	6,14	6,14	6,98	7,90	6,98	6,06	6,98	6,06
	Montagem bateria chumbo-ácido ^A	kg	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	15,30	19,45	15,30	15,30	19,45	15,30
-	Bateria Li-ion NMC811 ^B	kg	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	190,04	192,37	139,71	388,50	643,70	490,14
	Etapas fabris de montagem do veículo ^C	und	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Elaboração própria.

A Para evitar dupla contagem, este inventário considera apenas o processo de montagem da bateria chumbo-ácido, uma vez que os materiais da bateria de chumbo ácido já estão incluídos na lista de materiais (*Bill of Materials*) dos veículos. (mais detalhes ver seção 5.2.13).

B No caso das baterias principais dos veículos eletrificados, os materiais não foram incluídos na lista de materiais (*Bill of Materials*) dos veículos. Desse modo, estes inventários consideram tanto a montagem como a entrada de materiais das baterias (mais detalhes ver seção 5.2.13).

C Para evitar dupla contagem, este inventário compreende apenas o consumo de materiais auxiliares e energia empregados nas etapas fabris de montagem, uma vez que os materiais que compõem os veículos já estão incluídos na lista de materiais (*Bill of Materials*). Mais detalhes nas Tabelas 5.4 e 5.5. Para o cenário base, o inventário de montagem nacional foi considerado para os ICEVs e parcialmente para os HEVs (considerando que uma parte dos HEVs consumidos no Brasil são fabricados nacionalmente e uma parte é importada). Os inventários de montagem globais foram utilizados para os PHEVs e BEVs. Mais detalhes na seção 5.1.3.

Tabela 5.4 – Inventário de ciclo de vida das etapas fabris de montagem de 1 veículo leve no Brasil

Produtos	Qtd.	Und.
Etapas fabris de montagem do veículo, BR	1,00	und
Materiais e combustíveis		
Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil Cut-off, U ^A	1,43	kg
Argon, liquid {RoW} market for argon, liquid Cut-off, U	0,20	kg
Carbon dioxide, liquid {RoW} market for carbon dioxide, liquid Cut-off, U	0,14	kg
Acetylene {RoW} market for acetylene Cut-off, U	0,04	kg
Solvent for paint {GLO} market for solvent for paint Cut-off, U	2,62	kg
Polyvinylchloride, bulk polymerised {GLO} market for polyvinylchloride, bulk polymerised Cut-off, U	1,20	kg
Cationic resin {RoW} market for cationic resin Cut-off, U	1,96	kg
Petrol, unleaded {BR} market for petrol, unleaded Cut-off, U	4,00	kg
Ethanol, without water, in 99.7% solution state, from fermentation {BR} sugarcane processing, traditional annexed plant Cut-off, U	2,00	kg
Liquefied petroleum gas {BR} market for liquefied petroleum gas Cut-off, U	4,00	kg
Eletricidade e calor	kg	
Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, U	2000	MJ
[BP] Diesel, burned in building machine {BR} diesel, burned in building machine Cut-off, U	60	MJ
[BP] Electricity, medium voltage {BR} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	1800	MJ
Emissões para o ar		
Carbon dioxide, fossil ^E	23,58	kg
Methane, fossil ^F	0,02	kg
Dinitrogen monoxide ^{F,H}	0,002	kg
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a ^F	0,002	kg
Carbon dioxide, biogenic ^G	3,55	kg
Methane, biogenic ^H	0,0005	kg

Fonte: Elaboração própria a partir de dados primários das montadoras.

A Óleos utilizados nos maquinários e processos de fabricação.

B Gás inerte utilizados como gases de solda.

C Solventes utilizados no processo de pintura dos veículos. Os solventes não são incorporados nos veículos, mas volatilizados e emitidos como compostos orgânicos voláteis (COVs).

D Combustíveis consumidos por veículos controlados pela organização

E Parcela referente à queima do acetileno, gasolina e GLP. Fatores de emissão baseados na ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2023).

F Assumido um fator de perda de gás refrigerante na carga dos aparelhos de ar-condicionado dos veículos de 0,50% (IPCC, 2019).

G Parcela referente à queima do etanol. Fatores de emissão baseados na ferramenta do Programa Brasileiro GHG Protocol (PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL, 2023).

Nota: o método de AICV utilizado desconsidera as emissões e remoções de CO₂ biogênico, sendo estas consideradas apenas a nível de inventário.

Tabela 5.5 – Inventário de ciclo de vida das etapas fabris de montagem de 1 veículo leve importado

Produtos	Qtd.	Und.
Etapas fabris de montagem do veículo Etapas fabris de montagem do veículo, GLO	1,00	und
Eletricidade e calor		
Heat, district or industrial, natural gas {RoW} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, U	5574	MJ
Electricity, medium voltage {GLO} market for electricity, medium voltage Cut-off, U	2766	MJ

Fonte: GREET, (2024).

5.1.3. Dados de nacionalização da produção dos veículos e componentes

A definição do percentual de importação de materiais e componentes automotivos é fundamental, uma vez que diferenças geográficas influenciam rotas tecnológicas, matrizes energéticas e níveis de eficiência produtiva. Diante disso, o estudo buscou identificar, para o cenário base, o percentual de nacionalização dos materiais por tecnologia de propulsão (ICEV, HEV, PHEV e BEV).

Para os cenários base do PHEV e BEV foram considerados conteúdos 100% importados, uma vez que não havia produção nacional desses veículos em 2023. Para o ICEV, o estudo assumiu que 100% dos veículos consumidos no país foram fabricados no Brasil. Já no caso do HEV, adotou-se a premissa de que 60% dos veículos consumidos no país foram provenientes de produção nacional, tomando como referência a *market share* das marcas e modelos HEV SUV e sedan que são produzidos nacionalmente (ABVE, 2024).

Neste caso, para a parcela de veículos ICEV e HEV fabricados nacionalmente, o estudo buscou estimar a região de origem dos materiais, reconhecendo que uma parte relevante dos componentes veiculares é adquirida de fornecedores internacionais.

Para os ICEVs, o projeto contou com dados primários fornecidos por algumas empresas parceiras, abrangendo veículos dos segmentos hatch, sedan e SUV. Parte dos participantes encaminhou estimativas próprias de conteúdo importado por material, enquanto outros disponibilizaram listas de componentes (por NCM – Nomenclatura Comum do Mercosul), local dos fornecedores e custos médios. Essas informações permitiram à equipe do projeto classificar os componentes nos principais sistemas veiculares, conforme a taxonomia do modelo GREET (carroceria, estrutura, powertrain, entre outros), e estimar a proporção de fornecedores nacionais e importados por sistema. A partir dessa classificação, o conteúdo de importação foi extrapolado para os principais materiais — aço, ferro, alumínio

e polímeros — com base nas receitas de materiais fornecidas pela Bright Consulting.

Ressalta-se que o número de veículos considerados nesta análise foi limitado e, portanto, os percentuais estimados de importação dos principais materiais não necessariamente representam a totalidade dos modelos de ICEVs produzidos no país. Ainda assim, os dados primários utilizados oferecem uma aproximação mais realista do conteúdo importado dos principais materiais do setor automotivo quando comparados a análises baseadas exclusivamente em anuários estatísticos intersetoriais.

Para materiais de menor relevância em termos de massa nos ICEVs como cobre, magnésio, zinco, níquel, chumbo e vidro presentes em componentes específicos para os quais não foi possível obter informações diretas sobre o percentual de importação, adotaram-se dados de consumo aparente no Brasil. Esse consumo foi estimado a partir da soma da produção nacional com as importações, subtraídas as exportações. Os percentuais de importação desses materiais são detalhados na próxima seção.

Por fim, no caso do HEVs, sistemas como gerador, motor de tração, bateria e controlador eletrônico foram considerados como 100% importados, enquanto os demais sistemas (powertrain, transmissão, estrutura e corpo) assumiu-se para a parcela de produção nacional (60% do *market share*), os percentuais de materiais importados e nacionais estimados para o ICEV SUV, em função da indisponibilidade de dados primários. Um resumo dos percentuais de importação por material e por tecnologia de propulsão considerados no cenário base é apresentado na **Tabela 5.6**.

No caso dos cenários avaliados pelo projeto, o cenário de nacionalização explorou alterações na origem dos materiais e montagem: 100%BR – onde estes seriam produzidos integralmente no Brasil e 100% GLO, onde estes seriam produzidos integralmente fora do país. Os demais cenários - materiais de menor intensidade de carbono e maximização do teor de material reciclado – consideraram os mesmos percentuais de nacionalização do cenário 100%BR.

Tabela 5.6 – Percentual de importação de materiais e processos por tipo de veículo considerados no cenário base do estudo

VDA	Material/Processo	ICEV		HEV	P-HEV	BEV
		Hatch/ Sedan	SUV			
Processos						
-	Montagem veículo	0%	0%	40%	100%	100%
-	Montagem bateria chumbo ácido					
-	Fabricação e montagem da bateria NMC 811	-	-	100%	-	-
-	Fabricação e montagem da bateria LFP	-	-	-	100%	100%

Tabela 5.6 – Percentual de importação de materiais e processos por tipo de veículo considerados no cenário base do estudo

VDA	Material/Processo	ICEV		HEV	P-HEV	BEV
		Hatch/ Sedan	SUV			
Materiais (nomenclatura do VDA/IMDs)						
1.1	Aço / Aço fundido / Aço sinterizado	20%	35%	62%	100%	100%
1.1.1	aço não ligado, de baixa liga	20%	35%	62%	100%	100%
1.1.2	Aço altamente ligado	20%	35%	62%	100%	100%
1.2	Ferro fundido	10%	30%	58%	100%	100%
1.2.1	Ferro fundido com grafite lamelar / Ferro fundido temperado	10%	30%	58%	100%	100%
1.2.2	Ferro fundido com grafite nodular / Ferro fundido vermicular	10%	30%	58%	100%	100%
1.2.3	Ferro fundido altamente ligado	10%	30%	58%	100%	100%
2.1	Alumínio e ligas de alumínio	30%	50%	80%	100%	100%
2.1.1	Ligas de alumínio fundido	30%	50%	80%	100%	100%
2.1.2	Ligas de alumínio forjado	13%	13%	48%	100%	100%
2.2	Magnésio e ligas de magnésio	26%	26%	56%	100%	100%
2.2.1	Ligas de magnésio fundido	26%	26%	56%	100%	100%
2.2.2	Ligas de magnésio forjado	26%	26%	56%	100%	100%
2.3	Titânio e ligas de titânio	100%	100%	100%	100%	100%
3.1	Cobre	100%	100%	100%	100%	100%
3.2	Ligas de cobre	100%	100%	100%	100%	100%
3.3	Ligas de zinco	43%	43%	100%	100%	100%
3.4	Ligas de níquel	100%	100%	100%	100%	100%
3.5	Chumbo	26%	26%	56%	100%	100%
4.1	Platina / Ródio	100%	100%	100%	100%	100%
4.2	Outros metais especiais	100%	100%	100%	100%	100%
5.1	Termoplásticos	20%	35%	61%	100%	100%
5.2	Elastômeros termoplásticos	20%	35%	61%	100%	100%
5.3	Elastômeros / Compostos elastoméricos	0%	0%	40%	100%	100%
5.4	Durômero / Resina termofixa	20%	35%	61%	100%	100%
5.4.1	Poliuretano	20%	35%	61%	100%	100%
5.4.2	Poliéster insaturado	20%	35%	61%	100%	100%
5.4.3	Outros durômeros / resinas termofixas	20%	35%	61%	100%	100%
5.5.1	Plásticos (em compostos poliméricos)	20%	35%	61%	100%	100%
5.5.2	Têxteis (em compostos poliméricos)	0%	0%	40%	100%	100%
6.1	Vernizes / materiais de pintura	0%	0%	40%	100%	100%
6.2	Adesivos, selantes	100%	100%	100%	100%	100%
6.3	Revestimento inferior (underseal)	0%	0%	40%	100%	100%
7.1	Materiais naturais orgânicos modificados (por exemplo, couro, madeira, papelão, ...)	0%	0%	40%	100%	100%
7.2	Vidro	0%	0%	40%	100%	100%

Tabela 5.6 – Percentual de importação de materiais e processos por tipo de veículo considerados no cenário base do estudo

VDA	Material/Processo	ICEV				
		Hatch/ Sedan	SUV	HEV	P-HEV	BEV
	Fibra de vidro	100%	100%	100%	100%	100%
7.3	Outros compostos (por exemplo, grafite)	100%	100%	100%	100%	100%
8.1	Materiais de componentes eletrônicos (por exemplo, PCBs, displays)	100%	100%	100%	100%	100%
8.2	Materiais de componentes elétricos	100%	100%	100%	100%	100%
9.1	Combustíveis e meios auxiliares	100%	100%	100%	100%	100%
9.2	Lubrificantes	100%	100%	100%	100%	100%
9.3	Fluido de freio	100%	100%	100%	100%	100%
9.4	Líquido de arrefecimento / Outros glicóis	100%	100%	100%	100%	100%
9.5	Refrigerante	100%	100%	100%	100%	100%
9.6	Água de lavagem, ácidos de bateria	0%	0%	40%	100%	100%
9.7	Conservante	100%	100%	100%	100%	100%
9.8	Outros combustíveis e meios auxiliares	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Inventário de ciclo de vida da produção, processamento e transporte dos materiais

Para a elaboração dos inventários relacionados à produção, processamento e transporte dos materiais que compõem os veículos, foram considerados dados secundários provenientes de bases de dados consolidadas, comoecoinvent (v3.9.1), GREET (2024) e Plastics Europe, além de relatórios setoriais e publicações técnicas. Além disso, quando disponíveis, foram utilizados dados primários. Esses dados foram adaptados, sempre que possível, para refletir as condições específicas da indústria brasileira.

Dentre os materiais analisados, foi dada atenção especial ao aço e alumínio, devido à sua participação expressiva na composição mássica total dos veículos e à sua contribuição significativa para a pegada de carbono final do produto. De acordo com a revisão da literatura conduzida por este projeto, esses materiais juntos são responsáveis por mais de 70% da pegada de carbono da produção de um veículo leve, considerando o escopo do Berço ao Portão da montadora (FGVCES, 2024). O aço, por exemplo, é o material presente em maior quantidade em veículos leves, com uma participação em massa tipicamente acima de 50%, sendo sua contribuição para a pegada de carbono do veículo diretamente proporcional à esta participação mássica. Por essa razão, foram construídos inventários de ciclo de vida detalhados para estes materiais, com foco em sua aplicação automotiva, considerando rotas produtivas, fontes energéticas e parâmetros técnicos representativos da indústria nacional.

Além de inventários associados à produção dos materiais, foram gerados também inventários de processamento dos materiais em sua forma final de montagem no veículo como, por exemplo, a usinagem de barras de aço para a produção de componentes automotivos. A avaliação incluiu o consumo de energia, o uso de materiais auxiliares (como água, lubrificantes, produtos químicos, entre outros) e as perdas de material principal durante o processo.

Outro aspecto importante refere-se à origem dos materiais (nacional ou importada), que influencia diretamente o perfil de emissões de GEE.

A seguir, são detalhados os procedimentos adotados para a elaboração dos inventários do aço, alumínio e demais materiais. Vale destacar que a documentação completa dos inventários originais da base de dados ecoinvent, utilizados como referência para a maioria das adaptações descritas a seguir, está disponível em: <https://ecoofquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff>.

5.2.1 Aço

O Brasil ocupa a nona posição entre os maiores produtores de aço do mundo, com uma produção anual de 32,03 milhões de toneladas em 2023 (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024). Considerando as etapas produtivas do aço, as siderúrgicas podem ser divididas, do ponto de vista técnico, entre dois tipos de usinas: integradas e semi-integradas. Usinas integradas concentram, de maneira centralizada, todos os processos produtivos relevantes. Por outro lado, usinas semi-integradas operam com

foco em etapas específicas da cadeia produtiva, como, por exemplo, a produção de ferro-gusa.

Além disso, cada usina adota estratégias próprias para a reciclagem de materiais e seleção de fontes energéticas, o que implica em significativa variabilidade entre processos produtivos do setor. Apesar disso, a modelagem adotada para a elaboração dos inventários de ciclo de vida do aço no contexto do projeto “Do Berço ao Portão” representa um mix setorial do aço automotivo, com rotas distintas. Para a rota primária BF-BOF a carvão mineral (e sua variante a carvão vegetal), foi modelada uma usina integrada média, fictícia, que busca refletir os principais processos da indústria nacional, sem reproduzir nenhuma instalação específica. Também foi modelada uma usina para a rota secundária, EAF sucata. Por fim, para cenários futuros também foi modelada uma usina típica para a rota primária DRI-EAF. Essa alternativa ainda não possui exemplar no Brasil, portanto sua modelagem utilizou valores da literatura.

▲ 5.2.1.1 Processo produtivo

As principais rotas para a produção de aço são: a primária (BF-BOF), a secundária (EAF) e a rota de redução direta (DRI). A rota primária, também conhecida como alto-forno/conversor (BF-BOF, do inglês *Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace*) utiliza minério de ferro como matéria-prima principal e carvão mineral como agente redutor e fonte de energia térmica. No

Brasil, cerca de 11% do aço primário produzido por esta rota emprega carvão vegetal em substituição ao carvão mineral (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024).

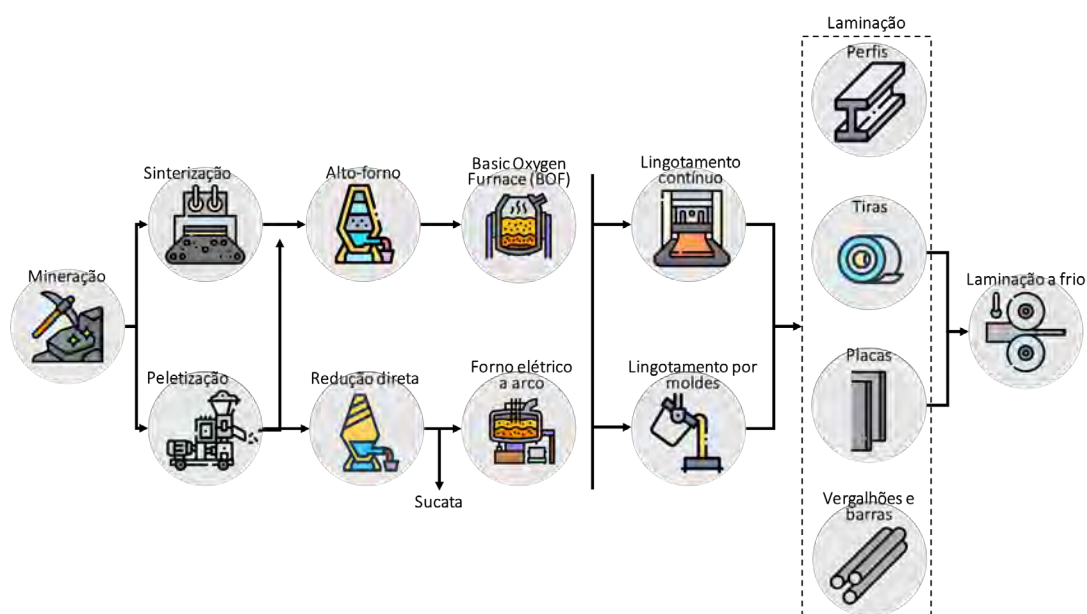
A rota secundária, desenvolvida a partir de fornos elétricos a arco (*Electric Arc Furnace – EAF*), tem como base o emprego da sucata metálica enquanto insumo, apresentando menor consumo energético e uma matriz predominantemente elétrica. Por fim, a rota de redução direta (*Direct Reduced Iron – DRI*), relevante em outros países em função de condições específicas, não possui representatividade significativa no Brasil. Adicionalmente, a rota EOF (*Energy Optimizing Furnace*), não será considerada neste estudo dado que responde por apenas 1,3% da produção nacional siderúrgica.

Em 2023, as 32,03 milhões de toneladas de aço bruto produzidas pelo Brasil estiveram distribuídas da seguinte forma:

- 76% pela rota BF-BOF (24,33 Mt);
- 22,9% pela rota EAF (7,29 Mt);
- 1,3% pela rota EOF (413 mil t, não considerada neste trabalho).

Dessa produção, aproximadamente dois terços correspondem ao aço laminado (planos e longos) e um terço a produtos semiacabados (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024). A **Figura 5.3** apresenta um esquema simplificado das principais rotas de produção de aço.

→| **Figura 5.3 – Principais rotas de produção de aço**



Fonte: Adaptado de Wang, 2024.

5.1.3.1. Modelagem do aço no cenário base

Para a modelagem dos processos produtivos envolvendo o aço brasileiro foram consideradas as informações apresentadas na seção anterior relacionadas às principais características das rotas de produção descritas. Assim, para cada rota de produção, foram aplicados balanços de massa e energia dos processos envolvidos no contexto de uma usina integrada.

O consumo energético de cada etapa, conforme apresentado na **Tabela 5.5** serve como base para todo o modelo. A metodologia priorizou dados secundários de balanços energéticos da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração de 2015 (ABM, 2024) e dados primários obtidos pelas empresas parceiras. Quando da existência de lacunas de dados, estas foram preenchidas com informações da literatura, de preferência nacional (HEBEDA et al., 2023; PINTO; SZKLO; RATHMANN, 2018; SILVA; MATHIAS; BAJAY, 2018; SOUZA; PACCA, 2021), complementadas por informações levantadas em entrevistas e visitas técnicas realizadas entre 2023 e 2025, sempre dentro de faixas mínimas e máximas. Vale destacar que esses dados não seguem o ano base definido pelo estudo (2023). Foi utilizado como referência principal balanços energéticos de 2015, pois não foi possível obter tais documentos públicos atualizados para o ano de 2023.

O modelo contém mais de 300 parâmetros; aqueles com maior influência sobre a intensidade de emissões (como intensidade energética do alto forno) foram priorizados na calibração e na checagem por múltiplas fontes. Em contraste, um subconjunto reduzido de parâmetros secundários foi estimado na ausência de referências diretas, apenas para viabilizar a execução completa do modelo. Esse expediente foi evitado sempre que possível e não afeta a interpretação dos resultados centrais, mas constitui uma limitação do estudo e motiva, como aprimoramento futuro, a explicitação sistemática desses parâmetros e a quantificação do efeito via análise de sensibilidade.

Analisando os dados do Anuário do Instituto Aço Brasil e dos Balanços de Massas e Energia disponíveis no site da ABM foi possível identificar que as principais fontes primárias de energia consumidas no processo siderúrgico são majoritariamente o carvão (de 70% a 90%), seguido pela eletricidade (de 5% a 15%) e pelo gás natural e GLP (de 5% a 15%). Vale ressaltar que a adoção do gás natural ou do GLP depende da disponibilidade e do preço de cada um destes vetores energéticos no momento da aquisição e, portanto, podem oscilar dependendo do momento de análise.

O Anuário do Instituto Aço Brasil (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024), lista as fontes primárias e secundárias de energia mais consumidas na siderurgia, destacando o coque metalúrgico produzido a partir do carvão e a eletricidade parcialmente au-

togerada a partir de gases de processo, sendo estes desprezados do carvão durante a produção do coque na coqueria ou durante a redução do minério de ferro no alto-forno. Nesse sentido, foi realizada a alocação energética das emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis nos processos de produção do coque e do ferro-gusa, considerando os gases gerados nesses processos e utilizados para a autoprodução de energia elétrica na siderurgia, como coprodutos.

A quantidade de eletricidade produzida por autogeração em cada siderurgia pode variar bastante em função das particularidades de cada indústria, dentre elas:

- Características do carvão consumido, que pode produzir uma quantidade maior ou menor de gases de processo;
- Qualidade dos processos de captura e purificação dos gases de processo para uso posterior;
- Quantidade requerida de coque no processo, que pode ser reduzida no alto-forno em até 40% em função de uma maior utilização de carvão pulverizado, o que também irá depender das características do carvão pulverizado utilizado;
- Decisão econômica a respeito da parcela dos gases de processo que será destinada para geração de eletricidade ou para outros processos siderúrgicos, tais como conformação, zincagem ou tratamento térmico do aço, minimizando o consumo de gás natural – considerando que haja infraestrutura adequada.

Tais características do processo siderúrgico implicam em divergências no cálculo dos consumos energéticos e das emissões de gases de efeito estufa associadas a cada etapa de produção do aço, que geralmente estão relacionadas à adoção de critérios diferentes de alocação de energia e emissões na coqueria, no alto-forno e na autogeração. Com efeito, a escolha do método de alocação adotado influencia significativamente a distribuição das emissões entre os produtos e subprodutos de um processo.

No caso de todas as emissões serem alocadas para o produto principal – como o coque produzido na coqueria – os subprodutos deste mesmo processo, a exemplo dos gases de processo, óleos leves e alcatrão, seriam isentos de qualquer ônus de emissão. Por outro lado, caso essas mesmas emissões fossem alocadas proporcionalmente à energia contida tanto nos produtos, quanto subprodutos mencionados, a eletricidade produzida a partir dos gases de processo apresentaria um fator de emissão mais elevado, proporcionando uma repartição mais equitativa das cargas ambientais associadas ao processo produtivo.

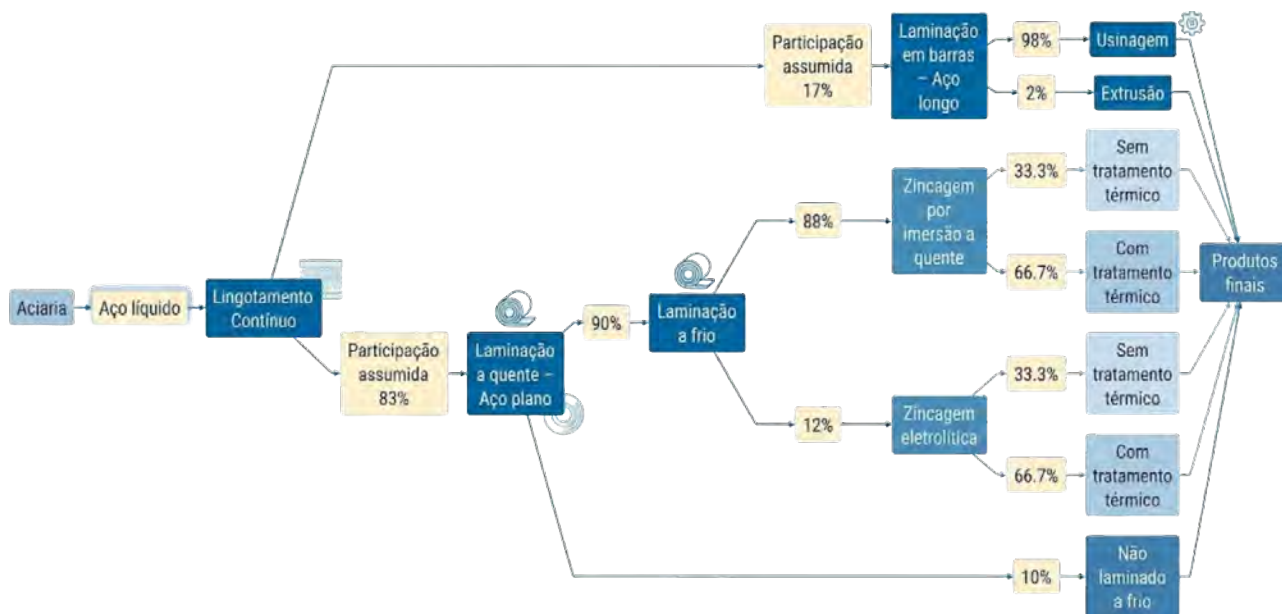
Após a produção do aço na aciaria, o material passa por diversas etapas até o uso final. Assume-se que todo o aço é submetido ao lingotamento contínuo. Em seguida, 83% é laminado a quente para a produção de aço plano, enquanto os 17% res-

tantes originam aço longo. Do aço longo, 98% é usinado e 2% extrudado. O aço plano segue um fluxo mais complexo: após a laminação a quente, 90% passa também por laminação a frio e 10% não. Todo o aço plano é então zincado, sendo 88% por imersão e 12% por processo eletrolítico. Por fim, dois terços do aço zincado passam por tratamento térmico, enquanto um

terço não. Todos os fatores de emissão produzidos nesse relatório levam em conta esse mix de processamentos.

A estrutura adotada dos processos de produção do aço é detalhada conforme **Figura 5.4** abaixo. Mais informações sobre a modelagem do aço podem ser consultadas no **Anexo IV**.

→| **Figura 5.4 – Configuração dos processamentos utilizados pelo projeto**



Fonte: Elaboração própria.

Para a modelagem, foram detalhadas três rotas principais de produção do aço utilizado no setor automotivo brasileiro: via alto-forno e forno básico a oxigênio com carvão mineral (BF/BOF, em inglês); via alto-forno com carvão vegetal (charcoal, em inglês); e via forno elétrico, para derreter sucata e/ou lingotes (EAF). Os principais parâmetros adotados são listados na tabela a seguir. O modelo ponderado utiliza fatores de 75%, 8% e 17% para as rotas BF/BOF MC, BF/BOF Ch e EAF Scrap, respectivamente. A rota BF/BOF MC diz respeito ao aço líquido produzido no Conversor a Oxigênio (BOF) a partir do ferro-gusa produzido no alto forno (BF) via coque mineral, enquanto a rota BF/BOF Ch utiliza carvão vegetal em substituição ao coque vegetal. Já na rota EAF Scrap, o aço é produzido dentro de um forno a arco elétrico (EAF) majoritariamente a partir da sucata, podendo ser adicionado também o ferro-gusa.

Os fatores escolhidos consideram as informações setoriais obtidas no anuário do Instituto Aço Brasil (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2024) e informações primárias levantadas junto a representantes de siderúrgicas. Assim, foi adotada uma participação maior da rota BF/BOF, de 83%, para melhor refletir o aço automotivo que é feito majoritariamente a partir desta rota, devido a exigências técnicas. A representatividade das rotas presentes no anuário, de 76% para a BF/BOF e 23% para o EAF, portanto, não apresenta desagregação setorial.

Além da escolha da participação das rotas, é importante destacar que para a rota EAF Scrap foi considerado o aço produzido 100% a partir de sucata, enquanto a rota BF-BOF o aço apresenta 10% de origem secundária. Assim, foi considerado em média 25,3% de sucata no aço automotivo.

Tabela 5.7 – Simulação da manufatura do aço – principais parâmetros.

Simulação da Manufatura do Aço	BF/BOF MC (75%)	BF/BOF Ch (8%)	EAF Scrap (17%)
Configuração do Processo (%)			
% de ferro no minério	61,5	61,5	61,5
% de scrap utilizada	10,0	10,0	100,0

Tabela 5.7 – Simulação da manufatura do aço – principais parâmetros.

Simulação da Manufatura do Aço	BF/BOF MC (75%)	BF/BOF Ch (8%)	EAF Scrap (17%)
Preparo do minério: Sínter	90,0	90,0	90,0
Preparo do minério: Pellet	10,0	10,0	10,0
Intensidade Energética (MJ/kg de PO)			
Produção do coque (do carvão)	6,54	0,00	0,00
Produção do nitrogênio	4,94	4,94	4,94
Produção do oxigênio	4,50	4,50	4,50
Preparo do minério: Sínter	1,90	1,90	1,90
Preparo do minério: Pellet	1,10	1,10	1,10
Redução do óxido de ferro (rota carvão mineral)	13,40	13,40	13,40
Aumento da intensidade energética do carvão mineral para o vegetal	10%	10%	10%
Redução do óxido de ferro (rota carvão vegetal)	14,74	14,74	14,74
Produção de aço secundário (EAF/Scrap)	2,29	2,29	2,29
Fundição contínua (continuous casting) (BOF/Steel)	0,35	0,35	0,35
Laminação à quente	2,85	2,85	2,85
Laminação à frio	1,50	1,50	1,50
Conformação em aço longo	3,00	3,00	3,00
Parâmetros Operacionais			
Produção líquida de gás de coqueria (COG)	8,5%	8,5%	8,5%
Produção líquida de gás de alto forno e aciaria (GAF + GLD)	27,5%	27,5%	27,5%
Razão Carvão/Coque	1,25	1,25	1,25
Perdas totais (cavaco, defeito)	15%	15%	15%
Taxa Autoforno de uso de carvão (kg carvão/t aço)	102	0	0
Taxa Autoforno de uso de coque (kg coque/t aço)	436	0	0
Taxa Autoforno de charcoal (kg charcoal/t aço)	0	640	0
Fuel rate with GAF +GLD (kg energéticos/t aço)	538	640	0
Taxa Total de uso de carvão (kg carvão/t aço)	823	0	0
Taxa Total de uso de coque (kg coque/t aço)	568	0	0
Taxa Total de uso de charcoal (kg charcoal/t aço)	0	801	0

Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 5.7** sintetiza os principais parâmetros adotados para a modelagem da fabricação do aço automotivo brasileiro. Além de referências da literatura, a seleção de parâmetros teve como base a análise dos balanços energéticos das siderúrgicas nacionais, disponibilizados publicamente, além de dados primários

das siderúrgicas parceiras do projeto e reuniões técnicas com especialistas, de forma a caracterizar os processos produtivos do setor de forma fidedigna. O percentual de importação de aço foi estimado para cada veículo e tipo de motorização, conforme explicado na seção 5.1.3.

Tabela 5.8 – Parâmetros da modelagem adaptados para o contexto brasileiro

Parâmetros adaptados para o contexto brasileiro	Escopo temporal	Dado	Fonte
Percentual de rotas produtivas	2023	75% BF-BOF mineral, 8% BF-BOF vegetal e 17% EAF	IABr, 2024
GRID brasileiro	2019-2023	Mix conforme seção 5.3	ONS, 2025
Fonte de eletricidade	2015-2023	64,8% GRID e 35,2% autoprodução	ONS, 2025 e USIMINAS, 2015
Percentual de importação	2023	17%	IABr, 2024
Percentual de aço reciclado	2015-2023	25,3% no aço ponderado, sendo 10% BF-BOF mineral 10% BF-BOF vegetal e 100% EAF	Adotado pelo projeto
Perdas de processamento	2015-2023	15%	Adotado pelo projeto
Distância de transporte	2015-2023	0,2 tkm para autopeças (caminhão); 0,15 tkm para montadoras (caminhão)	Adotado pelo projeto

Fonte: Elaboração própria.

▲ 5.2.1.2 Modelagem do aço nos cenários de materiais com menor intensidade de carbono e de maximização de materiais reciclados

Todos os resultados para cenários alternativos foram obtidos do mesmo modelo geral do aço, utilizado para a produção dos fatores de emissão *default* do projeto. Isso garante consistência interna entre as alternativas. Os cenários foram baseados no artigo "*Decarbonizing Brazil's Steel Sector: Pathway Analysis and Policy Constraints from a Bottom-Up Modeling Framework*", em fase final de edição para submissão em revista científica internacional. Um artigo detalhando o funcionamento do modelo deverá ser submetido para revista científica no futuro próximo. Por fim, o software ("*FORGE: Flexible Optimization of Routes for GHG and Energy*") por trás dos cálculos da pegada de carbono do aço está em fase de revisão no Journal of Open Source Software. Uma versão demonstrativa da ferramenta está disponível em: <https://ci-demo.streamlit.app/>

Para o cenário de materiais com menor intensidade de carbono, foi produzido um modelo para o aço produzido no Brasil, para o ano de referência 2035. Esse modelo é uma combinação de mudanças no parque industrial, ganhos de eficiência e alterações no mix de energéticos utilizados. Cada um desses aspectos será brevemente discutido a seguir. Os resultados, tanto do aço de menor intensidade de carbono, quanto para os materiais reciclados, foram obtidos a partir do mesmo modelo utilizado para gerar resultados da pegada do aço automotivo.

Partiu-se de um parque industrial conforme dados disponibilizados no relatório anual do IABr, com distribuição de produtores em BF-BOF a carvão mineral e vegetal (rota primária), bem como EAF a sucata (rota secundária). Como as pegadas de carbono da rota primária e secundária são consideravelmente distintas, a lógica de substituição de capital foi aplicada apenas à rota primária. A substituição de capital é da rota BF-BOF a carvão mineral pela rota DRI-EAF a gás natural. Essa substituição se dá quando o alto forno necessita de reforma, o que ocorre a cada 20 anos, em média. Dados para capacidade dos altos fornos, bem como vida útil estimada, foram obtidos em (GLOBAL ENERGY MONITOR, 2025). Além disso, aplica-se uma moratória para o início da substituição, que com começaria em 2030. Esse atraso permitiria a adequação e planejamento dos atores envolvidos.

O segundo parâmetro considerado é que todos os processos têm ganhos de eficiência de 1% ao ano, a começar no ano-base 2023. Isso pode ser interpretado tanto como melhorias de processo como em ganhos de intensidade de carbono nos energéticos utilizados.

A **Tabela 5.9** mostra a configuração do aço de menor intensidade de carbono para o cenário de 2035 para o aço não-ligado. Devido ao horizonte temporal relativamente próximo, considera-se que a rota DRI-EAF use gás natural como reductor, embora a rota permita também o uso de biometano e hidrogênio.

Tabela 5.9 – Configuração do aço de menor intensidade de carbono para o cenário 2035

Parâmetros	BF-BOF	DRI-EAF	F-BOF (carvão vegetal)
Fator de emissão	2,79	1,34	0,77
Participação (%)	82,4	7,96	9,61

Fonte: Elaboração própria.

Para o cenário de materiais reciclados todo o parque industrial é composto pela rota EAF a sucata. Essa rota utiliza predominantemente eletricidade, portanto a produção brasileira possui das mais baixas taxas de emissão.

A tabela abaixo compara os fatores de emissão nos cenários base, materiais de menor intensidade de carbono e maximização de materiais reciclados. Valores em kg CO₂e/kg de aço.

Tabela 5.10 – Fatores de emissão do aço nos cenários base, “verde” e “reciclado”, em kg CO2e/kg de aço

	Cenários		
	Base	Materiais de menor intensidade de carbono	Maximização de materiais reciclados
	2,94	2,56	0,83

Fonte: Elaboração própria.

5.2.2 Alumínio

Segundo o International Aluminium Institute, em 2023 foram produzidas aproximadamente 70,7 mil toneladas de alumínio primário mundialmente, com a China respondendo por cerca de 58,9% do total (Figura 5.5). No Brasil, em 2023, a produção de alumínio primário apresentou um salto de 26% em relação a 2022, passando de 810,9 mil toneladas para 1.021,7 mil toneladas, respectivamente (ABAL, 2024).

De acordo com o Anuário da ABAL (ABAL, 2024), a demanda mundial de alumínio em 2023 foi de 98 milhões de toneladas, com o setor de transportes sendo o principal consumidor, representando cerca de 26% deste valor. No Brasil, o principal segmento a utilizar o alumínio foi o de embalagens, com 37,8%, seguido pelo de transportes com 18,5%. Ainda segundo

o relatório, os principais produtos transformados de alumínio consumidos foram as chapas (48%), seguidos por extrudados (16%) e fundidos (12,6%). Já para o setor de transportes, os produtos foram as chapas (22,2%) e folhas (2,8%) (laminados), extrudados (15,9%) e fundidos (59,2%).

5.1.3.2 Processo produtivo

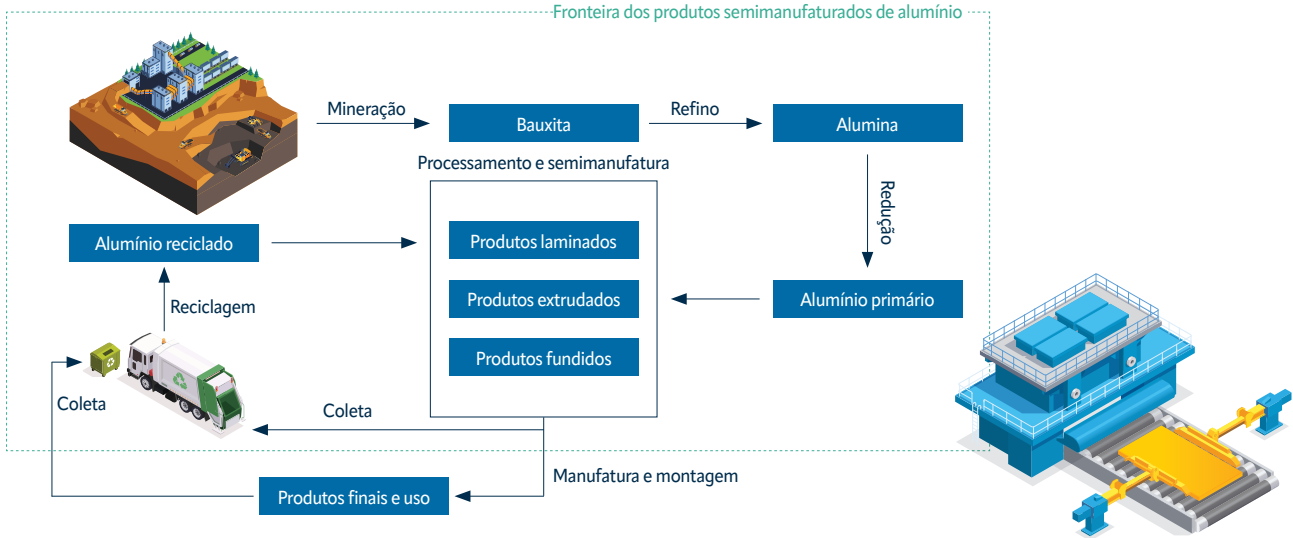
A cadeia primária de produção do alumínio envolve três etapas principais: mineração, refinaria e redução. Após a produção do alumínio primário e inserção de alumínio reciclado, é feito o processamento e produção de semimanufaturados, que envolvem os produtos mais utilizados no setor de transportes: laminados, extrudados e fundidos. A Figura 5.6 apresenta as etapas do processo produtivo de produtos semimanufaturados de alumínio.

→| **Figura 5.5 – Produção mundial de alumínio primário em 2023**



Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura 5.6 – Processo produtivo de produtos semimanufaturados de alumínio**



Fonte: Adaptado de The Aluminium Association, (2022).

O alumínio não é encontrado em estado metálico na crosta terrestre, para sua produção é necessária a mineração da bauxita. Para que a produção seja economicamente viável, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio (Al_2O_3) em sua composição (ABAL, 2024). Assim, a primeira etapa para a produção do alumínio primário é a obtenção do minério, a qual se inicia com a remoção da vegetação e do solo orgânico, posteriormente envolvendo a retirada das camadas superficiais do solo, como argilas e lateritas. Após estas atividades, inicia-se a britagem para a redução do tamanho do minério, lavagem e secagem.

Segundo Tabereaux and Peterson, (2014), a segunda etapa da produção do alumínio primário é a refinaria, cuja principal tecnologia é o processo Bayer, que tem como produto final o óxido de alumínio, ou alumina. O processo é dividido em cinco etapas principais: 1) Moagem e mistura, 2) Digestão, 3) Clarificação, 4) Precipitação e 5) Calcinação. Inicialmente, a bauxita é moída mecanicamente e misturada com soda cáustica, formando uma polpa que segue para os digestores, onde os minerais de alumínio são dissolvidos, formando uma solução de aluminato de sódio. Na etapa de clarificação, essa solução é separada das impurezas insolúveis por decantação e filtração. Em seguida, na precipitação, cristais de hidrato de alumínio são formados e posteriormente filtrados. Por fim, na calcinação, o hidrato é aquecido a altas temperaturas para remoção da água quimicamente ligada, resultando na alumina.

A obtenção do alumínio ocorre pela redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas a altas temperaturas, em um processo conhecido como Hall-Héroult. Segundo a ABAL, são necessárias duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de alumínio primário por meio do processo de redução ou eletrólise.

Nesse processo, o oxigênio do óxido de alumínio se liga ao ânodo de carbono, desprendendo-se na forma de dióxido de carbono e separando-se do alumínio líquido, que se precipita no fundo da cuba. O alumínio primário líquido então é conformado em lingotes para facilitar o transporte do material.

O alumínio primário segue para etapas de processamento e semimanufatura, que dão origem a produtos intermediários utilizados em diversos setores, como o automotivo. Para tanto, os principais processos aplicados são a fundição, extrusão e laminação (ABAL, 2024; THE ALUMINIUM ASSOCIATION, 2022). Nessas etapas, é realizada ainda a inclusão de alumínio reciclado, proveniente tanto de sucatas internas geradas nos próprios processos, quanto da recuperação de produtos pós-consumo. O alumínio processado segue então para a manufatura de peças automotivas, que pode ocorrer em indústrias de autopeças ou dentro das próprias montadoras.

▲ 5.1.3.3. Modelagem do alumínio no cenário base

Para a modelagem dos inventários de processos utilizados na produção do alumínio, a abordagem adotada foi a adaptação de inventários existentes na base de dados ecoinvent, priorizando aqueles representativos da América do Sul. Essa adaptação foi complementada por informações setoriais fornecidas pela Associação Brasileira de Alumínio (ABAL), por meio do Grupo de Trabalho do Alumínio, além de revisão bibliográfica e dados da análise de mercado conduzida pela consultoria Bright.

Segundo dados da ABAL (2024), as produtoras de alumínio em 2023 foram a Albras, Alumar e CBA. Dentre elas, apenas a CBA utiliza a rota de eletrólise *Soderberg*, enquanto as demais empresas realizam o processo de eletrólise pela rota *Prebaked*.

Logo, com base no percentual produtivo de cada empresa, foi estimado que, em 2023, 67,4% da produção nacional foi realizada pela rota *Prebaked* e 32,6% pela rota *Soderberg*.

O mix de eletricidade utilizado na produção de alumínio primário foi definido com base nas fontes de eletricidade declaradas pelas empresas produtoras ativas em 2023. Dentre as três empresas analisadas, apenas a CBA (Companhia Brasileira de Alumínio) divulgou oficialmente sua fonte energética, confor-

me seu Reporte de Agenda Climática (CBA, 2024). Assim, para a CBA, adotou-se o mix de eletricidade informado pela própria empresa. Já para a Albras e a Alumar, considerou-se o mix de eletricidade nacional (GRID brasileiro), conforme detalhado na tabela a seguir. Para esta análise não foram considerados os Certificados de Energia Renováveis (RECs), logo as declarações de RECs foram substituídas por valor percentual do GRID brasileiro. Informações sobre o GRID brasileiro adotado neste estudo podem ser consultadas na Seção 5.3.1.

Tabela 5.11 – Considerações do mix de eletricidade para a produção do alumínio primário em 2023

Fonte de eletricidade declarada pelas empresas produtoras de alumínio				
Empresa	Hidro	Eólica	RECS	Não informado
Albras	0	0	0	100%
Alumar	0	0	0	100%
CBA	84%	8%	8%	0%
Mix de eletricidade adotado para o alumínio na modelagem				
Fonte	Hidro	Eólica	GRID	RECs
Eletricidade	27,34%	2,60%	70,06%	0%

Fonte: ABAL, (2024) e CBA, (2024).

Além da eletricidade, as fontes energéticas utilizadas nos processos produtivos também foram parâmetros relevantes adaptados neste estudo. A **Tabela 5.12** apresenta a distribuição percentual das fontes de energia associadas à produção de alumínio, com base no Anuário Estatístico da ABAL de 2017 (ABAL, 2018). Foi utili-

zado o anuário de 2017 pois foi o documento público mais recente encontrado com esse nível de detalhamento por etapa do processo. As emissões atmosféricas de GEE dos inventários originais foram substituídas por valores recalculados pela equipe do projeto, com base na combustão das fontes energéticas consideradas.

Tabela 5.12 – Distribuição percentual das fontes energéticas na produção do alumínio primário.

Vetores Energéticos	Mineração de Bauxita	Refinaria de alumina	Alumínio Primário	Transformação de alumínio	Produção secundária de alumínio
Coque de petróleo	0,00%	0,00%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo combustível	19,50%	53,50%	29,7%	0,0%	0,0%
Óleo diesel	1,50%	0,00%	0,0%	0,4%	0,0%
Gás natural	0,00%	3,40%	3,7%	0,0%	16,0%
Carvão mineral	0,00%	37,00%	0,0%	0,0%	0,0%
Eletricidade	69,30%	6,10%	66,6%	56,0%	11,0%
GLP	9,70%	0,00%	0,0%	43,6%	73,0%
Biomassa	0,00%	0,00%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: Anuário Estatístico da ABAL, (2018).

Com relação a participação de material reciclado, foi considerado um valor de 41,8%, calculado a partir de dados detalhado na **Tabela 5.13**. Este valor desconta o percentual de material reciclado destinado a produção de latas de alumínio recicladas utilizadas pelo setor de embalagens, a fim

de se obter uma estimativa mais representativa da realidade dos demais setores, incluindo o automobilístico. Até o momento de elaboração deste relatório, não foram identificados dados específicos sobre esse parâmetro para o setor automotivo.

Tabela 5.13 – Dados utilizados para o cálculo do valor percentual de alumínio reciclado adotado

Dado	Valor	Fonte
Teor de reciclagem - alumínio total	57,30%	(ABAL, 2025)
Teor de reciclagem - latas de alumínio	99,70%	(ABRALATAS, 2024)
Produção - latas de alumínio (mil t)	397,2 (27%)	(ABRALATAS, 2024)
Produção - alumínio total (mil t)	1087,2 (73%)	Calculado
Produção - alumínio total (mil t)	1484,4	(ABAL, 2024)

Fonte: Anuário Estatístico da ABAL, (2025); ABRALATAS, 2024).

Na ausência de dados primários, as perdas no processamento do alumínio foram estimadas com base nos inventários da base de dados ecoinvent (versão 3.91), que indicam perdas entre 1% e 2% por processo. Já o parâmetro referente à proporção de alumínio fundido e forjado, foi definido a partir da análise de

mercado conduzida pela consultoria Bright, como apresentado na tabela a seguir. A **Tabela 5.14**, por sua vez, relaciona os inventários de ciclo de vida utilizados com seus respectivos escopos geográficos originais e as adaptações realizadas no âmbito do projeto “Do Berço ao Portão”.

Tabela 5.14 – Principais Inventários de Ciclo de Vida adaptados para o contexto brasileiro

Inventários ecoinvent	Escopo Geográfico	Adaptações realizadas no âmbito do projeto			
		Eletricidade	Insumos	Logística	Processos
bauxite mine operation	GLO	X	X	X	-
aluminium hydroxide production	South America	X	X	-	-
aluminium oxide production	South America	X	X	-	-
aluminium production, primary, liquid, Söderberg	South America	X	X	-	-
aluminium production, primary, liquid, Prebake	South America	X	X	-	-
aluminium production, primary, ingot	South America	X	X	-	X
aluminium ingot, primary, to aluminium, cast alloy market	GLO	X	X	-	-
market for aluminium, cast alloy	GLO	-	X	X	X
aluminium ingot, primary, to aluminium, wrought alloy market	GLO	X	X	-	-
market for aluminium, wrought alloy	GLO	-	X	X	X
treatment of aluminium scrap, post-consumer, prepared for recycling, at refiner	RoW	X	-	-	-
sheet rolling, aluminium	RoW	X	X	-	-
Section bar extrusion, aluminium	RoW	X	X	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Entre os quatro principais processos aplicados ao alumínio no setor automotivo – laminação, extrusão, fundição e usinagem –, apenas para a segunda fundição não foi identificado na base de dados ecoinvent um inventário específico. Para suprir essa lacuna, adotou-se o consumo energético informado pelo GREET, de 4,9 MJ por kg processado para esta etapa comum na conformação de peças pelas autopeças.

Por fim, estimou-se, com base em dados de logística fornecidos pelas empresas participantes do estudo, que o percentual de importação de alumínio fundido gire em torno de 30% a 50% para os veículos ICEV. Mais informações sobre as considerações de origem estão detalhadas na Seção 5.1.3. A **Tabela 5.15** resume os principais parâmetros modificados, o escopo temporal, os dados utilizados e suas respectivas fontes de informação.

Tabela 5.15 – Parâmetros adaptados para o contexto brasileiro

Produtos	Espaço Temporal	Dado	Fonte
Percentual de rotas produtivas	2023	67,4 % produzido por tecnologia <i>Prebaked</i> e 32,6 % por <i>Soderberg</i> ,	(ABAL, 2024)
GRID brasileiro	Média (2019-2023)	Foram consideradas perdas de transmissão e distribuição de 11,5% (ANEEL, 2023)	(ONS, 2025)
Fonte de eletricidade	2023	70,06% GRID; 27,34% hidroelétrica; 2,60% eólica.	(ABAL, 2024; CBA, 2024; ONS, 2025)
Fontes energéticas por processo	2017	Ver XXXX.	(ABAL, 2018)
Percentual de importação	2023	11%	(ABAL, 2024)
Percentual de alumínio reciclado	2023	41,8%	(ABAL, 2024; ABRALATAS, 2024)
Perdas de processamento	2022	1-2%	(Wernet al., 2016)
Distância de transporte	2019/2024	Bauxita – 1,694 tkm (embarcação) + 1 tkm (trem) + 1,292 tkm (caminhão); Alumínio forjado/ fundido – 0,006 tkm (caminhão) + 0,006 (trem) + 0,156 (embarcação)	(Velandia Vargas et al., 2019) e Modelo de logística desenvolvido pela UNICAMP
Processamento do alumínio	2023	Laminação 26,5%; extrusão 13,5% e fundição 60%. usinagem 60% ^A	(GREET, 2024) e dados primários montadoras

Fonte: Elaboração própria.

A A usinagem é um processo adicional e aplicado após o processo de fundição (ou seja, 60% do total), para representar a usinagem que ocorre para a produção do motor.

▲ 5.2.2.1 Modelagem do alumínio nos cenários de materiais com menor intensidade de carbono e de maximização de materiais reciclados

De acordo com o Plano Setorial de Mitigação da Indústria, dentre as ações impactantes do Plano Clima, que resultam em impactos diretos sobre a redução de emissões de GEE, constam o aumento da reciclagem de materiais e a ampliação do uso de energias e combustíveis renováveis (BRASIL, 2025).

Assim, para o cenário de materiais com menor intensidade de carbono, foi considerado a mesma modelagem da produção de alumínio no Brasil, porém com eletricidade proveniente exclusivamente de fonte hidráulica.

De forma similar, para o cenário de materiais reciclados, foi con-

siderado a modelagem da produção de alumínio no Brasil exclusivamente de fontes secundárias (sucata). Vale ressaltar que o Brasil já apresenta um índice de reciclagem de alumínio elevado, com 57,3% do consumo de produtos de alumínio em 2023 provenientes da reciclagem (ABAL, 2024). No entanto, a reciclagem na cadeia automobilística ainda enfrenta desafios como: (i) a disponibilidade de sucata e flutuações de preços; (ii) a qualidade da sucata para atendimento de especificações técnicas e de segurança dos veículos e; (iii) questões logísticas como longas distâncias e falta de acesso a modais eficientes. Esses fatores podem limitar a capacidade de escalar o uso de sucata no setor.

A **Tabela 5.16** apresenta os principais parâmetros modificados para a modelagem do alumínio para os cenários avaliados pelo projeto.

Tabela 5.16 – Parâmetros considerados nos cenários avaliados pelo projeto

Parâmetro/Cenário		Materiais verdes	Materiais Reciclados	Default
Mix de eletricidade alumínio	Hidroelétrica	100%	27,34%	27,34%
	Eólica	0%	2,60%	2,60%
	GRID	0%	70,06%	70,06%
	RECs	0%	0%	0%
Percentual de alumínio reciclado	Alumínio reciclado	41,8%	100%	41,8%

Fonte: Elaboração própria.

5.2.3 Polímeros

Os polímeros possuem um papel importante na fabricação de veículos leves. De acordo com dados de 2016 referentes ao setor automotivo europeu, aproximadamente 5 milhões de toneladas de plásticos foram utilizadas, sendo o polipropileno (PP) o mais empregado, com 26% do total. Outros polímeros de destaque incluem o poliuretano (PUR) com 15% e a poliamida (PA), com 11,9% (PLASTICS EUROPE, 2018). Esses materiais podem ser aplicados em componentes internos, exteriores, sistemas elétricos e de iluminação e partes localizadas sob o capô.

A tabela apresenta a composição média de polímeros considerada no estudo (plástico médio), obtida a partir de dados primários de seis veículos distintos disponibilizados pelas montadoras. Esses dados abrangem veículos ICEV dos segmentos hatch, sedan e SUV. Como não foram identificados padrões específicos na composição dos polímeros entre os diferentes segmentos analisados, adotou-se uma composição média ponderada, calculada em função do número de veículos produzidos no ano de 2023 de cada modelo. Cabe destacar que a composição de plás-

ticos foi bastante variada de modelo para modelo. Para o PP, por exemplo, foram observadas variações de 29 a 44%, enquanto as poliamidas de 8 a 20%. Também cabe destacar que o estudo assumiu para o cenário base o consumo de plástico virgem, sem teor de reciclados, dado os desafios técnicos dos polímeros reciclados tais como a variabilidade da qualidade do material reciclado e os requisitos de desempenho.

Para as tecnologias HEV, PHEV e BEV, não foram disponibilizados dados primários. Assim, o estudo assumiu, para essas tecnologias, a mesma composição de polímeros adotada para os veículos ICEV.

A maior parte dos componentes plásticos utilizados em veículos são produzidos por meio de moldagem por injeção. Outros processos de conformação aplicados na fabricação de peças plásticas automotivas incluem a calandragem, a moldagem por sopro e a extrusão. Os percentuais de polímeros que passam por cada um dos tipos de processamento foram baseados nos dados do GREET (2024). Os principais processos considerados são expressos na [Tabela 5.17](#).

Tabela 5.17 – Composição do plástico médio dos veículos leves

Material	Percentual
ABS	1,82%
GPPS	0,02%
XPS	0,02%
EPS	0,02%
HIPS	0,02%
HPDE	1,88%
LDPE	1,88%
LLDPE	1,88%
Nylon 6	6,90%
Nylon 66	6,90%
PC	4,71%
PET	0,99%
PES	5,04%
POM	1,04%
PP	41,44%
PPS	0,35%
PVC	2,12%
PBT	2,36%
ASA	0,09%
PMMA	0,29%

Tabela 5.17 – Composição do plástico médio dos veículos leves

Outros	8,36%
TPE	2,55%
PUR Flexível	3,75%
PUR Rígido	3,75%
Resina poliéster insaturada	0,35%
Durômeros (PVB, resina epóxi)	1,48%

Fonte: Elaboração própria a partir de dados primários de seis ICEVs.

Tabela 5.18 – inventários de processamento dos polímeros

Polímero	Processamento polímeros (GREET, 2024)				
	Moldagem por sopro	Calandragem	Moldagem por compressão	Extrusão	Injeção
ABS	-	-	23,80%	17,50%	58,70%
GPPS					
XPS					
EPS	-	-	-	-	-
HIPS					
HPDE					
LDPE	-	-	24,25%	9,25%	66,50%
LLDPE					
Nylon 6	36,40%	45,40%	-	-	18,20%
Nylon 66	-	-	34,30%	29,90%	35,80%
PC	-	-	22,00%	-	78,00%
PET	-	-	50,00%	-	50,00%
PES	-	-	-	-	-
POM	-	-	-	-	-
PP	9,20%	-	15,33%	1,90%	73,57%
PPS	-	-	-	-	-
PVC	-	18,10%	1,50%	51,10%	29,30%
PBT	-	-	-	-	-
ASA	-	-	-	-	-
PMMA	-	-	-	-	-
Outros	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Em relação aos dados de importação dos polímeros, com base em dados primários fornecidos pelas montadoras participantes do estudo, estima-se que o teor de plásticos importados seja da ordem de 20% para veículos ICEV dos segmentos hatch e sedan, e de aproximadamente 35% para ICEV do segmen-

to SUV, conforme detalhado na seção 5.1.3. Para os plásticos importados, o estudo utilizou inventários genéricos globais (*market GLO*) disponíveis na base de dadosecoinvent. Para representar os plásticos de origem nacional, o estudo realizou adaptações, conforme expressas na [Tabela 5.19](#).

Tabela 5.19 – Lista de polímeros e adaptações

Polímeros	Inventário base Ecoinvent	Sem adaptações	Adaptações ^S	
			Elet. BR	Processos ^T
ABS	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer GLO Cut-off, U	x		
GPPS	Polystyrene, general purpose {GLO} market for polystyrene, general purpose Cut-off, U	x		
XPS	Polystyrene, extruded {GLO} market for polystyrene, extruded Cut-off, U	x		
EPS	Polystyrene, expandable {GLO} market for polystyrene, expandable Cut-off, U	x		
HIPS	Polystyrene, high impact {GLO} market for polystyrene, high impact Cut-off, U	x		
HDPE	Polyethylene, high density, granulate {RoW} Cut-off, U		x	x
LDPE	Polyethylene, low density, granulate {RoW} Cut-off, U		x	x
LLDPE	Polyethylene, linear low density, granulate {RoW} Cut-off, U		x	x
Nylon 6	market for nylon 6 RoW Cut-off, U	x		
Nylon 6/6	market for nylon 6-6 RoW Cut-off, U	x		
PC	Polycarbonate {RoW} Cut-off, U		x	
PET	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {RoW} Cut-off, U		x	
PES	Polysulfone {GLO} market for polysulfone Cut-off, U	x		
POM	proxy - Formaldehyde {RoW} market for formaldehyde Cut-off, U	x		
PP	Polypropylene, granulate {RoW} Cut-off, U		x	x
PPS	Polyphenylene sulfide production {RoW} Cut-off, U		x	
PVC	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW} Cut-off, U		x	
PBT	proxy – inventário adaptado do PET		x	
ASA	Styrene-acrylonitrile copolymer {GLO} market for styrene-acrylonitrile copolymer Cut-off, U	x		
PMMA	Polymethyl methacrylate, sheet {GLO} market for polymethyl methacrylate, sheet Cut-off, U	x		
TPE	proxy - considerado o fator de emissão do plástico médio	x		
PUR flexível	Polyurethane, flexible foam, MDI-based {RoW} Cut-off,U Polyurethane, flexible foam, TDI-based, high density {RoW} Cut-off,U Polyurethane, flexible foam, TDI-based, low density {RoW} Cut-off,U		x	
PUR rígido	Polyurethane, rigid foam {RoW} Cut-off,U		x	
Resina poliéster insaturada	Polyester resin, unsaturated {RoW} Cut-off,U		x	
Resina epóxi	Epoxy resin, liquid {RoW} Cut-off,U		x	

Fonte: Elaboração própria.

S Elet BR: significa adaptações no mix elétrico do inventário original para o mix brasileiro. ABS, poliamidas, poliestireno, PES, POM, ASA e PMMA não tiveram adaptações do mix de eletricidade pois os inventários disponíveis na base de dados ecoinvent apresentaram apenas fluxos elementares, não sendo possível implementar adaptações.

T Para polipropileno (PP) e polietileno (PE) dada a representatividade da utilização desses polímeros em veículos, foram feitas adaptações no inventário dos petroquímicos básicos (propeno e eteno) para refletir a realidade brasileira.

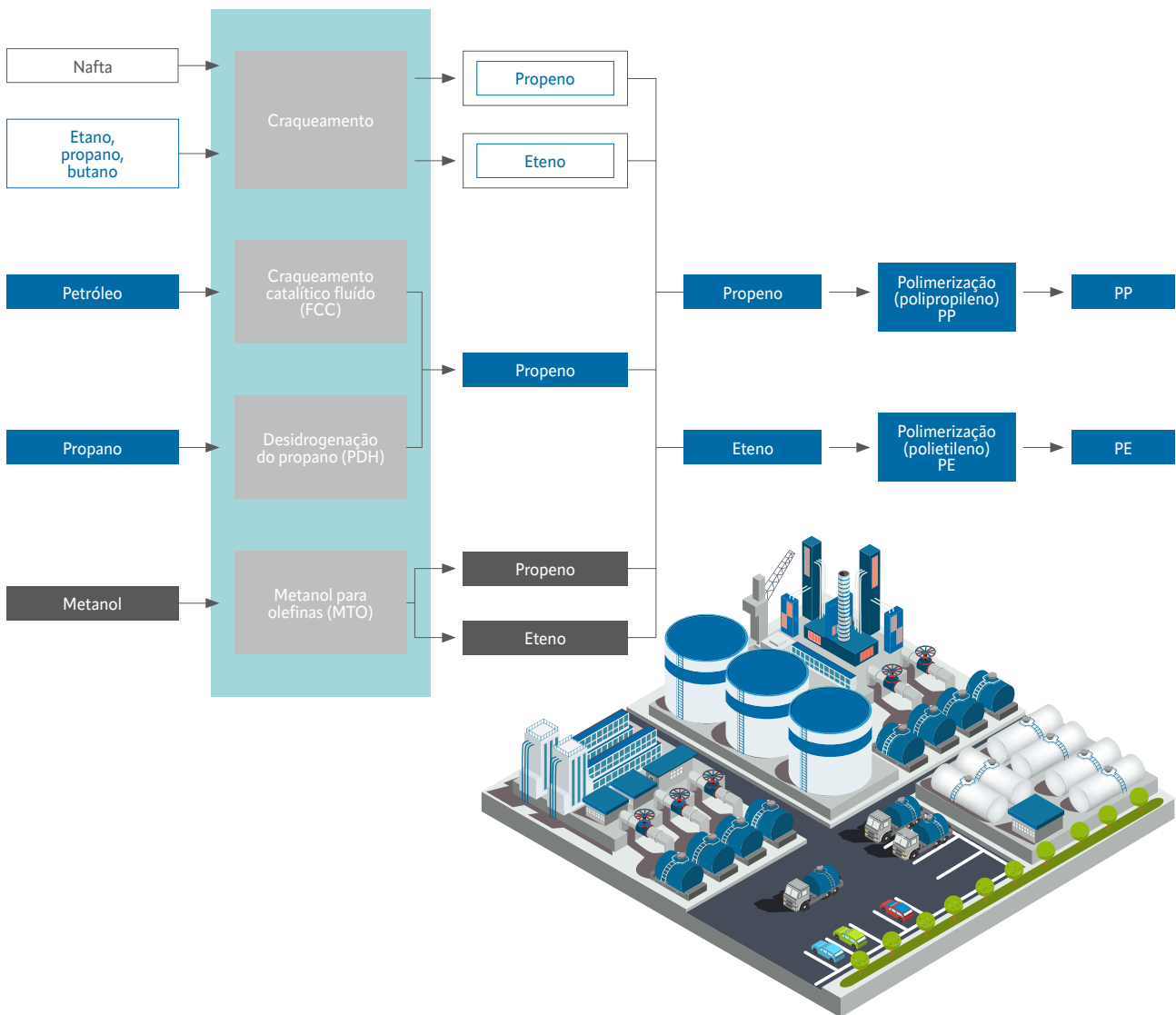
De modo geral, as adaptações realizadas nos inventários dos polímeros envolveram a alteração do mix elétrico original para o mix elétrico brasileiro. A exceção ocorreu para o PP e PE, pois além de terem uma participação importante

na composição de plásticos do veículo também representam uma parcela relevante do consumo nacional. Em 2023, estes polímeros responderam por aproximadamente cerca de 57% do consumo no Brasil (ABIPLAST, 2023). Dada a re-

representatividade no mercado brasileiro, uma análise mais refinada dos inventários do PP e PE foi feita, sendo detalhada a seguir.

▲ 5.1.3.4. Processo produtivo: Polipropileno (PP) e polietileno (PE)

→| **Figura 5.7 – Produção de polipropileno e polietileno**



Fonte: Adaptado de (BRASKEM, 2024; Kim *et al.*, 2024).

Cerca de 92% da matéria-prima utilizada na indústria petroquímica brasileira é proveniente do craqueamento da nafta, com apenas 8% advindos do gás natural (EPE, 2018). Esse perfil difere significativamente de países como os Estados Unidos, onde predomina o uso do gás natural (EPE, 2018). Desse modo, para o estudo do cenário brasileiro, foi assumida a produção de propeno e eteno inteiramente proveniente do craqueamento da nafta.

Os inventários disponíveis na base de dados ecoinvent, tem

A produção de PP ocorre por meio da polimerização do propeno, enquanto o PE é gerado a partir da polimerização do eteno. Esses petroquímicos básicos (propeno e eteno) podem ser obtidos de diferentes formas, conforme ilustra a Figura 5.7 e tem uma grande representatividade para as emissões de GEE no ciclo de vida dos polímeros (KIM *et al.*, 2024).

como referência o cenário europeu (IFEU/PLASTICSEUROPE, 2021) e apresentam somente fluxos elementares, de modo que a análise mais detalhada do inventário, bem como sua adaptação para o cenário brasileiro não foi possível. Desse modo, o inventário da coprodução de propeno e eteno foi baseado na literatura (RODRÍGUEZ-VALLEJO; GUILLÉN-GOSÁLBEZ; CHACHUAT, 2020) e é expresso na **Tabela 5.20**. O critério de alocação adotado para os coprodutos foi o critério mássico. Os fluxos de produtos de pro-

pileno e etileno foram utilizados, respectivamente, como entrada nos inventários adaptados da polimerização para

o polipropileno e polietileno, conforme detalhado anteriormente na **Figura 5.7**.

Tabela 5.20 – ICV da produção de etileno e propileno a partir do craqueamento de nafta

Produtos	Qtd.	Und.
Propylene	1,00	kg
Ethylene	2,44	kg
Hydrocarbons (C4, C5)	2,76	kg
Hydrogen	0,16	kg
Materiais e combustíveis		
Naphtha {BR} market for naphtha Cut-off, U ^A	1,36	kg
Naphtha {RoW} market for naphtha Cut-off, U ^A	5,81	kg
market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} Cut-off, U	0,00116	kg
Eletricidade e calor		
market for heat, from steam, in chemical industry {RoW} Cut-off, U	8,865	MJ
[BP] market for electricity, medium voltage {BR} Cut-off, U ^B	6,53	MJ
Emissões para o ar		
Carbon dioxide, fóssil	3,2	kg

Fonte: Adaptado de Rodríguez-Vallejo; Guillén-Gosálbez; Chachuat, (2020).

A Considerado que 81% da nafta é importada e 19% de origem nacional, com base nos dados de consumo aparente nacional. Dados de produção nacional de nafta obtidos da Pesquisa Industrial Anual de 2022 (IBGE, 2022) e dados de importação e exportação obtidos da plataforma ComexStat para o ano de 2022 (MDIC, 2025).

B Inventário de ciclo de vida da eletricidade brasileira elaborada pelo projeto.

5.1.3.5. Modelagem dos polímeros nos cenários de materiais com menor intensidade de carbono e de maximização de materiais reciclados

O uso de plásticos reciclados (pós-consumo) na fabricação de veículos vem ganhando crescente relevância como uma estratégia para a redução de impactos ambientais no setor automotivo. A incorporação desses materiais contribui diretamente para a diminuição da demanda por polímeros de origem fóssil, para a redução das emissões de GEE associadas à produção de materiais virgens, bem como para a redução da destinação destes materiais para aterro. Além dos benefícios ambientais, espera-se que o aumento do conteúdo reciclado esteja cada vez mais alinhado a requisitos regulatórios, metas corporativas de descarbonização e compromissos de economia circular assumidos pelas montadoras.

Em 2023, a Comissão Europeia adotou uma proposta de Regulamento relativa aos requisitos de circularidade aplicáveis à concepção de veículos e à gestão de veículos em fim de vida (EUROPEAN COMMISSION, 2023). Entre as diretrizes previstas, destaca-se a exigência de um conteúdo mínimo de 25% de plásticos reciclados pós-consumo nos veículos produzidos até 2030.

Com base nesse referencial regulatório, o presente estudo ado-

udou o percentual de 25% como hipótese para a definição dos cenários de uso de plásticos reciclados, com o objetivo de obter estimativas mais realistas para a incorporação de polímeros reciclados na fabricação de veículos novos no Brasil. No âmbito desses cenários, considerou-se a utilização de polímeros reciclados do tipo PP, PA, PE, ABS e PET, conforme as premissas adotadas por Shirzad e Kantor (2025) para o cenário europeu.

Na ausência de informações específicas sobre o teor de conteúdo reciclado por tipo de polímero, o estudo assumiu que o conteúdo reciclado pós-consumo (25% em massa) está distribuído proporcionalmente entre os polímeros passíveis de reciclagem. Dessa forma, foi considerado que aproximadamente 39,3% da massa de cada polímero reciclável corresponde a material reciclado, enquanto os demais polímeros foram assumidos como integralmente de origem virgem.

Na base de dados ecoinvent, foram identificados dois inventários específicos para polímeros reciclados: market for *polyethylene, high density, granulate, recycled*, RoW e market for *polyethylene terephthalate, granulate, amorphous, recycled* RoW. Para a representação do polietileno reciclado, adotou-se o primeiro inventário. Já para o PET reciclado, utilizou-se o segundo inventário. Para os demais polímeros reciclados considerados no estudo, o inventário de PET reciclado foi empregado como uma

aproximação, uma vez que apresenta níveis mais elevados de emissões de GEE, sendo, portanto, uma escolha metodológica conservadora na falta de inventários mais específicos.

Já para o cenário de polímeros não reciclados e com menor intensidade de carbono, o estudo considerou o cenário de produção de polietileno a base de biomassa. Neste caso, foram obtidos dados da pegada de carbono do polietileno de menor intensidade de carbono produzido no Brasil a partir do etanol de cana de açúcar pela BRASKEM (BRASKEM - COMUNICAÇÃO PESSOAL, 2025). Neste sentido, foram considerados dados primários de pegada de carbono informados pela empresa, que consideram emissões do cultivo da cana de açúcar, da produção do etanol, da produção do etileno e sua polimerização para produção do PE.

Cabe destacar que o método de AICV adotado no projeto do Berço ao Portão não considera o balanço de emissões e remoções de CO₂ biogênico na pegada de carbono e, portanto, não considera as remoções de CO₂ biogênico da cana de açúcar que ficam incorporadas no polietileno de menor intensidade de carbono. Se considerado este aspecto, o polietileno de menor intensidade de carbono pode apresentar uma pegada de carbono negativa, isto é, apresentar um balanço líquido em que as remoções de carbono da atmosfera são maiores do que as emissões de GEE do berço-ao-portão. Mesmo desconsiderando o balanço do carbono biogênico, a pegada do polietileno de menor intensidade de carbono de alta densidade, por exemplo, chegou a ser 72% menor comparado ao polietileno virgem importado. Ainda assim, o uso de polietileno nos veículos é pequeno comparado aos demais polímeros como o PP e as PAs, logo os resultados deste cenário de uso de PE de menor intensidade de carbono nos veículos tende a ser marginal, como discutido na Seção 8.2.

▲ 5.2.4 Borracha

Segundo a Confederação Nacional do Ramo Químico (CNQ, 2024), a produção nacional de pneus atende entre 80% e 90% do total da demanda interna. Assim, como simplificação metodológica, este estudo considerou que 100% da borracha utilizada na produção de pneus é sintética e de origem nacional, adaptando o inventário (*Synthetic rubber {RoW}*) para o mix elétrico nacional. Este inventário inclui a produção de borracha EPDM, produção de elastômero, extrusão e vulcanização de perfis. Outras atividades de processamento do material não foram consideradas. Cabe destacar que o EPDM não é o principal elastômero utilizado em pneus. Desse modo, o *dataset* da base de dados ecoinvent foi utilizado como aproximação. Apesar da limitação, a borracha tende a ser pouco representativa em termos de pegada de carbono para os veículos.

▲ 5.2.5 Ferro fundido

O ferro fundido é o ferro-gusa produzido no alto-forno a partir da redução do minério de ferro, que depois segue para o conversor a oxigênio (BOF) ou o forno elétrico à arco no caso da fabricação do aço líquido. Dessa forma, o inventário do ferro fundido reflete as etapas do aço até a saída do alto-forno, com a adição de um processo adicional de fundição e o de usinagem para conformação que pode ocorrer nas autopeças. Além disso, a produção do ferro fundido no alto forno foi modelada para refletir o mesmo percentual de sucata (25,3%) presente no aço, já que não foi possível obter dados primários ou secundários específicos para a utilização de sucata no ferro fundido produzido no Brasil. Por último, foi incorporado um inventário específico para o ferro fundido de alta liga, com um mix de 60% de ferro-gusa e 40% de uma mistura de ligas contendo 12,5% de ligas de cromo, 12,5% de ligas de níquel e 75% de ligas de silício.

Em relação à importação, foi considerado, assim como no caso do aço, um teor de nacionalização por veículo, conforme detalhado na seção 5.1.3. Além disso, as adaptações feitas para o inventário do ferro fundido incluíram ainda o processamento deste material, nas autopeças, para a obtenção de peças acabadas. Para tanto, o mesmo procedimento de alteração do mix elétrico brasileiro foi adotado.

▲ 5.2.6 Magnésio

Segundo o Anuário do Setor Metalúrgico, a produção de magnésio primário no Brasil em 2023 foi de 22.000 toneladas, enquanto os volumes de metal importados e exportados foram de 6.892 t e 2.587 t, respectivamente (MME, 2024). Isso resultou em um consumo aparente de 26.305t, com 73,8% de consumo nacional. O magnésio primário produzido no país é proveniente majoritariamente do Grupo RIMA, cuja principal rota de produção ocorre pela tecnologia de processamento de Pidgeon (MME, 2018; RIMA, 2020). Desse modo, o inventário da produção pela rota de Pidgeon (*magnesium production, pidgeon process {CN}*) foi utilizado como base para o inventário da produção nacional, alterando para o mix elétrico brasileiro. O inventário já inclui as atividades de refino do magnésio bruto e de fundição de magnésio puro em lingotes. Além disso, para o magnésio fundido foi adicionado o processo de fundição secundário para produção de componentes finais. O inventário de fundição foi baseado no GREET 2024 (*magnesium casting and moulding*), com o consumo de eletricidade brasileiro para a parcela nacional.

Ainda segundo o anuário, cerca de 68% do magnésio primário em 2023 foi importado da China e 9% de Israel. O inventário da base de dados ecoinvent de ambos os países foi utilizado para modelagem do magnésio importado. Para o restante do metal

importado, foi utilizado o inventário global (market GLO). Em ambos os casos para o magnésio fundido, o inventário de fundição secundário do considerou eletricidade global (market GLO).

▲ 5.2.7 Zinco

A produção nacional de zinco primário foi de 191.000 toneladas em 2023, com importação de 80.753 t e exportação de 99.751 t (MME, 2024). Isso refletiu em um percentual de consumo de zinco importado de 42,6%. O ecoinvent não possui inventários específicos deste material para o Brasil. Desse modo, o inventário de produção primária de zinco a partir de concentrado utilizando os processos eletrometalúrgico e pirometalúrgico da base de dados ecoinvent (*primary zinc production from concentrate* {RoW}) foi adaptado considerando o mix elétrico do Brasil. Para o zinco primário importado foi utilizado o inventário de produção global do metal (*market for zinc* {GLO}). É importante destacar que o zinco é utilizado no processo de galvanização do aço automotivo, mas a massa deste material foi excluída do LCI do aço e adicionada diretamente no BoM do veículo final, no intuito de garantir que não haja dupla contagem deste material.

Com relação ao processamento do zinco, o inventário da base de dados ecoinvent já inclui todos os processos pirometalúrgicos e eletrometalúrgicos necessários para a produção de zinco, incluindo o processo de fundição. Já o processo de galvanização/zincagem foi incluído no processamento do aço. Outras atividades de processamento do material não foram consideradas, por não haver inventário específico de processamento de zinco disponíveis na base de dados ecoinvent.

▲ 5.2.8 Níquel

O Brasil apresentou uma produção primária de níquel contido de 89.000 toneladas em 2023 (MME, 2024). No entanto, o país se destaca na produção de concentrado sulfetado (níquel Classe II), que é exportado para produção de níquel Classe I, usado na fabricação de baterias e outros componentes eletrônicos utilizados nos veículos (IBRAM, 2024). Desse modo, o estudo considerou o consumo do metal como 100% importado (*market for nickel, class 1* {GLO}).

▲ 5.2.9 Chumbo

A produção secundária do chumbo metálico no Brasil é bastante expressiva frente à produção primária do metal. Em 2023, a produção primária foi de 16.000 t de metal contido, enquanto a importação foi de 62.929t e exportação de 5.328t (MME, 2024). Os valores mais recentes de produção secundária foram encontrados apenas para 2017, onde dados apontam que foram produzidas mais de 167 mil toneladas no país naquele ano (ANM, 2018). Utilizando estes valores, o es-

tudo considerou que 70% do chumbo consumido no país é de origem reciclada, enquanto 26% são de origem primária importada e 4% de origem primária nacional.

Para chumbo reciclado, o estudo adotou o inventário de tratamento de sucata a partir de baterias de chumbo do ecoinvent (*treatment of scrap lead acid battery, remelting* {RoW}), com alteração para o mix elétrico brasileiro. Isso também foi feito para chumbo primário nacional, onde foi adotado o inventário de produção a partir do processo de Parkes (*primary lead production from concentrate* {GLO}). O inventário contempla os processos de redução por sinterização/alto-forno, de redução por fundição direta, o refino final de chumbo e o descarte de escória. Outras atividades de processamento do material não foram consideradas. Para o chumbo primário importado foi utilizado inventário de mercado (*market for lead* {GLO}).

▲ 5.2.10 Cobre

No Brasil, a cadeia produtiva do cobre se concentra na etapa de produção do concentrado, que é exportado para outros países onde ocorre o processo de refino. Esse concentrado corresponde ao minério após as fases de extração e beneficiamento, ainda necessitando de etapas adicionais para se tornar cobre refinado (IBRAM, 2024).

Em 2022, o Brasil produziu 25 mil toneladas de cobre refinado e 90,7 mil t de sucata, de acordo com o Anuário Brasileiro do Cobre (ABCOBRE, 2023). Já as importações e exportações representaram cerca de 280,6 mil toneladas e 109,2 mil toneladas, respectivamente (ABCOBRE, 2023). Desse modo, a produção nacional de cobre refinado representou apenas 2,4% do consumo aparente no país. O estudo, portanto, considerou 100% do consumo de cobre refinado como importado, utilizando o inventário de mercado (*market for copper, cathode* {GLO}).

Em relação ao processamento foi considerado o inventário de trefilação do cobre (*market for wire drawing, Copper* {GLO}) associado à produção de fios, cabos e arames. Cerca de 39% do consumo brasileiro de cobre em 2022 foi de produtos semimanufaturados (ABCOBRE, 2023). Neste caso, foi considerado o inventário de trefilação utilizando o mix elétrico brasileiro, considerando o processamento desses semimanufaturados em território brasileiro nas autopeças. O restante do consumo (61%) ocorreu em fios e cabos e, desse modo, foi considerado que o material já foi importado processado, utilizando, portanto, o inventário de trefilação global do ecoinvent, sem adaptações.

▲ 5.2.11 Vidro

Segundo dados do Relatório de Logística Reversa de Embalagens de Vidro (MME, 2025a), a produção de vidros ocios (utili-

zados em embalagens) no Brasil foi de 1.195.928 toneladas em 2023. Não foram encontrados dados específicos de produção de vidros automotivos. Ainda assim, considerando apenas a parcela de produção de vidros ocios, a produção nacional é superior aos dados de exportação e importação total de vidro para o mesmo ano. Desse modo, o estudo assumiu uma simplificação de produção de vidro 100% nacional para veículos produzidos no Brasil, adaptando inventários de produção de vidros planos revestidos (*flat glass production, coated* {RoW}) para o mix elétrico nacional.

O inventário inclui todos os processos de fabricação para produzir vidro plano revestido (fornecimento de matéria-prima, adição de cacos de vidro, fusão, conformação, resfriamento, corte, revestimento e armazenamento). Além disso foi adicionado o processo de têmpera (*Tempering, flat glass* {GLO} | *market for tempering, flat glass* | *Cut-off, U*), adaptando para o mix elétrico brasileiro. Cabe destacar que no para-brisa é utilizado vidro laminado, que contempla a etapa de inclusão de uma película interna de PVB. O estudo considerou a entrada de PVB na lista de materiais dos veículos na seção dos polímeros termoplásticos.

▲ 5.2.12 Têxteis

Os materiais têxteis, embora correspondam a uma fração relativamente pequena do peso total dos veículos, vêm ganhando protagonismo na indústria automotiva. As principais aplicações são no estofamento de bancos, carpetes e porta-malas, forro de teto e laterais, isolamento acústico/térmico, entre outras (CECCI, 2025).

Dentre os materiais têxteis usados nos veículos estão o poliéster (55% a 65%), a poliamida (15% a 20%), o polipropileno (10% a 15%), as fibras naturais (5 a 10%) e a fibra de vidro (5% a 8%) (Cessi, 2025). Excluindo dessa categoria a poliamida e o polipropileno (que são considerados no inventário dos polímeros) e a fibra de vidro, o material com maior relevância na composição dos têxteis é o poliéster, respondendo por aproximadamente 78% do total. Assim, o estudo considerou o poliéster como representativo da produção de têxteis, adaptando inventários de produção de tecido de poliéster (*Textile, nonwoven polyester* {GLO}) para o mix elétrico nacional. Como uma simplificação o estudo considerou que 100% do poliéster é de origem nacional.

O couro também é um material importante utilizado na fabricação dos assentos de alguns veículos. No entanto, dada a ausência de *datasets* para este material na base de dadosecoinvent e dado que o couro não foi discriminado na lista de materiais da maior parte dos veículos enviados pelas montadoras, o estudo optou por não o incorporar na análise. Esta é uma limitação importante, principalmente

nos casos de veículos eletrificados, onde o emprego deste material é mais comum.

▲ 5.2.13 Baterias

O aumento da demanda por veículos eletrificados impulsiona o mercado de baterias, que se tornam muito mais complexas do que a usual bateria chumbo-ácido, comum nos veículos ICEV. Embora a corrida tecnológica ainda esteja em curso para se determinar qual será a tecnologia dominante nos próximos anos, as baterias de íon-lítio vêm sendo a mais empregada pela indústria automobilística mundial.

Tais baterias são formadas por um cátodo – geralmente composto por uma mistura de lítio, magnésio, níquel e cobalto –, um ânodo feito de grafite e um eletrólito de sais de lítio. Além dos componentes presentes nas células químicas, a montagem da bateria requer também materiais como alumínio e cobre em sua estrutura. A química do cátodo será um dos principais fatores influenciando o desempenho da bateria, com três composições sendo mais comumente aplicadas no mercado: óxido de lítio-níquel-magnésio-cobalto (*lithium nickel manganese cobalt oxide* - NMC), óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (*lithium nickel cobalt aluminum oxide* - NCA) e fosfato de lítio-ferro (*lithium iron phosphate* - LFP) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Para as baterias íon-lítio, o estudo considerou o emprego de baterias do tipo LFP para veículos P-HEV e BEV e do tipo NMC para veículos HEV, todas de origem 100% importadas. Por sua relevância na pegada de carbono de veículos eletrificados e pela disponibilidade da base de dadosecoinvent, considerou-se os inventários de produção e montagem de forma agregada.

Para o cenário de nacionalização (100% BR), foram adaptados os inventários de baterias íon-lítio da base de dadosecoinvent abaixo, considerando o mix de eletricidade nacional e materiais como aço, alumínio e plásticos de origem nacional.

- Bateria NMC 811: *Battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic* {GLO} | *market for battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic* | *Cut-off, U*
- Bateria LFP: *Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic* {GLO} | *market for battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic* | *Cut-off, U*

Para o processo de montagem da bateria de chumbo-ácido foi utilizado o inventário do GREET 2024 (*Lead-Acid Battery Production*), considerando apenas o consumo de energia na etapa da montagem e adaptando a eletricidade para o mix elétrico brasileiro, uma vez que as entradas de materiais da bateria de chumbo já são consideradas na lista de materiais dos veículos.

5.2.14 Outros metais especiais e outros compostos

Uma das componentes importantes para a pegada de carbono dos veículos são as informações referentes ao uso de metais especiais nos veículos como ouro, prata, paládio, cério, disprósio, entre outros. Esses materiais, ainda que utilizados em pequenas quantidades podem ter fatores de emissão elevados, como o caso do ouro que possui um fa-

tor de emissão de 48.446 kgCO₂e/kg (Gold {GLO} | *market for gold* | *Cut-off*, U). Esses materiais são classificados de forma agrupada no item 4.2 do IMDS, não sendo possível avaliar a quantidade específica desses metais especiais em cada veículo a partir das informações enviadas pelas montadoras. Desse modo, o estudo utilizou a estratificação dos metais especiais conforme estudo conduzido por Løvik et al., (2021), conforme mostra a **Tabela 5.21**.

Tabela 5.21 – Estimativa de composição dos metais especiais para diferentes motorizações

IMDS	Inventário base Ecoinvent	Material	Veículo			
			ICEV	HEV	PHEV	BEV
4.2	Outros metais especiais - mix médio	Ouro	0,42%	0,31%	0,30%	0,33%
		Prata	2,40%	1,81%	1,94%	2,44%
		Cério	7,50%	4,17%	3,89%	0,00%
		Disprósio	1,40%	13,20%	14,90%	15,32%
		Lantânio	7,00%	4,03%	3,76%	3,06%
		Neodímio	13,00%	29,17%	31,09%	32,04%
		Paládio	1,20%	0,74%	0,69%	0,07%
		Estanho	67,08%	46,59%	43,44%	46,73%

Fonte: Elaboraões próprias, com dados de composição de metais especiais baseados em Løvik et al., (2021).

Além dos metais especiais, o IMDS possui a categoria 7.3 de outros compostos que considera diversos tipos de materiais sólidos que não se enquadram em nenhuma outra categoria, tais como o diamante, grafite, fibra de carbono, semicondutores, revestimentos, entre outros. Dada a composição bastante distinta de materiais e, não sendo possível avaliar junto às montadoras a composição específica desta categoria, o estudo assumiu uma composição de 33% de grafite (*market for graphite* {GLO} | *Cut-off*, U), 33% de fibra de carbono (*market for carbon fibre reinforced plastic, injection moulded* {GLO} | *Cut-off*, U) e 33% de materiais de revestimento (*market for coating powder* {GLO} | *Cut-off*, U).

5.2.15 Outros materiais

Para os demais materiais que compõe o veículo, foram considerados os inventários da base de dados ecoinvent sem adaptações. São eles:

- Adesivos e selantes: *Adhesive, for metal* {RoW} | *market for adhesive, for metal* | *Cut-off*, U
- Titânio: *Titanium* {GLO} | *market for titanium* | *Cut-off*, U
- Tinta: *Electrostatic paint* {GLO} | *market for electrostatic paint* | *Cut-off*, U
- Platina: *Platinum* {GLO} | *market for platinum* | *Cut-off*, U
- Fibra de vidro: *Glass fibre* {GLO} | *market for glass fibre* |

Cut-off, U

- Eletrônicos: *Electronics, for control units* {GLO} | *market for electronics, for control units* | *Cut-off*, U
- Óleo lubrificante: *Lubricating oil* {RoW} | *market for lubricating oil* | *Cut-off*, U
- Etilenoglicol: *Ethylene glycol* {GLO} | *market for ethylene glycol* | *Cut-off*, U
- Tetrafluoretano: *Refrigerant R134a* {GLO} | *market for refrigerant R134a* | *Cut-off*, U
- Água: *Tap water* {BR} | *market for tap water* | *Cut-off*, U

5.2.16 Outras informações relevantes: Logística e transporte dos materiais

Para a parcela de materiais importados, o estudo adotou inventários de mercado global (*market* GLO), que já consideram dados de transporte dos materiais até o consumo final. Já no caso dos materiais de origem nacional e de menor relevância em termos de massa no veículo (materiais secundários), o estudo assumiu distâncias e inventários padrão de transporte, considerando diferentes modais (**Tabela 5.22**). Essa abordagem permitiu considerar os impactos associados ao transporte, sem recorrer a dados muito específicos, uma vez que as emissões de GEE provenientes do transporte de materiais secundários representam uma parcela pouco significativa da pegada de carbono do veículo.

Tabela 5.22 – Distâncias e inventários utilizados para transporte dos materiais secundários

Região	Modal	Inventários Ecoinvent	Distâncias ^A
BR	Rodoviário	market for transport, freight, lorry, unspecified {BR}	400 km
	Ferroviário	market group for transport, freight train {RoW}	800 km

Fonte: Elaboração própria.

A Distâncias assumidas.

5.3. Inventário de ciclo de vida da produção e transmissão da eletricidade brasileira

Uma das principais vantagens para a produção nacional de veículos e matérias-primas se deve à matriz elétrica brasileira, cuja baixa dependência de fontes energéticas fósseis resulta em uma das eletricidades menos intensas em carbono do mundo. A determinação exata das emissões de GEE associadas à energia elétrica,

no entanto, é sujeita à parcela de geração proveniente de fontes renováveis, especialmente de empreendimentos hidroelétricos, cuja oferta apresenta flutuações anuais significativas.

A geração anual de energia elétrica por fonte no Brasil é controlada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A **Tabela 5.23** apresenta a geração de eletricidade por fonte entre 2019 e 2023, em GWh.

Tabela 5.23 – Geração total de eletricidade no Brasil entre 2019 e 2023

Fonte	2019	2020	2021	2022	2023	Média (Absoluta)	Média (Percentual)
Hidráulica	418184	415448	377744	440986	445354	419,543	68.4%
Eólica	55814	56910	72091	81472	95596	72,377	11.8%
Solar	4979	5960	7679	12604	54084	17,061	2.8%
Biomassa	24525	24772	22854	22173	24108	23,686	3.9%
Nuclear	16127	14053	14704	14559	14517	14,792	2.4%
Carvão	13942	10952	16523	6994	7702	11,223	1.8%
Gás Natural	45214	41540	67058	23842	19733	39,477	6.4%
Derivados de Petróleo	3591	3552	13294	1528	690	4,531	0.7%
Outras	11225	11298	11212	11370	9097	10,840	1.8%
Total	593600	584484	603158	615528	670881	613,530	100.0%

Fonte: ONS, 2025.

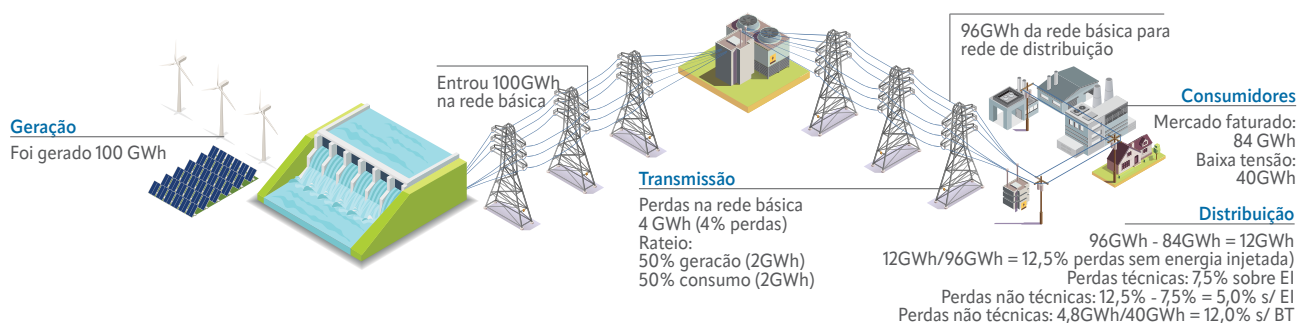
Pode-se observar, a partir dos dados de geração, a influência do recorte temporal na intensidade de carbono associada à geração de eletricidade. O ano de 2021, por exemplo, foi marcado por um evento de escassez hídrica e, neste ano, a geração hidráulica foi 10% menor do que a média entre 2019 e 2023. Na mesma direção, este déficit hídrico provocou o aumento da participação de fontes fósseis na geração de eletricidade daquele ano.

Sendo assim, para melhor representar a dinâmica da geração elétrica brasileira, optou-se, neste projeto, pela utilização de uma média de cinco anos de geração, em detrimento de um ano específico. Foram selecionados os cinco anos mais recentes cujos dados de geração estavam disponíveis no início da modelagem da pegada de carbono dos veículos. Anos anteriores a 2019 foram desconsiderados pois a fonte solar, que hoje

representa mais de 8% da matriz elétrica brasileira, tinha participação menor que 1% nestes anos, e por isso não refletem mais a realidade nacional.

Sobre a geração bruta de eletricidade, o estudo seguiu as orientações da norma ISO 14067, segundo a qual é necessário, para a determinação da geração líquida, considerar as perdas técnicas do sistema elétrico, calculadas pela diferença entre os pontos de injeção (energia gerada) e entregue nos pontos de carga, que são as unidades consumidoras diretamente conectadas ao sistema de transmissão e às redes de distribuição (ANEEL, 2025). No projeto, foram consideradas somente as perdas técnicas, ou seja, 4% na transmissão, e 7,5% na distribuição, ambos valores sobre o total gerado, totalizando 11,5% de perdas. A **Figura 5.8** ilustra as perdas no sistema elétrico.

→| **Figura 5.8 – Perdas no setor elétrico brasileiro**



Fonte: SAMP, 2025.

As demais exigências da norma ISO 14067 para o tratamento da eletricidade também foram cumpridas sendo que os inventários da ecoinvent contemplam as emissões *upstream* e *downstream* referentes à geração de eletricidade.

Com relação ao emprego de eletricidade nos inventários utilizados neste estudo, é importante mencionar que, para os inventários criados ou adaptados pelo projeto, empregou-se a abordagem de "rede" ("*location-based*"), sendo consideradas informações de autoprodução, quando disponíveis, ou consumo do GRID brasileiro. Seguindo as recomendações da ISO 14067, as informações referentes aos certificados de energia renovável (RECs) ou contratos de energia renovável não foram consideradas por não oferecerem dados específicos do ciclo de vida e não garantirem que a venda de eletricidade e as emissões de GEE associadas não sejam contabilizadas duas vezes, logo essas informações foram contabilizadas como provenientes do GRID brasileiro. Para os demais inventários, foram utilizados os valores

informados na base de dados ecoinvent, sem adaptações.

▲ 5.3.1 Modelagem da eletricidade brasileira no cenário base

A determinação dos fatores de emissão para a geração de eletricidade foi realizada com base em um inventário de geração elétrica para o Brasil da base de dados ecoinvent, versão 3.91 (*market for electricity, high voltage {BR-South-eastern/Mid-western grid}*). A **Tabela 5.24** apresenta resumidamente as etapas para o cálculo final do fator de emissão médio da eletricidade brasileira entre 2019 e 2023. O fator de emissão obtido para a eletricidade brasileira, de 138,7 g CO₂-eq/kWh foi utilizado para todos os inventários adaptados para a produção nacional no cenário base. Este valor foi obtido a partir da média dos fatores de emissão por fonte energética presentes na **Tabela 5.24** de acordo com sua respectiva participação, e dividindo-se o resultado final pelo percentual de perdas no setor elétrico, de 11,5%.

Tabela 5.24 – Fator de emissão ponderado para a geração de eletricidade brasileira

Fonte energética	Fator de Emissão ^A	Participação da fonte	Fator de Emissão Ponderado, com perdas
Hidráulica	71.7	68.38%	138.7 g CO ₂ -eq/kWh
Eólica	10.2	11.80%	
Solar	51.8	2.78%	
Biomassa	40.4	3.86%	
Nuclear	6.7	2.41%	
Carvão	1199.5	1.83%	
Gás Natural	505.3	6.43%	
Derivados de Petróleo	756.9	0.74%	
Outras ^B	527.2 ^C	1.77%	

Fonte: Wern *et al.* (2016); ONS (2025)

A Utilizando o método de avaliação de impacto IPCC 2021 GWP100.

B Outras: gás de coqueria, outras não renováveis e outras renováveis.

C Fonte: EPE 2022.

5.3.2 Modelagem da eletricidade brasileira nos cenários de maior participação e menor participação de renováveis

Além do cenário base referente à média de geração entre os anos de 2019 e 2023, foram estabelecidos outros dois cenários

de geração de eletricidade referente a um ano de abundância e outro de escassez de fontes renováveis dentro do escopo temporal considerado. Neste sentido, o mix do ano de 2021 foi utilizado como referência para o cenário de menor participação de renováveis e o ano de 2023 para o cenário de maior participação, conforme a [Tabela 5.25](#).

Tabela 5.25 – Composição da matriz elétrica brasileira para diferentes cenários

Fonte energética	Menor participação de renováveis		Maior participação de renováveis	
	Participação da fonte	Fator de Emissão Ponderado (g CO ₂ -eq/kWh)	Participação da fonte	Fator de Emissão Ponderado (g CO ₂ -eq/kWh)
Hidráulica	62,63%	185,3	66,38%	103,3
Eólica	11,95%		14,25%	
Solar	1,27%		8,06%	
Biomassa	3,79%		3,59%	
Nuclear	2,44%		2,16%	
Carvão	2,74%		1,15%	
Gás Natural	11,12%		2,94%	
Derivados de Petróleo	2,20%		0,10%	
Outras	1,86%		1,36%	
Perdas	11,50%		11,50%	

Fonte: Elaboração própria.

5.4. Avaliação da qualidade dos dados dos inventários de ciclo de vida

Como mencionado anteriormente, os dados de entrada e os parâmetros utilizados na construção e/ou adaptação dos inventários de ciclo de vida do projeto "Do berço ao portão" apresentados neste relatório, foram obtidos por meio de fontes primárias das empresas parceiras do projeto e/ou secundárias provenientes de bases de dados consolidadas, comoecoinvent, GREET, PlasticsEurope, Bright Consulting, além de relatórios setoriais e publicações técnicas. Esses dados foram utilizados para criar e/ou adaptar os inventários, com o objetivo de refletir de forma mais fiel a realidade da produção de veículos leves no Brasil, contribuindo assim para o aumento da qualidade e representatividade dos resultados.

Para a avaliação da qualidade dos dados, foram adotados cinco requisitos independentes indicados pela matriz Pedigree, conforme proposto por Weidema *et al.* (2013): confiabilidade; completeza; e correlação temporal, geográfica e tecnológica. Conforme pode ser observado na [Tabela 5.26](#), a matriz Pedigree permite converter informações qualitativas de qualidade de dados em valores quantitativos de variância, utilizando uma escala de 1 (excelente) a 5 (ruim) para cada requisito avaliado. Com base nesta classificação, um indicador geral de qualidade dos dados foi obtido a partir da média aritmética dos requisitos avaliados. Os resultados da avaliação de qualidade para os indicadores gerais dos principais inventários de ciclo de vida utilizados no projeto, bem como seus respectivos indicadores gerais de qualidade dos dados estão apresentados na [Tabela 5.27](#). A análise detalhada da qualidade dos dados dos inventários pode ser consultada no [Anexo V](#).

Tabela 5.26 – Matriz Pedigree utilizada para avaliação da qualidade dos dados do projeto

Fonte	1 Excelente	2 Muito bom	3 Bom	4 Regular	5 Ruim
Confiabilidade	Dados verificados baseados em medições.	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medições.	Dados não verificados baseados parcialmente em estimativas qualificadas.	Estimativa qualificada (ex. por especialista industrial).	Estimativa não qualificada.
Completeza	Dados representativos de todos os locais relevantes para o mercado considerado e com período adequado para compensar flutuações normais.	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o mercado considerado com períodos adequados para compensar flutuações normais.	Dados representativos de somente alguns locais (< 50%) relevantes para o mercado considerado ou > 50% dos locais mas com períodos curtos.	Dados representativos de apenas um local representativo para o mercado considerado ou alguns locais com períodos curtos.	Representatividade desconhecida ou dados de pequeno número de locais e períodos curtos.
Correlação temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo.	Menos de 6 anos de diferença para o ano do estudo.	Menos de 10 anos de diferença para o ano do estudo.	Menos de 15 anos de diferença para o ano do estudo.	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença para o ano do estudo.
Correlação geográfica	Dados da área em estudo.	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída.	Dados de uma área com condições similares de produção.	Dados de uma área com condições ligeiramente similares de produção.	Dados de área desconhecida ou área com diferenças significativas nas condições de produção.
Correlação tecnológica	Dados de empresas, processos e materiais em estudo.	Dados de processos e materiais em estudo (ex. mesma tecnologia), mas de empresas diferentes.	Dados de processos e materiais em estudo, mas de tecnologia diferente.	Dados de processos ou materiais relacionados.	Dados de processos relacionados, em escala laboratorial ou de tecnologia diferente.

Fonte: Adaptado de Weidema *et al.* (2013)

Outros elementos importantes relacionados a qualidade dos dados foram avaliados durante o processo de atribuição de valores quantitativos na Matriz Pedigree. A precisão, a fonte dos dados (primária ou secundária) e o grau de incerteza da informação foram levados em conta na avaliação do indicador de confiabilidade dos dados. De forma similar, a representatividade e a fonte dos dados (primária ou secundária) foram critérios considerados para a avaliação dos indicadores de correlação tecnológica, correlação geográfica e completeza.

A consistência dos dados foi avaliada por meio de uma análise minuciosa de todo o conjunto de dados coletados e de uma avalia-

ção de anomalias/plausibilidade, a fim de identificar valores fora do padrão, erros de unidades ou variações metodológicas. Quando encontrado alguma inconsistência relacionada aos dados primários, os responsáveis pelo preenchimento foram contactados para esclarecimentos ou ajustes e/ou os dados foram descartados. Além disso, foi também analisado se as escolhas metodológicas foram avaliadas de forma consistente para todas as alternativas estudadas e se critérios de alocação foram os mesmos para sistemas de produto multifuncionais. Também foi conduzida uma análise de sensibilidade para avaliar a influência de variações nos pressupostos, métodos e dados sobre os resultados obtidos. Essas análises podem ser consultadas no **Capítulo 8**.

Tabela 5.27 – Resultados dos indicadores gerais de qualidade dos dados dos principais inventários de ciclo de vida utilizados no projeto

Etapa do ciclo de vida	Inventário	Tipo de tratamento					Nome do inventário	Indicador geral da qualidade do dado	
		Criação	Adaptação			Sem adaptação			
			Eletricidade	Calor	Processo (insumo/rota/perda)				Logística
	Aço não ligado	X	X	X	X	X	[BP] Steel, unalloyed, processed {BR} market for steel Cut-off, U	2	
	Aço alta liga				X	X	[BP] Steel, high-alloyed, processed {RoW} steel high-alloyed, mix of process Cut-off, U	3	
	Ferro fundido		X				[BP] Cast iron, processed {BR} market for cast iron Cut-off, U	3	
	Alumínio fundido		X		X	X	[BP] Aluminum, cast alloy, processed {BR} mix of processes, sheet rolling, extrusion and casting, final market Cut-off, U	2	
	Alumínio forjado		X		X	X	[BP] Aluminum, wrought alloy {BR} aluminum, wrought alloy, final market Cut-off, U	2	
	Magnésio		X			X	[BP] Magnesium {BR} market for magnesium Cut-off, U	3	
	Titânio						X	Titanium {GLO} market for titanium Cut-off, U	3
Produção, processamento e transporte de materiais	Cobre		X			X		[BP] Copper, cathode {BR} market for copper, cathode Cut-off, U	3
	Zinco		X			X		[BP] Zinc {BR} market for zinc Cut-off, U	3
	Níquel		X			X		[BP] Nickel, class 1 {BR} market for nickel, class 1 Cut-off, U	3
	Chumbo		X			X		[BP] Lead {BR} market for lead Cut-off, U	3
	Platina						X	Platinum {GLO} market for platinum Cut-off, U	3
	Ouro, como outros metais especiais						X	Gold {GLO} market for gold Cut-off, U	4
	Plástico médio		X			X		[BP] Plastic, average plastic {BR} market for average plastic Cut-off, U	3
	Borracha sintética		X					[BP] Synthetic rubber {BR} synthetic rubber production Cut-off, U	3
	Tecido de poliéster		X					[BP] Textile, nonwoven polyester {BR} textile production, nonwoven polyester, needle-punched Cut-off, U	3

Tabela 5.27 – Resultados dos indicadores gerais de qualidade dos dados dos principais inventários de ciclo de vida utilizados no projeto

Etapa do ciclo de vida	Inventário	Tipo de tratamento					Sem adaptação	Nome do inventário	Indicador geral da qualidade do dado
		Criação	Adaptação			Logística			
			Eletricidade	Calor	Processo (insumo/rota/perda)				
Produção, processamento e transporte de materiais	Tinta eletrostática		X					[BP] Electrostatic paint {BR} paint production, for electrostatic painting for aluminium Cut-off, U	3
	PVC, como revestimento inferior		X					[BP] Polyvinylchloride, suspension polymerised {BR} polyvinylchloride production, suspension polymerisation Cut-off, U	3
	Couro	X	X	X	X			[BP] Leather {BR} Leather production Cut-off, U	3
	Vidro		X			X		[BP] Flat glass, coated {BR} market for flat glass, coated Cut-off, U	3
	Fibra de vidro						X	Glass fibre {GLO} market for glass fibre Cut-off, U	3
	Componentes eletrônicos						X	Electronics, for control units {GLO} market for electronics, for control units Cut-off, U	4
	Óleo lubrificante						X	Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil Cut-off, U	3
	Etilenoglicol						X	Ethylene glycol {GLO} market for ethylene glycol Cut-off, U	4
	Tetrafluoretano (R134-a)						X	Refrigerant R134a {GLO} market for refrigerant R134a Cut-off, U	3
	Água						X	Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U	4
Produção e/ou montagem da bateria	Montagem da bateria chumbo-ácido		X					[BP] Lead acid battery {BR} Lead acid battery Cut-off, U	3
	Produção e montagem bateria NMC						X	Battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic {GLO} market for battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic Cut-off, U	3
	Produção e montagem bateria LFP						X	Battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic {GLO} market for battery, Li-ion, LFP, rechargeable, prismatic Cut-off, U	3
	Produção e montagem bateria NiMH						X	Battery, NiMH, rechargeable, prismatic {GLO} market for battery, NiMH, rechargeable, prismatic Cut-off, U	4
Produção e/ou montagem do veículo	Montagem do veículo	X	X	X				[BP] Vehicle Assembly {BR} Vehicle Assembly Process Cut-off, U	2

Fonte: Elaboração própria.

A De modo geral, para os materiais ou processos em que houve a criação de inventários ou alguma adaptação para o cenário nacional, o estudo adotou a seguinte nomenclatura: material ou processo {BR} | market for material ou processo | Cut-off, U. Neste sentido, o inventário “market BR” considerou a parcela de material produzido nacionalmente (se houver), a parcela de material importado “market GLO” e a parcela de processamento nacional ou importada. Desse modo, os inventários “market BR” não consideram, necessariamente, que os materiais são 100% nacionais no cenário base, mas consideram a composição de nacional e importado descritos na seção 5.1.3. No caso do níquel, por exemplo, o inventário “[BP] Nickel, class 1 {BR} | market for nickel, class 1 | Cut-off, U” considera uma entrada de 100% de níquel importado para o cenário base, que pode se alterar, a depender do cenário de nacionalização considerado no estudo (seção 8.1).

6. Fatores de emissão consolidados

Para a obtenção dos fatores de emissão, o método de AICV empregado foi o IPCC 2021 GWP 100, disponível no software SimaPro v. 9.5.0.2. Essa métrica é a mais comumente empregada em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e em inventários de emissões, sendo recomendada por normas como a ISO 14067 e amplamente adotada em políticas públicas e relatórios corporativos. Não foram utilizados elementos opcionais como normalização, agrupamento ou ponderação.

Vale destacar que esta versão do método disponível no software SimaPro desconsidera as remoções e emissões de CO₂ biogênico, uma vez que estes fluxos fazem parte do ciclo curto de duração do carbono biogênico e possuem um impacto líquido neutro para a mudança do clima. Isso não se aplica para as emissões de CO₂ decorrentes de mudança do uso da

terra, nem para as emissões da oxidação de CH₄ biogênico.

A **Tabela 6.1** apresenta os fatores de emissão estimados para os principais materiais e para a etapa de montagem dos veículos, obtidos a partir da elaboração e/ou adaptação dos inventários de ciclo de vida descritos nas seções anteriores. Estes fatores foram empregados tanto no cenário base, levando em consideração o percentual de importação informados na seção 5.1.3, quanto nos cenários (100%BR e 100%GLO). Mais informações, incluindo os valores dos fatores de emissão das parcelas de CO₂eq fóssil, biogênico e MUT, podem ser consultadas no Anexo V – Detalhamento dos fatores de emissão e requisitos da qualidade dos dados (planilha excel). Esses fatores representam os resultados consolidados da fase de modelagem do projeto e servem como base para o cálculo da pegada de carbono total dos veículos leves analisados.

Tabela 6.1 – Fatores de emissão estimados pelo projeto no cenário base, em kg CO₂e/kg por fluxo (kg ou unidade de produto)

IMDS/ VDA	Material	Cenário 100% BR (kg CO ₂ e/kg)	Cenário 100% GLO (kg CO ₂ e/kg)
1.1	Aço / Aço fundido / Aço sinterizado	2,94	3,41
1.1.1	Não ligado, baixo teor de liga	2,94	3,41
1.1.2	Alto teor de liga	4,75	6,77
1.2	Ferro fundido	2,16	2,32
1.2.1	Ferro fundido com grafite lamelar / Ferro fundido temperado	2,16	2,32
1.2.2	Ferro fundido com grafite nodular / Ferro fundido vermicular	2,16	2,32
1.2.3	Ferro fundido altamente ligado	3,47	3,47
2.1	Alumínio e ligas de alumínio	5,52	15,02
2.1.1	Ligas de alumínio fundido	5,52	15,02
2.1.2	Ligas de alumínio forjado	4,84	14,19
2.2	Magnésio e ligas de magnésio	23,38	29,50
2.2.1	Ligas de magnésio fundido	23,38	29,50

Tabela 6.1 – Fatores de emissão estimados pelo projeto no cenário base, em kg CO₂e/kg por fluxo (kg ou unidade de produto)

IMDS/ VDA	Material	Cenário 100% BR (kg CO ₂ e/kg)	Cenário 100% GLO (kg CO ₂ e/kg)
2.2.2	Ligas de magnésio forjado	23,06	28,67
2.3	Titânio e ligas de titânio	-	48,33
3.1	Cobre (ex.: quantidades de cobre em chicotes elétricos)	7,37	7,49
3.2	Ligas de cobre	7,37	7,49
3.3	Ligas de zinco	1,75	2,69
3.4	Ligas de níquel	9,29	17,52
3.5	Chumbo	0,67	1,35
4.1	Platina / Ródio	-	69.669,93
	Outros metais especiais	-	-
	Ouro	-	48.446,14
	Prata	-	457,57
	Estanho	-	10,37
	Cério	-	16,31
	Disprósio	-	1,20
4.2	Lantânio	-	41,09
	Neodímio	-	54,58
	Paládio	-	11.290,30
	Outros metais especiais - mix médio ICEV	-	368,11
	Outros metais especiais - mix médio HEV	-	266,25
	Outros metais especiais - mix médio PHEV	-	257,45
	Outros metais especiais - mix médio BEV	-	204,66
-	Plástico - mix médio	4,29	5,25
	Termoplásticos	4,25	5,22
	Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	5,10	5,77
	Poliestireno (GPPS)	-	3,75
	Poliestireno (XPS)	-	10,52
	Poliestireno (EPS)	-	3,62
	Poliestireno (HIPS)	-	3,73
	Polietileno alta densidade (HDPE)	2,39	3,52
	Polietileno baixa densidade (LDPE)	2,30	3,67
5.1	Polietileno linear de baixa densidade (LLDPE)	2,40	3,45
	Poliamida (Nylon 6)	9,84	10,64
	Poliamida (Nylon 6/6)	8,71	9,33
	Polycarbonato (PC)	5,78	7,05
	Polietileno tereftalato (PET)	3,54	4,46
	Polietersulfona (PES)	-	7,75
	Poliacetal (POM)	-	1,11
	Polipropileno (PP)	2,37	3,55
	Polissulfeto de Fenileno (PPS)	6,47	6,66

Tabela 6.1 – Fatores de emissão estimados pelo projeto no cenário base, em kg CO₂e/kg por fluxo (kg ou unidade de produto)

IMDS/ VDA	Material	Cenário 100% BR (kg CO ₂ e/kg)	Cenário 100% GLO (kg CO ₂ e/kg)
5.1	Policloreto de vinila (PVC)	2,22	3,15
	Polibutileno Tereftalato (PBT)	3,54	4,46
	Acrlonitrila Estireno Acrilato (ASA)	-	4,33
	Polimetilmetacrilato (PMMA)	-	8,76
	Outros - plástico médio	4,29	5,25
5.2	Termoplásticos elastômeros	4,29	5,25
5.3	Elastômeros (borracha sintética)	2,49	2,97
5.4.1	Poliuretano - mix médio	4,62	5,67
	Poliuretano flexível (PUR)	4,82	5,38
	Poliuretano rígido (PUR)	4,41	5,96
5.4.2	Poliéster insaturado	5,04	5,25
5.4.3	Outras resinas termofixas	4,96	5,20
5.5.1	Plásticos (em compostos poliméricos)	4,29	5,25
5.5.2	Têxteis (em compostos poliméricos)	4,63	5,63
6.1	Lacas / materiais de pintura	3,62	3,95
6.2	Adesivos, selantes	-	3,70
6.3	Revestimento inferior (underseal)	2,22	3,15
7.1	Materiais orgânicos naturais modificados (ex.: couro, madeira, papelão, ...)	3,14	3,14
7.2	Cerâmicas / Vidro	-	-
	Vidro	1,30	1,42
	Fibra de vidro	-	2,54
	Outros compostos – mix médio	-	30,30
7.3	Grafite	-	0,07
	Fibra de carbono	-	83,38
	Revestimentos (coatings)	-	7,47
8.1	Materiais de componentes eletrônicos (ex.: placas de circuito, displays)	-	31,97
8.2	Materiais de componentes elétricos	-	31,97
9.2	Lubrificantes	-	1,68
9.3	Fluido de freio	-	1,68
9.4	Líquido de arrefecimento / Outros glicóis	-	2,04
9.5	Gás refrigerante	-	16,75
9.6	Água de lavagem, ácidos de bateria	0,00	0,00
9.7	Conservante	-	1,68
9.8	Outros combustíveis e meios auxiliares	-	0,44
-	Montagem bateria chumbo-ácido	0,12	0,36
-	Produção e montagem da bateria Li-ion NMC811	14,53	17,84
-	Produção e montagem da bateria LFP	9,46	11,17
-	Etapas fabris de montagem do veículo ¹	211,98	756,48

Fonte: Elaboração própria.

¹ Fatores de emissão das etapas fabris de montagem em kg CO₂e/veículo.

7. Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados da pegada de carbono do Berço ao Portão para os 12 veículos do projeto no cenário base. Os resultados gerais, medidos em kgCO₂e por veículo, são em seguida analisados a partir das etapas de ciclo de vida dos veículos, a partir da contribuição por material e por sistemas.

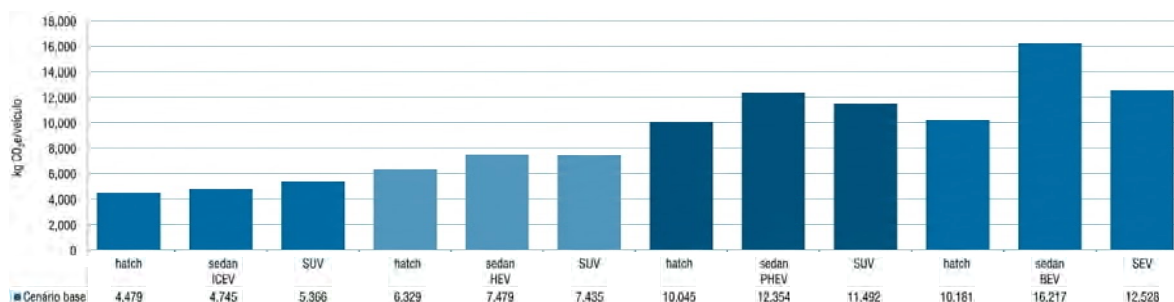
Estas análises têm por objetivo não somente evidenciar os fatores mais relevantes para a pegada de carbono dos veículos do projeto, como também facilitar a comparação dos resultados obtidos com a literatura, o que garante mais segurança para a modelagem realizada enquanto permite esclarecer diferenças e eventuais reduções na pegada de carbono de veículos leves brasileiros em relação aos internacionais.

É importante ressaltar que todos os resultados trazidos neste estudo contemplam o escopo do Berço ao Portão ("Cradle-to-Gate") e contemplam somente o impacto ambiental "Mudança do Clima". Além disso, os resultados do estudo representam tão somente a amostra e o escopo analisado. Não se deve, portanto, utilizar os resultados deste estudo para estabelecer valores normativos definitivos ou médias nacionais.

7.1. Resultado geral por veículo

A **Figura 7.1** a seguir traz os resultados obtidos para os 12 veículos do projeto, em kgCO₂e/veículo. Foi possível observar primeiramente que os modelos eletrificados HEV, PHEV e BEV apresentaram maiores pegadas de carbono do que os veículos convencionais, do berço ao portão da montadora. O veículo ICEV-hatch, o mais leve dentre os analisados, teve uma pegada de 4.479 kgCO₂e no cenário base, enquanto o veículo BEV-sedan, o mais pesado e potente, emitiu 16.217 kgCO₂e para a sua produção. Notou-se, além disso, uma grande diferença dentro da motorização BEV, na qual o modelo hatch conta com uma pegada quase 37% menor do que o BEV sedan devido ao peso do veículo e da bateria 30% e 40% menor, respectivamente, conforme apresentado anteriormente na **Tabela 5.3**. Esses perfis entre os diferentes segmentos buscaram representar as condições de mercado, utilizando como referência os modelos mais vendidos em 2023. Cabe destacar que esse cenário pode se alterar futuramente em função de tendências de mercado, preferências do consumidor, entre outros fatores, sendo necessárias atualizações. Neste sentido, o BEV sedan se caracterizou por veículos mais potentes e com maior consumo energético e, portanto, maiores emissões de GEE quando comparado aos demais veículos e segmentos.

→| **Figura 7.1 – Pegada de carbono do Berço ao Portão dos doze veículos do projeto**

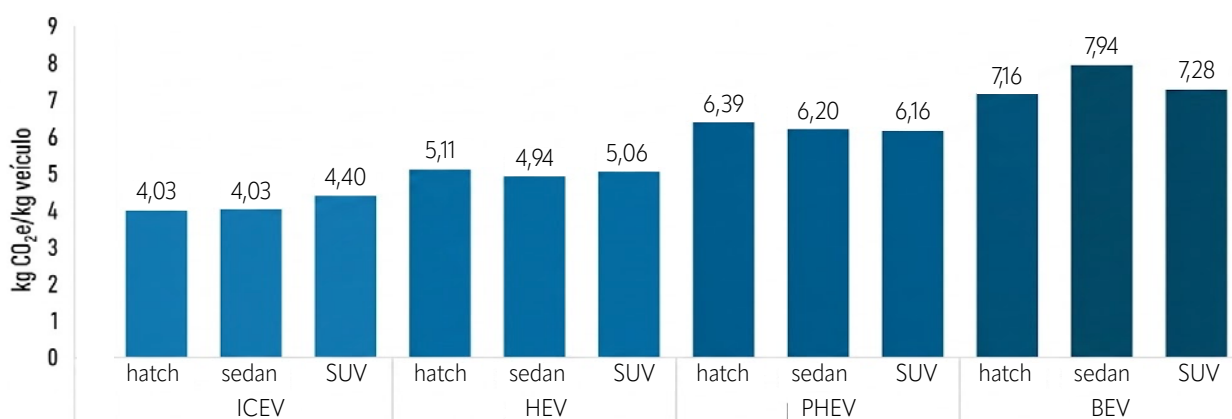


Fonte: Elaboração própria.

Desse modo, devido à grande variação de peso entre os veículos do projeto, é importante analisar os resultados obtidos normalizados pela massa de cada veículo, pois desta forma é possível entender melhor a influência direta da motorização na pegada de carbono. É importante ressaltar que esta normalização por massa é um indicador complementar, e não substitui a unidade funcional definida previamente. Estes resultados encontram-se representados na **Figura 7.2**. Nela, observa-se que quanto maior o grau de eletrificação do veículo, maior o fator de emissão medido em kg CO₂e/kg veículo, o que aponta para um maior fator

de emissão dos materiais e sistemas das alternativas eletrificadas. Apesar de na figura em questão a comparação envolver simultaneamente diferentes tipos de motorização como também diferentes percentuais de materiais importados, a constatação de que o fator de emissão do veículo aumenta conforme o grau de eletrificação também pode ser observada no Capítulo 8.1, no qual a análise compara o veículo do segmento SUV com um mesmo percentual de materiais nacionais ou importados ao longo de diferentes tecnologias de motorização, eliminando a influência da cobertura geográfica da análise.

→ **Figura 7.2 – Pegada de carbono dos doze veículos do projeto por massa**



Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 7.1** apresenta a pegada de carbono discriminada em emissões fóssil, biogênicas e de mudança no uso da terra (MUT), conforme estabelecido pela ISO 14067 quanto ao formato de

apresentação dos resultados. Foi possível observar que as emissões fósseis foram predominantes em todos os veículos, representando a maior contribuição para a pegada total.

Tabela 7.1 – Pegada de carbono, em kg CO₂e por parcela (fóssil, biogênico e MUT)

Cenário	ICEV			HEV			PHEV			BEV		
	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV
Fóssil	4.290	4.545	5.170	6.146	7.257	7.219	9.846	12.094	11.246	10.019	15.987	12.333
Biogênico ^A	138	146	146	151	184	179	183	239	227	145	201	174
MUT	50	53	50	32	37	37	16	20	19	17	29	21

Fonte: Elaboração própria.

A O método de AICV adotado considerou apenas derivadas dos fluxos de CH₄ biogênico, uma vez que os fluxos de CO₂ biogênicos foram considerados, por simplificação, como fluxos neutros na composição da pegada de carbono do estudo.

Um outro resultado da ACV é a compilação e quantificação das entradas e saídas relevantes do sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida, ou seja, o Inventário do Ciclo de Vida (ABNT, 2009a, 2009b). Como este estudo foca apenas em uma categoria de impacto ambiental – mudança do clima, foram consideradas relevantes apenas as emissões de GEE para o ar. O ICV dos veículos, incluindo os principais gases de GEE, é apresentado na **Tabela 7.2**, onde é possível observar com maior destaque as emissões de CO₂ fóssil. Os resultados

das emissões dos veículos do projeto separados em gases de efeito estufa foram obtidos diretamente do SimaPro, no qual os ICVs utilizados contém todos estes GEE listados. É importante ressaltar que as emissões de mudança no uso do solo são provenientes somente dos inventários carregados da base de dados daecoinvent, e como para os inventários criados pelo projeto não foram calculadas as emissões de dLUC, os resultados encontrados podem ser considerados subdimensionados para esta categoria.

Tabela 7.2 – Emissões dos principais GEE, em kg de GEE

Cenário	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV
CO ₂ fóssil	3.768	3.992	4.470	5.334	6.298	6.264	8.536	10.486	9.748	8.680	13.866	10.686
CO ₂ MUT	53,1	56,0	52,2	33,7	38,9	38,9	16,6	20,3	18,9	17,2	29,2	21,5
CH ₄ fóssil	13,8	14,6	18,3	21,9	25,9	25,7	35,5	43,6	40,6	36,3	56,9	44,6
CH ₄ biogênico	4,6	4,9	4,9	5,1	6,2	6,0	6,1	8,0	7,6	4,9	6,8	5,8
N ₂ O	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados e discussões apresentados devem ser interpretados à luz das limitações metodológicas identificadas. Em termos de representatividade, os achados referem-se exclusivamente à amostra e ao escopo analisados de 12 veículos responsáveis por aproximadamente 36% das vendas de veículos leves em 2023, não sendo adequada sua utilização para o estabelecimento de valores normativos definitivos ou médias nacionais, uma vez que a amostra não contempla a totalidade dos modelos produzidos no país. Adicionalmente, a ausência de dados primários para todos os segmentos e motorizações avaliados, em especial nos veículos elétricos, bem como para alguns materiais, implicou na utilização de dados secundários que não necessariamente refletem o contexto brasileiro. Diante dessas limitações, recomenda-se cautela na extrapolação dos resultados aqui apresentados para contextos mais amplos.

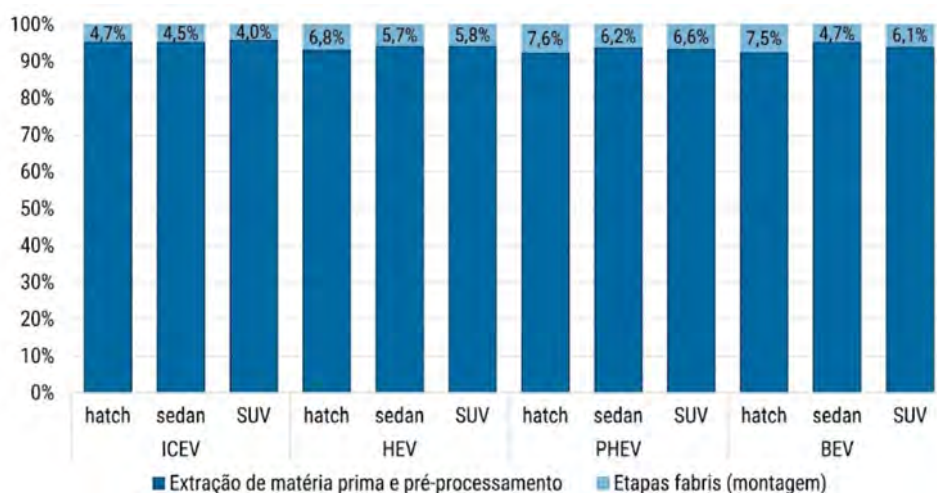
Ainda assim, conforme discutido anteriormente, os resultados apresentados neste estudo constituem um avanço relevante para a literatura nacional e internacional sobre avaliação do ciclo de vida de veículos leves. Há notória escassez de estudos que quantificam a pegada de carbono da fase de manufatura veicular com base em dados primários, lacuna que se torna ain-

da mais pronunciada quando se considera o contexto brasileiro. O Brasil apresenta características produtivas e de mix energético substancialmente distintas do cenário global, fatores que exercem influência direta sobre o perfil de emissões do ciclo de vida dos veículos aqui produzidos. Nesse sentido, este estudo oferece uma contribuição importante para preencher essa lacuna, fornecendo dados de base para futuras pesquisas, para o aprimoramento de inventários e para a formulação de políticas públicas voltadas à descarbonização do setor automotivo.

7.2. Fases do ciclo de vida

No escopo de um estudo de ACV do berço-ao-portão, é comum separar os resultados em duas fases: extração de matéria-prima e pré-processamento, e fabricação do produto. A primeira fase reflete a contribuição de toda a cadeia automobilística na pegada de carbono dos veículos, enquanto a segunda analisa a contribuição direta das fabricantes de veículos a partir dos processos que ocorrem dentro de suas unidades produtivas. A pegada de carbono dos 12 veículos do projeto por fase de ciclo de vida encontra-se representadas na **Figura 7.3** a seguir.

→| **Figura 7.3 – Contribuição por etapa do ciclo de vida para a pegada de carbono dos doze veículos do projeto**



Fonte: Elaboração própria.

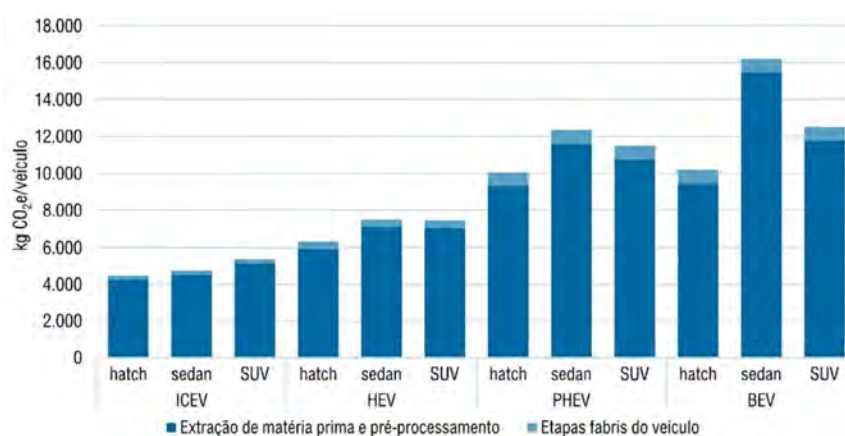
É notório que a pegada de carbono dos veículos do berço-ao-portão é dominada pela fase que vai desde a extração de matéria-prima, produção de materiais e pré-processamento, a qual contribui com mais de 92% do total para todos os veículos avaliados. Nota-se, ademais, que os veículos ICEV, com produção nacional, apresentaram a menor contribuição das etapas fabris, enquanto as demais motorizações, parcialmente ou totalmente importadas, possuem uma contribuição ligeiramente maior desta etapa. No caso dos HEVs, por exemplo, foi considerado no cenário base que 40% do market share é proveniente de veículos importados e no caso dos PHEVs e BEVs, considerado que os veículos são na sua totalidade importados, o que contribui para uma participação maior da etapa da fabricação.

É evidente, portanto, que a maioria dos esforços para descarbonizar o setor automobilístico devem ser direcionados para a cadeia de suprimento de materiais, que responde pela imensa maioria das emissões de GEE, do berço-ao-portão. Nesse sentido, ainda que não sejam diretamente responsáveis pela maior parte dessas emissões, as montadoras, como empresas focais - aquelas que usualmente (1) comandam ou governam a cadeia de suprimento, (2) têm o contato direto com o consumidor, ou (3) projetam o produto ou serviço oferecido (SEURING; MÜLLER, 2008) - desempenham um papel estratégico para sua mitigação, na medida em que exercem forte influência sobre a cadeia de suprimentos automotiva. Por meio de decisões de projeto, especificações técnicas, gestão e desenvolvimento de fornecedores, e estratégias de compras, as montadoras determinam, em grande parte, os materiais utilizados, suas quanti-

dades, rotas tecnológicas de produção e níveis de conteúdo reciclado, podendo atuar como agentes indutores de mudanças em todos os elos (*tiers*) da cadeia automotiva, tanto a montante (*upstream*) quanto a jusante (*downstream*).

Além disso, conforme discutido, as emissões absolutas da etapa de fabricação e montagem dos veículos foi significativamente menor nos ICEVs quando comparadas às emissões da fabricação e montagem dos PHEVs e BEVs, em função das premissas de nacionalização adotadas (fabricação e montagem 100% nacional para os ICEVs, enquanto para os PHEVs e BEVs 100% importado, uma vez que não havia fabricação de veículos desta motorização no Brasil em 2023). Os resultados mostram, portanto, que a fabricação e montagem nacional podem apresentar emissões menores quando comparadas ao cenário internacional, em especial em climas mais frios, por conta do menor consumo de eletricidade e calor na etapa de fabricação, além da menor pegada de carbono do mix elétrico brasileiro. Quanto ao consumo de calor, os maiores valores dos inventários de fabricação internacionais podem ser explicados por condições regionais, uma vez que a referência utilizada no estudo (GREET, 2024) retrata o cenário de fabricação em climas temperados, em que o maior consumo de calor pode ser explicado pela maior demanda energética para o aquecimento do ar e água utilizados para climatização dos ambientes, mas especialmente no processo de pintura. Valores semelhantes de consumo de energia também foram observados em outros estudos (GIAMPIERI et al., 2020, OH; HILDRETH, 2016). Para mais detalhes da etapa de fabricação, consultar seção 5.1.

→| **Figura 7.4 – Pegada de carbono do Berço ao Portão dos doze veículos do projeto por etapa do ciclo de vida**



Fonte: Elaboração própria.

▲ 7.3. Análise de contribuição de materiais

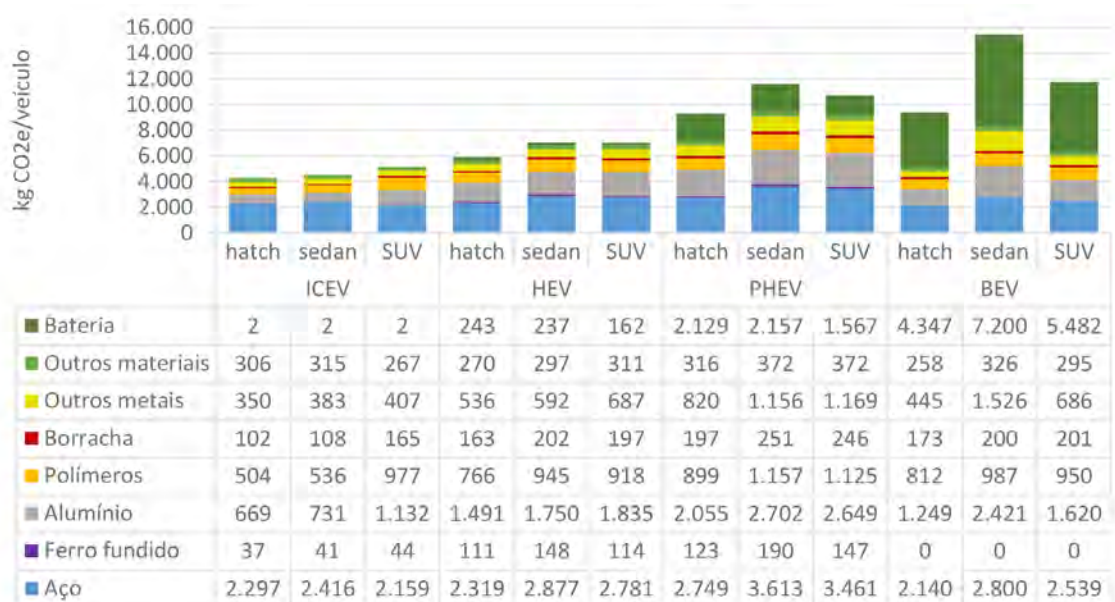
Conforme visto na seção anterior, é na produção e pré-processamento dos materiais que se encontra mais de 90% da pegada de carbono dos veículos. Assim, a análise da contri-

buição dos principais materiais nas emissões de produção de automóveis é essencial para a priorização de esforços de descarbonização. A Figura 7.5 e a Figura 7.6 mostram, de modo complementar, a pegada de carbono dos veículos por material. É importante ressaltar, contudo, que não foi possível desa-

gregar os materiais da bateria de íon de lítio dos veículos HEV, PHEV e BEV, e, portanto, o item "Bateria" reflete o conjunto de todos os materiais deste componente, além das emissões para

sua montagem. Apesar desta restrição, as próprias montadoras participantes do projeto informaram que é usual manter os materiais das baterias agregadas por nível de sistema.

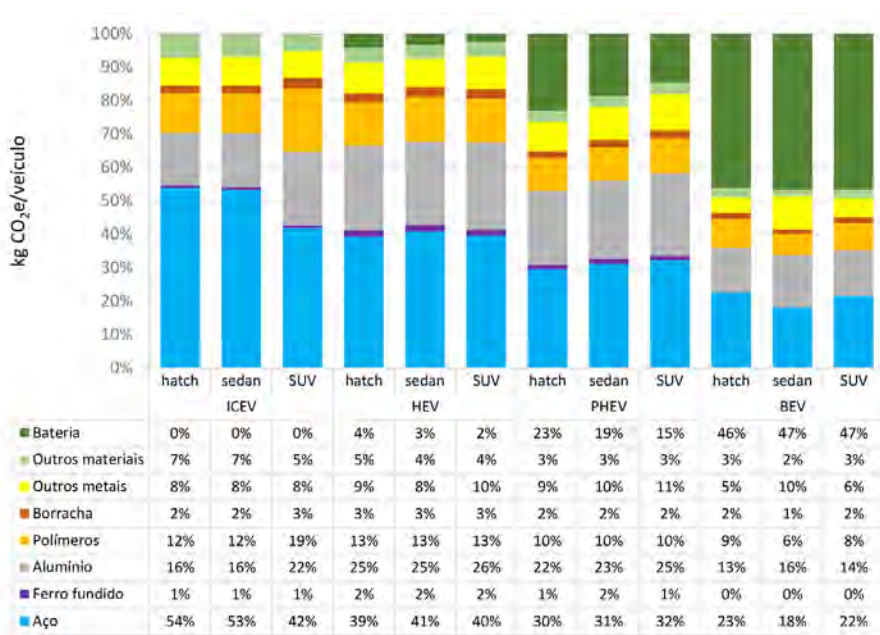
→| **Figura 7.5 – Pegada de carbono dos doze veículos do projeto por material⁴²**



A Para bateria auxiliar de chumbo, os resultados da categoria "Bateria" mostram somente as emissões associadas a fabricação e montagem. As emissões dos materiais que compõem a bateria de chumbo foram incorporadas diretamente na lista de materiais dos veículos. Já no caso da bateria principal dos veículos eletrificados, tanto as emissões dos materiais como da fabricação e montagem foram agrupadas na categoria "Bateria".
32 Gold {GLO} | market for gold | Cut-off, U.

Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura 7.6 – Contribuição relativa dos materiais para a pegada de carbono dos doze veículos do projeto**



Fonte: Elaboração própria.

O aço foi o principal responsável pelas emissões nos ICEVs, representando entre 42% e 54% da pegada de carbono, dependendo do segmento. Essa elevada participação está associada tanto à grande massa de aço empregada quanto à intensidade energética do processo siderúrgico, especialmente na fabricação do aço via a rota do alto forno. O alumínio aparece como o segundo maior contribuinte, com participação crescente nos veículos de maior porte, refletindo estratégias de redução de massa veicular por meio da substituição parcial do aço. Conforme dados primários de receitas de materiais obtidas de ICEVs do segmento SUV foi possível observar uma massa de aço 100 kg a menor que o sedan e uma composição de polímero e alumínio cerca de 92 kg e 23 kg maior.

Os polímeros, embora relevantes em termos de massa apresentam contribuição relativamente menor para as emissões totais, situando-se entre 12% e 19% nos ICEVs com destaque para as poliamidas, que possuem o maior fator de emissão entre os plásticos e o polipropileno, que representou cerca de 40% da composição dos polímeros dos veículos do estudo.

Para os HEVs, o perfil de emissões foi semelhante ao dos ICEVs, com predomínio do aço e alumínio, sendo possível observar uma ligeira redução da participação do aço e um aumento da contribuição do alumínio. Nos veículos híbridos plug-in, a influência da eletrificação fica mais evidente com a participação dos materiais associados à bateria contribuindo entre aproximadamente 15% e 23%.

Já nos BEVs, os materiais associados à bateria tornam-se o

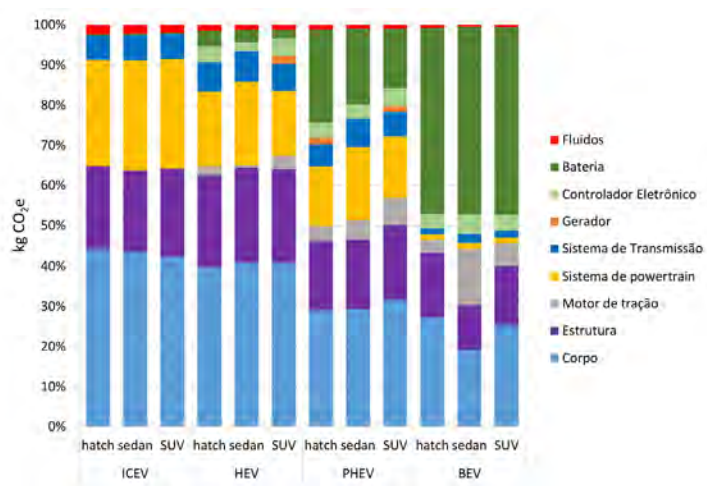
principal fator de impacto, respondendo por cerca de 46% a 47% da pegada de carbono da produção. Esse resultado está diretamente relacionado à elevada intensidade energética e às emissões associadas à produção de células de bateria, incluindo a extração e o processamento de materiais críticos.

A categoria de outros metais também foi relevante para a pegada de carbono dos veículos. A platina, utilizada nos catalisadores dos sistemas de exaustão teve uma importante contribuição para os veículos a combustão e híbridos. Já o cobre, juntamente com metais especiais utilizados em contatos elétricos tais como ouro, prata e metais de terras raras utilizados nos ímãs de motores elétricos como o neodímio apresentaram uma importante contribuição para veículos híbridos e elétricos. Os resultados, portanto, evidenciam a importância desses metais para a pegada de carbono do berço-ao-portão, especialmente nos veículos elétricos. Os materiais ainda que sejam usados em pequenas quantidades (em gramas por veículo) possuem contribuição relevante devido ao elevado fator de emissão, como o caso do ouro (48.446 kgCO₂e/kg²⁹), prata (457,6 kgCO₂e/kg³⁰) e platina (69.669 kgCO₂e/kg³¹). Desse modo, determinar o conteúdo mássico desses materiais é importante para a pegada de carbono dos veículos e pode ser explorada em mais detalhes em trabalhos futuros.

7.4. Análise de contribuição de sistemas

As contribuições em termos percentuais dos diferentes sistemas do veículo para a pegada de carbono podem ser consultadas na [Figura 77](#).

→ **Figura 77 – Contribuição dos sistemas dos veículos para a pegada de carbono, do berço- ao- portão**



Fonte: Elaboração própria.

29 Gold {GLO} | market for gold | Cut-off, U

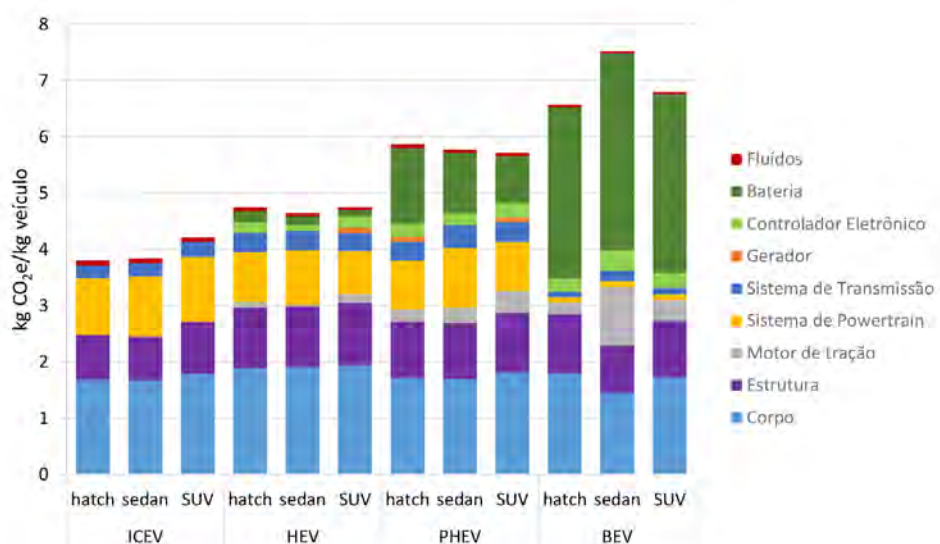
30 Silver {GLO} | market for silver | Cut-off, U

31 Platinum {GLO} | market for platinum | Cut-off, U

Os sistemas estruturais (corpo e estrutura) e o powertrain representaram a maior parte das emissões dos veículos, com exceção do BEV, no qual a bateria respondeu por cerca de 46% das emissões totais. A **Figura 7.8** apresenta os dados

da pegada de carbono estratificada por sistema e normalizado pela massa dos veículos, permitindo avaliar, de maneira complementar, a contribuição de cada sistema para cada kg de veículo produzido.

→| **Figura 7.8 – Contribuição dos sistemas dos veículos para a pegada de carbono, do berço-ao-portão**



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar pela **Figura 7.8** que os sistemas mais estruturais (corpo e estrutura) representaram cerca de 2,5 a 3,0 kgCO₂e/kg veículo, não sendo observadas grandes variações para as diferentes motorizações. Para os ICEVs foi possível observar maiores emissões destes sistemas estruturais para o segmento SUV, dada a maior composição de alumínio e polímeros comparados ao hatch e sedan. O sistema de powertrain, por sua vez, representou cerca de 0,9 a 1,2 kgCO₂e/kg veículo entre os ICEVs e híbridos, sendo pouco representativo para os BEVs, uma vez que não conta com componentes de motorização associados aos veículos a combustão. O sistema de transmissão também foi pouco representativo para o BEV, uma vez que esses veículos possuem um sistema mais simples e leve comparado aos ICEVs e híbridos. Os híbridos, por sua vez, por possuírem uma maior complexidade ao gerenciar a potência do motor a combustão e elétrico, apresentaram maiores massas nesses sistemas e, portanto, maiores emissões.

▲ 7.5. Análise comparativa internacional

Esta seção apresenta uma análise comparativa dos resultados deste projeto com outros estudos relatados pela literatura científica. O objetivo não esteve em realizar uma comparação direta entre os diferentes estudos e/ou veículos avaliados, mas sim demonstrar o que já foi explorado na literatura e qual o grau de variação existente entre os diferentes resultados. Isto porque re-

sultados de estudos de ACV são de difícil comparabilidade, uma vez que cada um carrega uma série de premissas e aspectos metodológicos que afetam diretamente os resultados.

Nesse sentido, a comparação apresentada neste capítulo tem caráter apenas exploratório e serve como referência inicial para contextualizar os resultados do estudo em relação à literatura disponível. Assim, essa análise não deve ser utilizada para comunicações diretas sobre superioridade ou inferioridade ambiental de veículos nacionais em relação a veículos produzidos em outros países, considerando as diferenças de escopo, premissas, qualidade de dados e escolhas metodológicas entre os estudos comparados. Para atender a esse objetivo, a análise comparativa foi realizada com enfoque em faixas de valores, e não em números absolutos.

Os resultados obtidos no estudo para a pegada de carbono dos veículos estão de acordo com aqueles observados na literatura. A **Tabela 7.3** abaixo apresenta a pegada de carbono dos 12 veículos do projeto para o cenário base e para o cenário de nacionalização, de acordo com a origem dos materiais automotivos. A pegada de carbono dos veículos do projeto no cenário "100% GLO", que considera a totalidade dos materiais de origem importada e utiliza fatores de emissão obtidos diretamente da base de dados ecoinvent (sem adaptações), está dentro da faixa de resultados obtidas com base na revisão de literatura realizada pelo projeto.

Tabela 7.3 – Pegada de carbono para os 12 veículos do projeto de acordo com a nacionalização dos materiais

Pegada de carbono dos veículos por cenário em toneladas CO ₂ e												
Cenário	ICEV			HEV			PHEV			BEV		
	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV
100% BR	4,2	4,4	4,7	4,9	5,8	5,7	7,3	9,0	8,3	7,7	12,4	9,5
Base	4,5	4,7	5,4	6,3	7,5	7,4	10,0	12,4	11,5	10,2	16,2	12,5
100% GLO	6,0	6,3	6,8	7,1	8,3	8,3	10,0	12,4	11,5	10,2	16,2	12,5
Varição literatura ^A	4,0 a 6,9			7,2 a 11,0			8,2 a 13,5			9,8 a 15,7		

Fonte: Elaboração própria. ^A FGVces, (2024).

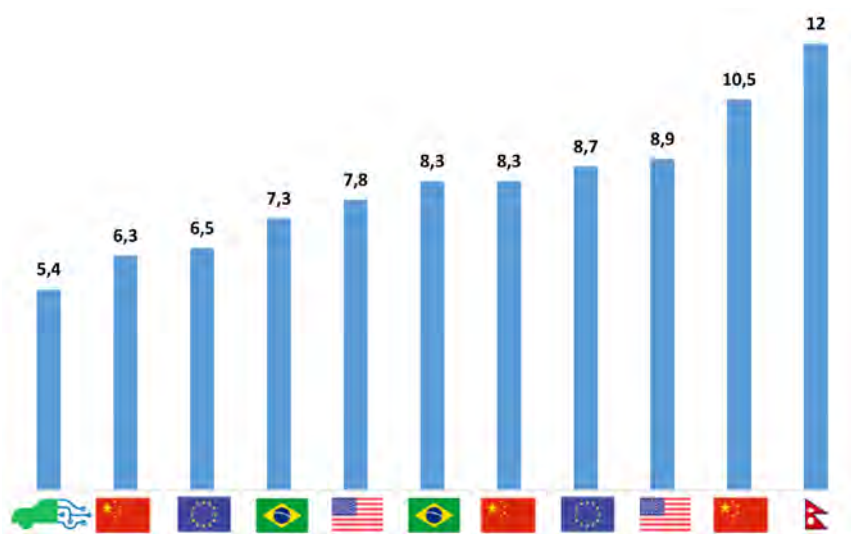
Ainda em relação ao cenário “100% GLO”, a relação entre a pegada de carbono dos veículos e o peso destes também está alinhada com a literatura. Para os veículos ICEV, o kg de CO₂-eq/kg de veículo obtidos neste estudo variam entre 5,34 e 5,60 dependendo do segmento no cenário base. Buberger et al. (2022) e Qiao et al. (2017) obtiveram valores de, respectivamente, 5,24 e 6,96 kg de CO₂-eq/kg de veículo, enquanto Hawkins et al. (2013) estimou este valor em 5 kg CO₂-eq/kg veículo, fornecendo uma média entre 4 e 6.5 kg CO₂-eq/kg veículo para o ICEV. Para as demais motorizações, a pegada de carbono total dos veículos encontra-se dentro da faixa de 10 estudos que também calcularam a pegada do Berço ao Portão.

Para os cenários “Base” e “100% BR”, que consideram inventários de materiais adaptados para a realidade brasileira, a pegada de carbono obtida é sistematicamente menor do que as obtidas na literatura. No caso dos veículos ICEV para o cenário “Base” deste estudo, a pegada de carbono obtida varia entre 4,01 e 4,40 kg CO₂-eq/kg veículo, bem próximas do mínimo estimados por Hawkins et al. (2013), sendo os valores

obtidos no cenário “100% BR” menores do que 4 kg CO₂-eq/kg veículo, o que reforça o potencial que a cadeia de suprimentos nacional, baseada em uma matriz elétrica composta majoritariamente de fontes renováveis, possui de reduzir a pegada de carbono de veículos leves.

Em relação ao resultado absoluto da pegada de carbono dos veículos do projeto para o cenário base em relação aos obtidos internacionalmente, conforme já explicitado anteriormente na **Figura 7.1**, o valor é notoriamente menor. Em complementação à esta análise, a **Figura 7.9** apresenta resultados do berço-ao-portão para veículos ICEV extraídos da literatura e separados por região ou país de origem do estudo, em comparação ao veículo ICEV-SUV do projeto. Nela, observa-se que não há uma tendência clara do valor da pegada de carbono de veículos leves do berço-ao-portão de acordo com o país de origem do estudo. Nota-se, ademais, que mesmo estudos de um mesmo país ou região podem apresentar valores substancialmente diferentes, corroborando a dificuldade de se comparar diretamente valores finais de estudos de ACV.

→ **Figura 7.9 – Comparação internacional da pegada de carbono do veículo ICEV-SUV em tCO₂eq/veículo**

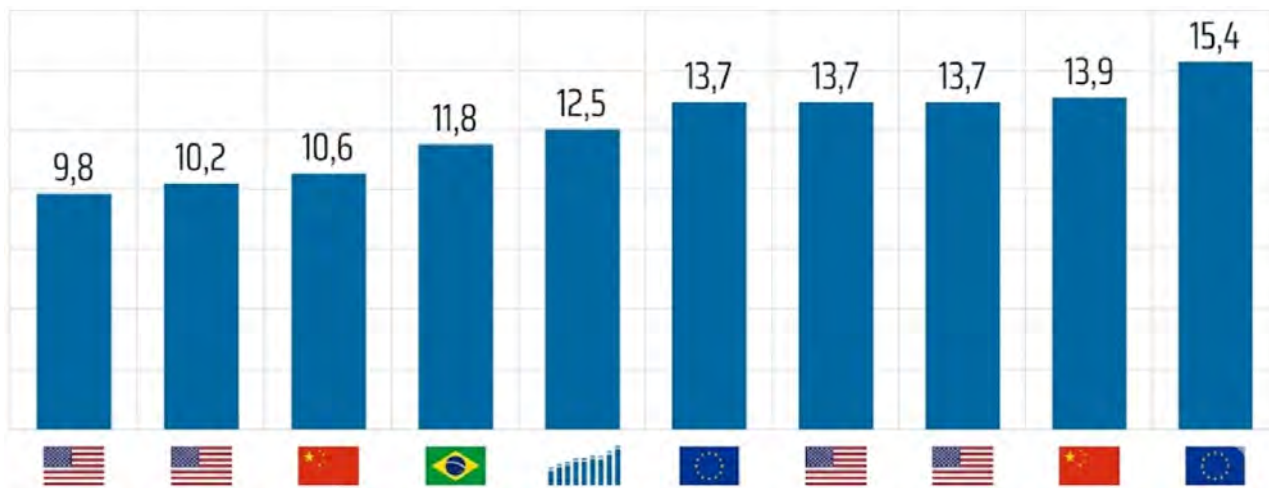


Fonte: Elaboração própria; dados de literatura baseados em Velandia Vargas et al. (2019); Gauto et al. (2023); Elgowainy et al. (2018); Hawkins et al. (2013); Shafique et al. (2022); Onat, Kucukvar e Tatari (2015); Xie (2023); Joshi, Sharma e Baral (2022); Patterson et al. (2012) e Yang, Wang e Jiao (2020).

Conclusões análogas são obtidas ao utilizar-se o veículo BEV-SUV do projeto em comparação à literatura separados por país ou região. No caso, como o veículo do projeto foi considerado

de origem 100% importada, o valor da pegada de carbono obtida não foi sistematicamente menor, mas situa-se bem no meio da faixa dos estudos considerados, conforme a **Figura 7.10**.

→| **Figura 7.10 – Comparação internacional da pegada de carbono do veículo BEV-SUV em tCO₂eq/veículo**



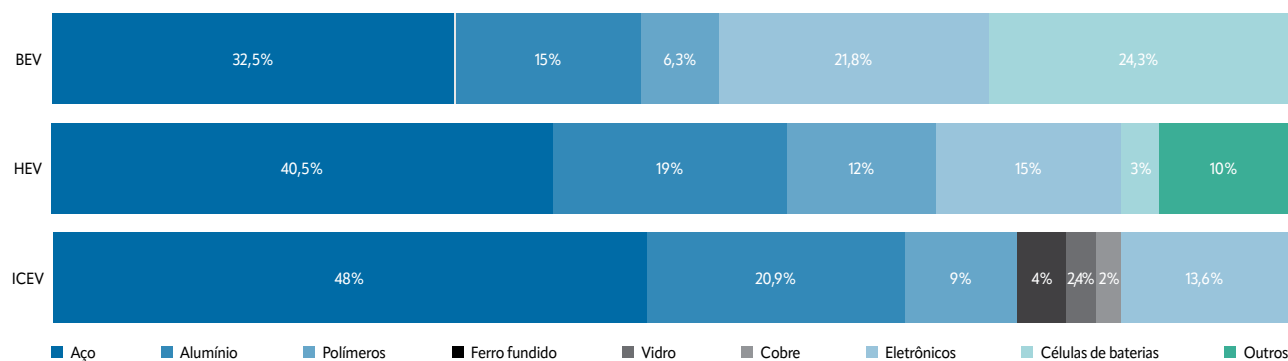
Fonte: Elaboração própria; dados de literatura baseados em Velandia Vargas *et al.* (2019); Gauto *et al.* (2023); Elgowainy *et al.* (2018); Hawkins *et al.* (2013); Shafique *et al.* (2022); Onat, Kucukvar e Tatari (2015); Xie (2023); Joshi, Sharma e Baral (2022); Patterson *et al.* (2012) e Yang, Wang e Jiao (2020).

Quando analisados os resultados da pegada de carbono por etapa de ciclo de vida, a contribuição das etapas fabris, referentes aos processos de montagem final do veículo que ocorrem dentro das montadoras, é menor do que encontrado na literatura. Para os veículos ICEV, a contribuição das etapas fabris varia entre 4 e 4,7% do total das emissões do Berço ao Portão, um valor menor do que o calculado a partir da ferramenta GREET de 2024, no qual esta etapa contribui em torno de 11% quando considerado o mesmo escopo. No entanto, é importante destacar que a ferramenta GREET inclui processos fabris que não representam a realidade das montadoras brasileiras, como por exemplo o aquecimento das fábricas no inverno.

Quando desconsiderado este componente de aquecimento de ambientes o valor total de GEE nesta etapa, sua contribuição cai para 7,8% do total do berço-ao-portão do veículo ICEV. Finalmente, a diferença restante entre os valores obtidos no projeto e da ferramenta GREET pode ser explicada pela menor intensidade de carbono da matriz energética brasileira.

A pegada de carbono calculada para os veículos do projeto, segmentadas a partir da contribuição dos principais materiais, também está alinhada com os resultados da literatura. A **Figura 7.11** apresenta a média de resultados por materiais de veículos ICEV, HEV e BEV obtidos na literatura.

→| **Figura 7.11 – Contribuição de impacto média dos materiais para veículos leves**



Fonte: Adaptado de Hirz e Nguyen (2022), Xie (2023), Hao *et al.* (2017) e Qiao *et al.* (2017).

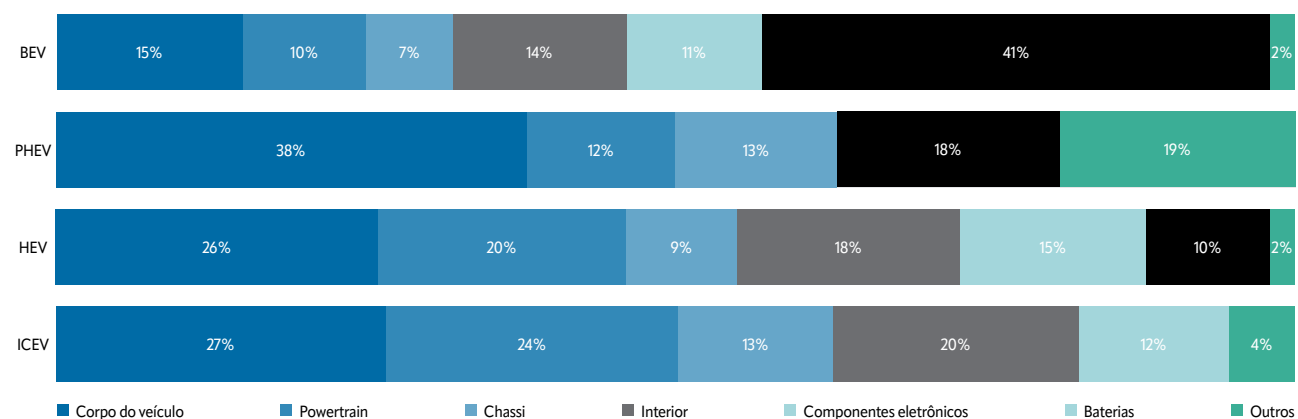
Os resultados dos veículos do projeto para as motorizações ICEV e HEV aproximam-se bastante dos valores da literatura. Tanto neste estudo, como nos demais estudos da literatura, o aço correspondeu por cerca de metade das emissões para o ICEV e por cerca de 40% para o HEV. A contribuição do alumínio para o ICEV SUV também ficou bastante próxima da literatura, com cerca de 21%. Já para os ICEVs do segmento hatch e sedan do projeto, os impactos do alumínio foram menores, confirmando uma tendência observada ao longo do estudo de que os ICEVs brasileiros, em geral, possuem uma menor composição de alumínio em relação ao cenário internacional. A contribuição dos polímeros para os ICEVs e HEVs do projeto variou entre 11 e 18% e de 12 e 13%, respectivamente, valores próximos aos observados na literatura.

Já para os veículos BEV os valores diferem por três principais motivos. O primeiro deve-se à forma de classificação dos materiais da bateria elétrica, sendo que a literatura distribuiu materiais deste componente em "Eletrônicos" e "Células de bateria", enquanto no projeto, todos os materiais da bateria elétrica estão consolidados na categoria "Bateria". O segundo deve-se a contribuição relativa destes materiais da bateria elétrica, que

difere significativamente dependendo do estudo avaliado, em razão de divergências quanto ao impacto da bateria elétrica medido em kg de CO₂-eq/kWh. Aichberger *et al.* (2020) encontrou uma mediana de 120 kg CO₂-eq/kWh a partir de 50 estudos considerados, com uma faixa de 70 kg CO₂-eq/kWh e 175 kg CO₂-eq/kWh para os percentis de 25% e 75%, respectivamente. No caso dos veículos BEV modelados pelo projeto, foi considerada uma bateria do tipo LFP de 95,9 kg CO₂-eq/kWh. O terceiro motivo é a capacidade da bateria elétrica considerada, medida em kWh. Neste sentido, a depender do tipo de veículo BEV, é de se esperar que a contribuição da bateria varie bastante, o que justifica em parte as diferenças dos resultados do projeto com os obtidos na literatura.

Em relação à pegada de carbono dos veículos do projeto segmentada por sistemas automotivos, é importante destacar primeiramente que não há um consenso em artigos acadêmicos ou entre as fabricantes de veículos sobre a melhor forma de dividir um veículo em sistemas, e, portanto, eventuais diferenças entre os resultados obtidos e a literatura são esperados. Porém, foi feito um esforço de mapear a contribuição dos principais sistemas automotivos destacados na literatura, representados na **Figura 7.12**.

→ **Figura 7.12 – Contribuição de impacto média dos componentes dos veículos leves mapeados**



Fonte: Adaptado de Hirz e Nguyen (2022), Shafique *et al.* (2022), Hawkins *et al.* (2013), Joshi *et al.* (2022), Xiong, Ji e Ma (2019), Patterson *et al.* (2012), Qiao *et al.* (2017).

No caso do veículo ICEV, os resultados do projeto estão bastante próximos da literatura: os componentes estruturais dos veículos, classificados como "Corpo" e "Estrutura" pelo projeto, representam juntos 64% da pegada de carbono dos veículos, enquanto na literatura os componentes correspondentes "Corpo do veículo", "Chassi" e "Interior" somam 60% do impacto total. Ainda em relação ao veículo ICEV, o sistema "Powertrain" representou neste estudo 27% do total, valor pró-

ximo dos 24% consolidados com base na revisão bibliográfica realizada pelo projeto.

Para os veículos BEV do projeto, os componentes estruturais somaram um total de 38% do total, sendo a bateria elétrica responsável por mais de 46% do total, resultados um pouco maiores do que os 36% e 41% obtidos para os respectivos componentes com base na revisão bibliográfica realizada.

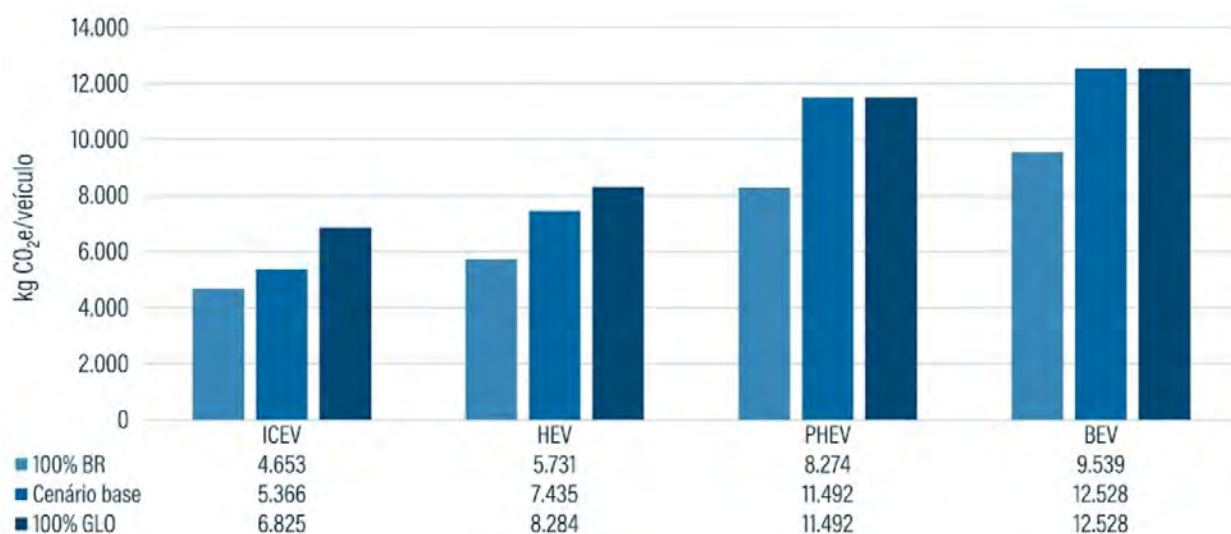
8. Simulação de cenários e análise de sensibilidade

A fase de simulação de cenários e análise de sensibilidade em um estudo de ACV é fundamental para avaliar a robustez e a confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que os inventários e modelos de impacto dependem de hipóteses, dados secundários e parâmetros frequentemente sujeitos a incertezas. Ao variar sistematicamente entradas-chave, como fatores de emissão, eficiência de processos ou cenários tecnológicos, essa etapa permite identificar quais variáveis exercem maior influência sobre a pegada de carbono dos veículos selecionados. Dessa forma, a análise de sensibilidade ajuda a verificar se as conclusões do estudo permanecem consistentes frente a mudanças plausíveis nas premissas adotadas, reduzindo o risco de interpretações equivocadas. Além disso, ela orienta a priorização de esforços na coleta de dados mais precisos e apoia a tomada de decisão, ao tornar explícitas as condições sob as quais uma alternativa é ambientalmente superior a outra.

8.1. Cenário de rotas alternativas: nacionalização

Neste cenário, o estudo buscou evidenciar a influência da fronteira geográfica, comparando a pegada de carbono dos veículos do projeto quando estes são produzidos a partir de sistemas e materiais 100% nacionais (100% BR), ou 100% importados (100% GLO), em relação ao cenário base adotado. Para o cenário 100% nacional, o estudo buscou utilizar os inventários de materiais e processos tropicalizados, com exceção de materiais não produzidos no Brasil, como o caso da platina e materiais ativos da bateria ou pouco representativos para a pegada de carbono do veículo como titânio, óleo lubrificante, entre outros. Os resultados para o segmento SUV são evidenciados na Figura 8.1. Cabe destacar que os resultados para os demais segmentos (hatch e sedan) foram semelhantes aos obtidos no segmento SUV e, desse modo, optou-se apenas por apresentar os resultados do segmento SUV.

→| **Figura 8.1 – Pegada de carbono dos veículos SUV para diferentes cenários de nacionalização**



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos apontam que quanto maior o percentual de insumos nacionais utilizados na fabricação dos veículos, menor a pegada de carbono. O veículo ICEV produzido a partir de materiais 100% nacionais, por exemplo, obteve uma pegada 32% menor do que o cenário 100% importado, o que reforça o potencial que a cadeia de suprimentos de materiais automotivos brasileira tem para descarbonizar a produção de veículos leves.

Para o ICEV e HEV do segmento SUV, o alumínio fundido respondeu por cerca de 50% da diferença na pegada de carbono entre os cenários "100%BR" e "100%GLO", especialmente por conta das diferenças no mix elétrico utilizado nos inventários do alumínio nacional e do global (*market* GLO) que possui uma parcela relevante do alumínio produzido na China. As diferenças nos fatores de emissão entre os materiais podem ser consultadas na **Tabela 6.1** e no **Anexo V**. A etapa de fabricação, por sua vez, respondeu por 25% das diferenças. Apesar desta etapa ser uma parcela menos relevante para a pegada de carbono dos veículos em comparação aos materiais, a nacionalização apresentou grandes reduções, especialmente em função da menor pegada de carbono do mix elétrico nacional e do menor consumo de calor nas fábricas (gás natural), comparado ao cenário de fabricação internacional baseado no GREET (2024). Por fim, o aço representou 15% das diferenças. Apesar de ser o material mais utilizado nos veículos, o fator de emissão entre o cenário nacional e do mercado global apresentou diferenças menos significativas comparado ao caso do alumínio e à etapa de fabricação, uma vez que a contribuição do consumo de combustíveis fósseis, especialmente o carvão na coqueria e altos fornos, é a etapa mais relevante tanto para o cenário nacional como global. Dentre as reduções na pegada de carbono do aço nacional podemos citar a presença do carvão vegetal, que atua como substituto do coque e do carvão na rota BF-BOF, e a influência da matriz elétrica na rota EAF, que torna o aço resultante menos carbono intensivo quando comparado ao importado.

Para o PHEV e BEV além do alumínio, aço e etapa de fabricação e montagem do veículo, também se destacaram as reduções na fabricação da bateria, em especial, pela redução na pegada de carbono do alumínio e aço que compõem a bateria e eletricidade para montagem.

De forma geral, os resultados evidenciam que a maior nacio-

nalização dos insumos utilizados na fabricação de veículos está associada a reduções significativas na pegada de carbono, principalmente em função do perfil mais favorável da matriz elétrica brasileira, que para o alumínio e etapa de fabricação dos veículos exercem uma influência importante nas emissões de GEE.

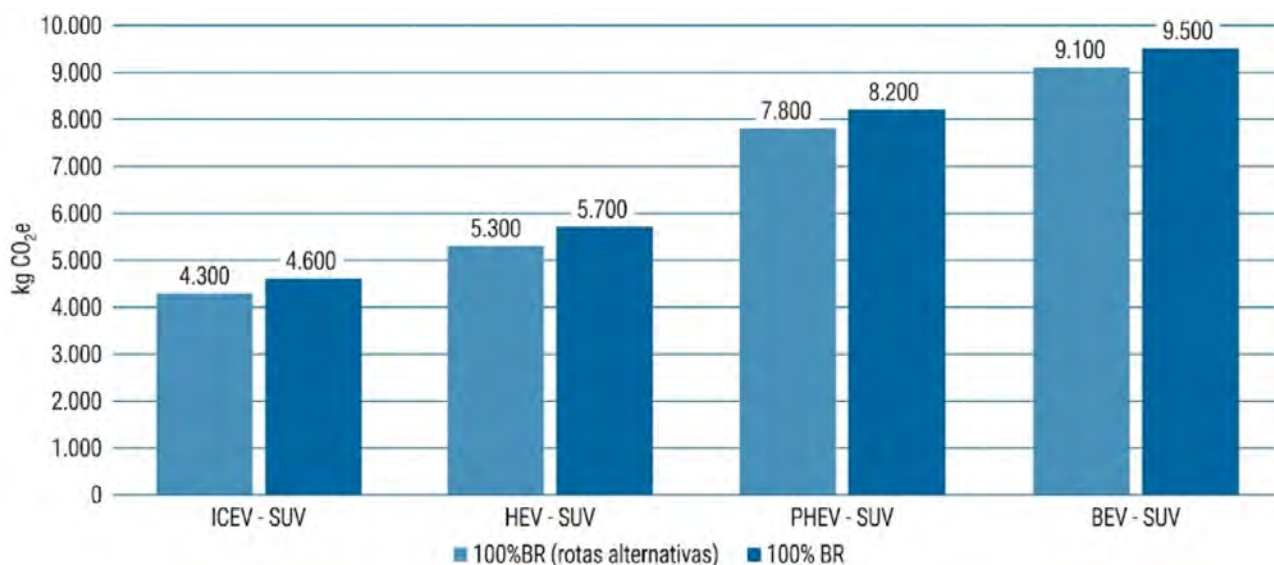
▲ 8.2. Cenário de rotas alternativas: materiais de menor intensidade de carbono

Este cenário explorou o efeito da produção de veículos a partir de materiais de menor intensidade de carbono no Brasil, termo comumente utilizado para se referir a materiais produzidos a partir de insumos, rotas tecnológicas e processos menos carbono intensivos. Apesar de materiais reciclados também poderem ser inclusos dentro deste cenário, sua particular relevância para o resultado justificou uma análise separada dentro de um novo cenário, que é detalhado na próxima seção.

A rota alternativa para a produção de aço considerou a substituição gradual da rota BF-BOF baseada em carvão mineral pela redução direta do ferro (DRI-EAF). Inicialmente, o gás natural é adotado como combustível de transição, com possibilidade de maior participação futura de hidrogênio de baixo carbono e biometano. Além da mudança de rota tecnológica, assumiu-se um ganho de eficiência energética de 1% ao ano em todos os processos produtivos, independentemente da rota considerada. Os fatores de emissão utilizados no projeto são derivados de simulações representativas do ano de 2035, horizonte temporal que permite acomodar o caráter lento da transição tecnológica no setor. Embora o carvão vegetal possa contribuir de forma relevante para a redução das emissões, adotou-se um cenário conservador, no qual não há expansão adicional dessa capacidade produtiva. Mais detalhes da modelagem, consultar a seção 5.2.1.2.

Já para o alumínio, o estudo considerou a mesma modelagem da produção do material primário no Brasil, porém com eletricidade proveniente exclusivamente de fonte hidráulica. Mais detalhes da modelagem, consultar seção 5.2.2. Para os polímeros, o estudo considerou o cenário de produção de polietileno a base de etanol de cana de açúcar. Mais detalhes da modelagem, consultar seção 5.1.3.5. Os resultados obtidos são exemplificados na **Figura 8.2** para o segmento de veículos SUV.

→| **Figura 8.2 – Resultados da pegada de carbono considerando cenários de materiais de menor intensidade de carbono no Brasil**



Fonte: Elaboração própria.

Foi possível observar que a utilização conjunta do aço e alumínio de menor intensidade de carbono, assim como a utilização de polietileno de menor intensidade de carbono, resultou em uma redução de aproximadamente 7% na pegada de carbono dos veículos ICEV e HEV do segmento SUV em relação ao cenário 100% nacional. Resultados semelhantes foram obtidos para os demais segmentos (cerca de 8% de redução para os ICEVs do segmento hatch e sedan). Para os PHEVs e BEVs no segmento SUV as reduções foram um pouco menores, na ordem de 6% e 4%, respectivamente. Resultados semelhantes também foram obtidos para os demais segmentos e, por isso, não foram evidenciados no gráfico.

O aço reduziu em 6% a pegada de carbono em relação ao cenário 100% nacional, sendo o principal responsável pelas reduções observadas entre os materiais de menor intensidade de carbono. A inclusão da rota DRI no mix de produção do aço de menor intensidade de carbono reduz as emissões deste material em relação ao cenário base pois a utilização de gás natural e eletricidade em substituição ao carvão e coque mineral torna esta rota menos carbono intensiva. O alumínio de menor intensidade de carbono, por sua vez, reduziu em apenas 1% a pegada de carbono em relação ao cenário 100% nacional, uma vez que o cenário base já considera uma parcela bastante expressiva de fontes renováveis no mix elétrico, apresentando uma redução menos expressiva em relação ao cenário base. Já o PE de menor intensidade de carbono apresentou uma redução marginal, pois o uso de PE no veículo representou menos de 1% da massa do veículo.

▲ 8.3. Cenário de rotas alternativas: maximização de materiais reciclados

Muitas empresas do setor automobilístico, respondendo aos inúmeros riscos e demandas relacionados ao clima, estão se comprometendo voluntariamente a atingir a neutralidade climática até 2050 por meio de esforços que incluem, entre outras estratégias, o aumento do uso de materiais reciclados – com metas girando em torno de 25 a 40%. De acordo com os relatórios de sustentabilidade dessas empresas, os principais materiais reciclados incluem os plásticos, têxteis, alumínio, aço e, crescentemente, componentes de baterias.

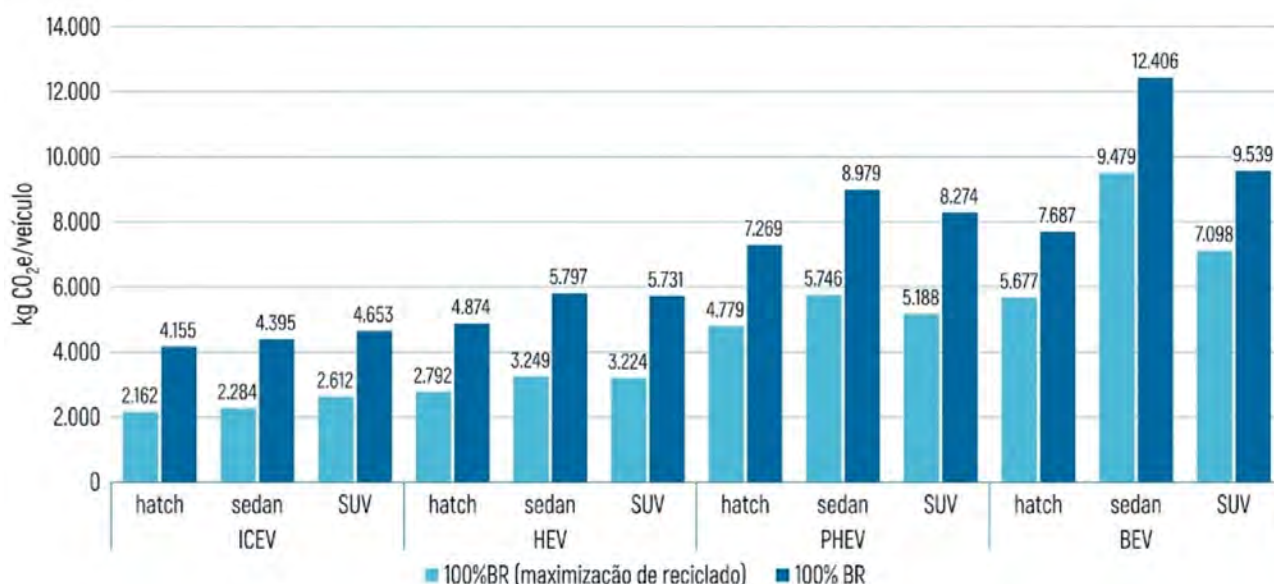
Para fins deste estudo, este cenário analisou a influência da maximização do percentual de reciclagem para o aço, alumínio e polímeros em relação ao cenário 100% nacional, que considerou um teor de 25,3% e 41,8% de reciclados nos inventários de aço e alumínio, respectivamente. Desse modo, o estudo adotou um percentual de 100% de reciclados para o aço e alumínio, bem como de 25% para os polímeros. A escolha da adoção de um percentual de 100% para o aço e para o alumínio justifica-se pois existem rotas tecnológicas que viabilizam este cenário, apesar de poder ser considerada atualmente muito otimista, dado que a reciclagem na cadeia automobilística ainda enfrenta desafios como: (i) a disponibilidade de sucata e flutuações de preços; (ii) a qualidade da sucata para atendimento de especificações técnicas e de segurança dos veículos e; (iii) questões logísticas como longas distâncias e falta de acesso a modais eficientes. Esses fatores contribuem

para limitar a capacidade de escalar o uso de sucata no setor.

Já para os polímeros, o teor de 25% foi selecionado de acordo com a proposta de Regulamento relativa aos requisitos de circularidade aplicáveis à concepção de veículos e à gestão de veículos em fim de vida (EUROPEAN COMMISSION, 2023),

que prevê a adoção de um conteúdo mínimo de 25% de plásticos reciclados pós-consumo nos veículos produzidos até 2030. Mais detalhes da modelagem para aço, alumínio e polímeros reciclados, consultar as seções 5.2.1.2, 0 e 5.1.3.5. A **Figura 8.3** apresenta os resultados deste cenário para os diferentes veículos do estudo.

→ **Figura 8.3 – Resultados da pegada de carbono considerando cenários de maximização de reciclados no Brasil**



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados apontaram para uma redução em torno de 43 e 47% na pegada de carbono dos ICEVs em relação ao cenário 100% nacional, 43% para os HEVs, entre 34 e 36% para o PHEV e 25% para o BEVs. O aço 100% reciclado foi o principal responsável pelas reduções tendo em vista que o cenário de produção de aço reciclado (via rota EAF) apresentou uma pegada de carbono 72% menor que o cenário base. A sucata, por ser tratada no estudo como resíduo, isto é, não possuir cargas ambientais atreladas à sua produção (com exceção do transporte), tem grande influência nessa redução, pois não necessita de processos associados à produção de ferro-gusa, que no cenário convencional possui consumo de coque de carvão mineral nos altos-fornos. O alumínio reciclado também apresentou uma grande contribuição para as reduções, em especial nos veículos com maior composição do metal como o ICEV SUV e os veículos híbridos. A redução na pegada de carbono do alumínio reciclado foi de cerca de 76% em relação ao alumínio brasileiro do cenário base, uma vez que além da sucata ser tratada como resíduo, o consumo de eletricidade é significativamente menor do que para a produção do alumínio primário, que necessita da redução da bauxita. Para o plástico médio, a redução da pegada de carbono considerando 25% de polímeros reciclados foi de cerca de 13%, principalmente relacionados à entrada de resíduos como matérias-primas.

Os resultados evidenciam, portanto, que a substituição de materiais primários por reciclados, especialmente aço e alumínio, constitui uma das estratégias mais relevantes de descarbonização para a produção dos veículos. Apesar disso, exemplos que envolvem parcerias entre as montadoras e autopeças, geradoras de sucatas de alta qualidade, e empresas produtoras de aço, alumínio e plásticos ainda são escassas no Brasil. A reciclagem de veículos em fim de vida útil também é pouco explorada no país, abrangendo atualmente apenas 1,5% dos veículos.

▲ 8.4. Análise de sensibilidade: eletricidade

Conforme explicitado anteriormente, a intensidade de carbono da geração de energia elétrica brasileira reflete diretamente nos fatores de emissão dos materiais. Esta intensidade de carbono da eletricidade nacional, por sua vez, varia de acordo com a participação de fontes renováveis no mix, em especial da disponibilidade hídrica e solar. Em anos de abundância de fontes renováveis, observa-se uma participação menor na utilização de termelétricas movidas a fontes fósseis para atender a demanda energética, sendo que o contrário ocorre em períodos de menor disponibilidade de fontes renováveis.

Portanto, esta análise de sensibilidade analisou a pegada de

carbono de veículos leves brasileiros caso sejam produzidos em períodos de menor participação de renováveis (pior cenário) ou maior participação (melhor cenário) dentro do escopo temporal para a geração de eletricidade escolhido pelo proje-

to, entre 2019 e 2023. A **Tabela 8.1** abaixo apresenta a geração de eletricidade por fonte e a intensidade de carbono para o ano em que houve menor participação de renováveis no mix (2021) e maior participação (2023).

Tabela 8.1 – Composição da matriz elétrica brasileira consideradas na análise de sensibilidade

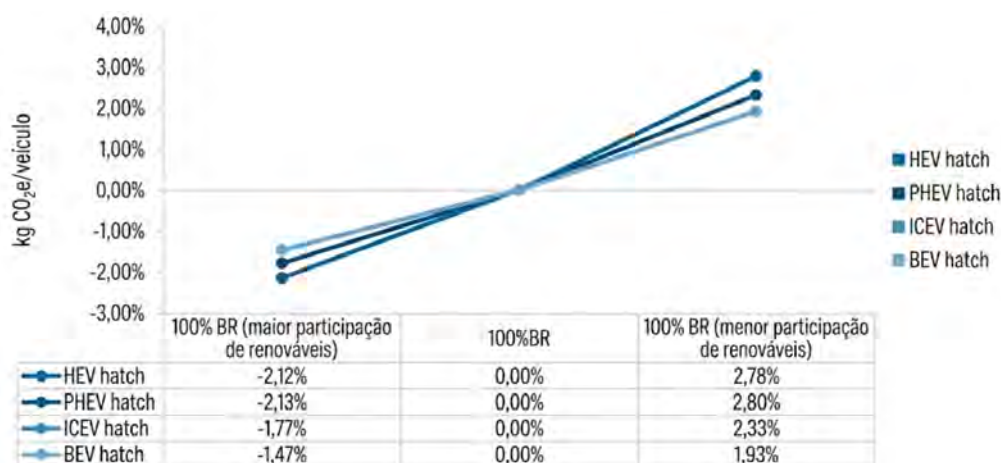
Fonte energética	Menor participação de renováveis		Maior participação de renováveis	
	Participação da fonte	Fator de Emissão Ponderado (g CO ₂ -eq/kWh)	Participação da fonte	Fator de Emissão Ponderado (g CO ₂ -eq/kWh)
Hidráulica	62,63%	185,3	66,38%	103,3
Eólica	11,95%		14,25%	
Solar	1,27%		8,06%	
Biomassa	3,79%		3,59%	
Nuclear	2,44%		2,16%	
Carvão	2,74%		1,15%	
Gás Natural	11,12%		2,94%	
Derivados de Petróleo	2,20%		0,10%	
Outras	1,86%		1,36%	
Perdas	11,50%		11,50%	

Fonte: Elaboração própria.

A **Figura 8.4** apresenta a variação na pegada de carbono para diferentes veículos entre o cenário base do projeto e

as sensibilidades relativas à participação de renováveis na matriz elétrica.

→ **Figura 8.4 – Variação da pegada de carbono do veículo referentes à análise de sensibilidade da eletricidade**



Fonte: Elaboração própria.

As variações observadas em relação ao cenário de referência da eletricidade foram inferiores a ±3% para todos os veículos, indicando baixa sensibilidade dos resultados aos cenários traçados de alteração do mix elétrico. Dessa forma, os resultados indicam que, no escopo do berço-ao-portão, o cenário base de eletricidade adotado no estudo

é representativo e robusto, e que a variação do fator de emissão da eletricidade considerando o histórico recente de variações do mix de geração no Brasil tendem não impactar de forma relevante a comparação dos resultados de cenário nacional com o cenário de produção de veículos no cenário global.

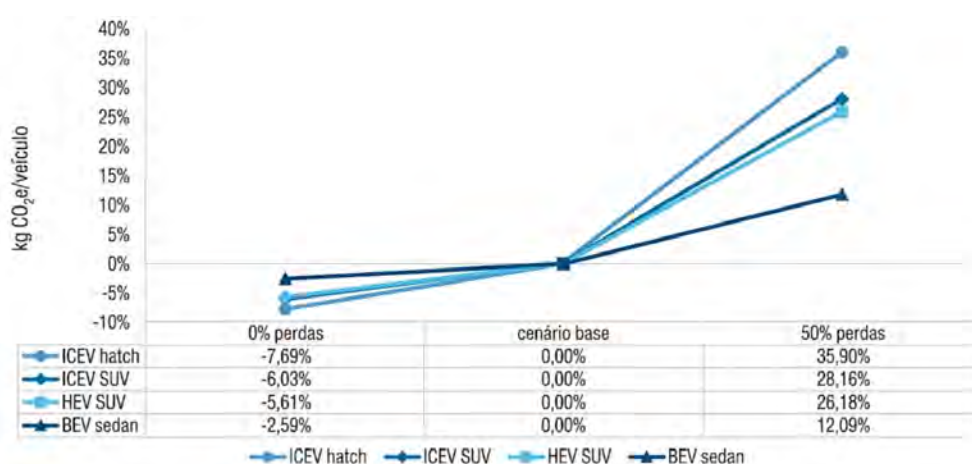
8.5. Análise de sensibilidade: perdas de aço

Posto que o aço é o material presente em maior quantidade em automóveis, todos os parâmetros que afetam sua pegada de carbono refletem diretamente nas emissões do veículo. Apesar da importância de se estabelecer um número apropriado para as perdas deste material, o valor exato varia muito na literatura, com bases de dados como o GREET sugerindo valores em torno de 8%, enquanto outros estudos sugerem perdas de mais de 60% (HORTON; ALLWOOD, 2017). Adicionalmente, ao se considerar dados primários de geração de sucata de aço nas montadoras e comparar com os dados primários de

consumo de chapas, foi possível estimar perdas na etapa de estampagem na ordem de 30% a 60%.

No cenário base foi assumido um percentual de perdas de 15% para o aço, que ocorre nos processamentos sobre este material nas autopeças e nas montadoras, um cenário mais otimista frente às variações que foram constatadas na literatura. Sendo assim, para melhor analisar a influência deste parâmetro na pegada final do veículo, foram escolhidos uma variação e 0% e 50% para as perdas do aço, conforme **Figura 8.5**, para diferentes motorizações e segmentos.

Figura 8.5 – Variação da pegada de carbono para o cenário de perdas do aço



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados evidenciam a elevada sensibilidade da pegada de carbono dos veículos às perdas de aço ao longo da cadeia, com magnitudes distintas conforme o tipo de motorização e o segmento.

No cenário hipotético de 0% de perdas de aço, a pegada de carbono dos veículos apresentou reduções que variam entre aproximadamente 2,6% e 7,7%. As maiores reduções foram observadas nos veículos ICEV, especialmente no segmento hatch (-7,69%) e SUV (6,03%), uma vez que o aço apresenta uma maior contribuição na pegada de carbono desses veículos. À medida em que se aumenta a eletrificação, as reduções se tornaram ligeiramente menores, dado que as emissões da bateria passam a assumir um papel dominante.

Para o cenário de 50% de perdas de aço, observou-se um aumento expressivo da pegada de carbono em todos os veículos analisados. O impacto é particularmente acentuado nos ICEVs, com aumento de até 35,9% para o hatch e 28,2% para o SUV. O HEV SUV apresentou aumento de magnitude semelhante (26,2%), enquanto o BEV sedan novamente se mostrou menos

sensível, com incremento de 12,1%. Os resultados evidenciam que o aumento das perdas de aço amplificou de forma desproporcional as emissões nos veículos.

De forma geral, a assimetria observada entre os cenários de redução e aumento das perdas indica que ineficiências na cadeia do aço podem anular parcela significativa dos ganhos obtidos por outras estratégias de descarbonização. Esses achados ressaltam a importância de medidas voltadas à redução de perdas e aumento da eficiência material ao longo da cadeia do aço, bem como a importância de se mapear os reais valores observados no contexto brasileiro.

8.6. Outras análises de sensibilidade

Os cenários e sensibilidades abordados anteriormente, assim como outros cenários relevantes encontram-se comparados ao cenário base na **Figura 8.7** e **Figura 8.8**. Foram estabelecidas comparações para se avaliar o efeito de variáveis-chaves, individualmente, para a pegada do veículo. Os cenários estão ordenados em ordem decrescente de cima para baixo, de

acordo com a diferença da pegada de carbono entre o pior caso, em cinza, e o melhor, em verde. Em relação à modelagem, cabem alguns destaques:

- Para o aço cenário "Rotas aço nacional" comparou-se o mix de rotas produtivas no cenário base, com o cenário 100% EAF, e com o cenário 100% BF-BOF via coque mineral, os quais, conforme detalhado no tópico do aço, respondem por mais de 80% das rotas produtivas do aço. A rota produtiva BF-BOF, ademais, é analisada a partir do cenário "Carvão vegetal aço" comparando-se a produção do aço via BF-BOF a partir de coque mineral, e a partir de carvão vegetal. Finalmente, a influência da origem do aço na pegada de carbono do berço-ao-portão dos veículos também foi analisada, sob o cenário "Nacionalização aço", contrastando-se o uso de um aço 100% nacional ou importado, em relação ao *default*.
- Já para o alumínio, foi analisado no cenário "Nacionalização alumínio fundido" o efeito de sua produção 100% nacional

ou 100% importada, em relação ao cenário base. No cenário "Reciclagem alumínio", é comparado o efeito de se utilizar este material de origem 100% reciclado ou virgem, enquanto no cenário default temos um mix de 42% e 28% de alumínio reciclado de origem nacional e importada, respectivamente. Por último, o cenário "Alumínio BR fontes renováveis" contrasta a influência da matriz elétrica na sua produção comparando o uso de um alumínio nacional produzido a partir de uma fonte 100% hidráulica, e a partir do mix de fontes elétricas do cenário base.

- Para os polímeros, os cenários "Nacionalização polímeros" e "Reciclagem plástico" exploram o efeito da utilização de polímeros 100% nacionais ou importados, em relação ao cenário base de 65%, no primeiro caso, e da utilização de plásticos de origem 25% reciclados em relação ao cenário base de 0%, no segundo caso.
- O cenário "nacionalização materiais", por sua vez, combina os cenários de 100% de nacionalização dos materiais ou de 100% de importação.

Tabela 8.2 – Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do ICEV-SUV

Variável	Cenário de menor emissão	Valor de referência	Cenário de maior emissão
Perdas aço	0%	15%	50%
Nacionalização materiais	100%	65% aço e polímeros, 50%Al	0%
Rotas aço nacional	100%EAF	75%BF-BOF, 17% EAF, 8% charcoal	100%BF-BOF
Teor de reciclados	100% aço e Al, 25% polímeros	17% aço (EAF), 42% Al BR, 28% Al GLO, 0% polímeros	Cenário base
Participação da rota de carvão vegetal	100%charcoal	75%BF-BOF, 17% EAF, 8% charcoal	100%BF-BOF
Nacionalização alumínio fundido	100%	50%BR	0%
Reciclagem alumínio	100%	BR:42% scrap, GLO:28% scrap	0%
Mix alternativo de rotas para o aço	BF-BOF (68%), DRI (7%), charcoal (8%) e EAF (17%)	75%BF-BOF, 17% EAF, 8% charcoal	Cenário base
Nacionalização aço	100%	65%BR	0%
Nacionalização polímeros	100%	65%BR	0%
Reciclagem plástico	25% reciclado	0% reciclado	Cenário base
Alumínio BR fontes renováveis	100%hidro	FE SIN	Cenário base
Distância transporte materiais nacionais	Sem transporte	400km rodoviário; 800 km ferroviário	Distâncias 10x maiores

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8.3 – Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do HEV-SUV

Variável	Cenário de menor emissão	Valor de referência	Cenário de maior emissão
Perdas aço	0%	15%	50%
Nacionalização materiais	100%	38% aço e polímeros, 20%Al	0%
Rotas aço nacional	100%EAF	BR: 75%BF-BOF, 17% EAF, 8% charcoal	100%BF-BOF

Tabela 8.3 – Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do HEV-SUV

Teor de reciclados	100% aço e Al, 25% polímeros	GLO: 83%BF-BOF, 17% EAF	Cenário base
Nacionalização alumínio fundido	100%	17% aço (EAF), 42% Al BR, 28% Al GLO, 0% polímeros	0%
Reciclagem alumínio	100%	20%BR	0%
Nacionalização aço	100%	BR:42% scrap, GLO:28% scrap	0%
Nacionalização polímeros	100%	38%BR	0%
Reciclagem plástico	25% reciclado	38%BR	Cenário base
Reciclagem plástico	25% reciclado	0% reciclado	Cenário base

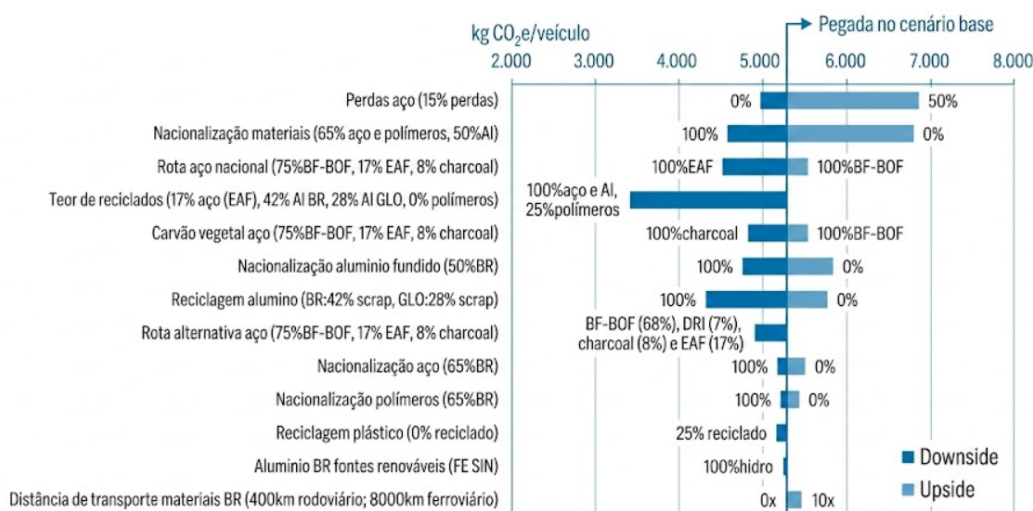
Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8.4 – Variáveis e valores utilizados na análise de sensibilidade da pegada de carbono do BEV-sedan

Variável	Cenário de menor emissão	Valor de referência	Cenário de maior emissão
Nacionalização materiais	100%	0% BR	Cenário base
Reciclagem alumínio	100%	28,8% scrap (100% importado)	0%
Perdas aço	0%	15%	50%
Nacionalização alumínio fundido	100%	0% BR	Cenário base
Teor de reciclados	100% Aço - EAF, Al - 100% sucata, 25% polímeros reciclados	100% importado, 17% aço (EAF), 28,8% Alumínio, 0% polímeros	Cenário base
Nacionalização montagem bateria	100%	0% BR	Cenário base
Rotas aço	100%EAF	83%BF-BOF, 17% EAF	100%BF-BOF
Nacionalização aço	100%	0% BR	Cenário base
Nacionalização polímeros	100%	0% BR	Cenário base

Fonte: Elaboração própria.

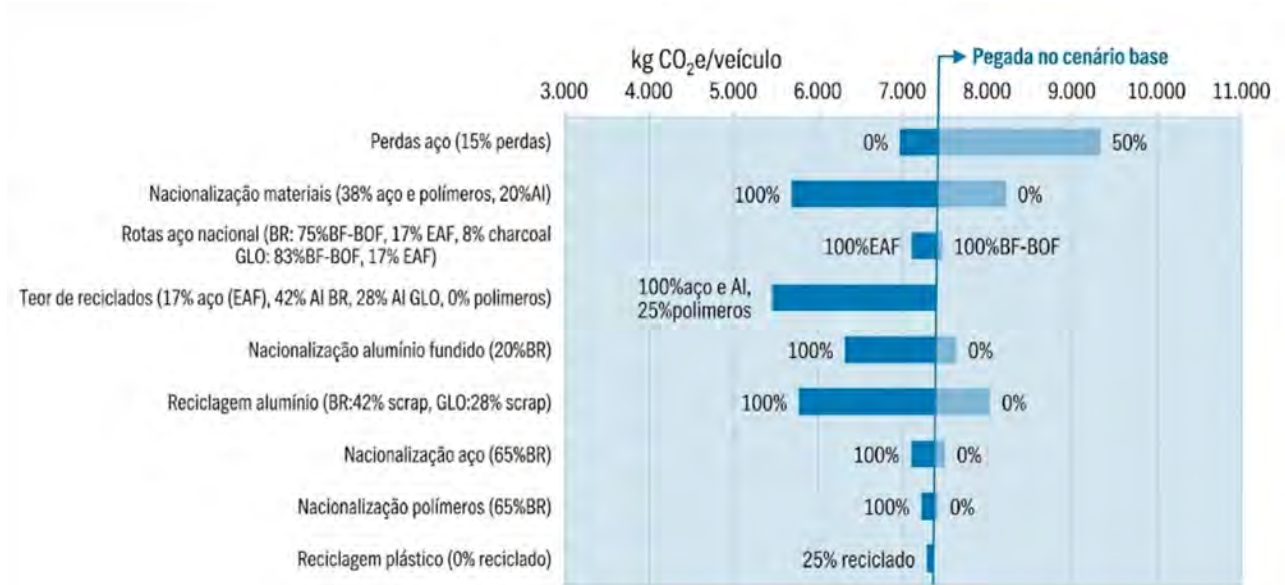
→| **Figura 8.6 – Análise de sensibilidade para a pegada de carbono veículo ICEV-SUV**



Observação: Nas barras em azul escuro são expressos os resultados da pegada de carbono para o melhor cenário de cada parâmetro avaliado e nas barras em azul claro o pior cenário (maiores emissões em relação ao cenário base). Na linha central encontra-se o valor da pegada de carbono do veículo no cenário base. Os valores referência de cada parâmetro encontram-se nos colchetes da sua descrição (exemplo: parâmetro referência das perdas de aço foram de 15%). Os valores dos parâmetros para cada cenário de variação são indicados nas barras (exemplo: perdas de aço de 0% e perdas de aço de 50%).

Fonte: Elaboração própria.

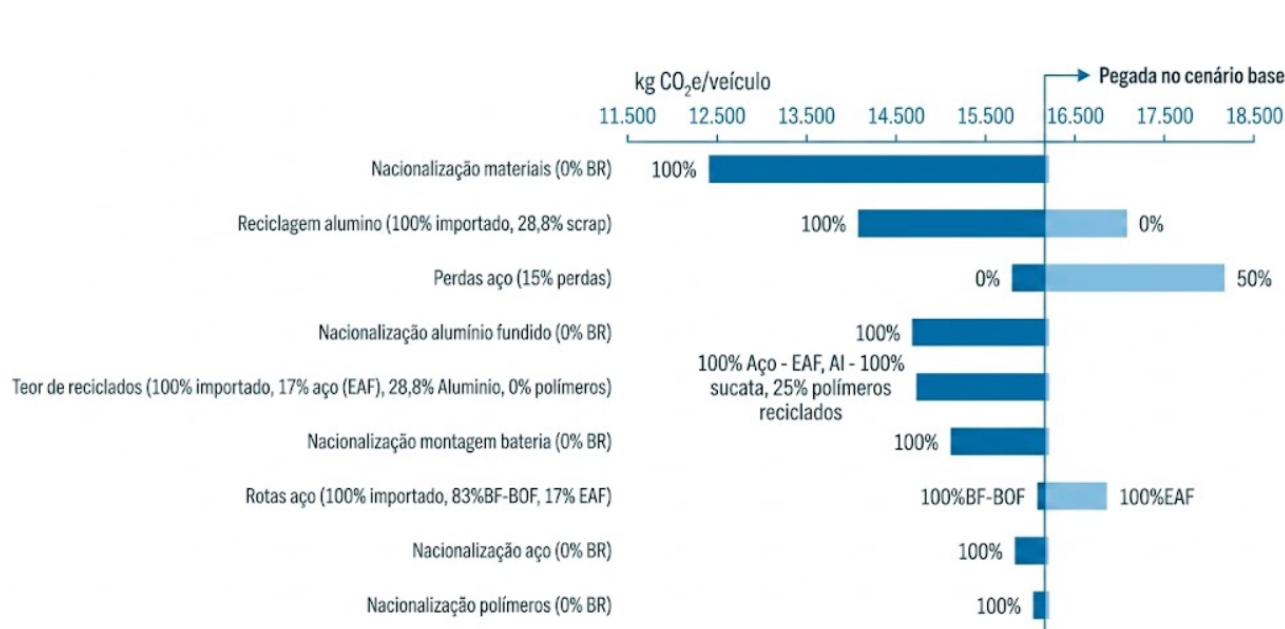
→| **Figura 8.7 – Análise de sensibilidade para a pegada de carbono veículo HEV-SUV**



Observação: Nas barras em azul escuro são expressos os resultados da pegada de carbono para o melhor cenário de cada parâmetro avaliado e nas barras em azul claro o pior cenário (maiores emissões em relação ao cenário base). Na linha central encontra-se o valor da pegada de carbono do veículo no cenário base. Os valores referência de cada parâmetro encontram-se nos colchetes da sua descrição (exemplo: parâmetro referência das perdas de aço foram de 15%). Os valores dos parâmetros para cada cenário de variação são indicados nas barras (exemplo: perdas de aço de 0% e perdas de aço de 50%).

Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura 8.8 – Análise de sensibilidade para a pegada de carbono veículo BEV-sedan**



Observação: Nas barras em azul escuro são expressos os resultados da pegada de carbono para o melhor cenário de cada parâmetro avaliado e nas barras em azul claro o pior cenário (maiores emissões em relação ao cenário base). Na linha central encontra-se o valor da pegada de carbono do veículo no cenário base. Os valores referência de cada parâmetro encontram-se nos colchetes da sua descrição (exemplo: parâmetro referência das perdas de aço foram de 15%). Os valores dos parâmetros para cada cenário de variação são indicados nas barras (exemplo: perdas de aço de 0% e perdas de aço de 50%).

Fonte: Elaboração própria.

Para o ICEV-SUV foi possível observar uma maior sensibilidade ao parâmetro de perdas do aço, nacionalização de materiais, das rotas de produção do aço e do uso de materiais reciclados. A substituição de rotas BF-BOF por EAF ou pela rota a carvão vegetal no aço nacional geraram reduções expressivas. O aumento do teor de reciclados em aço e alumínio também se destacaram como uma das maiores oportunidades de mitigação, enquanto as perdas de aço (de 15% para 50%) apareceram como o principal de atenção para o aumento das emissões, conforme já discutido na seção anterior. Por fim, o cenário de 0% de materiais nacionais evidenciou os benefícios já observados da fabricação de ICEVs no Brasil, reforçando o potencial que o Brasil possui para a descarbonização da produção de veículos leves, sendo que entre o veículo produzido a partir de aço, alumínio e polímeros de origem nacional e de origem importada há uma diferença de mais de duas toneladas de carbono equivalente.

No HEV-SUV, embora o perfil da análise de sensibilidade seja semelhante ao do ICEV, os impactos absolutos da nacionalização foram maiores, tendo em vista que no cenário base, os percentuais de nacionalização de aço, alumínio e polímeros foram menores do que o cenário base do ICEV-SUV. Novamente, as rotas do aço foram determinantes, associados ao parâmetro das perdas de materiais e do teor de reciclados. O teor de alumínio reciclado também apresentou elevada sensibilidade, uma vez que o HEV possui uma maior participação de alumínio importado, que possui maior fator de emissão e menor teor de reciclado em relação à modelagem do nacional, tornando-se mais sensível à variação de reciclados.

Assim como para o HEV, o alumínio também assumiu um papel crítico nas variações observadas para o BEV, tanto em relação ao teor de reciclados, mas principalmente de nacionalização, uma vez que foi considerado para o cenário base a adoção de materiais 100% importados, onde o alumínio possui um fator de emissão bastante elevado. A nacionalização da montagem e fabricação da bateria foi outro parâmetro sensível para os resultados, refletindo os benefícios do mix elétrico nacional. Do ponto de vista do aço, as perdas novamente foram o parâmetro de atenção para o aumento das emissões.

Cabe destacar que, apesar da nacionalização de materiais ser o cenário que mais afeta a pegada final do veículo, a nacionalização do aço em si é pouco representativa. Isto se dá pois no caso do aço, a eletricidade utilizada na sua produção tem uma participação muito menor no caso da produção via BF-BOF, que responde por 83% do aço automotivo no cenário base considerado, do que combustíveis fósseis como o carvão e o coque minerais. Logo, o fator de emissão é mais dependente da participação de rotas produtivas e de eficiências dos processos siderúrgicos do que da eletricidade, e, portanto, o

aço importado possui um fator de emissão bem próximo do nacional. A exceção pode ocorrer considerando o cenário de nacionalização com a rota EAF, em que o aço nacional pode se beneficiar do mix elétrico menos intensivo em emissões.

A análise de sensibilidade buscou identificar quais parâmetros de modelagem exercem maior influência sobre os resultados da pegada de carbono do estudo, evidenciando, portanto, aqueles que devem ser tratados como críticos em modelagens futuras. Ao destacar a sensibilidade dos resultados a fatores como nacionalização de materiais, rotas tecnológicas de produção, teores de reciclados e perdas de material, a análise contribui para direcionar estudos futuros para a construção de inventários mais representativos da realidade específica de cada veículo e montadora, reduzindo incertezas associadas a cada parâmetro, buscando sempre que possível, dados primários em detrimento de premissas mais genéricas. Além disso, essa abordagem permite direcionar os atores para focar esforços em estratégias com maior potencial de mitigação, priorizando ações que efetivamente geram benefícios mais significativos na redução das emissões de GEE do berço-ao-portão dos veículos.

▲ 8.7. Verificação de consistência

A verificação de consistência busca, de acordo com a norma ISO 14044, determinar se as premissas, métodos, metodologias, modelos e fontes de dados são consistentes ao longo do ciclo de vida do produto estudado. Como no caso deste estudo foram utilizados uma ampla gama de fontes de dados diferentes, descritos no capítulo 4, assim como diferentes critérios de alocação, é importante destacar aqui eventuais fontes de inconsistência e seu efeito em relação aos resultados, conclusões e recomendações do projeto. As principais inconsistências encontradas são:

- Diferenças em fontes de dados: conforme explicitado no capítulo de coleta de dados, foram utilizados neste estudo dados primários (fabricantes de veículos e fornecedores de peças, componentes e materiais veiculares) e secundários, oriundos principalmente da versão 3.91 da base de dados ecoinvent, mas também de relatórios setoriais e publicações acadêmicas. Apesar destas diferentes fontes de dados serem fonte de incerteza para os resultados do projeto, esta escolha justifica-se pela priorização em termos da qualidade dos dados, ou seja, na medida do possível foram utilizados dados para melhor representar a realidade da produção de veículos nacionais e importados;
- Diferenças de acurácia de dados: tanto para dados primários quanto secundários utilizados, alguns inventários são bem detalhados, como é o caso do aço brasileiro, enquanto outros como os de poliamidas são inventários caixa-preta extraídos diretamente da ecoinvent. No intuito de mitigar

o efeito desta fonte de inconsistência para com os resultados do projeto, foi priorizada a utilização de inventários mais detalhados para os materiais presentes em maior proporção mássica nos veículos (como é o caso do aço, alumínio e polímeros), enquanto para materiais com menor participação mássica foram utilizados quando necessário inventários menos detalhados, extraídos da versão 3.9.1 da ecoinvent;

- Diferenças de cobertura tecnológica: a grande maioria dos inventários utilizados estão ancorados em tecnologias com alto nível de maturidade e disponíveis em larga escala, com exceção do inventário do aço produzido a base de carvão vegetal, do polietileno produzido a base de cana-de-açúcar, e do aço de menor intensidade de carbono, utilizado na análise de sensibilidade para refletir a produção deste material em cenários futuros. Estes inventários baseados em tecnologias menos maduras, porém, apresentam baixa representatividade no mercado e, por isso, foram utilizados principalmente para análise de sensibilidade ou, no caso do aço produzido via carvão vegetal, representam uma pequena parcela do total produzido no país. Sendo assim, acredita-se que esta não seja uma fonte relevante de inconsistência para o projeto;
- Diferenças de cobertura temporal: a grande maioria dos inventários são referentes ou válidos para o ano de 2023, que foi o período utilizado tanto para a coleta de dados primários, como também é um período recente em relação ao lançamento da versão 3.9.1 da ecoinvent (15 de dezembro de 2022). Os únicos casos em que não foi adotado o ano de 2023 para a elaboração dos inventários foi para o caso da eletricidade, do alumínio e do aço. O critério utilizado para ampliação da cobertura temporal no primeiro caso foi a relevância do fator de emissão da eletricidade nos resultados do projeto, que é um fator-chave estudado por muitos estudos de avaliação de ciclo de vida veicular. Esta relevância, junto com o fato que este fator de emissão varia muito anualmente para o Brasil, justificou a ampliação deste escopo temporal neste caso. Já para o aço e alumínio, o escopo temporal foi ampliado por limitação na obtenção de dados específicos para 2023. Apesar de nestes casos o escopo temporal ter sido ampliado, os dados de primeiro plano obtidos junto às montadoras são específicos para 2023, assim como os dados de importação de materiais, e por isso foi optada a manutenção do escopo restrito para 2023 tanto quanto possível. Acredita-se que esta não seja uma fonte relevante de inconsistência para o projeto;
- Diferenças de cobertura geográfica: os dados utilizados para materiais nacionais foram coletados diretamente junto a fornecedores brasileiros ou então adaptados de inventários internacionais (acrônimos "GLO" ou "RoW") da ecoinvent, enquanto dados para materiais importados representam inventários originais da ecoinvent. Esta diferença de cobertura geográfica é uma fonte relevante de inconsistência, pois não necessariamente as adaptações feitas sobre inventários in-

ternacionais para o Brasil refletem a produção nacional.

- Diferenças de critérios de alocação adotados e no tratamento do carbono biogênico: foram utilizados tanto critérios de alocação econômica, já inclusos automaticamente por conta da escolha da base de dados da ecoinvent, e critérios de alocação física por massa e por energia no caso de inventários originais. Apesar destas metodologias distintas, esta escolha não foi contemplada na fase de análise de sensibilidade, pois a complexidade de se determinar o valor de mercado de inputs e outputs dos sistemas de produtos é alta, por um lado, e adaptar os inventários originais da ecoinvent para refletir um critério de alocação física também seria inviável dentro do escopo do projeto. Esta é uma fonte relevante de inconsistência, pois dependendo do método de alocação os resultados podem variar significativamente. No caso do tratamento de resíduos e materiais reciclados, diversas razões justificam a não inclusão das metodologias *end-of-life recycling* e *allocation at point of substitution*, como por exemplo a complexidade da modelagem principalmente para os inventários originais, incertezas quanto a disponibilidade de produtos substitutos ou secundários, assim como o conhecimento técnico da equipe, posto que nenhum dos 58 artigos utilizados como base para a revisão bibliográfica realizaram este tipo de sensibilidade. Finalmente, no caso do tratamento do carbono biogênico, foram adotadas as mesmas premissas tanto para os inventários primários do projeto quanto os secundários da ecoinvent, de forma que isto não é uma fonte relevante de inconsistência.

▲ 8.8. Verificação de incertezas

Conforme a ISO 14044, os resultados devem ser verificados a partir de uma análise de incerteza, pois estas podem afetar diretamente os resultados, conclusões e recomendações obtidos pelo estudo. Apesar de não ter sido realizada uma análise quantitativa das incertezas, é importante explicitar aqui as principais fontes de incerteza do estudo. São elas:

- Lista de materiais dos veículos: enquanto alguns veículos foram obtidos a partir de dados primários das montadoras participantes do projeto, outros veículos tiveram sua lista de materiais obtidas exclusivamente a partir de dados secundários. Apesar destes dados serem consolidados por meio do simulador de massas, que permite gerar veículos compatíveis com a realidade, não se descarta que esta seja uma potencial fonte de incerteza, dado que a pegada de carbono do berço-ao-portão depende diretamente da lista de materiais dos veículos.
- Parâmetros-chave na modelagem dos materiais automotivos: o fator de emissão de materiais críticos para a pegada de carbono dos veículos estudados depende diretamente de alguns parâmetros-chave, explorados em maior detalhe

nos subitens de cada material. O percentual de materiais reciclados, a utilização de materiais “verdes”, as perdas do aço foram alguns destes parâmetros explorados em maior detalhe na seção de sensibilidade, mas somente para o aço, o alumínio e polímeros. Apesar destes materiais responderem pela maior parte do veículo em termos mássicos, a ausência de cenários de sensibilidade para os demais materiais é uma fonte de incerteza.

- Percentual de nacionalização dos veículos: para os resultados do cenário base foi estabelecido um percentual de nacionalização para veículos ICEV e HEV, com base em dados primários e secundários. No entanto, os percentuais obtidos podem não refletir a realidade, pois na prática cada compo-

nente automotivo é formado por diversos subcomponentes inseridos em uma cadeia produtiva global, sendo praticamente impossível obter a rastreabilidade completa de todos os materiais presentes no veículo, sendo esta uma fonte relevante de incerteza.

- Anonimização dos dados: devido à confidencialidade dos dados primários recebidos das montadoras nacionais, estes foram anonimizados, o que pode afetar a rastreabilidade, transparência e representatividade dos dados, uma vez que os veículos modelados representam uma média do mercado, e não um veículo real em particular. Desta forma, diferentes realidades produtivas encontram-se agregadas, sendo isto uma fonte relevante de incerteza.

9. Considerações finais e recomendações

Este documento consolida os resultados, métodos, análises e conclusões relacionados à pegada de carbono da produção de veículos leves fabricados no Brasil, reunindo informações de mais de dois anos de desenvolvimento do projeto “Do Berço ao Portão”. Os resultados aqui apresentados buscam apoiar a tomada de decisão das estratégias de redução de emissões de GEE e mostram caminhos para o aumento da competitividade da indústria brasileira, identificando os principais pontos críticos em termos de emissões de gases de efeito estufa ao longo da cadeia automobilística, bem como os impactos associados a diferentes tecnologias e rotas de produção.

É importante ressaltar que todos os resultados trazidos neste estudo contemplam o escopo do berço-ao-portão e analisam somente a categoria de impacto ambiental definida como “Mudança do Clima” e que corresponde às emissões de GEE, nesse caso, associadas apenas à etapa de fabricação do produto. Nesse sentido, os resultados do estudo representam tão somente a amostra e o escopo analisado. Não se deve, portanto, utilizar os resultados deste estudo para estabelecer valores normativos definitivos ou médias nacionais, nem mesmo para realizar afirmações comparativas quanto à superioridade ou equivalência ambiental dos veículos estudados.

A delimitação do escopo a partir da abordagem berço-ao-portão – estabelecida pelo edital que originou o estudo – representa uma limitação inerente no contexto das principais normas de ACV, ISO 14040 e 14044. Isso ocorre, pois, a exclusão das etapas de uso, manutenção e fim de vida pode desconsiderar fatores relevantes para o entendimento completo do desempenho ambiental do produto, que no contexto do projeto, se relaciona com as diferentes tipologias de veículos consideradas. No caso dos veículos elétricos, por exemplo, aspectos específicos conectados às etapas de manutenção e fim de vida – como a troca de bateria e disposição final desses componentes – podem se revelar mais importantes quando

em comparação com veículos de motorização convencional.

Portanto, tal recorte limita principalmente a interpretação dos resultados, que devem ser lidos dentro do contexto que os originou e considerando que representam apenas parcialmente as emissões de GEE associadas aos veículos leves, havendo posteriormente uma miríade de impactos que podem ocorrer nas etapas subsequentes do ciclo de vida e que, juntas, estas irão compor de fato o desempenho ambiental do produto. Nesse sentido, a abordagem berço-ao-portão não substitui a necessidade de resultados que contemplem o ciclo de vida completo do veículo. Ao focar nesse escopo, no entanto, o estudo preenche uma lacuna relevante da literatura e das bases de dados de ACV, que ainda carecem de informações representativas e baseadas em dados primários sobre a produção automotiva no contexto brasileiro. Por meio do engajamento da cadeia automobilística, da coleta de dados primários em conjunto com o emprego de dados secundários e da adaptação de inventários do ciclo de vida, foram gerados mais de 200 inventários de ciclo de vida e mais de 50 fatores de emissão para os principais materiais e processos produtivos envolvidos na produção de veículos leves. Esse conjunto de dados constitui um dos principais resultados do projeto e estabelece uma base técnica sólida para o cálculo da pegada de carbono da produção de veículos leves no Brasil dentro do escopo do Berço ao Portão. Além disso, os resultados obtidos podem apoiar futuras aplicações, incluindo o apoio à regulamentação do Programa Mover e a operacionalização da ferramenta setorial de cálculo desenvolvida no âmbito do projeto, trazendo desdobramentos relevantes para a indústria automobilística nacional.

O número de veículos considerados na análise foi limitado, tendo sido avaliado doze veículos leves, compreendendo três segmentos (hatch, sedan e SUV) e quatro tecnologias de motorização (ICEV, HEV, P-HEV e BEV). No total, estes veículos re-

presentam 36% do total de vendas de veículos leves em 2023. A avaliação da qualidade dos dados se mostrou satisfatória, de forma que as premissas, métodos, abordagens e fontes de dados adotadas foram, em geral, consistentes com o objetivo do estudo. No entanto, por uma questão de prioridade, é importante reconhecer que não foram conduzidas algumas análises de sensibilidades e incerteza, como por exemplo a análise de alocação física e econômica no caso de sistemas de produto multifuncionais, a análise de tratamento de fim-de-vida de resíduos e produtos reciclados a partir de diferentes metodologias, e análises de Monte Carlo para a quantificação de incertezas e variabilidade de resultados, importantes para avaliar o impacto de escolhas metodológicas nos resultados e interpretações do estudo.

Os resultados da pegada de carbono, do berço-ao-portão da montadora, variaram de 4.479 kgCO₂e (ICEV-hatch) a 16.217 kgCO₂e (BEV-sedan), sendo os modelos eletrificados HEV, PHEV e BEV responsáveis por pegadas de carbono maiores do que os veículos convencionais (ICEV), principalmente em função do maior uso de materiais e da incorporação de baterias. Observou-se ainda uma variação entre os segmentos analisados, com veículos hatch e sedan, em geral, apresentando as menores e maiores pegadas de carbono, respectivamente. Essas diferenças refletem as especificações dos veículos (como massa, potência, materiais e sistemas embarcados) e buscaram representar as condições de mercado, utilizando como referência os modelos mais vendidos em 2023.

Os resultados evidenciam que a pegada de carbono do berço-ao-portão é fortemente dominada pelas etapas de extração de matérias-primas, produção e pré-processamento de materiais, que respondem por mais de 92% das emissões totais para todos os veículos avaliados. Isso demonstra que o avanço da descarbonização no Brasil depende da cadeia completa e, nesse sentido, ainda que não sejam diretamente responsáveis pela maior parte dessas emissões, as montadoras, como empresas focais, desempenham um papel estratégico para sua mitigação, na medida em que exercem forte influência sobre a cadeia de suprimentos. Por meio de decisões de projeto, especificações técnicas, gestão e desenvolvimento de fornecedores e estratégias de compras, as montadoras podem influenciar, em grande parte, os materiais utilizados, suas quantidades, rotas tecnológicas de produção e níveis de conteúdo reciclado, podendo atuar como agentes indutores de mudanças em todas as camadas (*tiers*) da cadeia automobilística, tanto a montante (*upstream*) quanto a jusante (*downstream*).

A análise por material reforça a importância do aço como principal contribuinte para as emissões dos veículos ICEV (representando entre 42% e 54% da PC, dependendo do segmento), seguido pelo alumínio (com variações entre 13% e 26%) e

pelos polímeros (situando-se entre 12% e 19%, especialmente polipropileno e poliamidas). Nos veículos eletrificados, os materiais associados às baterias tornam-se um dos principais fatores de impacto, respondendo por até cerca de metade da pegada de carbono nos BEVs (46% a 47%), devido à elevada intensidade energética e às emissões associadas à produção de células e materiais críticos. Quando avaliada a contribuição por sistemas, os sistemas estruturais (corpo e estrutura) e o sistema de *powertrain* representaram a maior parte das emissões dos veículos, com exceção do BEV, no qual a bateria também responde por cerca de metade das emissões totais.

Com base na amostra avaliada por este estudo, foi possível verificar que o fato do Brasil possuir uma matriz elétrica nacional composta por quase 90% de fontes renováveis, representa potencialmente uma vantagem quando em comparação com a produção conduzida em outras regiões do mundo. A análise comparativa internacional (benchmarking internacional) e a análise do cenário de nacionalização demonstram que a pegada de carbono, para os veículos cuja fabricação é realizada no Brasil (ICEV e HEV), pode, em determinados casos, se apresentar como menor do que as reportadas na literatura e quando em comparação com o cenário 100% GLO. Já a pegada de carbono dos veículos importados (PHEV e BEV), está dentro da faixa de resultados obtidas com base na revisão de literatura realizada. Apesar disso, ressalta-se que a comparação internacional não foi desenvolvida considerando a plena equivalência entre premissas, métodos, escopo e qualidade dos dados, uma vez que não constitui objetivo central do estudo. Assim, as diferenças observadas indicam apenas tendências aplicáveis no contexto da análise, não representando afirmações de superioridade comparativa.

De forma similar, a avaliação do cenário de nacionalização evidencia o potencial de descarbonização com o desenvolvimento da indústria nacional, seja na produção de materiais, baterias ou na fabricação dos veículos. Os resultados obtidos apontam que quanto maior o percentual de insumos nacionais utilizados na fabricação dos veículos, menor a pegada de carbono. Por exemplo, o veículo ICEV produzido a partir de materiais 100% nacionais pode reduzir cerca de um terço das emissões totais, comparado ao cenário 100% importado.

Os cenários de aumento do teor de reciclados demonstraram elevado potencial de mitigação, com reduções expressivas na pegada de carbono, especialmente associadas ao uso de aço e alumínio reciclados. Nesse sentido, é importante que a cadeia automobilística em conjunto com outros atores reúna esforços para enfrentar os principais desafios que impedem a ampla adoção de materiais reciclados na produção de veículos, tais como: (i) a disponibilidade de sucata e flutuações de preços; (ii) a qualidade da sucata para atendimento de especi-

ficações técnicas e de segurança dos veículos e; (iii) questões logísticas como longas distâncias e falta de acesso a modais eficientes. Vale destacar, no entanto, que escolhas metodológicas associadas ao tratamento de reciclagem podem afetar este resultado favorável ao uso de materiais secundários e não foram exploradas neste estudo, por uma limitação de tempo.

Por outro lado, a análise de sensibilidade relacionada às perdas de aço ao longo da cadeia evidenciou que ineficiências materiais podem comprometer significativamente os ganhos obtidos por outras estratégias de descarbonização, ressaltando a importância de medidas voltadas à redução de perdas ao longo da cadeia do aço, bem como do mapeamento mais preciso desses fluxos. As análises indicam ainda baixa sensibilidade dos resultados às variações recentes do mix elétrico nacional no escopo do berço-ao-portão, tanto em anos com maior participação de renováveis, como em anos de menor participação.

Com relação aos dados utilizados, os resultados da pegada de carbono deste estudo são fortemente influenciados pela composição material dos veículos, não sendo possível dissociar de forma clara as contribuições de impacto entre dados primários e secundários, uma vez que ambos se encontram integrados ao longo de toda a modelagem. Ainda assim, destaca-se que os principais impactos identificados, em especial aqueles associados à produção de materiais, são majoritariamente representados por dados secundários, o que introduz incertezas inerentes à sua representatividade tecnológica e geográfica. Essas limitações podem afetar a precisão absoluta dos resultados. Mais detalhes sobre as limitações e implicações deste estudo são apresentados no item 3.3. Em geral, os resultados do projeto indicam que as estratégias mais eficazes para a redução da pegada de carbono do berço-ao-portão dos veículos leves no Brasil estão associadas: (i) à escolha de materiais, (ii) às rotas tecnológicas de produção e origem dos materiais, (iii) ao aumento do uso de materiais reciclados e (iv) à melhoria da eficiência material ao longo da cadeia de suprimentos au-

tomotiva. Ao fornecer inventários e fatores de emissão representativos da realidade brasileira, o estudo contribui para embasar decisões técnicas, empresariais e regulatórias, apoiando a transição para uma indústria automotiva nacional mais competitiva e de menor intensidade de carbono.

Por fim, com base nos resultados obtidos e nas limitações identificadas ao longo do projeto, recomenda-se futuros aprofundamentos e discussões com o setor automotivo e os demais segmentos da sociedade, incluindo:

- Ampliação do escopo do projeto, incluindo as fases de uso e manutenção, e fim de vida do veículo, permitindo avaliar de forma mais consistente o desempenho ambiental das diferentes tecnologias veiculares ao longo de todo o ciclo de vida, bem como avaliar o efeito da substituição de materiais até a fase de uso dos veículos.
- Refinamento dos inventários de veículos eletrificados e dos inventários de materiais críticos como aço, alumínio, polímeros e baterias íon-lítio, com foco na caracterização mais precisa da lista de materiais (Bill of Materials), das perdas de material, das ligas utilizadas, do teor de reciclado e das rotas tecnológicas de produção no contexto brasileiro, reduzindo incertezas e aumentando a representatividade dos inventários.
- Análise aprofundada de materiais críticos e especiais, especialmente em baterias e sistemas eletrônicos, como lítio, platina, neodímio, ouro e prata, considerando sua contribuição para a pegada de carbono, riscos de suprimento e implicações estratégicas para a cadeia automobilística.
- Análise de sensibilidade para avaliar o impacto de escolhas metodológicas relevantes, como procedimentos de alocação, tratamento de coprodutos e/ou métricas de AICV.
- Avaliação técnico-econômica das estratégias de mitigação do setor, incluindo estimativas de custos de abatimento e a construção de curvas de custo marginal de abatimento (MACC), de modo a apoiar a priorização de ações sob a ótica de custo-efetividade.

Referências

- ABAL. Anuário Estatístico Alumínio 2017. [s.l.: s.n.].
- ABAL. Anuário Estatístico Alumínio 2023. [s.l.: s.n.].
- ABAL. Percentual de reciclagem brasileira do alumínio 2025.
- ABCOBRE. Anuário Brasileiro do Cobre 2023. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://abcobre.org.br/anuario-brasileiro-do-cobre/>>. Acesso em: 23 maio. 2025.
- ABIPLAST. PERFIL 2023 - As Indústrias de Transformação e Reciclagem de Plástico no Brasil. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2023/>>. Acesso em: 20 maio. 2025.
- ABM. Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/>>.
- ABNT. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009a. 21 p.
- ABNT. ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009b. 46 p.
- ABNT. ABNT NBR ISO 14067: gases de efeito estufa — Pegada de carbono de produtos — Requisitos e diretrizes para quantificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.
- ABRALATAS. Relatório Setorial ESG. O futuro da lata de alumínio. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://abralatas.org.br/wp-content/uploads/2024/11/RELATORIO_ESG_ABRALATAS_2024_compressed.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2025.
- ABVE. Elétricos crescem em todas as regiões do Brasil.
- AEA. Cartilha Eletromobilidade: Veículos eletrificados. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2023.
- ANEEL. Relatório de perdas de energia elétrica na distribuição. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://git.aneel.gov.br/publico/centralconteudo/-/raw/main/relatorioeindicadores/tarifaeconomico/Relatorio_Perdas_Energia.pdf>.
- ANFAVEA. Anuário da indústria automobilística brasileira 2023. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.anfavea.com.br>.
- ANM. Sumário Mineral Brasileiro - Chumbo. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral>>. Acesso em: 22 maio. 2025.
- BLACK, F. A carroceria do seu carro é feita por máquinas de até 1.600 toneladas. **Quatro Rodas**, 2021a. Disponível em: <<https://quatro-rodas.abril.com.br/auto-servico/a-carroceria-do-seu-carro-e-feita-por-maquinas-de-ate-1-600-toneladas>>.
- BLACK, F. Fabricação das tintas automotivas é tão complexa quanto a pintura. **Quatro Rodas**, 2021b. Disponível em: <<https://quatro-rodas.abril.com.br/auto-servico/fabricacao-das-tintas-automotivas-e-tao-complexa-quanto-a-pintura>>.
- BRASIL. Plano Setorial de Mitigação da Indústria – Plano Clima. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma>>.
- BRASKEM. O SETOR PETROQUÍMICO. Disponível em: <<https://www.braskem-ri.com.br/a-companhia/o-setor-petroquimico/>>.
- BRASKEM - COMUNICAÇÃO PESSOAL. Dados de pegada de carbono do polietileno verde produzido a partir de etanol de cana-de-açúcar. São Paulo. Braskem, 2025.
- BRIGHT CONSULTING. Bright Consulting Final Delivery - Projeto “Do berço ao portão” 2023.
- BUBERGER, J.; KERSTEN, A.; KUDER, M.; ECKERLE, R.; WEYH, T.; THIRINGER, T. Total CO₂-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, p. 112158, 2022.
- CARVALHO, I. Como funciona uma linha de montagem de automóveis? **Quatro Rodas**, 2021. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/como-funciona-uma-linha-de-montagem-de-automoveis/>>.

- CBA. **Reporte de Agenda Climática 2024**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://d2bijyvg5ozmx.cloudfront.net/agenda_climatica_2024_10217a7646.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2025.
- CECCI, R. **Materiais têxteis na indústria automotiva: evolução, aplicações e tendências**. [s.l.: s.n.].
- CNQ. **Panorama da indústria de transformados plásticos e de borracha**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://cnq.org.br/system/uploads/publication/328257e6deee6eeb8f80bd3cb534104b/file/panorama-transformados-plasticos-e-borracha.pdf%0A%0AAccessed>>.
- CNT. **Anuário CNT do Transporte 2022: Estatísticas consolidadas**. p. 1–25, 2022.
- CULLEN, JONATHAN M.; ALLWOOD, JULIAN M.; BAMBACH, M. D. Mapping the global flow of steel: from steelmaking to end-use goods. *Environmental Science & Technology*, v. 46, n. 24, p. 13048–13055, 2012.
- ELGOWAINY, A.; HAN, J.; WARD, J.; JOSECK, F.; GOHLKE, D.; LINDAUER, A.; RAMSDEN, T.; BIDDY, M.; ALEXANDER, M.; BARNHART, S.; SUTHERLAND, I.; VERDUZCO, L.; WALLINGTON, T. J. Current and Future United States Light-Duty Vehicle Pathways: Cradle-to-Grave Lifecycle Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment. *Environmental Science and Technology*, v. 52, n. 4, p. 2392–2399, 20 fev. 2018. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.7b06006>>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- EPD, S. I. **General Programme Instructions for the International EPD System**. [s.l.: s.n.].
- EPE. **Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.
- EPE. **Balço Energético Nacional - Ano base 2022**. [s.l.: s.n.].
- EUROPEAN COMMISSION. **Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023PC0451>>.
- EUROPEAN COMMISSION; DIRECTORATE-GENERAL FOR CLIMATE ACTION; HILL, N.; AMARAL, S.; MORGAN-PRICE, S.; NOKES, T.; BATES, J.; HELMS, H. **Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCAPublications Office of the European Union**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://op.europa.eu/sv/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1>>.
- FENABRAVE. **Relatório Informativo de Emplacamentos**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.fenabreve.org.br>>.
- FGVCES. **Panorama da pegada de carbono de veículos leves: Resultados do estado da arte. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas**. [s.l.: s.n.].
- GAUTO, M. A.; CARAZZOLLE, M. F.; RODRIGUES, M. E. P.; DE ABREU, R. S.; PEREIRA, T. C.; PEREIRA, G. A. G. Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. *Energy for Sustainable Development*, v. 76, p. 101261, 1 out. 2023.
- GIAMPIERI, A.; LING-CHIN, J.; MA, Z.; SMALLBONE, A.; ROSKILLY, A. P. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*, v. 261, 114074, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074>
- GLOBAL ENERGY MONITOR. **Global Iron and Steel Tracker**. Disponível em: <<https://globalenergymonitor.org/projects/global-iron-and-steel-tracker/>>.
- GREET. **The GREET life-cycle model**. Argonne National Laboratory, 2024. Disponível em: <<https://www.osti.gov/doecode/biblio/148104>>. Acesso em: 21 jan. 2026.
- HAWKINS, T. R.; SINGH, B.; MAJEAU-BETTEZ, G.; STRØMMAN, A. H. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, v. 17, n. 1, p. 53–64, 1 fev. 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- HEBEDA, O.; GUIMARÃES, B. S.; CRETTON-SOUZA, G.; LA ROVERE, E. L.; PEREIRA, A. O. Pathways for deep decarbonization of the Brazilian iron and steel industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 401, p. 136675, 2023.
- HELLWEG, STEFANIE; MILÀ I CANALS, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science*, v. 344, n. 6188, p. 1109–1113, 2014.
- HIRZ, M.; NGUYEN, T. T. Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. *World Electric Vehicle Journal 2022*, Vol. 13, Page 61, v. 13, n. 4, p. 61, 31 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2032-6653/13/4/61/htm>>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- HORTON, P. M.; ALLWOOD, J. M. Yield improvement opportunities for manufacturing automotive sheet metal components. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 249, p. 78–88, 2017.
- HYUNDAI. **Hyundai Mobis: Life cycle assessment (LCA) Report 2022**. [s.l.: s.n.].
- IAI. **Primary Aluminium Production for January 2023 to December 2023**. Disponível em: <[Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil: Resultados e premissas do Projeto “Do Berço ao Portão” 98](https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/?publication=primary-aluminium-production&filter=%7B%22row%22%3A85%-2C%22group%22%3Anull%2C%22multiGroup%22%3A%5B%5D%2C%22dateRange%22%3A%22monthly%22%2C%22monthFrom%22%3A1%2C%22monthTo%22%3A12%2C%22quarterFrom%22%3A1%2C%22quarterTo%22%3A4%-2C%22yearFrom%22%3A2023%2C%22yearTo%22%3A2023%2C%22multiRow%22%3A%5B85%5D%2C%22co-></p></div><div data-bbox=)

- [lums%22%3A%5B1%2C2%2C3%2C4%2C5%2C6%2C10%2C7%2C8%2C9%2C10%5D%2C%22activeChartIndex%22%3A0%2C%22activeChartType%22%3A%22bar%22%7D>”. Acesso em: 16 jul. 2025.](#)
- IBRAM. **CONTRIBUIÇÃO DA INDÚSTRIA DA MINERAÇÃO PARA O G20 CONSTRUINDO UM MUNDO JUSTO E UM PLANETA SUSTENTÁVEL**. [s.l: s.n.].
- IFEU/PLASTICSEUROPE. **Eco-profile of Steam Cracker Products: Ethylene, Propylene, Butadiene, Pyrolysis Gasoline, Ethylene Oxide (EO), Ethylene Glycols (MEG, DEG, TEG)**. Disponível em: <<https://plasticseurope.org/sustainability/circularity/life-cycle-thinking/eco-profiles-set/>>.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br>>.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Electric Vehicle Outlook 2023 - Catching up With Climate Ambitions**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/dac14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>>.
- IPCC. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 3 – Industrial Processes and Product Use**. [s.l: s.n.].
- JOSHI, A.; SHARMA, R.; BARAL, B. Comparative life cycle assessment of conventional combustion engine vehicle, battery electric vehicle and fuel cell electric vehicle in Nepal. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134407, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622039798>>.
- KIM, T.; BENAVIDES, P. T.; KNEIFEL, J.; BEERS, K.; LU, Z.; HAWKINS, T. R. Life-Cycle Analysis Datasets for Regionalized Plastic Pathways. 1 fev. 2024. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/2315023/>>.
- LØVIK, A. N.; MARMY, C.; LJUNGGREN, M.; KUSHNIR, D.; HUISMAN, J.; BOBBA, S.; MAURY, T.; CIUTA, T.; GARBOSSA, E.; MATHIEUX, F.; WÄGER, P. Material composition trends in vehicles: critical raw materials and other relevant metals Preparing a dataset on secondary raw materials for the Raw Materials Information System. 2021.
- MIAH, JAMAL HUSSAIN; KOH, LENNY; STONE, DAVID; SWEET, W. A framework for increasing the availability of life cycle inventory data based on the role of multinational companies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 926–939, 2018.
- MME. **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico e do Setor de Transformação de Não Metálicos — Magnésio**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos>>. Acesso em: 22 maio. 2025.
- MME. **Anuário do Setor Metalúrgico — Ministério de Minas e Energia**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/anuario-do-setor-metalurgico>>.
- MME. **Relatório de Logística Reversa – Vidro**. [s.l: s.n.].
- MME. **Resolução no 14**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2025/resolucao-14.pdf>>.
- MOTOMURA, M. Como se fabrica um carro? **Super interessante**, 2011. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-se-fabrica-um-carro>>.
- OH, SEOG-CHAN; HILDRETH, ALFRED J. Analytics for smart energy management: tools and applications for sustainable manufacturing. **Cham: Springer**, 2016.
- ONAT, N. C.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. **Applied Energy**, v. 150, p. 36–49, 15 jul. 2015.
- ONS. **Histórico da Geração de Energia**. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- PATTERSON, J.; GURR, A.; MARION, F.; WILLIAMS, G. Strategic selection of future EV technology based on the carbon payback period. **World Electric Vehicle Journal**, v. 5, n. 4, p. 825–835, 2012.
- PINTO, R. G. D.; SZKLO, A.; RATHMANN, R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector – from structural to intensity effects. **Energy Policy**, v. 114, p. 380–393, 2018.
- PLASTICS EUROPE. **Automotive - The world moves with plastics (brochure) • Plastics Europe**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/automotive-the-world-moves-with-plastics-brochure/>>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- PROGRAMA BRASILEIRO GHG PROTOCOL. **Ferramenta de cálculo de emissões de gases de efeito estufa**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ghgprotocolbrasil.com.br>>.
- QIAO, Q.; ZHAO, F.; LIU, Z.; JIANG, S.; HAO, H. Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China. **Applied Energy**, v. 204, p. 1399–1411, 15 out. 2017.
- REBITZER, GERALD; EKVALL, TOMAS; FRISCHKNECHT, ROLF; HUNKELER, DANIEL; NORRIS, GREGORY; RYDBERG, TOMAS; SCHMIDT, WOLF-PETER; SUH, SANGWON; WEIDEMA, BO; PENNINGTON, D. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2014.
- RIMA. **Magnésio – Rima Industrial**. Disponível em: <<https://www.rima.com.br/magnesio/>>. Acesso em: 22 maio. 2025.

- RODRÍGUEZ-VALLEJO, D. F.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.; CHACHUAT, B. What Is the True Cost of Producing Propylene from Methanol? The Role of Externalities. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 8, n. 8, p. 3072–3081, 2 mar. 2020. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.9b05516>>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- SENA, K. A. C. de. **Ecodesign da pele bovina e seu impacto no potencial de aquecimento global de couros automotivos**. 2024. Fundação Getulio Vargas – Escola de Administração de Empresas de São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10438/35762>>.
- SEO, E. S. M.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. *InterfacEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente*, v. 1, n. 1, 2006.
- SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 15, p. 1699–1710, 1 out. 2008.
- SHAFIQUE, M.; AZAM, A.; RAFIQ, M.; LUO, X. Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong. *Research in Transportation Economics*, v. 91, p. 101112, 1 mar. 2022.
- SHIRZAD, P.; KANTOR, I. Toward sustainable propylene: A comparison of current and future production pathways. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, v. 7, p. 100099, 1 jun. 2025.
- SILVA, R. R. da; MATHIAS, F. R. de C.; BAJAY, S. V. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: Fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills. *Energy*, v. 153, p. 816–824, 2018.
- SOUZA, J. F. T. de; PACCA, S. A. Carbon reduction potential and costs through circular bioeconomy in the Brazilian steel industry. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105517, 2021.
- SULLIVAN, J. L.; BURNHAM, A.; WANG, M. **Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing**. [s.l.: s.n.].
- TABEREAUX, A. T.; PETERSON, R. D. Aluminum Production. In: SEETHARAMAN, S. **Treatise on Process Metallurgy**. [s.l.] Elsevier, 2014. p. 839–917.
- TECHNOLOGY, D. **International Material Data System (IMDS)**. Disponível em: <<https://public.mdssystem.com>>. Acesso em: 6 out. 2025.
- THE ALUMINIUM ASSOCIATION. **The Environmental Footprint of Semi-Fabricated Aluminum Products in North America**. [s.l.: s.n.].
- VELANDIA VARGAS, J. E.; FALCO, D. G.; DA SILVA WALTER, A. C.; CAVALIERO, C. K. N.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 24, n. 10, p. 1878–1897, 1 out. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-019-01615-9>>. Acesso em: 9 ago. 2023.
- VERMA, S.; DWIVEDI, G.; VERMA, P. Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 49, p. 217–222, 1 jan. 2022.
- WANG, X.; ZHANG, X.; XU, L.; LI, G.; JIANG, T. Development of direct reduced iron in China: challenges and pathways. *Engineering*, v. 41, n. 10, p. 98–115, 2024.
- WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. [s.l.: s.n.].
- WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. P. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.
- XIA, X.; LI, P. A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. *Science of The Total Environment*, v. 814, p. 152870, 25 mar. 2022.
- XIE, J.-B. Evaluation of carbon footprint and energy input of internal combustion engine vehicles in China. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, v. 42, n. 1, 2023.
- XIONG, S.; JI, J.; MA, X. Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs: A Case Study in China. *Energies*, v. 12, n. 5, p. 834, 3 mar. 2019.
- YANG, Z.; WANG, B.; JIAO, K. Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China. *Energy*, v. 198, p. 117365, 1 maio 2020.

Anexo I – Estudo de Caso – Do berço à roda

O Projeto “Do Berço ao Portão” tem como foco a avaliação da Pegada de Carbono de veículos leves fabricados no Brasil, desde a extração da matéria-prima até sua fabricação nas montadoras. Adotando uma abordagem do tipo do Berço ao Portão, o projeto concentra-se, portanto, nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas até a fase de produção, não abrangendo as etapas de uso, fim de vida ou a queima de combustíveis/eletricidade durante a operação dos veículos.

No entanto, considerando a relevância da fase de uso para a compreensão do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de veículos, este anexo apresenta um estudo de caso complementar simplificado, ampliando as fronteiras do sistema para uma abordagem Do Berço à Roda.

▲ Objetivo e escopo

Este estudo de caso segue os requisitos das normas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 e tem como objetivo estimar a Pegada de Carbono de veículos leves fabricados no Brasil pela abordagem “Do Berço à Roda”.

A unidade funcional adotada é definida como: “Um veículo leve operado ao longo de sua vida útil, percorrendo 160.000 km ao longo de 5 anos de uso”, conforme definições de durabilidade da resolução CONAMA N° 490, de 16 de novembro de 2018. O fluxo de referência é um veículo leve.

O estudo de caso avaliou 12 veículos representativos dos segmentos hatch, sedan e SUV, considerando diferentes tecnologias de motorização (ICEV, HEV, P-HEV e BEV) e incluindo a fase de uso ao longo da vida útil do veículo. Ressalta-se que os resultados aqui apresentados têm caráter exclusivamente ilustrativo e exploratório.

Para a obtenção dos resultados da pegada de carbono, expressos em t de CO₂equivalente por veículo (t CO₂e/veículo), foi utilizado como fator de caracterização o potencial de aquecimento global de 100 anos do quinto relatório do IPCC – AR6 (Global Warming Potential – IPCC 2021 GWP 100) (IPCC, 2021). Esta versão do método de avaliação de impacto exclui a captura de CO₂ e as emissões de CO₂ biogênico.

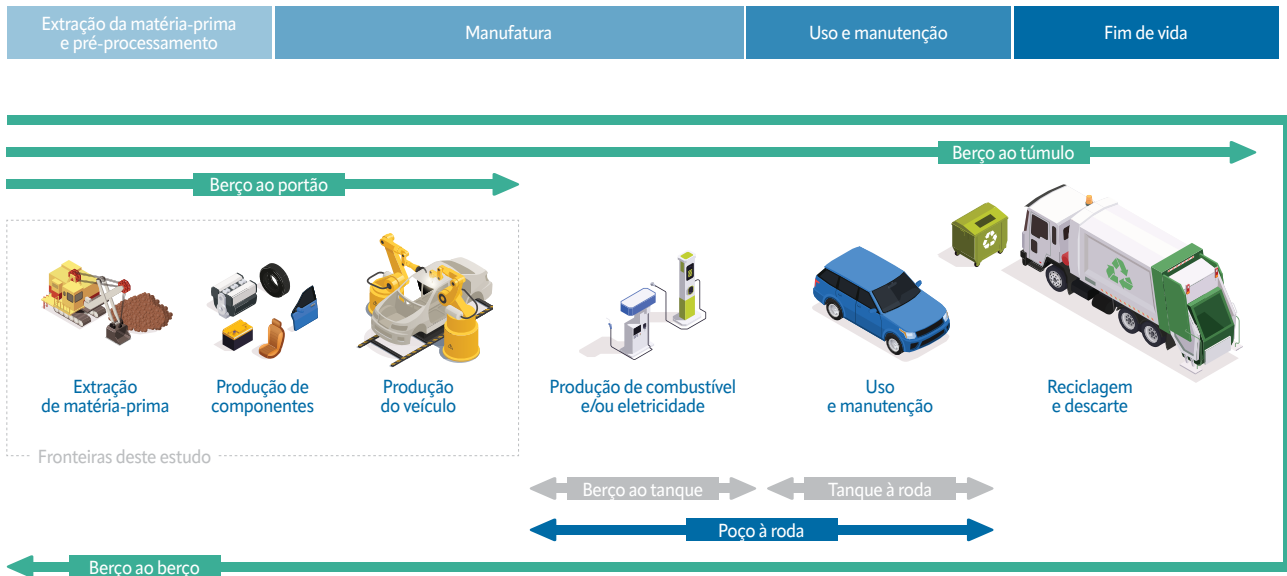
Conforme destacado na Figura abaixo, as fronteiras do sistema consideradas neste estudo de caso incluem as seguintes fases do ciclo de vida:

Berço ao Portão: fase de extração e processamento de matérias-primas e fabricação de componentes e fase de montagem do veículo;

Poço à Roda: fase de uso do veículo, incluindo a produção e o consumo de combustíveis e/ou eletricidade;

Dessa forma, a Pegada de Carbono avaliada corresponde à abordagem Do Berço à Roda, não incluindo as fases de manutenção e fim de vida do veículo.

→| **Figura A.1 – Fronteiras do sistema do estudo de caso, do berço-à-roda**



Fonte: Adaptado de Verma *et al* (2022) e Xia e Li (2022).

Este estudo de caso apresenta algumas limitações importantes, que devem ser consideradas na interpretação dos resultados:

- os consumos energéticos representam valores médios, não capturando variações de estilo de condução, condições de tráfego ou manutenção do veículo;
- não foram consideradas emissões associadas à manutenção e a substituição de materiais e componentes, como bateria elétrica, bateria chumbo-ácido, pneus, pastilha de freio, óleo lubrificante, dentre outros;
- não foram consideradas emissões associadas ao fim de vida do veículo;
- os resultados não devem ser utilizados para comparações diretas entre marcas ou modelos comerciais

específicos e é exclusivamente de caráter exploratório e exemplificativo.

▲ Metodologia de cálculo

O cálculo da Pegada de Carbono deste estudo de caso é estruturado a partir da combinação (i) da Pegada de Carbono do berço ao portão, conforme estimado pelo Projeto Do Berço ao Portão; e (ii) da Pegada de Carbono do poço à roda, calculadas a partir de dados secundários de consumos energéticos e fatores de emissão representativos da realidade brasileira.

A seguinte equação foi aplicada:

$$\text{Pegada de Carbono}_{\text{Berço ao Portão}} = \text{Pegada de Carbono}_{\text{Berço ao Portão}} \left[\frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] + \text{Pegada de Carbono}_{\text{Poço à Roda}} \left[\frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{Pegada de Carbono}_{\text{Poço à Roda}} \left[\frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] &= \text{Consumo Energético}_{\text{Combustível}} \times \text{Pegada de Carbono}_{\text{Combustível}} \left[\frac{\text{tCO}_2\text{e}}{\text{veículo}} \right] \\ &= \text{Vida Útil}_{\text{Veículo}} \left[\frac{\text{km}}{\text{veículo}} \right] \times 1 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

Os valores de consumo energético foram obtidos a partir de dados de 2023 do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), considerando as seguintes condições de rodagem ao longo da vida útil dos veículos: cidade (55%) e estrada (45%).

Além disso, para veículos flex-fuel (ICEV e HEV), para o cálculo do consumo energético combinado, foi considerada uma participação de 36% etanol hidratado e 64% gasolina C ao longo da vida útil (MME, 2025). Para veículos P-HEV, assumiu-se a mesma proporção para o consumo energético combinado: 36% gasolina C e 64% eletricidade.

Vale ressaltar que o comportamento do motorista, o estilo de direção e as condições de uso influenciam diretamente o consu-

mo de combustível e a duração da bateria dos veículos elétricos.

Os valores da pegada de carbono do combustível consideraram como referência as intensidades de carbono adotados para fins de apuração do cumprimento das metas do Programa Mobilidade Verde e Inovação - Programa Mover (MME, 2025), com exceção da eletricidade onde foi adotado o mesmo valor do cenário base do projeto "Do Berço ao Portão". Esses fatores incorporam tanto as emissões diretas na fase de uso quanto as emissões associadas à produção e distribuição das respectivas fontes energéticas.

A Tabela abaixo apresenta os valores de cada parâmetro utilizado para o cálculo das emissões de GEE, do berço à roda.

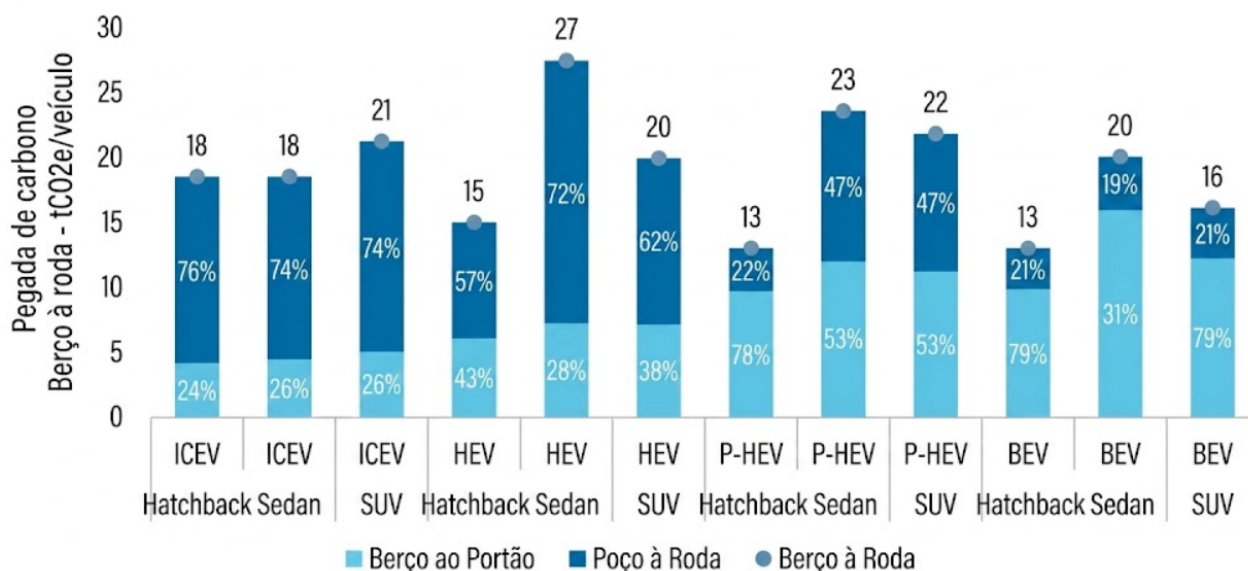
Tabela A.2 – Parâmetros utilizados para o cálculo das emissões de GEE, do berço à roda

Parâmetro	Unidade	Pegada de carbono dos veículos por cenário em toneladas CO ₂ e												Referência
		ICEV			HEV			PHEV			BEV			
		hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	
Pegada de carbono - berço ao portão	tCO ₂ e/veículo	4,5	4,7	5,4	6,3	7,5	7,4	10,0	12,4	11,5	10,2	16,2	12,5	Elaboração própria
Consumo energético - etanol	veículo	1,5	1,4	1,7	0,7	-	1,5	-	-	-	-	-	-	Adaptado de INMETRO, 2023
Consumo energético - gasolina	MJ/km	1,5	1,5	1,7	1,0	1,6	1,3	-	1,2	1,2	-	-	-	Adaptado de INMETRO, 2023
Consumo energético - eletricidade	MJ/km	-	-	-	-	-	-	0,4	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	Adaptado de INMETRO, 2023
Consumo energético - combinado	MJ/km	1,5	1,5	1,7	0,9	1,6	1,4	0,4	1,0	0,9	-	-	-	Adaptado de INMETRO, 2023
Pegada de Carbono - etanol hidratado	gCO ₂ e/MJ							22,7						MME, 2025
Pegada de Carbono - gasolina C	gCO ₂ e/MJ							76,8						MME, 2025
Pegada de Carbono - eletricidade	gCO ₂ e/MJ							38,5						MME, 2025
Vida útil	km							160.000,0						MMA, 2018

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados da pegada de carbono dos veículos analisados pelo projeto, do berço à roda, são apresentados na **Tabela A.3**.

→ **Tabela A.3 – Estudo de caso da pegada de carbono dos veículos analisados pelo projeto, do berço à roda**



Fonte: Elaboração própria.

Analisando os resultados encontrados percebe-se que um veículo leve emite em média entre 13 e 27 t CO₂e ao longo do seu ciclo de vida, a depender da tecnologia e segmento.

Conforme já era esperado, os resultados evidenciam que a contribuição relativa da fase de uso varia significativamente entre tecnologias de motorização. Enquanto veículos com motor a combustão interna (ICEV) apresentam predominância da fase de uso na pegada de carbono, emitindo “do poço à roda” cerca de 75% das emissões totais, veículos eletrificados deslocam parte relevante das emissões para a fase de produção, com veículos BEV emitindo “do berço ao portão” cerca de 80% das emissões totais. Esse comportamento reforça a importância do projeto “Do Berço ao Portão”, já que as emissões de GEE do processo produtivo tendem a se tornar mais significativas à medida que a fase de uso se descarboniza e/ou eletrifica.

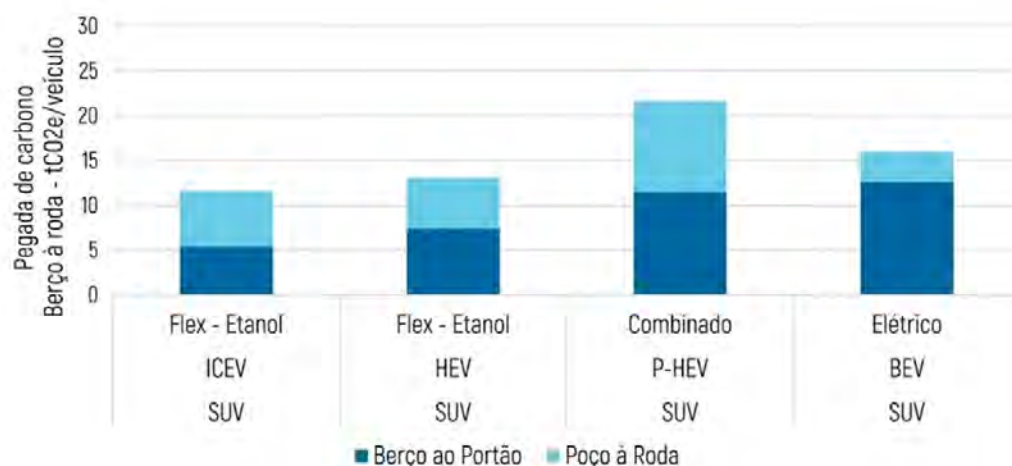
Outro aspecto de destaque é a variação da pegada de carbono conforme os diferentes segmentos analisados. Em todas as tecnologias de motorização, os veículos hatch apresentam as menores pegada de carbono, quando comparado com veículos sedan e SUV. Isso se dá especialmente pelas características intrínsecas desse segmento, conhecido pelas suas dimensões compactas, menor peso e maior eficiência energética.

Por fim, quando as diferentes tecnologias de motorização são comparadas, percebe-se que veículos eletrificados apresentam, em geral, um desempenho superior em relação aos veículos ICEV, com exceção do segmento sedan, que seguindo as tendências de mercado de 2023 foram caracterizados por veículos mais potentes e com maior consumo energético. Vale ressaltar que esta performance é influenciada pelo tipo de combustível consumido ao longo da vida útil de veículos flex. Outro aspecto relevante é a necessidade de troca da bateria dos veículos elétricos, que se fosse levada em consideração, provavelmente iria reverter esse cenário.

▲ Influência do tipo de combustível na pegada de carbono de veículos flex

Como apresentado anteriormente, os resultados do estudo de caso evidenciam que a pegada de carbono dos veículos flex (ICEV e HEV) são fortemente dependentes da fase de uso, que por sua vez, apresentam elevada sensibilidade à escolha do combustível utilizado ao longo de seu ciclo de vida. A fim de ilustrar esse efeito, a Figura abaixo apresenta os resultados da pegada de carbono de veículos do segmento SUV, considerando o abastecimento exclusivamente à etanol para as tecnologias ICEV e HEV.

→| Tabela A.4 – Estudo de caso da pegada de carbono dos veículos analisados pelo projeto, do berço-à-roda



Fonte: Elaboração própria.

Quando considerado o cenário de abastecimento com 100% de etanol hidratado, observa-se uma redução expressiva da Pegada de Carbono na fase de uso dos veículos flex, refletindo o menor fator de emissão poço à roda desse biocombustível. Como consequência, no cenário de abastecimento exclusivamente à etanol, a pegada de carbono, do berço à roda, dos veículos ICEV e HEV tornam-se inferiores às observadas demais tecnologias eletrificadas (P-HEV e BEV).

Assim como outros estudos brasileiros indicam, o resultado encontrado neste estudo de caso destaca que, sob determinadas condições de uso e abastecimento, os veículos flex podem ser uma excelente opção para a descarbonização de veículos leves no Brasil. Essa tecnologia, desenvolvida nacionalmente, combinada com uma matriz elétrica predominantemente renovável e com a proeminência no mercado de biocombustíveis parece contrastar com os desafios da implementação de uma nova infraestrutura de recarga e do aumento da oferta de energia elétrica limpa que uma ampla adoção de veículos P-HEV e BEV exigiriam. No entanto, a efetividade desse potencial depende de políticas públicas,

instrumentos econômicos e estratégias de comunicação capazes de, por um lado, garantir o aumento da produção sustentável de etanol, e por outro, incentivar o comportamento do consumidor para priorizar o abastecimento com este biocombustível.

▲ Ponto de break-even: análise das emissões cumulativas dos veículos

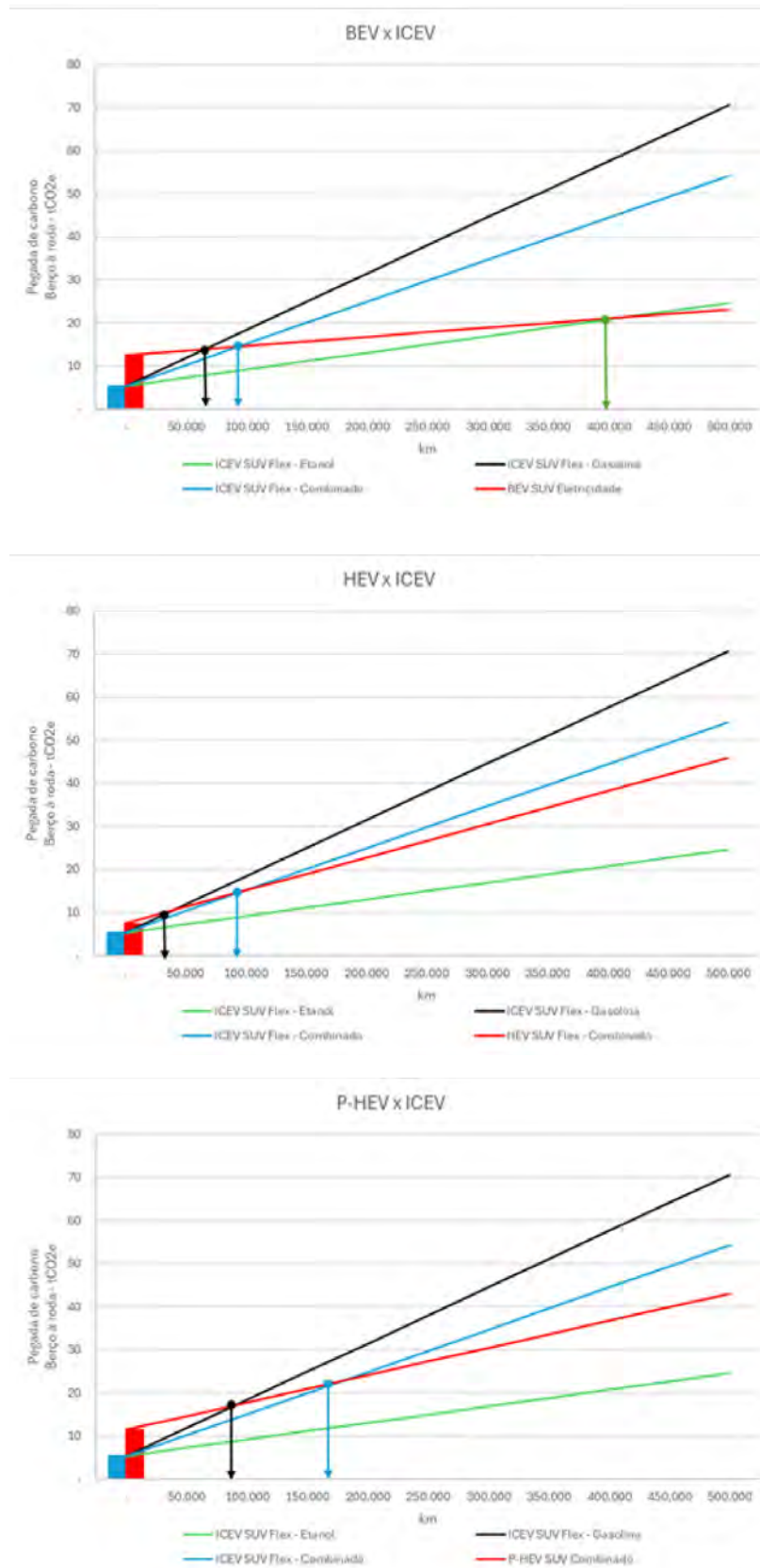
Além da análise da pegada de carbono ao longo de toda a vida útil dos veículos, este estudo de caso avaliou a evolução cumulativa das emissões do ciclo de vida de GEE em função da quilometragem percorrida, com o objetivo de identificar o chamado ponto de break-even de carbono entre as diferentes tecnologias veiculares. Esse conceito refere-se à quilometragem a partir da qual veículos eletrificados passam a apresentar emissões acumuladas inferiores às dos veículos com motor de combustão interna (ICEV), compensando a maior pegada de carbono associada à fase de produção (do berço ao portão). A fim de ilustrar esse conceito, a Tabela X apresenta os resultados para veículos do segmento SUV.

Tabela A.5 – Ponto de break-even e emissões cumulativas dos veículos do segmento SUV, em relação ao veículo ICEV Flex-combinado

Tecnologia	Combustível	Pegada de carbono cumulativa por quilometragem (tCO ₂ e/veículo)					Ponto de break-even (km)
		0 km	50.000 km	100.000 km	150.000 km	200.000 km	
ICEV	Flex - Combinado	5,4	10,2	15,1	20,0	24,9	-
HEV	Flex - Combinado	7,4	11,3	15,1	19,0	22,8	99.409
P-HEV	Combinado	11,5	14,6	17,8	21,0	24,1	177.437
BEV	Eletricidade	12,5	13,6	14,6	15,7	16,8	93.682

Fonte: Elaboração própria.

→ Tabela A.6 – Ponto de break-even e emissões cumulativas dos veículos do segmento SUV



Fonte: Elaboração própria.

Conforme discutido neste relatório, veículos eletrificados iniciam sua vida útil com uma pegada de carbono mais elevada em comparação aos veículos ICEV. A análise quilômetro a quilômetro permite visualizar essa dinâmica de forma clara: as curvas de emissões acumuladas dos veículos ICEV apresentam uma inclinação mais acentuada ao longo do tempo, refletindo maiores emissões por unidade de distância percorrida, enquanto os veículos eletrificados exibem inclinações menores, ainda que partam de um patamar inicial mais elevado. O ponto de interseção entre essas curvas representa o break-even de carbono, ou seja, o momento a partir do qual a alternativa eletrificada passa a ser mais vantajosa em termos de emissões de GEE.

Conforme observado na Figura acima, os resultados indicam que o ponto de break-even de carbono varia significativamente em função da tecnologia considerada e, novamente, das premissas adotadas para o consumo energético dos diferentes combustíveis. Para veículos ICEV abastecidos exclusivamente com etanol, esse ponto pode ocorrer apenas após uma quilometragem elevada (acima de 400 km para BEV) ou, dependendo do veículo, não ser atingido (HEV e P-HEV).

Por outro lado, quando os veículos ICEV operam com exclusivamente com gasolina, a inclinação da curva de emissões aumenta substancialmente, antecipando o ponto de break-even em favor dos veículos eletrificados. Em todos os casos, os veículos ICEV são mais facilmente ultrapassados pelos veículos eletrificados (~39.000 km para HEV, 66.000 km para BEV e 91.000 km para P-HEV).

Já a avaliação combinada dos combustíveis etanol e gasolina na proporção de 36% e 64%, respectivamente, mostra que com exceção do P-HEV, os veículos BEV e HEV atingem o ponto de break-even com aproximadamente 60% da sua vida útil de 160.000 km.

Por fim, a avaliação quilômetro a quilômetro evidencia que análises baseadas exclusivamente nas emissões totais ao final da vida útil podem ocultar dinâmicas relevantes ao longo do tempo, enquanto a abordagem de break-even de carbono oferece uma visão mais refinada sobre quando e em que condições cada tecnologia contribui efetivamente para a mitigação das emissões no setor de transportes.

▲ Considerações finais

Apesar das limitações inerentes a este estudo de caso de caráter simplificado, a análise permitiu extrair aprendizados relevantes para a compreensão da pegada de carbono de diferentes tecnologias e segmentos veiculares no contexto brasileiro.

Em primeiro lugar, os resultados evidenciam que a ampliação das fronteiras do sistema para a abordagem Do Berço à Roda é fundamental para uma avaliação mais completa e realista do desempenho ambiental dos veículos. A consideração exclusiva da fase de produção ou da fase de uso, de forma isolada, pode levar a interpretações parciais ou enviesadas sobre os benefícios relativos de cada alternativa tecnológica.

Ao mesmo tempo, a análise detalhada Do Berço ao Portão mostrou-se particularmente relevante para veículos eletrificados, nos quais uma parcela significativa da pegada de carbono está concentrada na fase de produção. Esses resultados reforçam a importância do escopo do Projeto Do Berço ao Portão.

A análise quilômetro a quilômetro indicou que, embora veículos eletrificados apresentem, em geral, menores emissões específicas durante a fase de uso, o desempenho ambiental superior em termos de emissões acumuladas é alcançado apenas após uma parcela significativa da vida útil do veículo já ter sido percorrida. O ponto de break-even ou payback de carbono ocorre, portanto, em horizontes temporais e quilometragens que variam conforme a tecnologia, o segmento veicular e, sobretudo, as premissas adotadas para o consumo energético da fase de uso.

Por fim, os resultados destacam o papel central da eficiência energética e do tipo de combustível utilizado na fase de uso como fatores determinantes da pegada de carbono do berço à roda. No contexto brasileiro, a ampla disponibilidade do bioetanol confere desempenho ambiental particularmente favorável aos veículos flex (ICEV e HEV) quando abastecidos exclusivamente com etanol, os quais podem apresentar um desempenho inferior à de tecnologias eletrificadas P-HEV e BEV.

Em conjunto, esses achados reforçam a necessidade de abordagens de Avaliação do Ciclo de Vida, capazes de capturar as especificidades do contexto nacional e de subsidiar decisões mais informadas sobre estratégias de descarbonização do setor de transportes no Brasil.

Anexo II – lista de materiais dos veículos

Tabela B-1 – Composição de materiais por sistemas

VDA/ IMDS	Material	ICEV			HEV			PHEV			BEV		
		hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV
Corpo													
1.1	Aço não ligado	80,2%	80,2%	67,0%	64,9%	64,9%	64,9%	64,9%	64,9%	64,9%	64,9%	64,9%	64,9%
2.1	Alumínio fundido sem liga	0,6%	0,6%	1,7%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
3.1	Cobre	0,0%	0,0%	0,0%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%	2,2%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	11,1%	11,1%	23,3%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%	22,2%
5.3	Borracha sintética	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%	1,8%
7.2	Vidro	4,4%	4,4%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%
	Fibra de vidro	0,8%	0,8%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
7.3	Outros compostos	0,9%	0,9%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%
Estrutura													
1.1	Aço não ligado	81,5%	81,5%	68,0%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%	66,7%
2.1	Alumínio fundido sem liga	0,3%	0,3%	1,0%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	3,7%	3,7%	6,5%	10,8%	10,8%	10,8%	10,8%	10,8%	10,8%	10,8%	10,8%	10,8%
2.2	Magnésio fundido	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
3.1	Cobre	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	5,1%	5,1%	8,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%	3,0%
5.3	Borracha sintética	9,2%	9,2%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%	15,6%
7.2	Fibra de vidro	0,2%	0,2%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%
7.3	Outros compostos	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Motor de tração													
1.1	Aço não ligado	0,0%	0,0%	0,0%	49,5%	49,5%	49,5%	50,7%	50,7%	50,7%	51,7%	51,7%	51,7%
1.1.2	Aço alta liga	0,0%	0,0%	0,0%	1,5%	1,5%	1,5%	1,2%	1,2%	1,2%	1,0%	1,0%	1,0%
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	0,0%	0,0%	0,0%	30,4%	30,4%	30,4%	32,1%	32,1%	32,1%	32,1%	32,1%	32,1%

Tabela B-1 – Composição de materiais por sistemas

VDA/ IMDS	Material	ICEV			HEV			PHEV			BEV		
		hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV
3.1	Cobre	0,0%	0,0%	0,0%	12,5%	12,5%	12,5%	10,6%	10,6%	10,6%	9,9%	9,9%	9,9%
3.3	Zinco	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3.4	Níquel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
4.2	Outros metais especiais	0,0%	0,0%	0,0%	2,7%	2,7%	2,7%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	1,9%	1,9%	1,7%	1,7%	1,7%	1,6%	1,6%	1,6%
6.1	Tinta eletrostática	0,0%	0,0%	0,0%	1,3%	1,3%	1,3%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%	0,9%
7.2	Fibra de vidro	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7.3	Outros compostos	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sistema de Powertrain													
1.1	Aço não ligado	42,4%	42,4%	35,2%	48,4%	48,4%	48,4%	51,2%	51,2%	51,2%	46,8%	46,8%	46,8%
1.2	Ferro fundido	0,0%	0,0%	0,5%	24,2%	24,2%	24,2%	22,8%	22,8%	22,8%	0,0%	0,0%	0,0%
2.1	Alumínio fundido sem liga	4,8%	4,8%	4,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	22,3%	22,3%	24,5%	14,5%	14,5%	14,5%	13,7%	13,7%	13,7%	0,0%	0,0%	0,0%
3.1	Cobre	6,8%	6,8%	7,7%	2,5%	2,5%	2,5%	2,7%	2,7%	2,7%	21,8%	21,8%	21,8%
4.1	Platina	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	19,0%	19,0%	22,2%	8,2%	8,2%	8,2%	7,5%	7,5%	7,5%	31,4%	31,4%	31,4%
5.3	Borracha sintética	2,2%	2,2%	2,6%	2,2%	2,2%	2,2%	2,1%	2,1%	2,1%	0,0%	0,0%	0,0%
7.2	Fibra de vidro	2,5%	2,5%	2,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7.3	Outros compostos	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Sistema de Transmissão													
1.1	Aço não ligado	30,0%	30,0%	30,0%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%	60,5%
1.2	Ferro fundido	30,0%	30,0%	30,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2.1	Alumínio fundido sem liga	30,0%	30,0%	30,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%
3.1	Cobre	0,0%	0,0%	0,0%	18,9%	18,9%	18,9%	18,9%	18,9%	18,9%	18,9%	18,9%	18,9%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	5,0%	5,0%	5,0%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
5.3	Borracha sintética	5,0%	5,0%	5,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
7.3	Outros compostos	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Gerador													
1.1	Aço não ligado	0,0%	0,0%	0,0%	36,1%	36,1%	36,1%	36,1%	36,1%	36,1%	0,0%	0,0%	0,0%
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	0,0%	0,0%	0,0%	36,1%	36,1%	36,1%	36,1%	36,1%	36,1%	0,0%	0,0%	0,0%
3.1	Cobre	0,0%	0,0%	0,0%	27,8%	27,8%	27,8%	27,8%	27,8%	27,8%	0,0%	0,0%	0,0%
Controlador eletrônico													
1.1	Aço não ligado	0,0%	0,0%	0,0%	3,1%	3,1%	3,1%	2,8%	2,8%	2,8%	2,7%	2,7%	2,7%
2.1	Alumínio fundido sem liga	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%
2.1.1	Alumínio fundido sem liga	0,0%	0,0%	0,0%	61,7%	61,7%	61,7%	53,7%	53,7%	53,7%	52,5%	52,5%	52,5%
3.1	Cobre	0,0%	0,0%	0,0%	19,0%	19,0%	19,0%	25,9%	25,9%	25,9%	27,8%	27,8%	27,8%

Tabela B-1 – Composição de materiais por sistemas

VDA/ IMDS	Material	ICEV			HEV			PHEV			BEV		
		hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV	hatch	sedan	SUV
3.3	Zinco	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,9%	0,9%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%
3.4	Níquel	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	0,0%	0,0%	0,0%	9,0%	9,0%	9,0%	10,9%	10,9%	10,9%	10,4%	10,4%	10,4%
5.3	Borracha sintética	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,9%	0,9%	1,0%	1,0%	1,0%	1,1%	1,1%	1,1%
7.2	Fibra de vidro	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	0,9%	0,9%	0,7%	0,7%	0,7%	0,6%	0,6%	0,6%
7.3	Outros compostos	0,0%	0,0%	0,0%	4,3%	4,3%	4,3%	3,5%	3,5%	3,5%	3,3%	3,3%	3,3%
Bateria auxiliar (chumbo ácido)													
3.5	Chumbo	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%	69,0%
5.1 5.2 5.4	Plástico - mix médio	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%	6,1%
7.2	Fibra de vidro	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%
7.3	Outros compostos	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%
9.6	Água	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%	22,0%
Fluidos													
6.2	Adesivos e selantes	32,1%	32,1%	32,1%	42,0%	42,0%	42,0%	42,0%	42,0%	42,0%	53,9%	53,9%	53,9%
9.2	Óleo lubrificante	34,8%	34,8%	34,8%	14,5%	14,5%	14,5%	14,5%	14,5%	14,5%	3,3%	3,3%	3,3%
9.3	Óleo lubrificante	2,1%	2,1%	2,1%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	3,6%	3,6%	3,6%
9.4	Etilenoglicol	24,6%	24,6%	24,6%	32,2%	32,2%	32,2%	32,2%	32,2%	32,2%	28,4%	28,4%	28,4%
9.6	Água	6,4%	6,4%	6,4%	8,4%	8,4%	8,4%	8,4%	8,4%	8,4%	10,8%	10,8%	10,8%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados primários das montadoras e no estudo de mercado da consultoria Bright. Obs: a composição de materiais da bateria principal dos veículos elétricos foi obtida diretamente de bases de dados do Ecoinvent.

Tabela B.2 – Relação de materiais do IMDs e datasets utilizados pelo projeto

Materiais IMDS/VDA		Nome do datasets no SimaPro ^A
1	Materiais de aço e ferro	
1.1	Aço / Aço fundido / Aço sinterizado	[BP] Steel, high-alloyed, processed {BR} market for steel Cut-off, U
1.1.1	Aço não ligado, baixo teor de liga	Hyundai
1.1.2	Aço alto teor de liga	[BP] Steel, high-alloyed, processed {BR} market for steel Cut-off, U
1.2	Ferro fundido	
1.2.1	Ferro fundido com grafite lamelar / Ferro fundido temperado	[BP] Cast iron, processed {BR} market for cast iron Cut-off, U
1.2.2	Ferro fundido com grafite nodular / Ferro fundido vermicular	
1.2.3	Ferro fundido altamente ligado	[BP] High-alloyed Cast iron, processed {BR} cast iron production Cut-off, U
2	Ligas leves, ligas fundidas e forjadas	
2.1	Alumínio e ligas de alumínio	[BP] Aluminum, cast alloy, processed {BR} mix of processes, sheet rolling, extrusion and casting, final market Cut-off, U
2.1.1	Ligas de alumínio fundido	
2.1.2	Ligas de alumínio forjado	[BP] Aluminum, wrought alloy {BR} aluminum, wrought alloy, final market Cut-off, U
2.2	Magnésio e ligas de magnésio	
2.2.1	Ligas de magnésio fundido	[BP] Cast magnesium {BR} market for cast magnesium Cut-off, U

Tabela B.2 – Relação de materiais do IMDs e datasets utilizados pelo projeto

Materiais IMDS/VDA		Nome do datasets no SimaPro ^A
2.2.2	Ligas de magnésio forjado	[BP] Wrought magnesium {BR} market for wrought magnesium Cut-off, U
2.3	Titânio e ligas de titânio	Titanium {GLO} market for titanium Cut-off, U
3	Metais pesados, ligas fundidas e forjadas	
3.1	Cobre (ex.: quantidades de cobre em chicotes elétricos)	[BP] Copper, cathode {BR} market for copper, cathode Cut-off, U
3.2	Ligas de cobre	
3.3	Ligas de zinco	[BP] Zinc {BR} market for zinc Cut-off, U
3.4	Ligas de níquel	[BP] Nickel, class 1 {BR} market for nickel, class 1 Cut-off, U
3.5	Chumbo	[BP] Lead {BR} market for lead Cut-off, U
4	Metais especiais	
4.1	Platina / Ródio	Platinum {GLO} market for platinum Cut-off, U
		Gold {GLO} market for gold Cut-off, U Silver {GLO} market for silver Cut-off, U Tin {GLO} market for tin Cut-off, U
4.2	Outros metais especiais ^B	Cerium oxide {GLO} market for cerium oxide Cut-off, U Dysprosium oxide {GLO} market for dysprosium oxide Cut-off, U Lanthanum oxide {GLO} market for lanthanum oxide Cut-off, U Neodymium oxide {GLO} market for neodymium oxide Cut-off, U Palladium {GLO} market for palladium Cut-off, U
5	Materiais poliméricos	
		[BP] Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer, processed {BR} market for -butadiene-styrene copolymer processed Cut-off, U Polystyrene, general purpose {GLO} market for polystyrene, general purpose Cut-off, U Polystyrene, extruded {GLO} market for polystyrene, extruded Cut-off, U Polystyrene, expandable {GLO} market for polystyrene, expandable Cut-off, U Polystyrene, high impact {GLO} market for polystyrene, high impact Cut-off, U [BP] Polyethylene, high density, processed {BR} market for polyethylene, high density, processed Cut-off, U [BP] Polyethylene, low density, processed {BR} market for polyethylene, low density, processed Cut-off, U [BP] Polyethylene, linear low density, processed {BR} market for polyethylene, linear low density, processed Cut-off, U [BP] Nylon 6, processed {BR} market for nylon 6 processed Cut-off, U [BP] Nylon 6-6, processed {BR} market for nylon 6-6 processed Cut-off, U [BP] Polycarbonate, processed {BR} market for polycarbonate processed Cut-off, U [BP] Polyethylene terephthalate, processed {BR} market for polyethylene terephthalate, amorphous, processed Cut-off, U Polysulfone {GLO} market for polysulfone Cut-off, U Formaldehyde {RoW} market for formaldehyde Cut-off, U [BP] Polypropylene, processed {BR} market for polypropylene, processed Cut-off, U [BP] Polyphenylene sulfide, processed {BR} market for polyphenylene sulfide processed Cut-off, U [BP] Polyvinylchloride, processed {BR} market for polyvinylchloride, suspension polymerisation, processed Cut-off, U [BP] Polyethylene terephthalate, processed {BR} market for polyethylene terephthalate, amorphous, processed Cut-off, U Styrene-acrylonitrile copolymer {GLO} market for styrene-acrylonitrile copolymer Cut-off, U Polymethyl methacrylate, sheet {GLO} market for polymethyl methacrylate, sheet Cut-off, U
5.1 a 5.1 b	Termoplásticos ^C	

Tabela B.2 – Relação de materiais do IMDs e datasets utilizados pelo projeto

Materiais IMDS/VDA		Nome do datasets no SimaPro ^A
5.2	Termoplásticos elastômeros	Considerado como proxy o inventário da composição média dos termoplásticos nos veículos
5.3	Elastômeros	[BP] Synthetic rubber {BR} market for synthetic rubber Cut-off, U
5.4	Resina termofixa/duromero	
5.4.1	Poliuretano ^D	[BP] Polyurethane, flexible foam {BR} market for polyurethane, flexible foam Cut-off, U
5.4.2	Poliéster insaturado	[BP] Polyurethane, rigid foam {BR} market for polyurethane, rigid foam Cut-off, U [BP] Polyester resin, unsaturated {BR} market for polyester resin, unsaturated Cut-off, U
5.4.3	Outras resinas termofixas	[BP] Epoxy resin, liquid {BR} market for epoxy resin, liquid Cut-off, U
5.5.2	Têxteis (em compostos poliméricos)	[BP] Textile, nonwoven polyester {BR} market of textile production Cut-off U
6	Polímeros de processo	
6.1	Lacas / materiais de pintura	[BP] Electrostatic paint {BR} market of electrostatic paint Cut-off U
6.2	Adesivos, selantes	Adhesive, for metal {RoW} market for adhesive, for metal Cut-off, U
6.3	Revestimento inferior (underseal)	[BP] Polyvinylchloride, processed {BR} market for polyvinylchloride, suspension polymerisation, processed Cut-off, U
7	Outros materiais e materiais compostos	
7.1	Materiais orgânicos naturais modificados (ex.: couro, madeira, papelão, ...)	(SENA, 2024)
7.2	Cerâmicas / Vidro	[BP] Flat glass, coated {BR} market for flat glass, coated Cut-off, U Glass fibre {GLO} market for glass fibre Cut-off, U
7.3	Outros compostos ^E	Graphite {GLO} market for graphite Cut-off, U Carbon fibre reinforced plastic, injection moulded {GLO} market for carbon fibre reinforced plastic, injection moulded Cut-off, U Coating powder {RoW} market for coating powder Cut-off, U
8	Eletrônicos	
8.1	Materiais de componentes eletrônicos (ex.: placas de circuito, displays)	Electronics, for control units {GLO} market for electronics, for control units Cut-off, U
8.2	Materiais de componentes elétricos	
9	Combustíveis e auxiliares	
9.2	Lubrificantes	Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil Cut-off, U
9.3	Fluido de freio	
9.4	Líquido de arrefecimento / Outros glicóis	Ethylene glycol {GLO} market for ethylene glycol Cut-off, U
9.5	Gás refrigerante	Refrigerant R134a {GLO} market for refrigerant R134a Cut-off, U
9.6	Água de lavagem, ácidos de bateria	[BP] Tap water {BR} market for tap water Cut-off, U
9.7	Conservante	Lubricating oil {RoW} market for lubricating oil Cut-off, U
9.8	Outros combustíveis e meios auxiliares	Nitrogen, liquid {RoW} market for nitrogen, liquid Cut-off, U

Fonte: Elaboração própria.

A A sigla "[BP]" no início do nome de cada inventário indicam inventários que foram adaptados ou criados pelo projeto. As adaptações feitas podem ser consultadas na seção 5.2 para cada material.

B Para metais especiais, foi assumido um mix de diferentes materiais para cada tipo de motorização (ver seção 5.2.14).

C Foi considerada uma composição de diferentes termoplásticos (ver seção 5.2.3) com base em dados primários fornecidos pelas montadoras.

D Para poliuretano, foi assumida uma composição de 50% de PUR flexível e rígido (ver seção 5.2.3).

E Para outros compostos, foi assumido um mix de diferentes materiais (ver seção 5.2.15).

Anexo III – Veículos mais vendidos

Tabela C.1 – Informações dos veículos leves mais vendidos em 2023

Segmento	Motorização	Marca	Modelo mais vendido	Vendas acumuladas 2023	% vendas total 2023	% vendas por segmento 2023
Hatch	ICEV	VW	Polo	111242	6%	18%
Hatch	ICEV	GM	Onix	102043	6%	16%
Hatch	ICEV	Hyundai	HB20	88905	5%	14%
Hatch	ICEV	Stellantis/ Fiat	Argo	66717	4%	11%
Hatch	ICEV	Toyota	Yaris	23339	1%	4%
Sedan	ICEV	GM	Onix Plus	74887	4%	25%
Sedan	ICEV	Stellantis/ Fiat	Cronos	50755	3%	17%
Sedan	ICEV	Toyota	Corolla	42923	2%	15%
SUV	ICEV	VW	T Cross	72440	4%	9%
SUV	ICEV	GM	Tracker	66643	4%	9%
SUV	ICEV	Hyundai	Creta	65817	4%	8%
SUV	ICEV	Honda	HRV	48054	3%	6%
SUV	ICEV	Nissan	Kicks	50778	3%	6%
SUV	ICEV	Jaguar Land Rover	Discovery Sport	1714	0%	0%
Hatch	HEV	-	-	-	-	-
Hatch	HEV	-	-	-	-	-
Hatch	HEV	-	-	-	-	-
Sedan	HEV	Caoa Chery	Arrizo 6	969	0%	0%
Sedan	HEV	M. Benz	Classe C	865	0%	0%
Sedan	HEV	Honda	Accord	104	0%	0%
SUV	HEV	Toyota	Corolla Cross	42070	2%	5%
SUV	HEV	GWM	Haval H6	10704	1%	1%
SUV	HEV	BMW	X1	3983	0%	1%
Hatch	PHEV	-	-	-	-	-
Hatch	PHEV	-	-	-	-	-
Hatch	PHEV	-	-	-	-	-

Tabela C.1 – Informações dos veículos leves mais vendidos em 2023

Segmento	Motorização	Marca	Modelo mais vendido	Vendas acumuladas 2023	% vendas total 2023	% vendas por segmento 2023
Sedan	PHEV	BMW	330E	568	0%	0%
Sedan	PHEV	Porsche	Panamera	509	0%	0%
Sedan	PHEV	BMW	530E	96	0%	0%
SUV	PHEV	BYD	Song Plus	7669	0%	1%
SUV	PHEV	BMW	X5	1267	0%	0%
SUV	PHEV	Volvo	XC90	1203	0%	0%
Hatch	BEV	BYD	Dolphin	6806	0%	1%
Hatch	BEV	GWM	Ora 03	775	0%	0%
Hatch	BEV	Nissan	Leaf	370	0%	0%
Sedan	BEV	BYD	Seal	1040	0%	0%
Sedan	BEV	Hyundai	IONIQ	260	0%	0%
Sedan	BEV	BMW	I4	155	0%	0%
SUV	BEV	BYD	Yuan Plus	1756	0%	0%
SUV	BEV	-	-	-	-	-
SUV	BEV	-	-	-	-	-

Fonte: FENABRAVE, (2023).

Anexo IV – Detalhamento da modelagem do aço

Neste anexo serão detalhados os principais fatores pertinentes a cada etapa modelada na produção do aço, bem como aspectos mais gerais, que envolvem a usina como um todo. A modelagem do inventário de ciclo de vida será explicitada para todas as rotas citadas anteriormente, com todas as entradas e saídas de cada processo.

O modelo é configurado via operações unitárias (material necessário para produzir uma unidade de produto) para cada processo de produção do aço. Quando o produto final é selecionado, o modelo percorre todos os produtores à montante, produzindo um balanço de massas final, com todos os insumos necessários para a produção daquele determinado produto. O balanço de massas então dita a quantidade de produto de cada processo, portanto a demanda de energia total por cada

um deles. De posse do total de energia requerida, por vetor energético, chega-se às emissões totais, aplicando fatores de emissão para cada um dos vetores energéticos utilizados.

A **Tabela D.1** abaixo mostra o formato das tabelas de LCI que serão reproduzidas para cada processo. Da esquerda para a direita, lê-se: **Tipo** se refere a **Output (O)**, **Input (I)** ou **Gases de Efeito Estufa (GEE)**. **Processo** é a identificação UUID da base de dados do Ecoinvent, ou *Processo do Modelo*, neste caso para se referir a parâmetros e processos gerados internamente no modelo. Unidade é a unidade do Sistema Internacional para esse processo, podendo aparecer com insumo material (em kg), energético (MJ) ou emissões de CO₂ equivalente. **Quantidade** é a quantidade efetivamente utilizada de determinado processo.

Tabela D.1 – Modelo de inventário utilizado

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	-	Processo do Modelo	-	-
I	-	-	-	-
GEE	GEE	-	kg CO ₂ e	-

Fonte: Elaboração própria.

▲ Reaproveitamento dos gases de processo e Autogeração de eletricidade

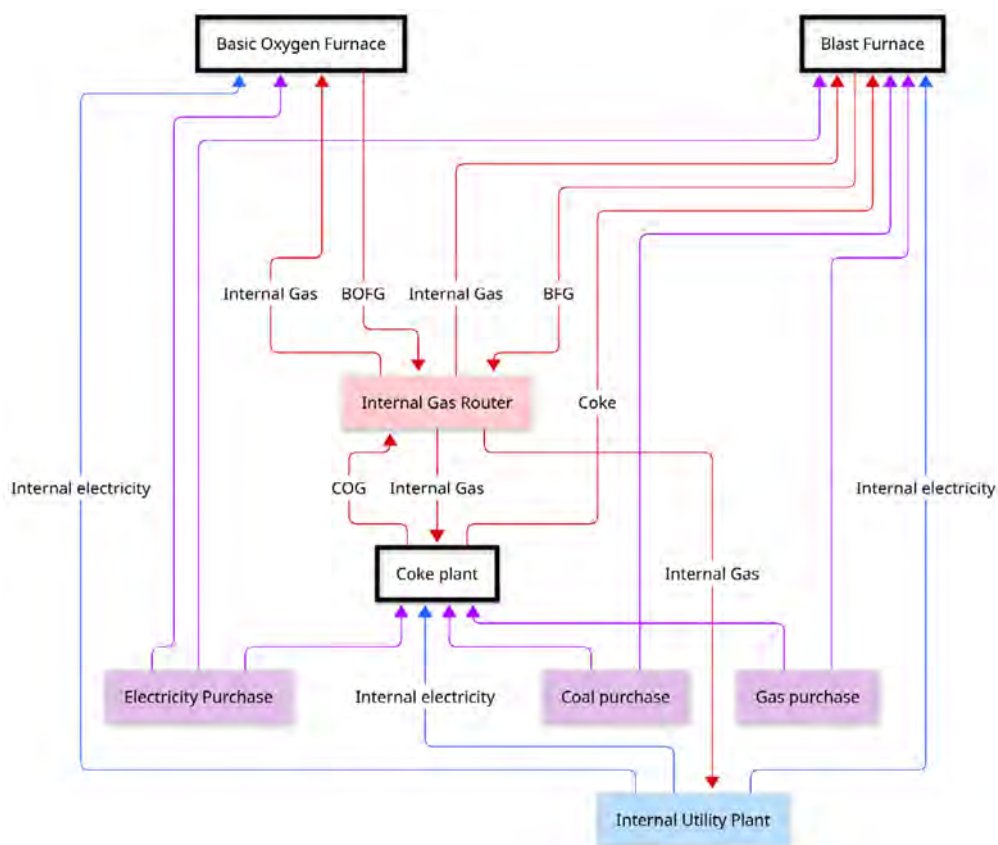
Um aspecto fundamental de uma usina integrada é que processos como coqueria, aciaria e alto forno, geram gases de processo que podem ser reaproveitados na própria usina. O modelo considera esse reaproveitamento de duas formas principais: reutilizado diretamente como gás de processo em etapas da produção, identificados como Process Gas nos inventários, ou utilizado para a geração de vapor e posteriormente eletricidade. De todo o gás recuperado, considera-se

que 50% são reutilizados como gás, enquanto a outra metade é direcionada à produção de eletricidade. Considera-se uma eficiência de conversão de 34% para essa geração de eletricidade. Embora essa proporção entre gás de processo e eletricidade varie de maneira substancial de uma usina para outra, esse número se aproxima dos valores médios observados em balanços energéticos das usinas integradas. No modelo, a eletricidade autoproduzida desloca eletricidade comprada, enquanto o gás de processo desloca a demanda por gás natural. Não é modelada a eventual venda de excedente, embora isso possa acontecer em usinas com menos pro-

cessamento de a com menor demanda de energia. A figura abaixo ilustra o esquema de reaproveitamento de gases. Em roxo estão os fluxos energéticos adquiridos externamente, em vermelho a recuperação e uso direto dos gases, e em azul a eletricidade gerada internamente. BFG, BOFG e COG são os gases recuperados, respectivamente, no alto forno, aciaria

e coqueria. Pela figura, gás é obtido desses três processos, que são agregados no "Internal Gas Router", onde o operador decide rotear o gás diretamente de volta para processos consumidores de gás, ou para a usina elétrica interna. Note que o diagrama é simplificado, e o gás de processo pode ser usado em outros processamentos a jusante da aciaria.

→| **Figura D.1 – Esquema de reaproveitamento de gases de processo em usina siderúrgica integrada**



Fonte: Elaboração própria.

Uma parcela das emissões de gases de efeito estufa (GEE) produzidas na coqueria e no alto-forno foram alocadas nos gases de processo com base no conteúdo energético dos subprodutos e transferidas integralmente para a eletricidade produzida, para ser alocada no final da cadeia, nos processos que consomem esta eletricidade. Dentro da Siderurgia é considerado, nos

pontos de consumo, uma proporção fixa entre a eletricidade comprada do grid e autogerada. Fora da siderurgia somente é utilizada eletricidade comprada do grid. Dada a complexidade e variabilidade, para esse parâmetro foram utilizados valores médios obtidos nos balanços energéticos das siderúrgicas. A **Tabela D.2** abaixo mostra o LCI da autogeração de eletricidade.

Tabela D.2 – Inventário do processo de autoprodução de eletricidade

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	1,00000
I	Steam	Processo do Modelo	MJ	2,941176
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,00000

Fonte: Elaboração própria.

Coqueria

Foi adotado que todo o coque de carvão mineral é produzido na própria siderurgia, mesmo cientes de que existem empresas que optam em comprar parte destes insumos. Este procedimento, também adotado para outros insumos, amplia a transparência dos parâmetros considerados no cálculo e não afeta o resultado, uma vez que as emissões que ocorrem nos eventuais fornecedores precisariam ser igualmente computadas, assumindo como não significativos os impactos eventualmente diferentes da logística.

O consumo de energia na coqueria é definido pela diferença entre a energia contida no carvão utilizado como insumo e a energia contida no coque e na produção líquida de gases de coqueria, não sendo mostrado o gás de coqueria produzido e consumido na própria coqueria (embora a produção e o consumo ocorram em momentos diferentes). Como os gases de processo e o coque são vetores energéticos, todas as emissões produzidas na coqueria são rateadas entre eles com base no conteúdo energético, à semelhança do que foi feito com a eletricidade, para serem alocadas, no final da cadeia de consumo energético, nos processos que consomem estes vetores. Com este procedimento, todas as emissões ficam alocadas em pro-

cessos de transformação do aço e nenhuma nos processos de transformação energética, o mesmo não ocorre com o consumo energético que é alocado na coqueria e na autogeração de eletricidade. A **Tabela D.3** lista o LCI da coqueria.

Os principais parâmetros de processo para modelar uma coqueria são: i) a razão de coque obtido por carvão utilizado (em kg/kg) e ii) o consumo líquido de energia no processo. A razão utilizada foi de 1,25 kg/kg, em linha com o observado nos balanços energéticos das Siderúrgicas, de 1,265 kg/kg para Usiminas e 1,36 kg/kg para Arcelor-Mittal. Esse valor é ligeiramente mais baixo que a faixa observada em (Harvey 2024), de 1,42 kg/kg a 1,53 kg/kg, com média de 1,47 kg/kg. Conforme filosofia geral de modelagem, dá-se preferência a valores obtidos nos balanços energéticos, mais precisos. Assim, os oriundos da literatura são utilizados como balizadores das escolhas.

O consumo líquido de energia na coqueria foi considerado de 6,7 MJ/kg, valor ligeiramente abaixo dos 7,15 MJ/kg e 7,1 MJ/kg encontrados nos balanços da Usiminas e Gerdau, respectivamente. Em comparação com valores encontrados na literatura, o valor considerado está banda superior da faixa de 3,7 MJ/kg a 7,96 MJ/kg, com média de 5,25 MJ/kg resumida nos trabalhos de Harvey (Harvey 2024).

Tabela D.3 – Inventário do processo de produção do coque

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Coke P	Processo do Modelo	MJ	1,00000
O	Process Gas	Processo do Modelo	MJ	0,11395
O	Óleo Derivado do Alcatrão	0	kg	0,00130
O	Óleo Leve Bruto	0	kg	0,00035
O	Amônia Anidra	0	kg	0,00013
I	Coal	d4b94ddd-e2a6-4c15-a182-b7d651029dd4	MJ	1,34058
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,00382
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,00292
I	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	0,00069
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,00000

Fonte: Elaboração própria.

Alto Forno

Foi considerado como estrutura básica de funcionamento de um alto-forno tradicional a adição pelo topo do forno de camadas intercaladas de mistura de minério sinterizado, pelletizado ou em pedaços com camadas de coque mineral ou vegetal com resistência mecânica compatível com as dimensões e cargas do forno. A depender das características do forno e

dos insumos utilizados, bem como das características desejadas do ferro gusa produzido, também podem ser adicionados calcário, nitrogênio e oxigênio. Para auxiliar o aquecimento e a redução do minério de ferro também são injetados carvão mineral ou vegetal pulverizados com o auxílio de gases de processo (do próprio alto-forno ou de coqueria) ou de gás natural. As **Tabelas D.4** e **D.5** listam os LCIs para o alto forno a carvão mineral e vegetal, respectivamente.

Tabela D.4 – Inventário do processo do Alto Forno a carvão mineral

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Pig Iron BF	Processo do Modelo	kg	1,00000
O	Process Gas	Processo do Modelo	MJ	4,66304
O	Escória	0	kg	0,33
I	Limestone	d3e6b16a-4c46-36dd-ad45-7bac46d06ea7	kg	0,04000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	MJ	0,00000
I	Charcoal M	f06037c3-1f10-5861-b92b-b6ffdde49d3d	MJ	0,00000
I	Coal	d4b94ddd-e2a6-4c15-a182-b7d651029dd4	MJ	3,391304
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,548273
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,158249
I	Coke P	Processo do Modelo	MJ	13,56522
I	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	0,07500
I	Oxygen P	Processo do Modelo	kg	0,08000
I	Sinter	Processo do Modelo	kg	1,439928
I	Pellet	Processo do Modelo	kg	0,179991
I	Iron ore	330d3885-1c96-5cfc-8c26-36a308923cd9	kg	0,179991
GEE	GEE		kg CO ₂ e	1,204833

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.5 – Inventário do processo do Alto forno a carvão vegetal

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Pig Iron BF	Processo do Modelo	kg	1,00000
O	Process Gas	Processo do Modelo	MJ	4,673203
O	Escória	Processo do Modelo	kg	0,33
I	Limestone	d3e6b16a-4c46-36dd-ad45-7bac46d06ea7	kg	0,04000
I	Charcoal M	f06037c3-1f10-5861-b92b-b6ffdde49d3d	kg	0,598361
I	Coal	d4b94ddd-e2a6-4c15-a182-b7d651029dd4	MJ	0
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,569019
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	011072
I	Coke P	Processo do Modelo	MJ	0
I	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	0,07500
I	Oxygen P	Processo do Modelo	kg	0,08000
I	Sinter	Processo do Modelo	kg	1,439928
I	Pellet	Processo do Modelo	kg	0,179991
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,119804

Fonte: Elaboração própria.

O consumo líquido de energia no alto forno é o parâmetro mais importante de toda a modelagem, pois esse é o processo mais intensivo em energia de toda a usina integrada. Os balanços de Usiminas e Arcelor Mittal dão valores bastante próximos, de 13,27 MJ/kg e 13,26 MJ/kg de aço. Esses valores também têm

boa convergência com os encontrados na literatura, de 10,74 MJ/kg a 14,79 MJ/kg, com média de 13,25 MJ/kg (Harvey 2024).

No Brasil, o carvão vegetal é alternativa ao carvão mineral para a produção de aço primário na rota BF-BOF. Naturalmente o

carvão vegetal oferece vantagens em relação ao fóssil, pois pode ser obtido através do plantio de árvores para esse fim. Desde que observadas as regras de sustentabilidade, essa alternativa oferece vantagens ambientais consideráveis. Em contrapartida, a menor resistência a compressão do carvão vegetal limita o tamanho de um alto forno, e, portanto, sua escala. Essa diferença de escala também se traduz em menor eficiência, com uma taxa de consumo (*fuel rate*) de carvão vegetal ligeiramente maior. De acordo com o IABr (Instituto Aço Brasil 2024), o *fuel rate* de um alto-forno a carvão mineral, no Brasil, consome em média 539 kg, enquanto um a vegetal, 708 kg. Portanto, o consumo energético de um alto forno a carvão

vegetal é ajustado para cima, em 10%, em comparação com aquele a carvão mineral.

▲ Produção de Vapor

A eficiência conjunta da transformação de gases de coqueria em vapor e do vapor em eletricidade é indicada somente no processo de autogeração por uma simplificação matemática. A eficiência global de 34% na geração de eletricidade é também adotada caso a siderurgia possua sistemas alternativos de geração de eletricidade que não utilizem vapor. A [Tabela D.6](#) lista o LCI para a produção de vapor.

Tabela D.6 – Inventário do processo de produção de vapor

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Steam	Processo do Modelo	MJ	1,00000
I	Process Gas	Processo do Modelo	MJ	1,00000
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,00000

Fonte: Elaboração própria.

Produção de Nitrogênio e Oxigênio

Foi adotado que o Nitrogênio e Oxigênio consumidos na Siderurgia são produzidos na própria siderurgia, mesmo cientes

que existem empresas que optam em comprar estes insumos. As [Tabelas D.7](#) e [D.8](#) abaixo listam os LCIs para a produção de nitrogênio e oxigênio, respectivamente.

Tabela D.7 – Inventário do processo de produção do nitrogênio

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	3,833526
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	1,106474
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,95872

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.8 – Inventário do processo de produção do oxigênio

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Oxygen P	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	3,492078
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	1,007922
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,91623

Fonte: Elaboração própria.

▲ Produção de de Calcário e Cal

Foi adotado que o calcário e o cal consumidos na Siderurgia são produzidos na própria siderurgia, mesmo cientes que exis-

tem empresas que optam em comprar parte destes insumos. Foi considerado que o uso do calcário calcítico e dolomítico como auxiliar de fluxo e/ou redutor da temperatura de redução do minério de ferro em ferro gusa e/ou transformado em

cal para ser utilizado como auxiliar para remoção de impurezas produz dióxido de carbono ao liberar o Carbono de sua com-

posição química. O LCI para o consumo de calcário é dado na [Tabela D.9](#) enquanto a produção de cal é dada na [Tabela A-12](#).

Tabela D.9 – Inventário do processo de produção de cal virgem

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Burnt Lime P	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Limestone	d3e6b16a-4c46-36dd-ad45-7bac46d06ea7	kg	1,78571
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,074926
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,12327
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,035533
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,93759

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.10 – Inventário do processo de produção de cal dolomítica

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Dolomitic Lime P	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Limestone	d3e6b16a-4c46-36dd-ad45-7bac46d06ea7	kg	1,91667
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,074926
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,123107
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,035533
GEE	GEE		kg CO ₂ e	1,06859

Fonte: Elaboração própria.

▲ Sinterização e Pelotização

As [Tabelas D.11](#) e [D.12](#) a seguir mostra o LCI para os processos de sinterização e pelotização, respectivamente.

Tabela D.11– Inventário do processo de produção de Sínter

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Sinter	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Limestone	d3e6b16a-4c46-36dd-ad45-7bac46d06ea7	kg	0,14000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	MJ	0,00000
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,356968
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,103032
I	Charcoal M	f06037c3-1f10-5861-b92b-b6ffdde49d3d	MJ	0,00000
I	Coke P	Processo do Modelo	MJ	1,54
I	Iron Ore	330d3885-1c96-5cfc-8c26-36a308923cd9	kg	0,910125
GEE	GEE		kg CO ₂ e	288765

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.12 – Inventário do processo de produção de Pellet

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Pellet	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Limestone	d3e6b16a-4c46-36dd-ad45-7bac46d06ea7	kg	0,06500
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,011498
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,085362
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,024638
I	Burnt Lime P	Processo do Modelo	kg	0,01000
I	Iron Ore	330d3885-1c96-5cfc-8c26-36a308923cd9	kg	1,023891
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,09314

Fonte: Elaboração própria.

▲ EAF

Uma siderurgia pode ou não produzir ferro e/ou aço primários, aqui definido como o material com origem no minério de ferro ou trabalhar a partir de sucatas e/ou lingotes de ferro e/ou aço adquiridos no mercado. As operações de conformação, tratamento térmico e/ou tratamento superficial que sucedem o derretimento da sucata e/ou lingotes num forno elétrico são similares às existentes nas siderúrgicas que produzem ferro e/ou aço primário utilizando carvão e coque mineral e/ou vegetal. Assim sendo, por simplicidade metodológica, estas etapas foram mantidas com as mesmas proporções

e parâmetros em todas as rotas tecnológicas consideradas.

Além do derretimento em um EAF, também é possível utilizar sucata na rota primária BF-BOF, de forma a reduzir o consumo de redutores e proteger as paredes internas dos equipamentos. A taxa máxima de utilização de sucata na rota primária fica em torno de 25 a 30% (Cullen, Allwood, and Bambach 2012), enquanto valores mínimos ficam em torno de 5% (Usiminas). Para este trabalho, adota-se um valor de 10%. Note que esse percentual não se refere à participação da rota EAF no mix de produção nacional, em torno de 25% (IABr, 2024). A [Tabela D.13](#) abaixo lista o LCI para o EAF.

Tabela D.13 – Inventário do processo EAF

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Liquid Steel R EAF	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,026667
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	3,08
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,00000
I	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	0,11300
I	Oxygen P	Processo do Modelo	kg	0,02500
I	Burnt Lime P	Processo do Modelo	kg	0,04100
I	Dolomitic Lime P	Processo do Modelo	kg	0,01200
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,0539136

Fonte: Elaboração própria.

▲ Aciaria

A [Tabela D.14](#) lista o LCI para a aciaria.

Tabela D.14 – Inventário do processo de Aciaria (BOF)

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Liquid Steel R BOF	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,271606
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,07839
I	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	0,11300
I	Oxigen P	Processo do Modelo	kg	0,09000
I	Burnt Lime P	Processo do Modelo	kg	0,04500
I	Dolomitic Lime P	Processo do Modelo	kg	0,00500
I	Scrap	798e4295-574e-5410-b1c9-8cb7418a6e2d	kg	0,10000
I	Pig Iron BF	Processo do Modelo	kg	0,90000
I	Basic oxygen furnace converter GLO market	8a4239f4-95bc-556b-963a-411f5ca81fad	units	1,33E-11
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,00000

Fonte: Elaboração própria.

▲ Conformação contínua

A [Tabela D.15](#) abaixo lista o LCI para a conformação contínua.

Tabela D.15 – Inventário do processo de conformação contínua

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Liquid Steel RHL	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m ³	0,000058
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	0,002909
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,190124
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,054876
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,000177

Fonte: Elaboração própria.

▲ Conformação do Aço Plano

A [Tabelas D.16](#) e [D.17](#) mostram as LCIs para a conformação a quente e a frio do aço plano, respectivamente. Para a conformação a quente a intensidade energética média no caso brasileiro tem valores entre 2,31 MJ/kg e 3,56 MJ/kg, portanto ligeiramente acima do encontrado na literatura,

de 1,90 MJ/kg. Dada a disponibilidade de dados para o Brasil, adota-se um valor médio para as usinas nacionais.

Para a conformação a frio os valores para o Brasil o valor encontrado foi de 1,1 MJ/kg, abaixo da média internacional de 1,45 MJ/kg compilada em (Harvey 2024). Nesse caso adota-se uma postura mais conservadora de alinhar os valores com as referências internacionais.

Tabela D.16 – Inventário do processo de conformação em aço plano - Hot Rolling

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Hot Raw Steel	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,023228
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	1,163793
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,388009
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,111991
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,046961

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.17 – Inventário do processo de conformação em aço plano - Cold Rolling

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Cold Raw Steel	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,007665
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	0,384052
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,341448
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,098552
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,18752

Fonte: Elaboração própria.

▲ Conformação do Aço Longo

A [Tabela D.18](#) abaixo mostra a LCI da conformação do aço longo.

Tabela D.18 – Inventário do processo de conformação em aço longo

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Raw Long Steel	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,027874
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	1,396551
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,46561
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,13439
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,056354

Fonte: Elaboração própria.

▲ Tratamento térmico

A [Tabela D.19](#) abaixo lista o LCI do tratamento térmico.

Tabela D.19 – Inventário do processo de tratamento térmico

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Thermal Treated Steel	Processo do Modelo	kg	1,00000

Tabela D.19 – Inventário do processo de tratamento térmico

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,018583
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	0,931
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,3104
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,0896
I	Nitrogen P	Processo do Modelo	kg	0,07500
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,19347

Fonte: Elaboração própria.

▲ Zincagem

Neste processo foi considerada a energia utilizada na zin-

cagem sem o zinco, que, precisa ser adicionado separadamente. As [Tabelas D.20](#) e [D.21](#) mostram os LCIs para a zincagem.

Tabela D.20 – Inventário do processo de zincagem por imersão

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	HDM Coated Sheet	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Zinc	fda4a6cf-14d2-3528-8259-ce1508618511	kg	0,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,023228
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	1,163793
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,388009
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,111991
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,046961

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.21 – Inventário do processo de zincagem eletrolítica

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	EM Coated Sheet	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Zinc	fda4a6cf-14d2-3528-8259-ce1508618511	kg	0,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,042739
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	2,141379
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,713936
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,206064
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,086409

Fonte: Elaboração própria.

▲ Conformação do Aço fora das Siderúrgicas (nas Autopeças e nas Montadoras)

As [Tabelas D.22](#), [D.23](#) e [D.24](#) mostram o LCI para a conformação do aço fora das siderúrgicas.

Tabela D.22 – Inventário do processo de fundição/extrusão

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Finished Long Steel	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Natural gas	72ffd107-b4d9-5da4-b4ea-634a75c97d32	m3	0,011614
I	Process gas	Processo do Modelo	MJ	0,581896
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,023491

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.23 – Inventário do processo de usinagem

Tipo	Nome	Processo	Unidade	Quantidade
O	Machined Steel	Processo do Modelo	kg	1,00000
I	Electricity Grid	7752ad66-b499-4de2-be47-b5666ceb7435	MJ	0,90018
I	Electricity P	Processo do Modelo	MJ	0,25982
GEE	GEE		kg CO ₂ e	0,00000

Fonte: Elaboração própria.

Tabela D.24 – Consumo de matérias-primas do anuário estatístico 2024 do Instituto Aço Brasil

Insumo/Input	Unidade/Unit	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Minérios e Fundentes/Ores and Fluxes							
Minério de Ferro/Iron Ore	10 ³ t	32.908	28.017	26.921	27.684	26.443	25.684
Pellets	10 ³ t	11.811	9.434	7.082	11.622	10.461	9.885
Sinter	10 ³ t	30.761	27.173	25.754	26.903	25.891	25.699
Minério de Manganês/Manganese Ore	10 ³ t	126	122	109	101	78	67
Calcário/Limestone	10 ³ t	3.426	2.321	2.332	2.613	2.428	2.214
Dolomita/Dolomite	10 ³ t	1.823	1.967	1.544	1.918	1.707	1.618
Cal/Lime	10 ³ t	2.914	2.416	2.177	2.489	2.584	2.595
Fluorita/Fluorite	t	13.220	10.770	9.840	7.169	27.010	18.480
Carvão e Coque/Coal and Coke							
Carvão Vegetal/Charcoal	10 ³ t	1.414	1.717	1.573	1.746	1.697	1.454
Carvão Mineral Coquificável/Coking Coal	10 ³ t	10.789	8.346	9.016	9.603	8.358	8.643
Carvão PCI/PCI Coal	10 ³ t	4.282	3.789	3.066	3.921	3.766	3.793
Coque/Coke	10 ³ t	12.517	9.266	7.706	9.038	8.555	8.349
Coque de Petróleo/Petroleum Coke	10 ³ t	1.340	1.496	1.443	1.247	1.263	1.100
Metálicos e Ligas/Metallics and Alloys							
Ferro-Gusa/Pig Iron	10 ³ t	28.762	24.392	21.853	25.243	23.914	23.394
Sucata de Ferro e Aço/Iron and Steel Scrap	10 ³ t	9.227	7.788	7.957	9.328	8.972	7.787
Ferroligas/Ferroalloys	t	523.006	436.304	407.376	440.218	465.128	433.265
Insumos Energéticos/Energy Inputs							
Gás Natural/Natural Gas	10 ⁶ Nm ³	1.249	830	806	954	927	906
GLP/LPG	t	17.710	10.710	13.120	32.490	11.630	15.050

Tabela D.24 – Consumo de matérias-primas do anuário estatístico 2024 do Instituto Aço Brasil

Óleo Combustível/Fuel Oil	t	14.140	7.250	9.130	10.670	8.420	6.310
Energia Elétrica/Electric Power	10 ³ MWh	18.830	14.715	13.453	16.417	15.529	13.876
Oxigênio/Oxygen	10 ⁶ m ³	3.505	3.005	2.613	3.743	2.983	2.956
Outros Insumos/Other Inputs							
Alumínio/Aluminum	t	55.760	44.380	38.690	53.593	87.620	86.190
Carbureto de Cálcio/Calcium Carbide	t	11.960	10.408	13.575	15.170	37.100	22.230
Carbureto de Silício/Silicon Carbide	t	14.950	9.911	5.730	6.780	9.420	5.430
Eletrodos de Grafite/Graphite Electrodes	t	13.750	11.920	11.283	13.970	13.870	11.357

Fonte: Anuário Estatístico IABR, (2024).

 **Anexo V – Detalhamento dos fatores de emissão e requisitos da qualidade dos dados**

Anexo VI – Modelo de massas

Este anexo foi extraído do artigo a ser publicado “Modeling decarbonization strategies for the Brazilian light vehicle sector” de autoria: Paulo Sergio Pinheiro Lima[1], Ricardo Simões de Abreu, Joaquim Eugênio Abel Seabra, Diogo Betti Tavano, Leonardo Henrique Pastre e Marcelo Pereira da Cunha.

▲ Composição do veículo: sistemas e grupos de sistemas

Considerando as particularidades das tecnologias adotadas, torna-se possível correlacionar com boa precisão a participação de materiais como aço, alumínio, cobre e lítio na composição de sistemas como motores a combustão, motores elétricos, carrocerias e baterias. Como o porte relativo de cada um desses sistemas pode variar significativamente em função da configuração de cada veículo, especialmente quando se comparam diferentes tipos de motorização, ainda que a composição relativa de materiais em sistemas equivalentes tenda a permanecer relativamente estável, a composição final de materiais do veículo, resultante da combinação e do dimensionamento dos sistemas que o compõem, pode variar de forma substancial.

Por exemplo, a participação percentual de cobre na massa total varia muito mais quando comparamos um veículo elétrico com um veículo a combustão do que quando comparamos um motor elétrico de 60 kW com outro semelhante de 80 kW, mesmo que as massas desses dois motores sejam diferentes. Por essa razão, trabalhar com listas de composições de materiais, ou “receitas de materiais”, para o veículo como um todo a fim de estimar emissões de GEE exigiria uma “receita” para cada configuração de veículo associada

à sua massa total, enquanto adotar “receitas” por sistema e ponderá-las pelas massas desses sistemas reduz significativamente o número de “receitas” necessárias para alcançar um resultado de qualidade equivalente.

As receitas por sistema podem ser adicionadas à biblioteca de receitas, aprimorando progressivamente a precisão do cálculo conforme se tornam disponíveis. Por exemplo, para o sistema “motores a combustão” poderiam existir diferentes “receitas de composição de materiais” para motores tradicionais e motores turbo, e para motores com bloco de alumínio e com bloco de ferro fundido. Como outro exemplo, para o sistema “carroceria” também poderiam existir várias receitas para representar soluções baseadas no uso mais intensivo de aço convencional, no uso de aços de baixa liga e alta resistência, no uso de alumínio e no uso de compósitos de fibra de carbono ou fibra de vidro, entre outras.

Mesmo considerando a conveniência de elaborar várias receitas de composição de materiais por sistema, essa abordagem ainda exige muito menos do que uma receita para cada configuração de veículo e produz um resultado muito mais preciso do que uma receita média por categoria de veículo. Além do benefício de exigir menos “receitas”, a subdivisão do veículo em sistemas facilita a simulação de alternativas por meio de composição e interpolação das possibilidades disponíveis, incluindo a substituição de materiais em função de projetos, bem como a gestão da contabilização das emissões de cada um deles, ao também subdividir a cadeia de suprimentos em subgrupos associados aos sistemas.

O simulador utilizado neste trabalho adotou os grupos de sistemas do modelo GREET de cálculo de emissões de GEE, pois há informações sobre a composição de materiais associadas a esses grupos:

Tabela F.1 – Grupos de sistemas do GREET

Grupos de Sistemas GREET (adotado pela Bright)	
A	Corpo: incluindo BIW, interior, exterior e vidros
B	Estrutura (sem bateria)
C	Motor de tração
D	Sistema de "Trem de Força" (Powertrain incluindo BOP)
E	Sistema de transmissão / caixa de câmbio
F	Gerador de Eletricidade
G	Controlador Eletrônico
H	Sistema auxiliar de célula a combustível
I _{aux}	Bateria chumbo-ácido
I _{princ}	Bateria íon-lítio
J	Carregador de Bateria embarcado
K	Fluídos

Fonte: Modeling decarbonization strategies for the Brazilian light vehicle sector.

Para escolher os sistemas que compõem cada grupo de sistemas, detalhados no próximo tópico, além de garantir consistência com as informações bibliográficas do GREET, deu-se preferência a conjuntos que atendessem a 3 critérios: (1) pudessem ser associados a uma grandeza característica informada pelas montadoras (como potência do motor, capacidade da bateria, diâmetro do aro da roda, dimensões do veículo), (2) tivessem informações disponíveis sobre suas massas associadas às respectivas grandezas características e (3) fossem preferencialmente fornecidos por um ou poucos elos da cadeia

automotiva (para, no futuro, facilitar o uso do sistema de gestão de suporte à compra IMDS, adotado no Brasil como padrão da indústria, cuja evolução proposta é incluir informações de emissões de GEE na metodologia CATENA-X).

▲ Massa dos sistemas do veículo: simulador de massa

Para estimar as massas de cada sistema, que geralmente não são informadas pelas montadoras, o simulador utiliza a seguinte equação:

→| **Figura F.1 – Equação de estimativa de massa dos sistemas**

$$M_{ei} = M_{Ri} * \left(\frac{GC_i}{GC_{Ri}} \right)^{\beta_i}$$

Para cada sistema "i" (IDS de 1 a 36)

M_{ei} = massa desejada extrapolada

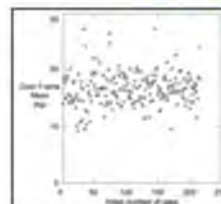
GC_i = grandeza característica conhecida

M_{Ri} = massa referencial

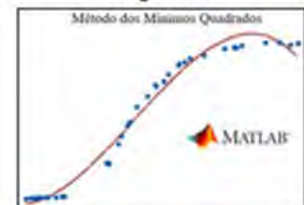
GC_{Ri} = grandeza característica referencial

β_i = exponencial de extrapolação

Identificação dos dados e escolha dos referenciais M_{Ri} e GC_{Ri}



Cálculo dos β_i por Regressão



Fonte: Modeling decarbonization strategies for the Brazilian light vehicle sector.

Os parâmetros do simulador, calculados de acordo com a equação acima, foram revisados até que as somas das massas estimadas de todos os sistemas ficassem suficientemente pró-

ximas das massas totais conhecidas de veículos com diferentes configurações disponíveis no mercado. A tabela a seguir lista os sistemas resultantes e seus parâmetros calibrados:

Figura F.2 – Parâmetros de estimativa de massa

GREET	IDS	Sistemas de Veículos	M_{Ri}	β_i	GC_{Ri}	Grandeza Característica (Parâmetro Chave)	Unidade
		R1 Carroceria					
A	1	Corpo da Carroceria	379	0,35	12,0	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ³
A	2	Capô e portas	39	0,89	9,0	fA=Área Carro (ComprimentoXLargura)	m ²
A	3	Revestimentos e Acabamentos Diversos	10	0,60	14,6	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ³
A	4	Acabamentos Internos	34	0,60	14,6	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ³
A	5	Equipamentos de Segurança	10	1,00	10,0	Número de "Air Bags"	un
A	6	Bancos e Acessórios	54	1,00	5,0	Número de Lugares	un
A	7	Vidros	46	0,60	14,6	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ³
A	8	Pintura	12	0,60	14,6	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ³
		R2 Estrutura/Chassis					
B	9	Chassis	40	0,60	14,6	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ² *m
A	10	Barras Estruturais Adicionais	38	1,99	9,0	fA=Área Carro (ComprimentoXLargura)	m ²
		R3 Rodas e pneus					
B	11	Aro/roda (kit)	53	3,17	16,0	Tamanho da Roda	polegadas
B	12	Pneu (kit)	45	1,57	16,0	Tamanho da Roda	polegadas
		R4 Transmissão de Potência					
B	13	Mecanismos de Transmissão de Potência	74	0,60	912	fR = Robustez (PotênciaXfAXfTXfH)	KW*m ² *fT*fH
B	14	Sistema de Direção	22	0,60	912	fR = Robustez (PotênciaXfAXfTXfH)	KW*m ² *fT*fH
B	15	Freios	44	0,32	810	fR = Robustez (PotênciaXfAXfTXfH)	KW*m ² *fT*fH
B	16	Suspensão	20	0,14	810	fR = Robustez (PotênciaXfAXfTXfH)	KW*m ² *fT*fH
		R5 Sistemas Elétricos de Suporte	14.715	13.453	16.417	15.529	13.876
laux	17	Bateria e Proteção	17	0,84	0,8	Capacidade da Bateria para Utilidades	kWh
A	18	Ar-Condicionado e Ventilação	20	0,60	20000	Capacidade do Ar-Condicionado	BTU
A	19	Iluminação e Sinalização	10	0,60	14,6	fB = Tamanho do Carro (ÁreaXAltura)	m ³
A	20	Painel e Instrumentação Eletrônica	54	0,60	5,0	Complexidade da Instrumentação	adimensional
		R6 Geração de Potência a Combustão					

Figura F.2 – Parâmetros de estimativa de massa

GREET	IDS	Sistemas de Veículos	M_{Ri}	β_i	GC_{Ri}	Grandeza Característica (Parâmetro Chave)	Unidade
D	21	Motor de Combustão Interna	107	0,61	100,0	Potência do Motor a Combustão Interna	kW
D	22	Sistema de Arrefecimento	7	0,25	100,0	Potência do Motor a Combustão Interna	kW
E	23	Caixa de Câmbio e Embreagem	62	0,68	90	Potência do Motor a Combustão Interna	kW
D	43	Módulo de Combinação Híbrida	34	0,68	110,0	Potência Combinada	kW
D	24	Sistema Elétrico da Motorização	10	0,60	100,0	Potência do Motor a Combustão Interna	kW
D	25	Motor de Partida	3	0,86	1,2	Potência do Motor de Arranque	kW
H	26	Tanque de Combustível e Acessórios	0	0,80	50,0	Tanque para Combustível Líquido	litros
D	27	Sistema de Alimentação de Combustível	9	0,16	100,0	Potência do Motor a Combustão Interna	kW
D	28	Sistema de Exaustão & Catalizador	53	0,59	80,0	Potência do Motor a Combustão Interna	kW
R7		Geração de Potência Elétrica					
C	29	Motor Elétrico	32	1,36	100,0	Potência do Motor Elétrico	kW
F	30	Gerador de Eletricidade	41	0,89	100,0	Gerador de Eletricidade	kW
E	31	Caixa de Transmissão	33	0,68	150,0	Potência do Motor Elétrico	kW
G	32	Inversor de Frequência	24	0,49	100,0	Potência do Motor Elétrico	kW
G	33	Sistema de Gerenciamento Elétrico	10	0,60	100,0	Potência do Motor Elétrico	kW
J	34	Carregador de Bateria	7	1,02	6,6	Onboard Battery Charger	kW
D	35	Sistema de Gestão Térmica da Bateria	7	1,00	100,0	Peso da Bateria	kg
lprinc	36	Bateria	356	0,96	60,0	Capacidade da Bateria	kWh

Fonte: Modeling decarbonization strategies for the Brazilian light vehicle sector.

Foi realizada uma comparação entre as estimativas de massa do simulador e as massas reais dos veículos para 26 veículos representativos do mercado brasileiro, conforme mostrado na Tabela A-26, resultando em um erro médio de menos 0,9%, desvio padrão de 3,4%, erro máximo positivo de 4,6% e erro mínimo de menos 5,8%. A diferença residual entre as massas estimadas e aquelas informadas pela montadora é alocada pelo simulador à carroceria e ao chassi dos veículos (na maioria dos veículos, a carroceria cumpre a função de chassi, que só existe como elemento separado em alguns tipos de picapes e SUVs), resultando em uma massa total idêntica à informada. Essa metodologia, quando aplicada aos veículos disponíveis no GREET, resultou em diferenças nas emissões totais das motorizações ICEV, HEV e BEV inferiores a 2%.

O objetivo do modelo não é estimar a massa total de cada veículo, pois esses valores geralmente são conhecidos, mas sim determinar com precisão a distribuição de massa entre seus sistemas individuais. Esse nível de precisão é crucial porque os dados de composição de materiais estão disponíveis separadamente para cada sistema, permitindo um cálculo mais preciso da quantidade total de cada material utilizada no veículo. É importante notar, por exemplo, que dois veículos elétricos com massas totais semelhantes podem diferir significativamente em atributos-chave como dimensões, potência do motor e capacidade da bateria. Essas diferenças levam a variações substanciais na composição de materiais, reforçando ainda mais a necessidade de uma avaliação de massa detalhada e específica por sistema.

Tabela F.3 – Comparação entre o Peso Simulado e o Peso Real de 26 Veículos Representativos

Receita de Materiais Adotada	Veículo	Potência do Motor a Combustão Interna (kW)	Potência do Motor Elétrico (kW)	Capacidade da Bateria (kWh)	Diâmetro das Rodas (polegadas)	Área do Carro (comprimento x largura) (m ²)	Volume do Tanque de Combustível (litros)	Potência da Célula de Combustível (kW)	Peso Real (kg)	ID da Bateria de Ion Lítio	Peso Bateria (kg)	GHG estimado pelo modelo (kgCO ₂ e)	Peso estimado pelo modelo (kg)	Diferença entre Peso Real e Estimado (%)
ICEV-G01	Chevrolet Onix	60	0	0	14	7	44	0	1,049	-	0	4,189	1,082	3.1%
BEV-G04	Volvo C40	0	300	82	20	9	0	0	2,185	G22-BEV300-NMC111	519	11,696	2,136	-2.2%
ICEV-G01	Volkswagen T-Cross 250TSI 1.4	110	0	0	17	7	52	0	1,343	-	0	4,900	1,296	-3.5%
HEV-G02	Toyota Corolla	74	53	1	17	8	43	0	1,445	G22-HEV-NMC111	32	4,763	1,394	-5.6%
ICEV-BISD2	VW Polo	80	0	0	15	7	49	0	1,111	-	0	4,588	1,138	2.5%
ICEV-BISD3	Fiat Argo	72	0	0	15	7	47	0	1,077	-	0	4,328	1,112	3.3%
HEV-BISD6	Kia Stonic	87	7	0	17	7	45	0	1,256	G22-HEV-NMC111	4	4,396	1,258	0.1%
HEV-BISD6	Cherry Tiggo 5x	110	7	2	18	8	51	0	1,454	G22-HEV-NMC111	4	4,919	1,436	-1.2%
HEV-BISD6	Honda Civic Hybrid	105	135	1	18	8	40	0	1,500	G22-HEV-NMC111	82	5,298	1,539	2.6%
PHEV-BISD8	Volvo XC60	228	107	19	19	9	71	0	2,120	G22-PHEV50-Ni-MH	355	8,197	2,170	2.4%
PHEV-BISD8	Audi Q5	185	105	18	19	9	54	0	2,075	G22-PHEV50-Ni-MH	338	7,637	2,002	-3.5%
SHEV-BISD7	BMW i3 Rex	28	125	27	19	7	9	0	1,365	G22-SPHEV20-NMC622	270	4,795	1,428	4.6%
BEV-BISD12	Nissan Leaf	0	160	62	17	8	0	0	1,620	G22-BEV200-NMC111	459	9,119	1,590	-1.8%
BEV-BISD12	Renault Zoe	0	100	52	17	7	0	0	1,502	G22-BEV200-NMC111	385	8,026	1,428	-4.9%
FCV-G05	Toyota Mirai	0	128	1	19	9	0	128	1,930	G22-FCV-NMC111	74	10,848	2,004	3.8%
BEV-BISD12	BYD TAN	0	380	109	22	10	0	0	2,479	G22-BEV300-LFP	819	14,970	2,577	4.0%
BEV-BISD12	BYD SEAL	0	391	83	19	9	0	0	2,185	G22-BEV200-LFP	716	12,457	2,253	3.1%
BEV-BISD12	BYD DOLPHIN	0	70	45	16	7	0	0	1,405	G22-BEV200-LFP	390	7,264	1,323	-5.8%
PHEV-BISD8	VOLVO XC90	228	107	19	20	10	70	0	2,317	G22-PHEV50-Ni-MH	358	8,426	2,249	-2.9%
PHEV-BISD8	VOLVO S60	235	64	12	19	9	60	0	2,055	G22-PHEV50-Ni-MH	219	7,216	1,987	-3.3%
PHEV-BISD8	JEEP RENEGADE 4xe	177	32	11	19	8	36	0	1,844	G22-PHEV50-Ni-MH	215	6,515	1,764	-4.4%
PHEV-BISD9	JEEP COMPASS 4xe	177	44	11	19	8	36	0	1,935	G22-PHEV50-Ni-MH	215	6,697	1,823	-5.8%
ICEV-BISD3	VW PASSAT	206	0	0	17	9	66	0	1,645	-- X --	0	6,013	1,612	-2.0%
BEV-BISD11	BYD DOLPHIN MINI	0	55	38	16	6	0	0	1,239	G22-BEV200-LFP	330	6,527	1,215	-1.9%
ICEV-BISD3	Porsche Macan	195	0	0	20	10	65	0	1,920	-- X --	0	6,601	1,813	-5.6%
HEV-BISD6	Mercedes GLE53AMG	320	16	0	20	11	94	0	2,230	G22-HEV-NMC111	10	7,216	2,209	-0.9%

Fonte: Modeling decarbonization strategies for the Brazilian light vehicle sector.

É importante reforçar que o método desenvolvido possui natureza dinâmica, exigindo revisões periódicas de seus parâmetros para que continue representando adequadamente o universo de veículos analisado. Essa atualização é especialmente necessária para refletir fielmente os modelos mais licenciados em um determinado período, assegurando a inclusão de representantes das diversas tecnologias de motorização (ICEV, HEV, PHEV e BEV), tamanhos (compactos, médios e grandes) e tipos de carroceria (hatch, sedan e SUV). As quantidades de materiais necessárias para a fabricação dos diferentes sistemas veiculares variam de projeto para projeto, sendo influenciadas por múltiplos fatores. Entre eles, destacam-se as características tecnológicas das soluções adotadas, os materiais selecionados, a qualidade do projeto e os coeficientes de segurança empregados. Essa variabilidade torna-se particularmente evidente nos sistemas de baterias dos veículos elétricos, uma vez que essas tecnologias evoluem rapidamente e frequentemente incorporam novas composições de materiais, visando ganhos em custo e densidade energética. Tais mudanças impactam diretamente as quantidades relativas de cada material necessárias para se atingir uma mesma capacidade energética em kWh. Embora em ritmos distintos, transformações similares ocorrem em outros sistemas veiculares, como na busca por motores a combustão mais eficientes e com melhor desempenho, ou na substituição de materiais estruturais com o objetivo de reduzir o peso do veículo. À medida que essas inovações tecnológicas se consolidam, torna-se necessário revisar os parâmetros utilizados para estimar a massa de cada sistema, bem como atualizar as "receitas" de composição relativa de materiais, de forma a manter a precisão e atualidade das estimativas.

▲ Equações utilizadas no cálculo do simulador de massas

Equação 1: cálculo da Grandeza (*unidades diversas*) que Caracteriza cada Sistema que compõe um Veículo (exemplo: um motor pode ser caracterizado por sua potência), sendo esta grandeza derivada dos parâmetros que caracterizam o Veículo disponíveis no Manual do Proprietário

$$GCsv = f(Ppv)$$

GCsv: Grandeza Característica para o Sistema *s* do Veículo *v* (Tab.SM.III.2 do Anexo VI)

Ppv: Parâmetro *p* de caracterização do Veículo *v* (Tab.5.1)

Equação 2: cálculo da Massa Estimada em kg/Sistema que compõe o Veículo, sendo que os parâmetros utilizados foram obtidos por regressão numérica à partir de dados disponíveis e/ou estimados calibradas para produzirem resultados compatíveis com os pesos de veículos de mercado. A Massa Estimada para as Baterias dos Veículos Eletrificados foram substituídas pela Capacidade da Bateria em kWh multiplicado pelo parâ-

metro kg/kWh disponível no Processo de Produto da bateria escolhida para cada Veículo disponível no Ecoinvent

$$MEsv = MRs*(GCsv/GCRs)^{\beta s}$$

MEsv: Massa Estimada do Sistema *s* do Veículo *v* (ND)

MRs: Massa Referencial do Sistema *s* do Veículo *v* (Tab. SM.III.2 do Anexo VI)

GCRs: Grandeza Característica Referencial para o Sistema *s* (Tab.SM.III.2 do Anexo VI)

GCsv: Grandeza Característica para o Sistemas do Veículo *v*

βs : Parâmetro para extrapolação de massa para o Sistema *s* (Tab.SM.III.2 do Anexo VI)

Equação 3: cálculo da Massa Estimada em Kg/Veículo à partir das Massas estimadas para cada Sistema, sendo a diferença entre o peso conhecido e estimado do veículo alocada no conjunto Corpo/Chassi do Veículo

$$MEv = \sum(MEsv)$$

MEv: Massa Estimada do Veículo *v* (ND)

MEsv: Massa Estimada do Sistemas do Veículo *v*

Equação 4: cálculo da Massa Estimada em Kg/Grupo de Sistemas que compõe o veículo, considerando que o "Grupamento" de Sistemas seguiu o mesmo critério utilizado pelo GREET em suas receitas de materiais e adotado pela Bright para este Projeto

$$MEgsv = \text{Soma}(MEsv)$$

MEgsv: Massa Estimada do Grupo de Sistema *gs* do Veículo *v* (Tab.5.2)

MEsv: Massa Estimada do Sistema *s* do Veículo *v* que pertencem ao Grupo de Sistema *gs*

Equação 5: cálculo da Massa estimada em Kg/Material no Grupo de Sistemas para cada Grupo de Sistemas que compõe o Veículo

$$MEmgsv = \%Mmgs*MEgsv$$

MEmgsv: Massa Estimada do Material *m* no Grupo de Sistemas *gs* do Veículo *v* (ND)

$\%Mmgs$: % da Massa do Grupo de Sistemas *gs* composta pelo Material *m* estimada na Receita t adotada para o Veículo *v* (Tab.A.1 do Anexo I)

MEgsv: Massa Estimada do Grupo de Sistemas do Veículo *v*

Equação 6: cálculo da Massa Estimada em Kg/Veículo à partir das Massas Estimadas para cada Grupo de Sistemas (mesmo resultado que a Equação 3, realizado para verificação de integridade)

$$MEv = \sum(MEsv)$$

MEv: Massa Estimada do Veículo v (Tab.5.1)

MEsv: Massa Estimada do Sistema s do Veículo v

Equação 7: cálculo da Massa Estimada em Kg/Material no Veículo para cada Material que compõe o Veículo

$$MEmv = \text{Soma}(MEMmgsv)$$

MEMv: Massa Estimada do Material m no Veículo v (Tab.5.3)

MEMmgsv: Massa Estimada do Material m no Grupo de Sistemas gs do Veículo v

Anexo VII – Formulários de coleta de dados enviados (planilha Excel)

Acesse a planilha Excel com detalhamento dos fatores de emissão e requisitos da qualidade dos dados:

<https://drive.google.com/drive/folders/1lkwflDs81Bu2wWuS4ZBd5NoEaYKQ8os>

Anexo VIII – Revisão crítica

▲ 1. Identificação da Revisão Crítica

Nome do estudo

Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil: Resultados e premissas do Projeto “Do Berço ao Portão”

Nome dos relatórios avaliados

- 1) Versão Original disponibilizada: Produto 3.4 - Relatório Final_vFINAL_26.01.26
- 2) Versão com devolutivas após 1ª Rodada: Produto 3.4 - Relatório final_13.03.26_Rev Eco_1ª Rodada_vF
- 3) Versão com devolutivas após 2ª Rodada: Produto 3.4 - Relatório Final_14.04.26_Rev Eco_2ª Rodada_vF

Instituições executoras do estudo

- Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas – FGVces / FGV EAESP
- Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas – FEM / UNICAMP

Instituição responsável pela revisão crítica

- Fundação Eco+

Equipe de revisão crítica

- Eduardo Toshio Sugawara
eduardo.toshio-sugawara@basf.com
- Ana Carolina Godoy Albino
carolina.godoy@basf.com

Período da revisão crítica

Data inicial: 26/01/2026

Data final: 24/04/2026

▲ 2. Tipo e escopo da revisão crítica

A presente revisão crítica foi conduzida por especialistas em Avaliação de Ciclo de Vida, com base nas normas ISO 14040, ISO 14044 considerando também os aspectos da ISO 14067 aplicáveis ao estudo, por se tratar de um estudo de pegada de carbono de produto.

O objetivo da revisão crítica foi avaliar se:

- os métodos utilizados para conduzir o estudo são consistentes com os princípios e requisitos aplicáveis das normas de ACV;
- os métodos utilizados são científica e tecnicamente válidos;
- os dados utilizados são apropriados e razoáveis em relação ao objetivo e escopo do estudo;
- as interpretações refletem adequadamente as limitações identificadas e o objetivo do estudo; e
- se o relatório é transparente, coerente e tecnicamente consistente.

O escopo desta revisão contemplou a análise crítica do relatório do estudo e de suas versões revisadas ao longo do processo. Não fizeram parte do escopo desta revisão:

- auditoria independente das bases de dados utilizadas;
- verificação direta do modelo em software;
- reexecução integral dos cálculos;
- verificação documental primária de todos os dados fornecidos por terceiros.

▲ 3. Processo de revisão crítica

O processo de revisão crítica foi conduzido em rodadas iterativas, compreendendo:

- leitura técnica e avaliação crítica da versão inicial do relatório;
- emissão de comentários metodológicos, técnicos, de interpretação e de transparência;
- recebimento e análise das respostas dos autores;
- avaliação das versões revisadas do relatório;
- consolidação das principais observações remanescentes;
- emissão desta declaração final de revisão crítica.

▲ 4. Conclusões da revisão crítica

O estudo revisado tem como objetivo quantificar as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção de veículos leves fabricados no Brasil, no escopo berço-ao-portão, com foco na categoria de impacto Mudança Climática. Trata-se de um estudo com finalidade técnica e setorial, com potencial uso como suporte metodológico e informacional para discussões regulatórias, setoriais e de rastreamento de emissões na cadeia automotiva brasileira.

Com base na versão final avaliada, entende-se que o estudo apresenta estrutura metodológica compatível com ACV de categoria única e com o objetivo proposto e evoluiu de forma relevante em transparência, clareza metodológica e rastreabilidade ao longo das rodadas de revisão.

Entretanto, ao término do processo de revisão, permaneceram ressalvas metodológicas pontuais, que devem ser registradas para fins de transparência e melhoria futura. Cabe destacar que mesmo que não atendidas por parte dos executantes, não invalidam os resultados e qualidade estudo dentro do objetivo e escopo proposto.

▲ 4.1. Escolha do referencial metodológico

Por ser intitulado como um estudo de Pegada de Carbono, idealmente o mesmo deveria adotar a ISO 14067 (específico para Pegada de Carbono de Produto) como referencial primário. A escolha das ISOs 14040 e 14044 (específicas para estudos de Avaliação de Ciclo de Vida) foi justificada por questões de alinhamento com o edital de pesquisa que originou o projeto. Apesar do estudo ser intitulado como Pegada de Carbono, os autores justificaram que não deve ser representativo de estudo com foco na ISO 14067, mas sim como “indicador que representa a soma das emissões de gases de efeito estufa ao longo das etapas do ciclo de vida consideradas, conforme as diretrizes das normas ISO 14040 e 14044 adotadas”. Os revisores entendem que o uso do termo Pegada de Carbono quando

o estudo é proclamado como de ACV – ainda que explicitamente descrito de categoria única – acarreta confusão conceitual e certa incoerência entre a devida aplicação das normas da família ISO para ACV e Pegada de Carbono de Produto.

▲ 4.2. Procedimentos de alocação

O estudo apresenta justificativas técnicas para o uso de diferentes critérios de alocação, incluindo alocação econômica em inventários adaptados de bases secundárias e alocação física por energia ou massa em inventários originais. Contudo, não foi apresentada informação quanto à aplicação da hierarquia prevista nas normas ISO 14040/14044, especialmente quanto à demonstração de tentativa de evitar alocação por subdivisão de processos ou expansão do sistema, uma vez que as normas indicam que alocação deve ser preferencialmente evitada.

▲ 4.3. Critério de corte

Em relação à critério de corte é relatada sua aplicação para casos de baixa representatividade e avaliada tanto em termos de massa quando de significância ambiental – conforme recomenda a ISO. Porém, não foram apresentados detalhes das avaliações feitas desses dois critérios para verificação. Dessa forma, os revisores entendem que para os casos em que o critério de corte foi aplicado, apesar da falta de transparência apontada, não é esperado que sua adequabilidade influencie significativamente os resultados encontrados.

4.4. Tratamento do carbono biogênico e emissões de dLUC

Os autores adotaram a ISO 14067 para endereçar boa parte das questões que esta norma é mais específica que as ISOs de ACV. No entanto, em relação à quantificação e ao reporte separado de emissões, remoções e fluxos de carbono biogênico, a ISO de Pegada de Carbono de Produto foi deliberadamente ignorada, sem uma justificativa da sua não adoção neste caso particular.

Adicionalmente, a avaliação de que as emissões associadas à mudança direta do uso da terra (dLUC) teriam baixa representatividade nos processos modelados não foi suficientemente embasada no relatório, permanecendo pouco claros quais critérios ou evidências sustentam essa conclusão.

Considerando que o sistema de produto analisado não contempla quantidades expressivas de materiais de origem renovável, os revisores entendem que as limitações acima apontadas não devem exercer influência significativa nas emissões de GEE calculadas.

5. Parecer final

Considerando o escopo da revisão crítica realizada, a do-

cumentação disponibilizada e as versões revisadas do relatório avaliadas ao longo do processo, conclui-se que o estudo apresenta **consistência metodológica geral**, sendo **tecnicamente válido** para o objetivo proposto e **adequadamente estruturado** segundo os princípios e requisitos aplicáveis das normas **ISO 14040** e **ISO 14044**, com apoio complementar da **ISO 14067** nos aspectos específicos adotados pelo estudo.

Essas ressalvas devem ser consideradas na leitura, interpretação e eventual uso dos resultados, mas **não impedem a emissão do presente parecer final de revisão crítica** para a versão avaliada do relatório.

Acesse a tabela consolidada da planilha de comentários:

<https://drive.google.com/drive/folders/1lkwkfIDs81Bu2w-WuS4ZBd5NoEaYkQ8os>

Eduardo Toshio Sugawara

Eduardo Toshio Sugawara (Apr 24, 2026 09:52:37 ADT)

Eduardo Toshio Sugawara
Coordenador de Sustentabilidade
Fundação Eco+

Ana Carolina Godoy Albino

Ana Carolina Godoy Albino (Apr 24, 2026 09:51:35 ADT)

Ana Carolina Godoy Albino
Analista de Sustentabilidade Aplicada
Fundação Eco+



do berço ao portão

PEGADA DE CARBONO DE VEÍCULOS LEVES FABRICADOS NO BRASIL

FGV EAESP
CENTRO DE ESTUDOS
EM SUSTENTABILIDADE



UNICAMP



FEM



Coord. Técnica Linha V

Coordenadora Linhas IV, V e VI

PROGRAMA PRIORITÁRIO - LINHA V:
**BIOCOMBUSTÍVEIS, SEGURANÇA
E PROPULSÃO VEICULAR**



fundep fundação de
apoio da UFMG

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA,
COMÉRCIO E SERVIÇOS

