

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: Sumário Executivo

Junho de 2026

FGV EAESP
CENTRO DE ESTUDOS
EM SUSTENTABILIDADE



UNICAMP



FEM

Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil [recurso eletrônico] : sumário executivo / Escola de Administração de Empresas de São Paulo. Centro de Estudos em Sustentabilidade. - São Paulo : FGVces, 2026.
45 p.

1. Desenvolvimento sustentável. 2. Indústria automobilística - Brasil. 3. Redução de gases do efeito estufa. I. Fundação Getulio Vargas.

CDU 629.1(81)

Ficha catalográfica elaborada por: Cristiane de Oliveira CRB SP-008061/O
Biblioteca Karl A. Boedecker da Fundação Getulio Vargas - SP

Expediente

REALIZAÇÃO



APOIO



PROJETO

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

RELATÓRIO

Produto 6.2 – Sumário executivo do projeto contendo detalhamento das atividades desenvolvidas, resultados obtidos, recomendações e lições aprendidas

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
Layla Nunes Lambiasi
Letícia Missiatto Gavioli
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: Relatório Final do Projeto "Do Berço ao Portão". Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getulio Vargas e Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, p. 46. 2026.

PARTICIPANTES



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





Sumário

	Expediente	3
1	Introdução e contexto	9
1.1	Sobre o projeto	10
1.2	Sobre este documento	12
2	Cadeia automotiva e avaliação do ciclo de vida	13
2.1	O setor automotivo e sua cadeia produtiva	15
2.2	Engajamento da cadeia automotiva	17
3	Estudo da pegada de carbono de veículos leves	18
3.1	Procedimentos metodológicos	18
3.1.1	Definição de objetivo e escopo	18
3.1.2	Veículos e cenários analisados	21
3.1.3	Metodologia de cálculo	23
3.1.4	Coleta de dados e elaboração de Inventários de Ciclo de Vida	23
3.1.5	Principais limitações	27
3.2	Resultados da pegada de carbono	28
3.2.1	Resultados gerais	29
3.2.2	Análise de cenários e sensibilidades	32
3.2.3	Análise comparativa internacional	35
4	Desafios e aprendizados	38
5	Considerações finais e recomendações	40
	Referências	42

Lista de figuras

Figura 1.1 –	Panorama geral do Projeto “Do Berço ao Portão”	13
Figura 2.1 –	Fases da Avaliação do Ciclo de Vida	15
Figura 2.2 –	Ciclo de vida de um veículo leve	16
Figura 2.3 –	Tipos de veículos eletrificados	20
Figura 2.4 –	Infográfico com panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil	21
Figura 3.1 –	Fronteira do sistema de produto avaliado pelo Projeto	22
Figura 3.2 –	Veículos simulados pelo Projeto “Do Berço ao Portão”	26
Figura 3.3 –	Fluxo de estruturação dos inventários para o cálculo da PC dos veículos	31
Figura 3.4 –	Fluxo de criação e adaptação dos inventários de ciclo de vida	33
Figura 3.5 –	Árvore de decisão para adaptação dos inventários	34
Figura 3.6 –	Esquemático do simulador de massas para criação dos doze veículos avaliados pelo Projeto	37
Figura 3.7 –	Pegada de carbono, do berço-ao-portão, dos doze veículos do Projeto	38
Figura 3.8 –	Contribuição por etapa do ciclo de vida para a pegada de carbono dos doze veículos do Projeto	45
Figura 3.9 –	Pegada de carbono dos doze veículos avaliados pelo Projeto, por material	47
Figura 3.10 –	Contribuição relativa dos materiais para a pegada de carbono dos doze veículos avaliados pelo Projeto	50
Figura 3.11 –	Contribuição relativa dos sistemas dos veículos para a pegada de carbono, do berço-ao-portão	51
Figura 3.12 –	Pegada de carbono dos veículos SUV para diferentes cenários de nacionalização	58
Figura 3.13 –	Resultados da pegada de carbono considerando cenários de maximização de reciclados no Brasil	65
Figura 3.14 –	Variação da pegada de carbono para o cenário de perdas na cadeia do aço	73
Figura 3.15 –	Comparação internacional da pegada de carbono do veículo ICEV-SUV em tCO ₂ eq/veículo	74
Figura 3.16 –	Comparação internacional da pegada de carbono do veículo BEV-SUV em tCO ₂ eq/veículo	75

Lista de tabelas e quadros

Tabela 1.1 –	Principais produtos gerados pelo Projeto “Do Berço ao Portão”	17
Quadro 2.1 –	Diferentes abordagens de um estudo de ACV de veículos	23
Tabela 3.1 –	Principais contornos metodológicos empregados neste estudo .	23
Tabela 3.2 –	Análise de cenários e sensibilidades simulados pelo Projeto “Do Berço ao Portão”	33
Tabela 3.3 –	Pegada de carbono, em kg CO ₂ e por parcela (fóssil, biogênico e MUT)	32
Tabela 3.4 –	Pegada de carbono para os 12 veículos do projeto de acordo com a nacionalização dos materiais	39

Lista de siglas e abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
BEV	Veículo Elétrico a Bateria
BF-BOF	Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace
CO₂e	Dióxido de carbono equivalente
DRI	Direct Reduction Iron
EAFF	Electric Arc Furnace
BF-BOF	Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace
CO₂eq.	Dióxido de carbono equivalente
DRI	Direct Reduced Iron
EAFF	Electric Arc Furnace
EV	Veículo Eletrificado
FCEV	Veículo Elétrico a Célula de Combustível
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
FENABRAVE	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
FGV	Fundação Getulio Vargas
FGVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas
FUNDEP	Fundação de Apoio da UFMG
GEE	Gases de Efeito Estufa
REET	Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HEV	Veículo Elétrico Híbrido
ICEV	Veículo com Motor de Combustão Interna
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ISO	International Organization for Standardization
LFP	Fosfato de ferro-lítio
MACC	Curva de Custo Marginal de Abatimento
MUT	Mudança no Uso da Terra
NBR	Norma Brasileira
NMC	Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto
PC	Pegada de Carbono
PE	Polietileno
PHEV	Veículo Elétrico Híbrido Plug-in
PIB	Produto Interno Bruto
PP	Polipropileno
RoW	Resto do Mundo
SUV	Veículo Utilitário Esportivo
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

1. Introdução e contexto

A dimensão do mercado automotivo brasileiro e a forte dependência do transporte rodoviário têm impactos relevantes sobre o meio ambiente e a saúde pública, especialmente em função das emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (GEE). Nesse contexto, a redução das emissões associadas ao setor de transportes tem se tornado um tema central nas agendas climáticas globais e nacionais, impulsionando transformações tecnológicas e regulatórias no setor automobilístico. Do ponto de vista da competitividade internacional, poderá haver perda de mercado para os países que não atendam a determinados requisitos ambientais, em especial aqueles relacionados à mudança do clima.

Para alinhar o setor de transportes brasileiro às metas climáticas globais e nacionais, torna-se essencial que agentes públicos e privados compreendam com maior clareza os impactos ambientais associados à produção e ao uso de diferentes tecnologias de veículos. Diante disso, metodologias como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e a Pegada de Carbono (PC) têm sido amplamente utilizadas para quantificar impactos ambientais ao longo da cadeia de suprimentos e apoiar processos de tomada de decisão mais informados. Assim, por meio do cálculo extensivo e sistemático, a ACV orienta para potenciais melhorias de processo, apoiando decisões estratégicas no âmbito da sustentabilidade.

Nos últimos anos, foram produzidos diversos estudos de Pegada de Carbono comparando as emissões de GEE de veículos leves, principalmente dentro do escopo poço-à-roda ou berço-ao-túmulo e considerando tecnologias tradicionais (motores a combustão interna) e alternativas (híbridos, elétricos, com uso ou não de baterias, etc). Os estudos mostram que uma parte significativa das emissões ocorrem durante a fase de produção e uso dos combustíveis.

Ainda segundo esses estudos, as emissões da produção de veículos leves constituem uma parcela menos significativa das emissões totais. Por esse motivo, a literatura científica geralmente tem como foco o escopo poço-à-roda ou berço-ao-túmulo, se concentrando, de forma mais ampla, na análise das emissões da produção e consumo de combustível/eletricidade. Muitas vezes esses estudos não representam adequadamente o sistema de manufatura brasileiro, tampouco possuem dados e informações características da etapa de produção dos veículos e seus componentes, com grande parte dos artigos tomando dados genéricos da ferramenta GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies), da literatura ou de bases de dados como o ecoinvent. Percebe-se, portanto, uma notável falta de dados e informações considerando a fronteira do berço-ao-portão.

Por outro lado, o controle da gestão sobre este escopo torna a etapa de produção altamente relevante para as montadoras e possivelmente representam uma vantagem competitiva do Brasil com relação a outros mercados globais, já que a matriz energética brasileira é predominantemente composta por fontes renováveis. Além disso, as emissões de GEE do processo produtivo tendem a se tornar mais significativas à medida que a fase de uso se descarboniza/eletrifica.

Diante deste contexto, em dezembro de 2021, a Fundação de Apoio da UFMG (Fundep), coordenadora da linha V- Biocombustíveis, Segurança e Propulsão Veicular, do programa prioritário Mover (Mobilidade Verde e Inovação), lançou um edital para a submissão de propostas na Chamada Pública Especial nº 01.2021 "Do berço ao portão"¹. É nesse contexto que o Projeto "Do Berço ao Portão: Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil" está inserido.

1 Saiba mais em: <https://mover.fundep.ufmg.br/linha5/linha-v-lancamento-da-chamada-publica-do-berco-ao-portao/>.

1.1 Sobre o Projeto

O Projeto “Do Berço ao Portão” posiciona-se como uma iniciativa estratégica para fortalecer a competitividade e a descarbonização da indústria automobilística brasileira, contribuindo para identificar oportunidades de mitigação ao longo da cadeia de suprimentos e apoiar decisões empresariais e políticas públicas. Entre seus principais resultados, destacam-se o desenvolvimento de inventários e fatores de emissão nacionalizados, bem como da ferramenta setorial “Mover-se”, que ampliam a capacidade de gestão de emissões no setor. Ao evidenciar vantagens comparativas do Brasil, como a matriz energética de baixa intensidade de carbono, o projeto também reforça o potencial do país em um contexto de crescente exigência ambiental global, ao mesmo tempo em que oferece apoio técnico à regulamentação do Programa Mover.

Conduzido entre junho de 2023 e junho de 2026, sob financiamento da Linha V do programa prioritário Mover, com coordenação da Fundep, o Projeto “Do Berço ao Portão”: Pegada de Carbono de veículos leves fabricados no Brasil”, foi executado pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (FGVces – FGV EAESP) em parceria com a Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (FEM – UNICAMP). O foco principal do Projeto foi quantificar e avaliar a pegada de carbono da produção de veículos leves no Brasil, seguindo os requisitos das normas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ISO 14040 e ISO 14044.²

A partir da análise das emissões de GEE desde a extração da matéria-prima até a montagem dos veículos, bem como da identificação das principais diferenças em relação à produção de veículos em outros países (benchmarking internacional), os resultados gerados pelo Projeto podem ser utilizados para apoiar a identificação de oportunidades de redução de emissões de GEE na cadeia de suprimentos automotiva, a avaliação de materiais e tecnologias, a formulação de políticas públicas e o desenvolvimento de instrumentos como a regulamentação do Programa Mover, pavimentando o caminho para a fabricação de veículos mais competitivos que contribuam para a redução das emissões de GEE na atmosfera.

Ressalta-se, contudo, que os resultados não devem ser utilizados para afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente, principalmente em relação à potencial superioridade ou equivalência ambiental de diferentes motorizações, segmentos de veículos ou condições produtivas específicas, uma vez que há limitações relacionadas ao escopo³, impactos ambientais avaliados⁴ e disponibilidade de dados.⁵ Os resultados também não devem ser empregados como valores de referências universais, normativas ou absolutas.

Por fim, o Projeto foi estruturado em 6 etapas e contou com 18 produtos, gerados com o apoio e a participação de uma ampla rede de instituições parceiras. A **Figura 1.1** apresenta um panorama geral do Projeto “Do Berço ao Portão”.



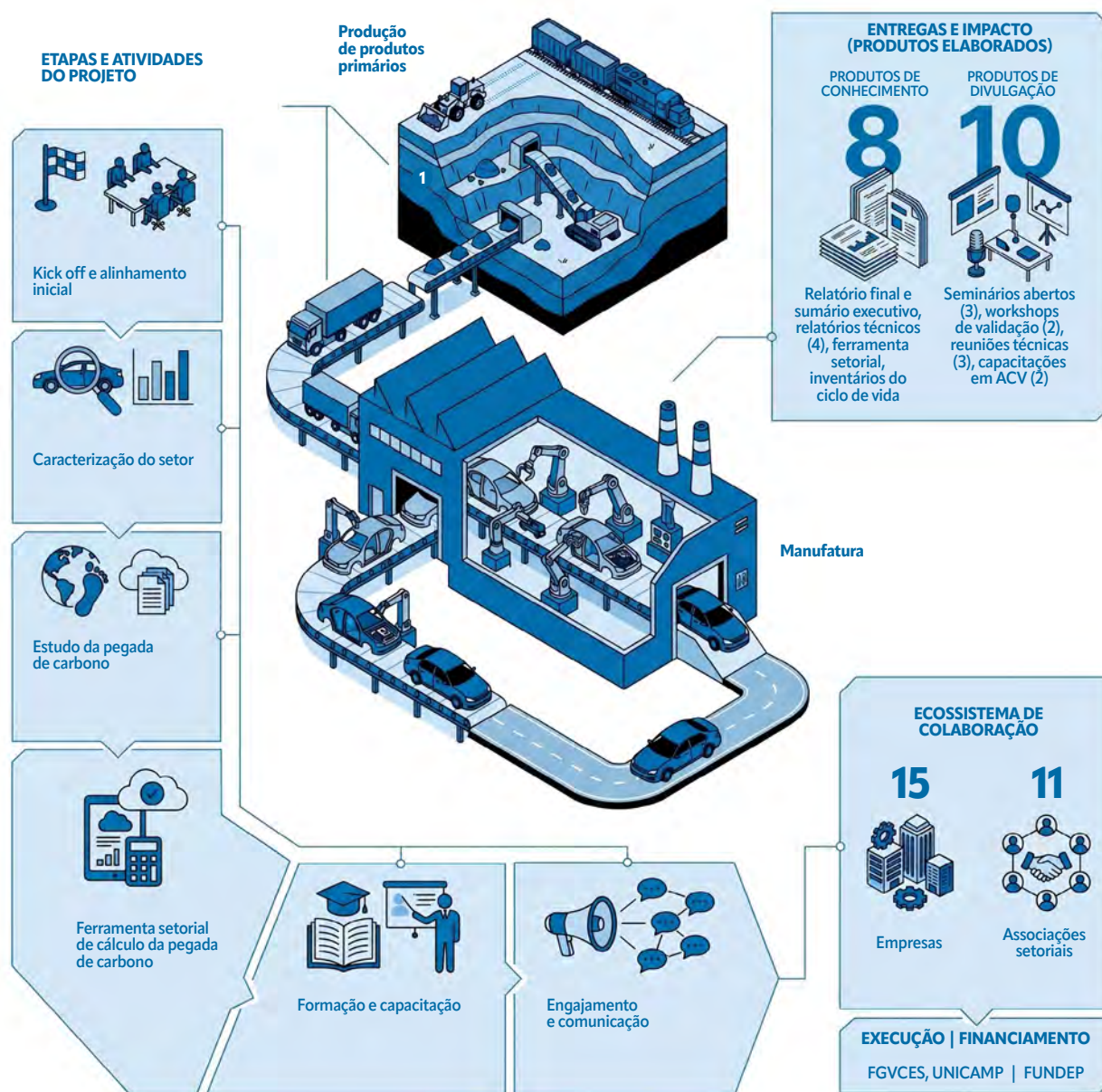
2 Ressalta-se que neste Projeto, o termo “pegada de carbono” é utilizado para se referir ao indicador que representa a soma das emissões de GEE ao longo das etapas do ciclo de vida consideradas, conforme as diretrizes das normas ISO 14040 e 14044, não representando, portanto, referência direta a estudo conduzido estritamente sob a ISO 14067. Nesse sentido, o estudo se enquadra como uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de categoria única – mudança do clima.

3 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. O Projeto não contabiliza, portanto, as emissões de GEE da produção e queima de combustíveis/eletricidade necessários à propulsão do veículo, nem da reposição de peças e componentes e de processos de reciclagem.

4 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.

5 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.

→| Figura 1.1 – Panorama geral do Projeto “Do Berço ao Portão”



Fonte: Elaboração própria.

Dentre as atividades desenvolvidas, encontram-se os produtos listados abaixo, que complementam o presente relatório e embasam as informações aqui apresentadas. São eles:







- A produção de relatórios técnicos, que consolidaram os métodos, premissas e resultados do estudo possibilitando auxiliar os processos de tomadas de decisão de estratégias de redução de emissões de GEE no âmbito público e empresarial;
- A elaboração de inventários de ciclo de vida e a geração de fatores de emissão adaptados à realidade brasileira que estruturaram a base técnica do projeto e carregam potencial para servir como referência para estudo de PC de veículos

leves fabricados no país, do berço-ao-portão;

- O desenvolvimento de uma ferramenta setorial para o cálculo da pegada de carbono de veículos leves, permitindo uma gestão eficiente das emissões de GEE ao longo da cadeia de suprimentos da indústria automobilística;
- A realização de eventos e capacitações, promovendo um ecossistema de integração setorial para discussão e inovação contínua do setor, fomentando o intercâmbio científico e tecnológico entre grupos de pesquisa e a cadeia automotiva.

A **Tabela 1.1** apresenta os principais produtos gerados pelo Projeto “Do Berço ao Portão”.

Tabela 1.1 – Principais produtos gerados pelo Projeto “Do Berço ao Portão”

	Relatório Técnico	Panorama da pegada de carbono de veículos leves: Resultados do estado da arte	Relatório de revisão do estado da arte sobre a pegada de carbono de veículos leves, com base em estudos nacionais e internacionais de ACV. Acesse aqui .
	Relatório Técnico	Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil: Resultados e premissas do Projeto “Do Berço ao Portão”	Relatório de resultados do Projeto, apresentando quantificação da pegada de carbono da produção de veículos leves no Brasil com base em ACV. O estudo utiliza dados primários e secundários adaptados ao contexto nacional, quantifica as emissões do berço-ao-portão, e inclui análises de cenários e sensibilidades para apoiar estratégias de descarbonização do setor automotivo. Acesse aqui .
	Ferramenta Setorial	Mover-se: Simulador de emissões de gases de efeito estufa de veículos leves do Projeto “Do Berço ao Portão”	Ferramenta setorial desenvolvida no âmbito do Projeto “Do Berço ao Portão”, voltada ao cálculo e à comparação da pegada de carbono de veículos leves produzidos no Brasil. Acesse aqui .
	Eventos	Lançamento do Projeto “Do Berço ao Portão”	Evento aberto ao público que teve como objetivo lançar o Projeto “Do Berço ao Portão”. Saiba mais aqui .
	Eventos	Meetup: Projeto de avaliação da pegada de carbono de veículos leves Programa Mover	Encontro online que teve como objetivo apresentar o Projeto “Do Berço ao Portão” e gerar conexões estratégicas para a coleta de dados primários. Acesse aqui .
	Eventos	Workshop do Projeto “Do Berço ao Portão”: Avanços e Perspectivas	Evento aberto ao público que teve como objetivo apresentar os principais avanços do Projeto “Do Berço ao Portão” e os resultados das etapas desenvolvidas, além de instigar discussões sobre perspectivas futuras do setor automobilístico. Acesse aqui .
	Eventos	Evento de apresentação dos resultados do Projeto “Do Berço ao Portão”	Evento que teve como objetivo apresentar os principais resultados do estudo sobre a pegada de carbono da fabricação de veículos leves no Brasil, bem como compartilhar recomendações e aprendizados gerados ao longo do Projeto. Acesse aqui .

Fonte: Elaboração própria.

1.2 Sobre este documento

O presente Sumário Executivo sintetiza os principais resultados do estudo da Pegada de Carbono da produção de veículos leves analisadas pelo Projeto “Do Berço ao Portão”. Informações detalhadas sobre o estudo podem ser consultadas no relatório técnico, disponível [aqui](#).

Pesquisadores, acadêmicos, profissionais da indústria automotiva e aqueles envolvidos em tomadas de decisão tanto no setor público quanto privado encontrarão neste relatório informações que poderão ser utilizadas para orientar pesquisas futuras, práticas empresariais sustentáveis e iniciativas gover-

namentais. O documento está estruturado em cinco capítulos, conforme descritos a seguir:

O Capítulo 2 apresenta informações relevantes sobre a avaliação do ciclo de vida de veículos leves, a cadeia automotiva e o processo de engajamento do setor. O Capítulo 3 é dedicado à apresentação do estudo de pegada de carbono conduzido pelo Projeto, trazendo os procedimentos metodológicos e os principais resultados obtidos. No Capítulo 4, são discutidos os principais desafios encontrados e aprendizados gerados ao longo da execução do Projeto. Por fim, o Capítulo 5 reúne as principais recomendações e considerações finais do Projeto “Do Berço ao Portão”.

2. Cadeia automotiva e avaliação do ciclo de vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de gestão ambiental para o 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 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 ter-

minologias 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, apresentadas na Figura 2.1, a abordagem da ACV, 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 2.1 – Fases da Avaliação do Ciclo de Vida**



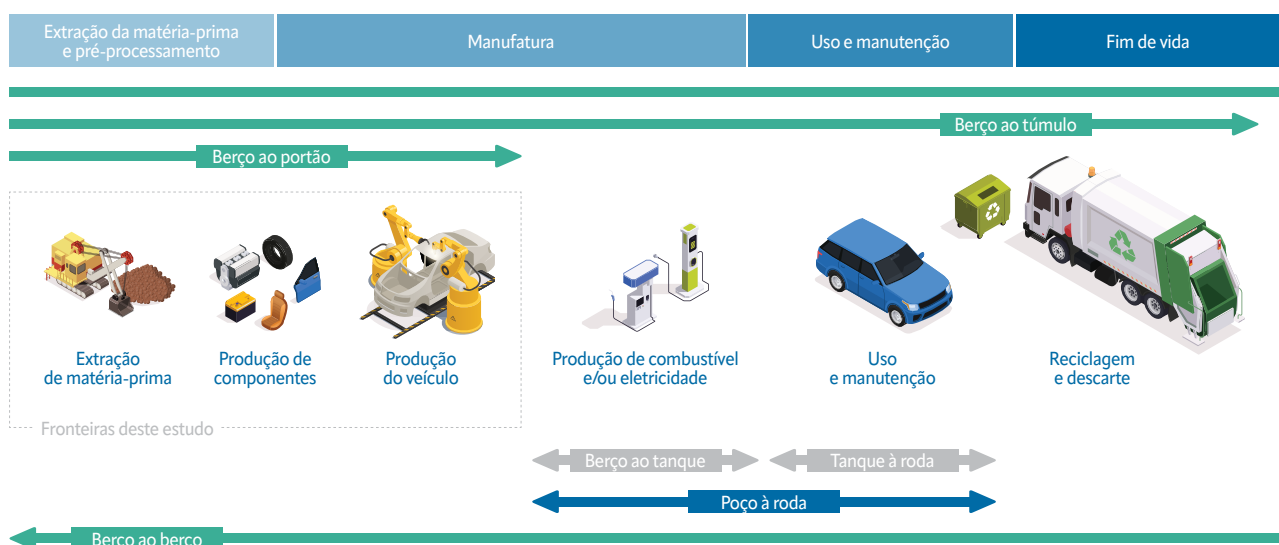
Fonte: Adaptado de ABNT (2014a, 2014b) e HYUNDAI (2022).

A ACV tem se mostrado cada vez mais relevante no setor automobilístico, abrangendo uma variedade de aplicações que vão desde o ecodesign – facilitando o desenvolvimento de produtos e processos mais sustentáveis – até o marketing – possibilitando a comunicação transparente e objetiva do desempenho ambiental dos produtos. Sua presença é crescente também na gestão das metas climáticas tanto no âmbito empresarial quanto governamental.

A **Figura 2.2** traz, de forma simplificada, o ciclo de vida com-

pleto de um veículo leve, desde a obtenção de matérias-primas até o descarte. Ela inclui não só a etapa de uso do veículo e as emissões do escapamento, mas também a fabricação do veículo, a produção e transporte do combustível, a reciclagem das peças e componentes, terminando com o fim da vida útil do veículo. No caso do setor automobilístico, possíveis fronteiras abrangem tanto o ciclo de vida do veículo quanto do combustível, sendo estas divididas em cinco recortes específicos descritos no **Quadro 2.1**.

→ **Figura 2.2 – Ciclo de vida de um veículo leve**



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

Quadro 2.2 – Termos e conceitos de um estudo de ACV

Do berço-ao-túmulo (cradle-to-grave)	Considera todas as etapas do ciclo de vida, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, manutenção, reciclagem até a disposição final. Quando se refere ao ciclo de vida do combustível, utiliza-se o termo "do poço-à-roda" (<i>well-to-wheels</i>), compreendendo desde a fabricação do combustível até o seu uso nos veículos.
Do berço-ao-portão (cradle-to-gate)	Engloba desde a aquisição e produção das matérias-primas até a produção do produto. Quando se refere ao combustível, utiliza-se o termo "do poço-ao-tanque".
Do portão-ao-portão (gate-to-gate)	Avalia apenas a etapa de produção, dentro dos portões da fábrica.
Do portão-ao-túmulo (gate-to-grave)	Abrange a distribuição, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição final do produto. Quando se refere ao combustível, utiliza-se o termo "do tanque-à-roda".
Do berço-ao-berço (cradle-to-cradle)	Abrange a aquisição das matérias-primas, produção, uso, distribuição, tratamento pós-uso, reciclagem e inserção do material reciclado ao ciclo de vida do produto.

Fonte: Adaptado de ABNT (2014b, 2014a); IBICT (2014).

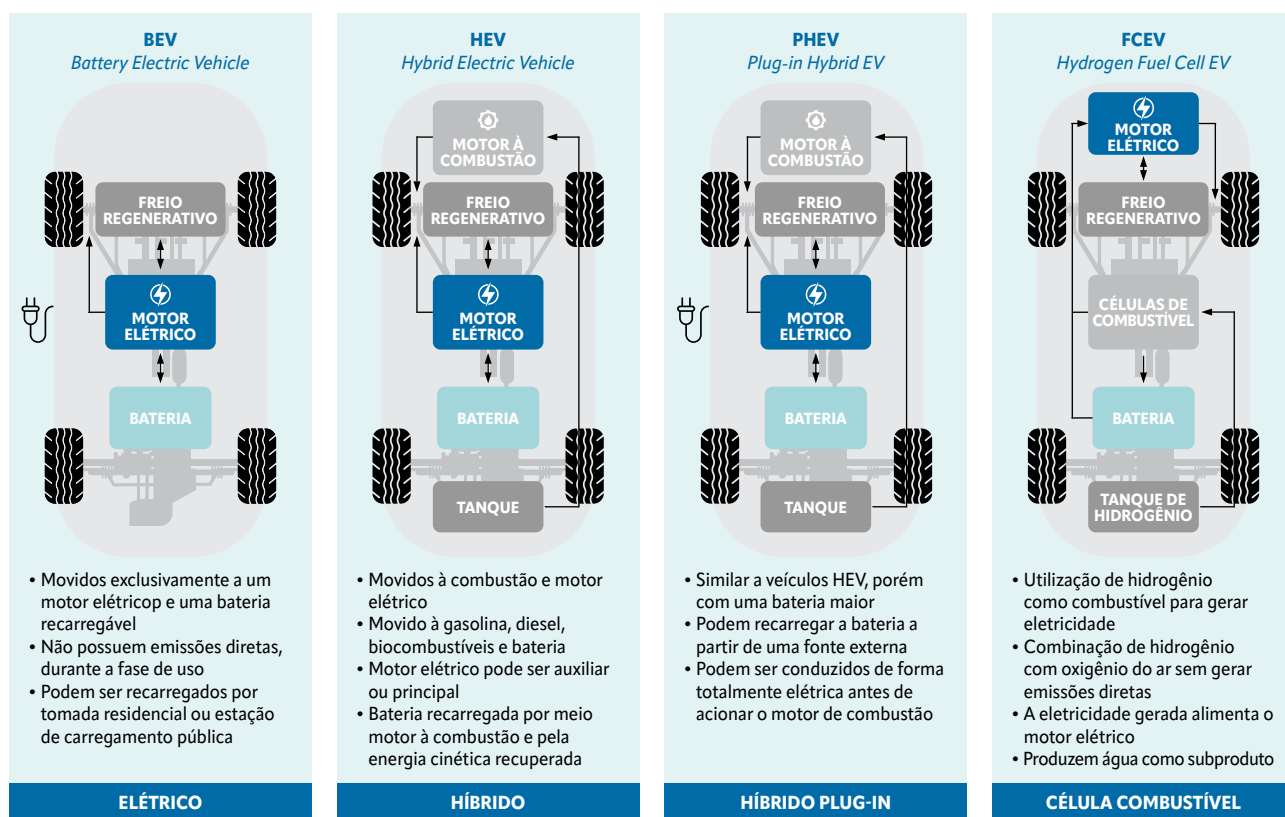
Para facilitar a compreensão do perfil de emissões da cadeia automotiva, as seções a seguir apresentam, de forma resumida, o mapeamento da cadeia automotiva e os principais processos e fontes de emissões de cada etapa do ciclo de vida de um veículo.

2.1 O setor automotivo e sua cadeia produtiva

A indústria automobilística brasileira se destaca no cenário mundial, ocupando o posto de 8º maior produtor e 6º maior mercado interno de veículos. 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 é responsável por gerar mais de 1,2 milhões de empregos diretos e indiretos.

Os veículos leves, isto é, veículos de passeio e comerciais leves, compõem a maior parcela da frota brasileira (CNT, 2022). Esse segmento é caracterizado por veículos com motor de combustão interna (ICEV, do inglês *internal combustion engine vehicles*) do tipo *flex-fuel*. O restante está distribuído entre veículos ICEV movidos exclusivamente a diesel ou gasolina e veículos eletrificados (EV, do inglês *electric vehicles*), que podem ser divididos em quatro categorias: Veículos Elétricos a Bateria (BEV, do inglês *battery electric vehicles*); Veículos Elétricos Híbridos (HEV, do inglês *hybrid electric vehicles*); Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (PHEV, do inglês *plug-in hybrid EV*); e Veículos Elétricos a Célula de Combustível (FCEV, do inglês *hydrogen fuel cell electric vehicle*) (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Tipos de veículos eletrificados



Fonte: Adaptado de AEA(2023).

A Figura 2.4 apresenta um panorama do mercado automotivo brasileiro, destacando tanto a evolução da produção quanto o perfil tecnológico da frota e das vendas recentes. O gráfico de barras evidencia os dados históricos de produção de veículos no Brasil entre 2005 e 2023, indicando predominância de automóveis em relação a comerciais leves, caminhões e ônibus, além de variações ao longo do tempo. No campo do licenciamento, observa-se a forte dominância dos veículos *flex-fuel*, que repre-

sentam 83% da frota, seguidos por diesel (10%), enquanto gasolina, híbridos e elétricos ainda possuem participação reduzida. Complementarmente, o gráfico de vendas de eletrificados leves em 2023 mostra uma maior participação dos veículos híbridos plug-in (PHEV), com 35%, seguidos por híbridos *flex-fuel* (28%), veículos elétricos a bateria (BEV) com 21% e híbridos convencionais (HEV) com 16%, evidenciando uma transição ainda gradual para tecnologias de menor emissão no país.

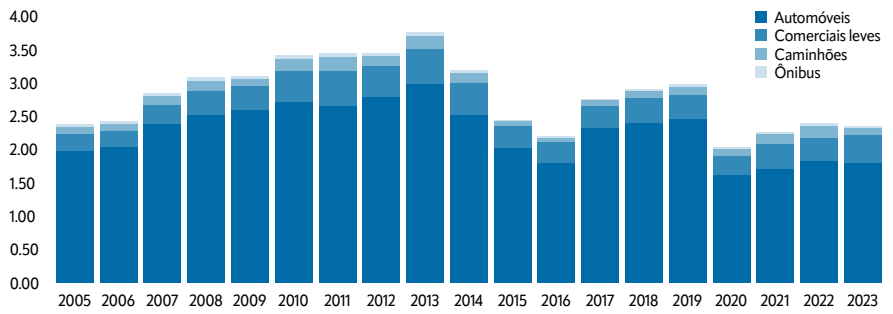
→| **Figura 2.4 – Infográfico com panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil**

52%

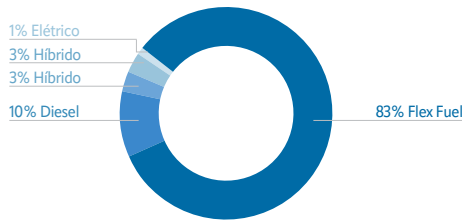
da frota brasileira é composta por automóveis (61.803.369 veículos)



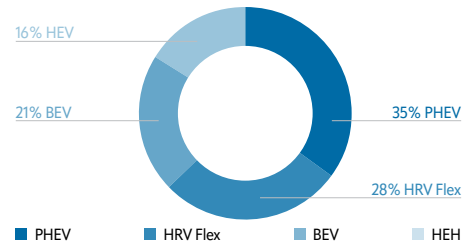
Dados históricos da produção de veículos no Brasil (milhões de veículos/ano)



Licenciamento total de automóveis e comerciais leves por combustível em 2023



Vendas de eletrificados leves por tecnologia em 2023



Fonte: Adaptado de Ministério dos Transportes (2023), ANFAVEA (2023), ABVE (2024).

Esforços crescentes de mitigação das emissões de GEE em escala global apontam a eletrificação dos meios de transporte, em conjunto com a expansão de fontes renováveis de energia, como pilares da transição energética (FAN et al., 2023). Como pode ser observado na Figura 2.4, apesar da crescente participação das vendas de veículos eletrificados no país (3%), o mercado brasileiro ainda é tímido em comparação com a média global de vendas que atualmente gira em torno de 10% e tem projeção de alcançar 44% em 2030.

Diversos fatores impulsionam essa transição, incluindo a crescente preocupação com as mudanças climáticas, a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e a influência internacional da indústria automobilística. No entanto, para o crescimento desse segmento, algumas particularidades delimitam o cenário de adoção no Brasil. Por um lado, o alto preço de aquisição de um veículo eletrificado e a falta de implementação de infraestrutura de recarga colaboram para a baixa aderência deste segmento no país. Por outro, o Brasil possui vantagens comparativas potencias – a exemplo de sua matriz energética predominantemente renovável e da proeminência no mercado de biocombustíveis – que podem ser exploradas pela indústria de automóveis na busca pela descarbonização da economia.

Ciclo de vida de um veículo leve

O ciclo de vida de um veículo tem início com a extração das matérias-primas, seguida da produção dos materiais que compõem 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 fabris principais de uma linha de montagem: estamparia (corte das chapas de aço que formam a estrutura do automóvel); pintura da carroceria; e montagem final dos componentes elétricos, mecânicos e de segurança (MOTOMURA, 2011). Antes de ser liberado para a venda, o veículo passa por testes e inspeções 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.

A fase de uso tem início com a aquisição do veículo pelo consumidor e incluem atividades como o abastecimento com combustível, a recarga de bateria no caso de veículos elétricos e a manutenção de componentes, além de eventuais reparos, que se repetem até o consumidor efetuar a revenda ou descarte do veículo. O comportamento do motorista, o estilo de direção e as condições de uso influenciam diretamente o consumo de combustível e a duração da bateria. Além disso, a manutenção regular e os reparos são essenciais para prolongar a vida útil dos veículos. Todos esses aspectos afetam o perfil das emissões do veículo.

O estágio de fim de vida útil de um veículo é alcançado quando ele não possui mais condições de trafegar, seja devido a acidentes, danos, mau estado ou outras razões, como apreensão por autoridades policiais. No Brasil, são produzidos cerca de

5,6 milhões de toneladas de sucata automotiva por ano, sendo a maior parte destinada para aterros sanitários ou ferros-velhos (BRITO; GRIGORI, 2022). A reciclagem de veículos ainda é pouco explorada no país, abrangendo atualmente apenas 1,5% dos veículos em fim de vida útil (AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS, 2022). Isso se deve, em parte, à falta de legislação específica que incentive e regulamente a reciclagem de veículos em âmbito nacional (AEA, 2020). Em contrapartida, modelos de reciclagem veicular têm sido implantados em todo o mundo, com destaque à União Europeia e Japão, onde o nível de reaproveitamento de materiais são da ordem de 85% da massa do veículo (AEA, 2020).

2.2 Engajamento da cadeia automotiva

Dada a complexidade e diversidade de atores envolvidos na produção de veículos leves, o engajamento da cadeia automotiva foi fundamental para o desenvolvimento do Projeto. Para tanto, contou-se com a participação de empresas, associações setoriais e especialistas, o que permitiu ampliar o acesso a dados, alinhar aspectos metodológicos e incorporar diferentes perspectivas técnicas, contribuindo para a construção de resultados mais representativos do contexto brasileiro.

O Projeto foi estruturado a partir de um arranjo institucional que integra diferentes atores com funções complementares. No âmbito da governança do Projeto, o desenvolvimento das atividades contou com o suporte de um Comitê Consultivo, que desempenhou papel estratégico, reunindo representantes da FGV, UNICAMP, FUNDEP e 11 associações setoriais, além de especialistas. O objetivo do Comitê Consultivo esteve em acompanhar o andamento das atividades, discutir diretrizes metodológicas e promover o engajamento setorial. Esse processo de aproximação entre atores-chave possibilitou trocas importantes sobre aspectos técnicos, fundamentais para a estruturação da coleta de dados e da modelagem da fabricação de veículos leves no Brasil. Paralelamente, o Projeto envolveu a participação de empresas parceiras ao longo de toda a cadeia automotiva, incluindo montadoras, fabricantes de autopeças, siderúrgicas, produtores de plásticos e alumínio, além de empresas de logística, refletindo uma abordagem colaborativa e multissetorial.

Além das atividades do Comitê Consultivo, ao longo do Projeto, foram realizados seminários e workshops com o objetivo de promover o engajamento da cadeia automotiva, disseminar conhecimento e apoiar o desenvolvimento técnico do estudo. O 1º

Seminário aberto, realizado em outubro de 2023 durante evento aberto no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, contou com a presença de aproximadamente 60 pessoas e marcou o lançamento do Projeto, possibilitando a divulgação de seus objetivos, escopo e expectativas, além de reforçar a importância da participação do setor na disponibilização de dados primários. Em setembro de 2025, foi realizado o 2º Seminário aberto de sensibilização, que ampliou o diálogo com os atores da cadeia ao apresentar avanços do estudo e discutir a relevância da pegada de carbono no contexto da descarbonização do setor, contando com cerca de 53 participantes. Ao final do Projeto, em abril de 2026, o 3º Seminário aberto consolidou os principais resultados alcançados, promovendo a disseminação do conhecimento produzido e representando um espaço de diálogo com o setor e os mais de 70 profissionais que compareceram ao evento.

No âmbito técnico, também foram realizados workshops fundamentais para o desenvolvimento do Projeto. O 1º Workshop, realizado em junho de 2024, reuniu 38 representantes de diferentes segmentos da cadeia automotiva para apresentação de resultados parciais e discussão de desafios e oportunidades, contribuindo diretamente para o aprimoramento metodológico. Complementarmente, o 2º Workshop, realizado em setembro de 2025, foi dedicado à validação da ferramenta setorial de cálculo da pegada de carbono, possibilitando ajustes a partir das contribuições dos participantes, além da discussão das premissas adotadas para a modelagem de cenários. Tais momentos foram essenciais para garantir a consistência e transparência do processo. Somados, esses workshops contaram com a participação ativa de aproximadamente 80 pessoas, que juntas contribuíram para a robustez técnica do Projeto e sua aderência à realidade e às demandas do setor automobilístico brasileiro.

Por fim, as atividades de formação e capacitação contribuíram para o fortalecimento das capacidades técnicas dos atores envolvidos e para o alinhamento conceitual ao longo da cadeia automotiva. Ao todo, duas formações foram realizadas e 114 pessoas foram capacitadas. A primeira formação foi voltada à Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e à pegada de carbono – com a participação de 77 profissionais – e segunda específica para o uso da ferramenta setorial de cálculo da pegada de carbono desenvolvida no âmbito do Projeto – com a participação de 37 profissionais. Essas iniciativas forneceram suporte para a apropriação dos resultados do Projeto por parte dos atores relevantes, fomentando a incorporação da pegada de carbono como instrumento de gestão e tomada de decisão no setor automobilístico.

3. Estudo de pegada de carbono de veículos leves

Este capítulo apresenta os resultados finais do estudo da Pegada de Carbono da produção de veículos leves analisadas pelo Projeto “Do Berço ao Portão”. A seguir são apresentados os procedimentos metodológicos e os principais resultados obtidos, incluindo a quantificação da pegada de carbono, do berço-ao-portão, dos doze veículos avaliados pelo Projeto, bem como análises de cenários e sensibilidades.

Vale destacar que o 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, assegurando maior consistência e robustez metodológica. Para mais detalhes, consulte o relatório técnico completo [aqui](#).

▲ 3.1 Procedimentos metodológicos

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. Nesse sentido, o estudo se enquadra como uma ACV de categoria única – mudança do clima. 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.

▲ 3.1.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo do estudo 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. A análise adotou a abordagem do

berço-ao-portão, não abrangendo as etapas de uso, manutenção, fim de vida ou a queima de combustíveis/eletricidade 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.

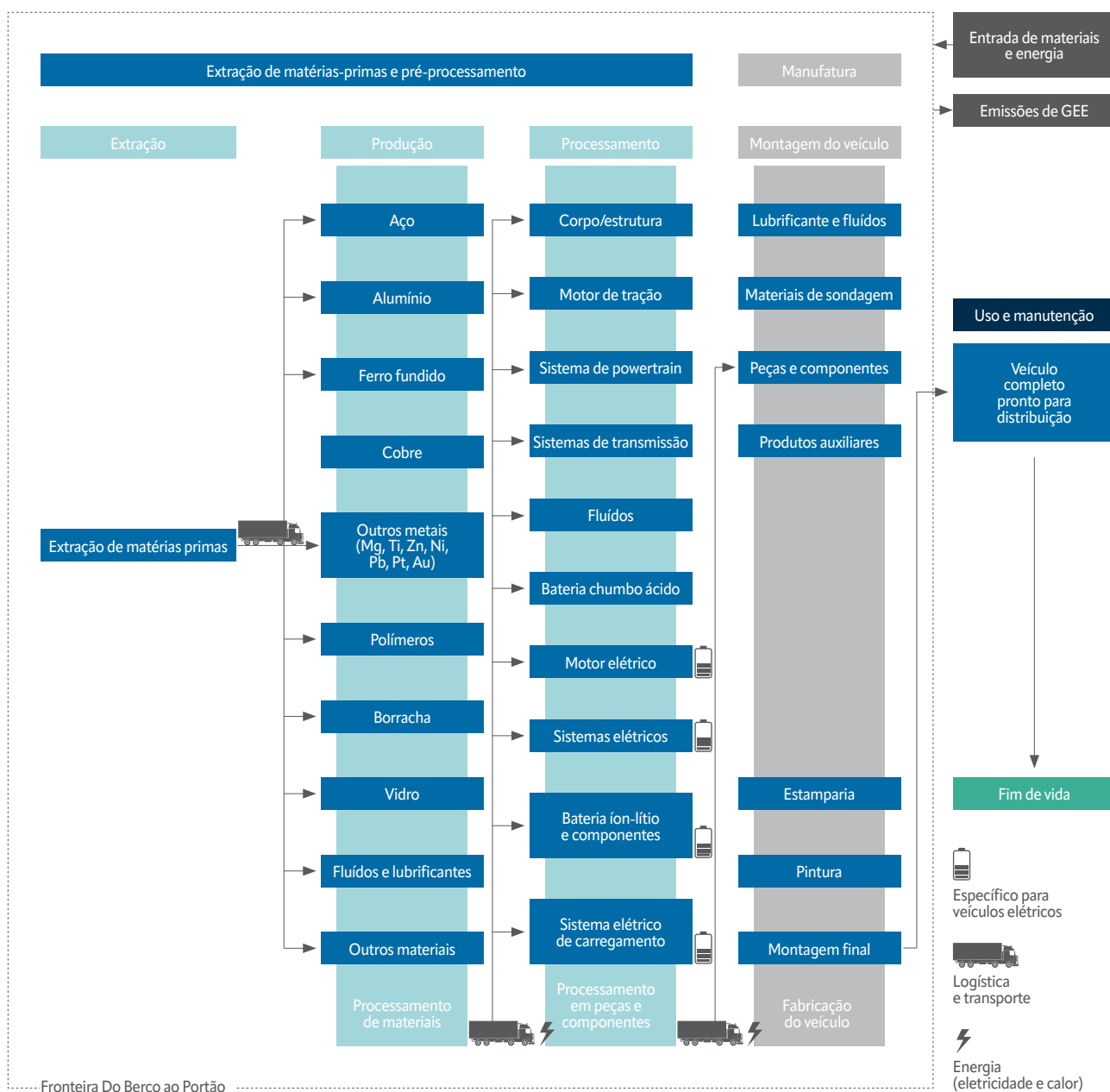
A partir desse recorte, o estudo contribui para a identificação de oportunidades de redução de emissões de GEE na cadeia automotiva, avaliação de materiais e tecnologias, e apoio à formulação de políticas públicas. Entre as aplicações destacam-se o suporte técnico a iniciativas como o Programa Mover, o desenvolvimento de ferramentas setoriais e o estabelecimento de referências nacionais para o cálculo da pegada de carbono na produção de veículos leves. Potenciais aplicações do estudo 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.

A função estabelecida é o transporte de passageiros por uma determinada distância. A unidade funcional foi definida como o transporte de até 5 passageiros por 160.000 km, e o fluxo de referência como a produção de uma unidade de veículo leve até a etapa de fabricação e disponível em montadoras no Brasil em 2023. Essa escolha assegura coerência e comparabilidade entre diferentes tecnologias de propulsão, além de estar alinhada à literatura e às limitações de dados primários na etapa de manufatura no contexto brasileiro,

permitindo uma modelagem mais robusta e representativa.

As fronteiras do sistema abrangem todas as etapas necessárias à produção do veículo, desde a extração de matérias-primas até a saída da montadora, conforme ilustrado na **Figura 3.1**. Isso inclui a produção e transformação de insumos, a fabricação de componentes e sistemas, as etapas fabris (estampagem, solda, pintura e montagem) e a produção dos sistemas de propulsão, como motores a combustão, sistemas elétricos, baterias e controles.

→| **Figura 3.1 – Fronteira do sistema de produto avaliado pelo Projeto**



Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 3.1** a seguir apresenta uma síntese da abordagem metodológica adotada neste estudo de Avaliação do Ciclo de Vida.

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
Fonte de dados da montagem dos veículos	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. 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.
Fonte de dados dos processos a montante da montadora	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.
Cobertura temporal	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.
Cobertura geográfica	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.
Cobertura tecnológica	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') ⁶ 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 3.91 da base de dados ecoinvent.
Tratamento de coprodutos	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.
Tratamento de resíduos e tratamento de material reciclado	Empregou-se a abordagem "cut-off", também conhecida como "100:0" ou "conteúdo reciclado". Esta abordagem considera 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 cut-off está mais alinhada ao escopo do projeto, do berço-ao-portão, evitando carregar "créditos futuros" (pós-portão) para dentro da fronteira.

⁶ 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 eletricidade	<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.</p> <p>Para os demais inventários, foram utilizados os valores informados na base de dados ecoinvent, sem adaptações.</p>
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.</p> <p>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 completudeza, consistência e qualidade dos dados	<p>Empregou-se os 5 indicadores da Matriz Pedigree: confiabilidade; completudeza; 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

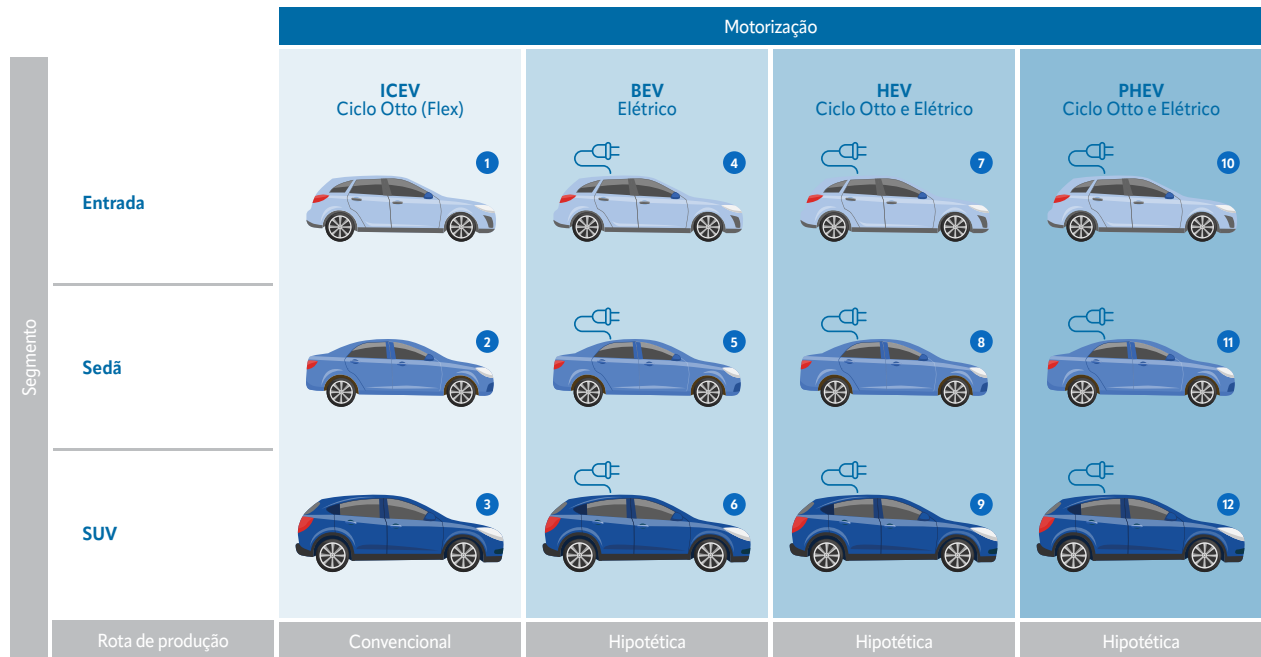
Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Veículos e cenários analisados

O Projeto analisou a Pegada de Carbono associada a fabricação de doze veículos leves, sendo três modelos representativos do setor automobilístico brasileiro atual com motorização a combustão interna do tipo Ciclo Otto (*flex-fuel*), 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 3.2** apresenta uma síntese dos veículos simulados dentro do escopo do Projeto.

→| **Figura 3.2 – Veículos simulados pelo projeto “Do Berço ao Portão”**



Fonte: Elaboração própria.

Adicionalmente, conforme observado da **Tabela 3.2**, foram avaliados cenários alternativos de produção, com o objetivo de estimar o impacto de mudanças estratégicas na cadeia de suprimentos automotiva e nos principais materiais sobre a

pegada de carbono dos veículos, e uma análise de sensibilidade foi conduzida considerando fatores identificados como relevantes para avaliar a influência de parâmetros-chave na variabilidade dos resultados.

Tabela 4.2 – 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 tecnológicas 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: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

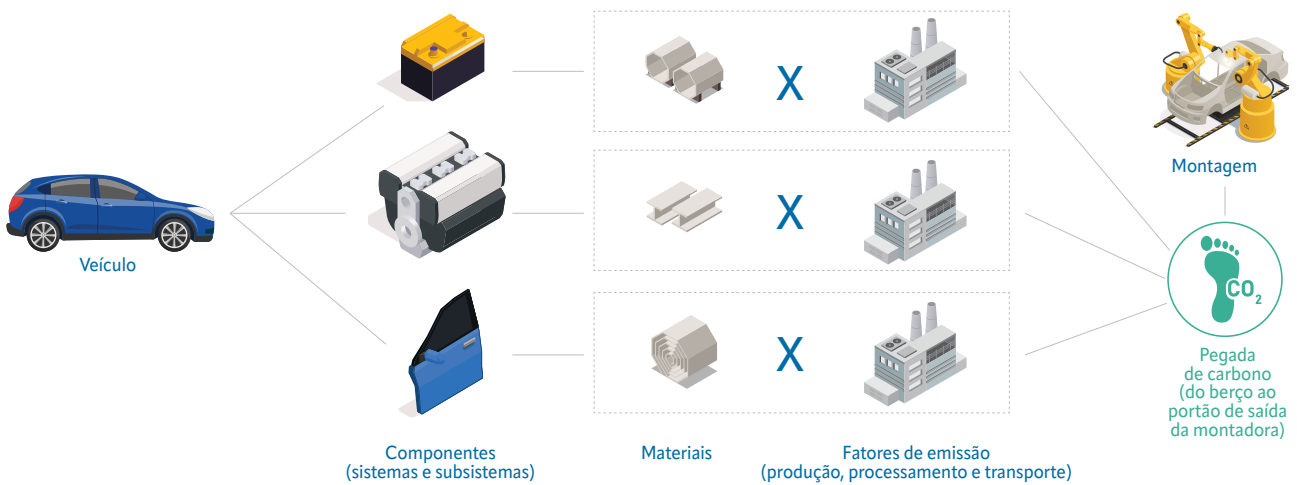
3.1.3 Metodologia de cálculo

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 (Figura 3.3). A partir dessa decomposição, de forma simplificada, são conduzidas três etapas principais. 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.

→| Figura 3.3 – Fluxo de estruturação dos inventários para o cálculo da PC dos veículos



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

3.1.4 Coleta de dados e elaboração de Inventários de Ciclo de Vida

A elaboração dos Inventários de Ciclo de Vida (ICV) constitui uma etapa central da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), reunindo dados de entradas e saídas de materiais e energia que determinam a robustez dos resultados. No contexto brasileiro, observa-se uma lacuna significativa de inventários representativos para veículos leves: dentre 58 estudos revisados, apenas um considerou 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.

A metodologia adotada no Projeto “Do Berço ao Portão” para a construção dos ICVs combina duas abordagens complementares, com o objetivo de garantir maior represen-

tatividade, 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.

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 para o engajamento e coleta de dados primários incluíram diálogos multisetoriais e mobilização transversal de atores, além da estruturação de um processo de compartilhamento de dados seguro e anonimizado. A partir do envio de formulários de coleta de dados, foram obtidos dados primários de sete das principais montadoras do país e oito fornecedores de matérias-primas.

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

demandou o levantamento de dados secundários. Este processo envolveu revisão sistemática da literatura, mapeamento de inventários disponíveis e adaptação ao contexto nacional ("tropicalização"), com apoio de dados primários, consultas a especialistas e relatórios setoriais (Figura 3.4).

→| **Figura 3.4 – Processo de criação e adaptação de inventários do ciclo de vida**



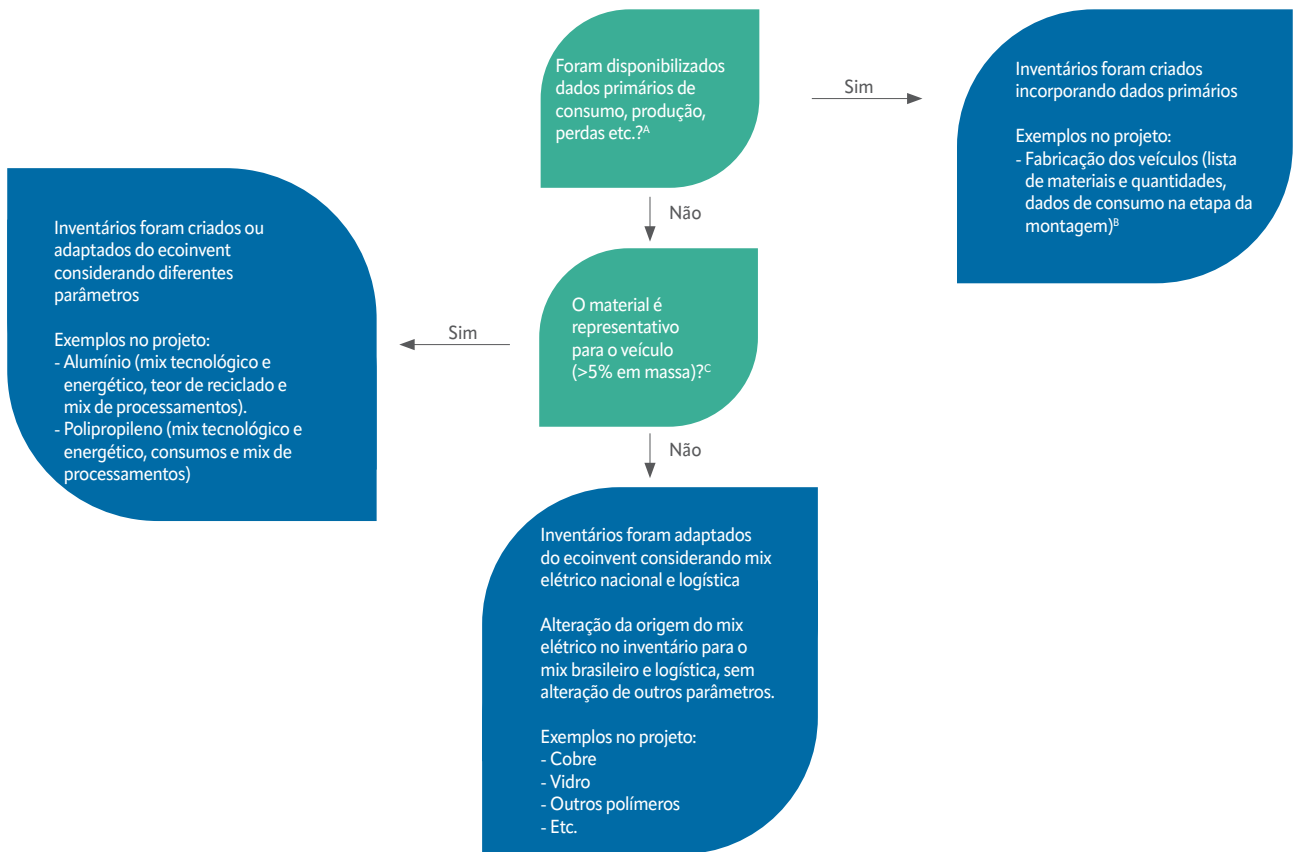
Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

Conforme ilustrado na Figura 3.5, os inventários foram classificados de acordo com sua relevância e disponibilidade de dados. Para processos mais representativos ou com maior disponibilidade de informações (como aço, alumínio e principais polímeros), foram desenvolvidos inventários customizados,

com ajustes detalhados em consumo energético, insumos e rotas produtivas. Para materiais de menor relevância ou com limitações de dados, foram realizadas adaptações simplificadas, principalmente por meio da substituição do mix elétrico e ajustes logísticos.



→| **Figura 3.5 – Árvore de decisão para adaptações dos 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.

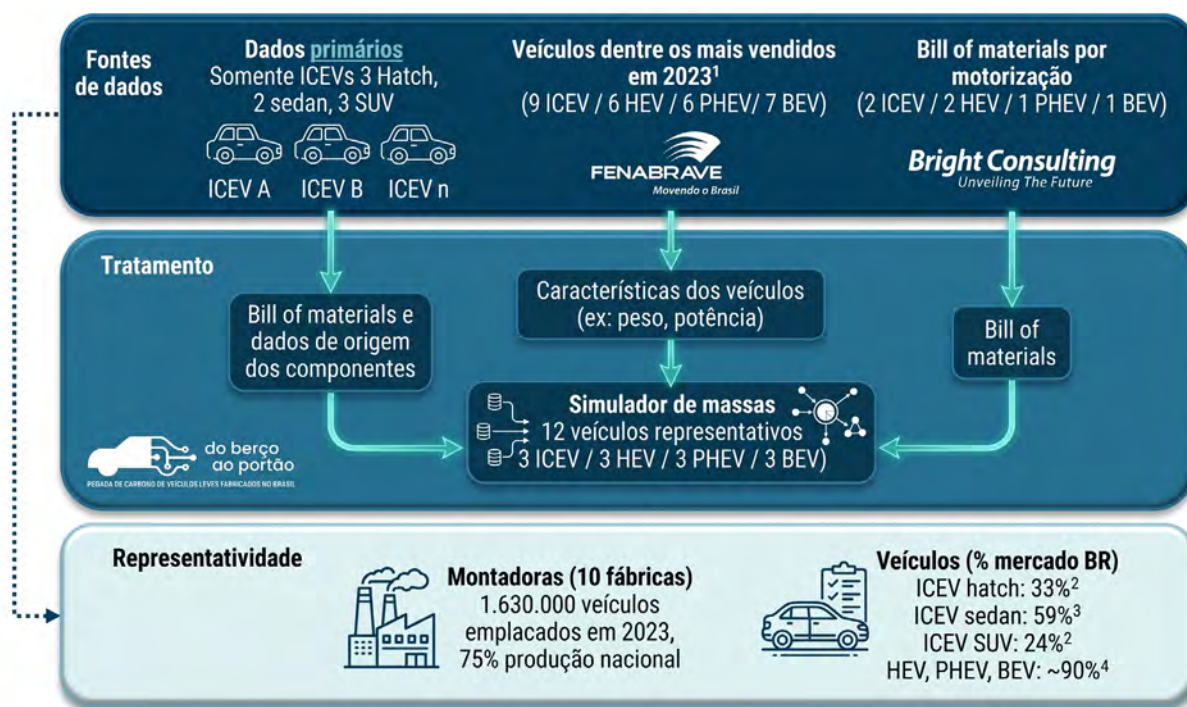
Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

O estudo considerou doze veículos representativos, distribuídos em três segmentos (hatch, sedan e SUV) e quatro tecnologias de propulsão (ICEV, HEV, PHEV e BEV). As características técnicas (massa, potência e dimensões) foram definidas a partir de médias ponderadas dos modelos mais

vendidos em 2023 (FENABRAVE, 2023). Com base nessas informações, foi desenvolvido um modelo para estimar a massa dos principais sistemas veiculares (corpo, estrutura, powertrain, transmissão, entre outros), conforme ilustrado na **Figura 3.6**.



→| **Figura 3.6 – Esquemático do simulador de massas para criação dos doze veículos avaliados pelo 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: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

A definição do conteúdo de nacionalização dos materiais foi tratada como variável-chave. 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). Assumiu-se produção nacional para veículos ICEV, importação integral para BEV e PHEV, e produção mista para HEV (60% nacional, com base em ABVE, 2024). Para veículos produzidos no Brasil, a origem dos materiais foi estimada com base em dados primários fornecidos por algumas empresas parceiras, incluindo listas de componentes, fornecedores e custos, permitindo classificar sistemas e extrapolar o conteúdo de importação para materiais como aço, alumínio e polímeros. Para materiais de menor representatividade, foram utilizados dados de consumo aparente.

A elaboração dos inventários de produção, processamento e transporte dos materiais baseou-se principalmente em dados secundários provenientes de bases consolidadas (ecoinvent v3.9.1, GREET 2024, PlasticsEurope), complementados por relatórios setoriais, literatura técnica e dados primários, quando dis-

poníveis. Esses inventários foram adaptados para refletir as condições específicas da indústria brasileira, especialmente quanto ao mix elétrico, rotas produtivas e parâmetros tecnológicos.

Destaca-se a relevância do aço e do alumínio, que juntos podem representar mais de 70% da pegada de carbono na produção de veículos (FGVCES, 2024). A modelagem do aço foi desenvolvida para representar o mix do aço automotivo brasileiro, considerando as principais rotas produtivas: alto-forno/conversor a oxigênio (BF-BOF), nas variantes a carvão mineral e vegetal, e forno elétrico a arco (EAF), além da rota de redução direta (DRI-EAF) para cenários futuros. O modelo desenvolvido pelo Projeto integra mais de 300 parâmetros, incluindo consumo energético, autoprodução de energia a partir de gases de processo, critérios de alocação e processamento subsequente (laminação, zincagem e tratamentos térmicos), sendo calibrado com dados da indústria nacional.

De forma complementar, a modelagem do alumínio considerou toda a cadeia produtiva, desde a mineração da bauxita até

os processos de transformação (laminação, extrusão e fundição), incorporando o mix tecnológico nacional de eletrólise (Prebaked e Söderberg), o mix de eletricidade das produtoras, a participação de material reciclado (41,8%) e parâmetros logísticos. Já os polímeros foram modelados a partir de uma composição média representativa dos veículos, com destaque para polipropileno (PP) e polietileno (PE), incluindo a cadeia petroquímica baseada no craqueamento de nafta, os principais processos de transformação e cenários com incorporação de reciclados e materiais de menor intensidade de carbono.

Além desses materiais principais, o estudo contemplou uma ampla gama de materiais relevantes para a composição dos veículos. O ferro fundido foi modelado de forma alinhada ao aço até a etapa de alto-forno, com inclusão de processos de fundição e usinagem e adoção de teor de sucata equivalente (25,3%). O magnésio foi representado majoritariamente pela rota Pidgeon para produção nacional, com complementação por inventários internacionais para a parcela importada e inclusão de fundição secundária. O zinco foi modelado a partir de rotas eletro e pirometalúrgicas, sendo tratado separadamente do aço para evitar dupla contagem, especialmente em aplicações como galvanização.

Materiais como níquel e cobre foram considerados predominantemente importados, refletindo a estrutura produtiva nacional, enquanto o chumbo apresentou elevada participação de material reciclado (cerca de 70%), principalmente associado à reciclagem de baterias. O vidro foi modelado como integralmente nacional, com base em inventários de vidro plano e inclusão de etapas como têmpera e laminação. Já os materiais têxteis foram representados principalmente pelo poliéster, dada sua predominância nas aplicações automotivas.

Adicionalmente, foram consideradas as baterias, especialmente relevantes para veículos eletrificados, modeladas a partir de inventários agregados para baterias de íon-lítio (NMC e LFP) e chumbo-ácido, com adaptação para cenários de nacionalização. Também foram incluídas categorias agregadas de metais especiais (como ouro, prata, paládio e terras raras) e outros compostos (como grafite, fibra de carbono e revestimentos), representadas por composições médias devido à limitação de dados específicos. Materiais complementares, como tintas, adesivos, eletrônicos e fluidos, foram modelados diretamente com inventários da base de dadosecoinvent.

Por fim, aspectos de logística e eletricidade foram tratados de forma consistente no estudo. Para materiais importados, foram utilizados inventários globais que já incorporam transporte, enquanto para materiais nacionais adotaram-se distâncias e modais padrão. A eletricidade foi modelada com base no mix médio brasileiro no período de 2019 a 2023, incluindo perdas

de transmissão e distribuição, garantindo maior representatividade das condições reais do país.

▲ 3.1.5 Principais limitações

A seguir, são apresentadas as principais limitações identificadas no estudo, decorrentes das escolhas metodológicas, restrições de escopo e disponibilidade de dados. A explicitação desses aspectos é essencial para assegurar transparência, qualificar a interpretação dos resultados e orientar seu uso adequado no contexto do Projeto, especialmente diante da complexidade inerente à ACV no setor automobilístico.

- **Fronteras do estudo:** em conformidade com as diretrizes do edital de pesquisa, foi adotada a abordagem do berço-ao-portão, contemplando exclusivamente as etapas de extração de matérias-primas, produção de materiais e fabricação dos veículos. Portanto, as fases de uso e fim de vida não foram incluídas. Essa delimitação, embora adequada ao objetivo do estudo, limita a avaliação do desempenho ambiental completo dos veículos, conforme preconizado pela ISO 14040;
- **Escopo temporal e tecnológico:** 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 dadosecoinvent v.3.91, 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. Reconhece-se que o período adotado pode não capturar variações sazonais, evoluções tecnológicas ou alterações no padrão do mercado de veículos leves;
- **Representatividade:** a análise foi conduzida com base em uma amostra de doze veículos, que representam aproximadamente 36% das vendas de veículos leves no Brasil em 2023. 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. Dessa forma, os resultados não devem ser interpretados como representativos de todo o mercado nacional, nem utilizados para definição de valores médios ou parâmetros normativos;
- **Análise de impacto ambiental:** 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:** 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:** a estimativa da nacionalização de materiais e componentes foi baseada em um número restrito de veículos ICEVs, complementada por dados secundários setoriais. Essa abordagem pode não refletir com precisão a diversidade de arranjos produtivos e cadeias de suprimento existentes na indústria automotiva 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;
- **Adaptação de inventários ao 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;
- **Modelagem das etapas fabris:** a etapa de fabricação e montagem foi modelada por meio de uma abordagem agregada ("caixa preta"), considerando consumos totais de energia e insumos, sem distinção entre processos produtivos específicos. Além disso, esse inventário foi aplica-

do de forma uniforme para diferentes motorizações, devido à indisponibilidade de dados mais detalhados;

- **Tratamento de coprodutos (multifuncionalidade):** em alguns processos, foi necessário adotar diferentes critérios de alocação (econômica, mássica e energética). 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;
- **Tratamento de resíduos e reciclagem:** foi adotada a abordagem "cut-off" para o tratamento de materiais reciclados, sem a realização de análises de sensibilidade com métodos alternativos, como "end-of-life recycling" ou "allocation at the point of substitution". Esta é uma limitação do estudo, uma vez que 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.

Em conjunto, essas limitações evidenciam a complexidade da modelagem de ACV no setor automobilístico e reforçam a necessidade de cautela na interpretação dos resultados. Ao mesmo tempo, indicam oportunidades de aprimoramento, especialmente no que se refere à ampliação do escopo, ao uso de dados primários mais representativos e ao aprofundamento das análises metodológicas em estudos futuros.

▲ 3.2 Resultados da pegada de carbono

Neste capítulo são apresentados os resultados da pegada de carbono, do berço-ao-portão, para os doze veículos avaliados pelo Projeto no cenário base. Os resultados gerais, medidos em kgCO₂e por veículo, são em seguida analisados a partir da contribuição por etapas de ciclo de vida, por material e por sistemas. Para mais detalhes, consulte o relatório técnico completo [aqui](#).

Os resultados e discussões apresentados devem ser interpretados à luz das limitações metodológicas identificadas, 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 ainda 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

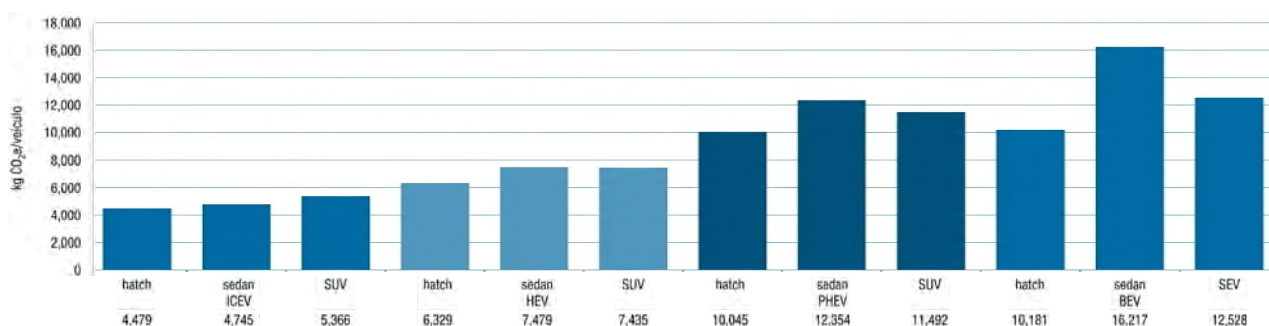
de vida dos veículos aqui produzidos. Nesse sentido, este estudo oferece uma contribuição importante para preencher essa lacuna, fornecendo dados de base para futuras pesquisas, para o aprimoramento de inventários e para a formulação de políticas públicas voltadas à descarbonização do setor automotivo.

3.2.1 Resultados gerais

A Figura 3.7 traz os resultados obtidos para os doze 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 até 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. 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 e mercado, 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 3.7 – Pegada de carbono, do berço-ao-portão, dos doze veículos do Projeto**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

A Tabela 4.3 apresenta a pegada de carbono discriminada em emissões fóssil, biogênicas e de mudança no uso da terra (MUT). Foi possível observar que as emissões fósseis foram

predominantes em todos os veículos, representando a maior contribuição para a pegada total.

Tabela 3.3 – 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

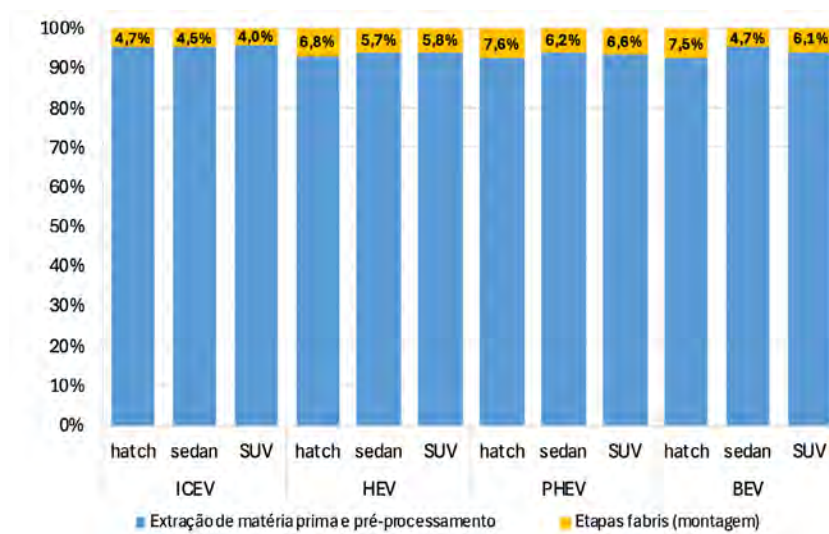
Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

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.

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 automotiva 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 veículos avaliados pelo Projeto por fase de ciclo de vida encontra-se representadas na Figura 3.8.

→| **Figura 3.8 – Contribuição por etapa do ciclo de vida para a pegada de carbono dos doze veículos do Projeto**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

Conforme pode ser observado na **Figura 3.8**, a pegada de carbono dos veículos, do berço-ao-portão, dos veículos 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.

É evidente, portanto, que a maioria dos esforços para descarbonizar o setor automobilístico devem ser direcionados para a cadeia de suprimentos, 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 quantidades, 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*).

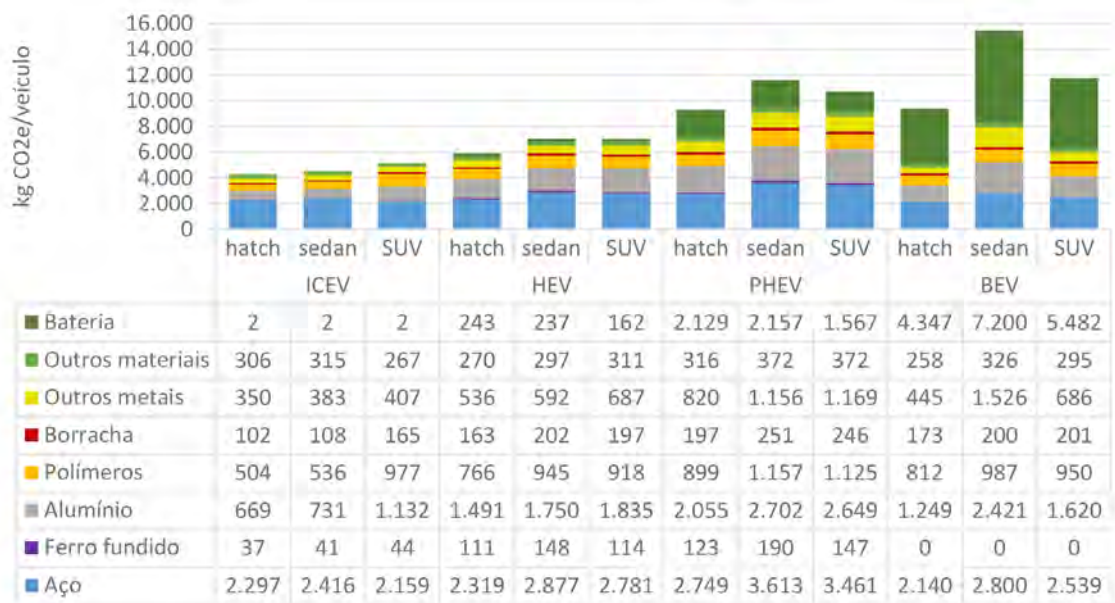
Nota-se, ademais, que os veículos ICEV, com produção nacional, apresentaram a menor contribuição das etapas fabris, enquanto as demais motorizações, parcialmente ou totalmente importadas, possuem uma contribuição ligeiramente maior desta etapa. No caso dos HEVs, por exemplo, foi considerado no cenário 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.

Os resultados mostram 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.

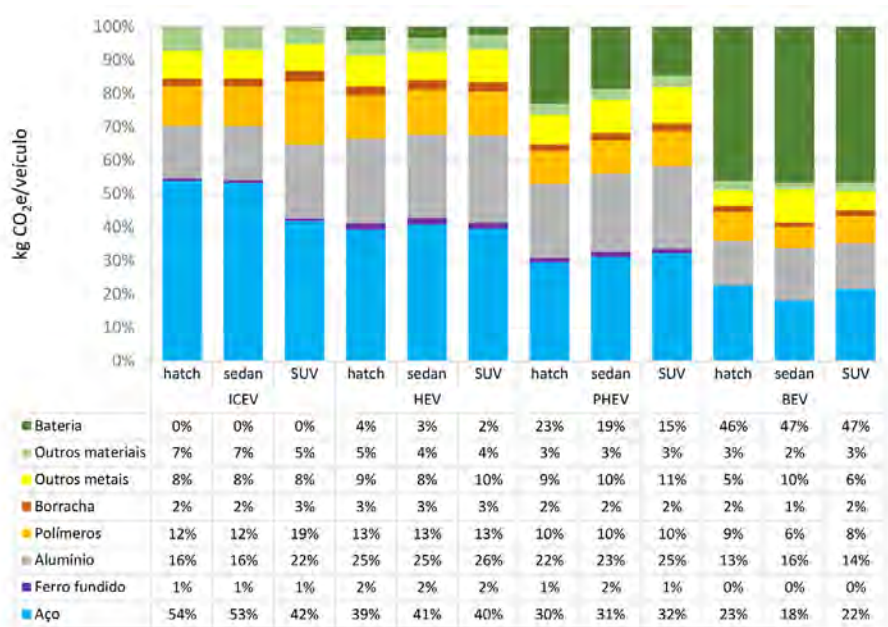
Dado que é na fase de produção e pré-processamento dos materiais que se encontra mais de 90% da pegada de carbono dos veículos, a análise da contribuição dos principais materiais nas emissões de produção de automóveis é essencial para a priorização de esforços de descarbonização. A **Figura 3.9** e **Figura 3.10** mostram, de modo complementar, a pegada de carbono dos veículos por material. É importante ressaltar, contudo, que não foi possível desagregar 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 3.9 – Pegada de carbono dos doze veículos avaliados pelo Projeto, por material**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

→| **Figura 3.10 – Contribuição relativa dos materiais para a pegada de carbono dos doze veículos do projeto**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

O aço foi o principal responsável pelas emissões nos veículos estudados, representando entre 18% e 54% da pegada de carbono, dependendo do tipo de motorização e segmento. Essa elevada participação está associada tanto à grande massa de aço empregada na fabricação do veículo quanto à intensidade energética do processo siderúrgico, especialmente na fabricação do aço via rota do alto-forno (BF-BOF). O alumínio aparece como o segun-

do maior contribuinte, com participação crescente nos veículos de maior porte, especialmente no segmento SUV, 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 6% 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 (PHEVs), a influência da eletrificação fica mais evidente com a participação dos materiais associados à bateria contribuindo entre aproximadamente 15% e 23%.

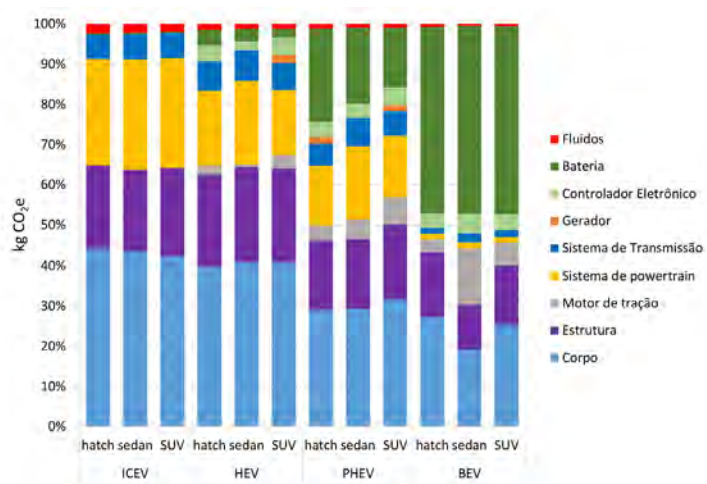
Já nos BEVs, os materiais associados à bateria tornam-se o principal fator de impacto, respondendo por cerca de 46% a 47% da pegada de carbono da produção. Esse resultado está diretamente relacionado à elevada intensidade energética e às emissões associadas à produção de células de bateria, incluindo 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 ca-

talisadores 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/kg), prata (457,6 kgCO₂e/kg) e platina (69.669 kgCO₂e/kg). 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.

As contribuições em termos percentuais dos diferentes sistemas do veículo para a pegada de carbono podem ser consultadas na **Figura 3.11**. Destacam-se os sistemas que utilizam maiores quantidades dos materiais críticos mapeados acima. Assim, 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.

→ **Figura 3.11 – Contribuição dos sistemas dos veículos para a pegada de carbono, do berço- ao- portão**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

3.2.2 Análise de cenários e sensibilidades

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 cenários e sensibilidades ajuda a verificar se as conclusões do estudo permanecem consistentes frente a mudanças plausíveis nas premissas adotadas, reduzindo o risco de interpretações equivocadas.

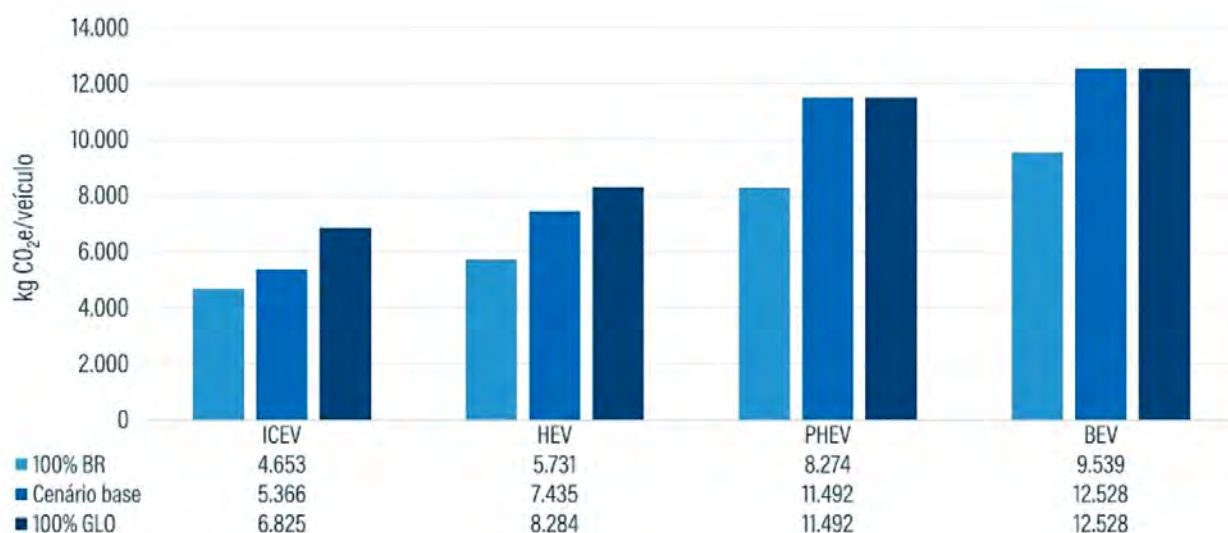
A seguir são apresentados os principais resultados das análises de cenários e sensibilidades apresentados na **Seção 4.1.2**. Outras análises de sensibilidades e cenários foram realizadas e podem ser consultadas no relatório técnico do Projeto.

Cenário de nacionalização

No cenário de nacionalização, o estudo buscou evidenciar a influência da fronteira geográfica, comparando a pegada de carbono

no 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 são evidenciados na **Figura 3.12** para o segmento SUV.

→| **Figura 3.12 – Pegada de carbono dos veículos SUV para diferentes cenários de nacionalização**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

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.

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.

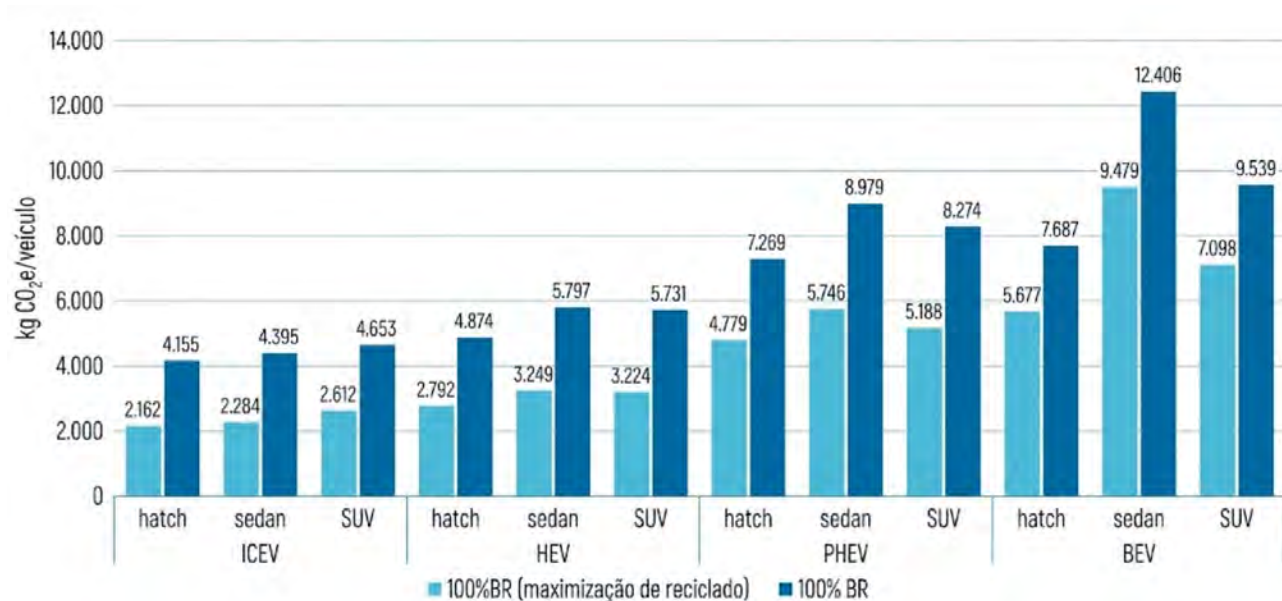
Cenário de maximização de materiais reciclados

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%, 41,8% e 0% de reciclados nos inventários de aço, alumínio e plásticos, respectivamente. Desse modo, o estudo adotou um percentual de 100% de reciclados para o aço e alumínio, bem como de 25% para os polímeros.

→| **Figura 4.13 – Resultados da pegada de carbono considerando cenários de maximização de reciclados no Brasil**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

Conforme pode ser observado na **Figura 3.13**, os resultados apontam para uma redução em torno de 43 e 47% na pegada de carbono dos ICEVs em relação ao cenário 100% nacional, 43% para o 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 possui 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

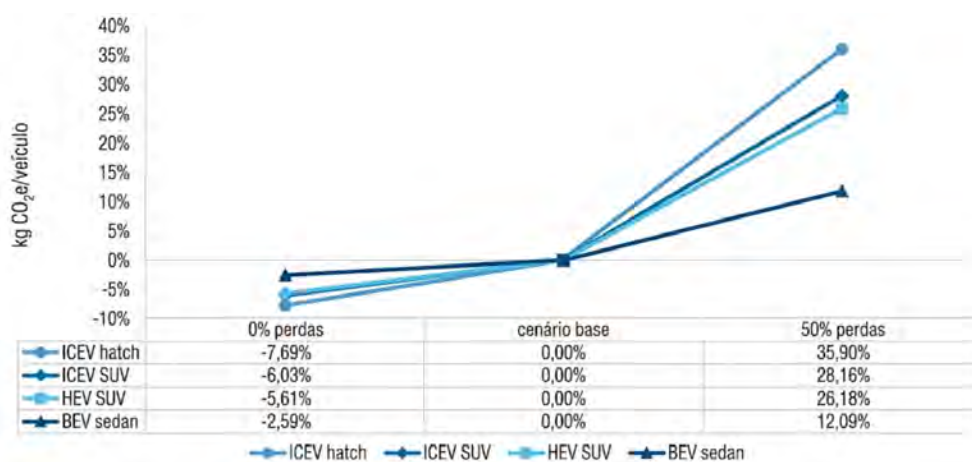
Análise de sensibilidade: perdas na cadeia do aço

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 3.14**, para diferentes motorizações e segmentos.

→ **Figura 3.14 – Variação da pegada de carbono para o cenário de perdas do aço**



Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

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%. 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 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 res-

saltam 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.

▲ 3.2.3 Análise comparativa internacional

Os resultados obtidos no estudo para a pegada de carbono dos veículos estão de acordo com os daqueles observados pela literatura científica. A **Tabela 3.4** apresenta a pegada de carbono dos doze veículos avaliados pelo 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 dos materiais automotivos a partir de inventários de ciclo de vida 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 3.4 – 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	4,0 a 6,9			7,2 a 11,0			8,2 a 13,5			9,8 a 15,7		

Fonte: FGVces; FEM-UNICAMP (2026).

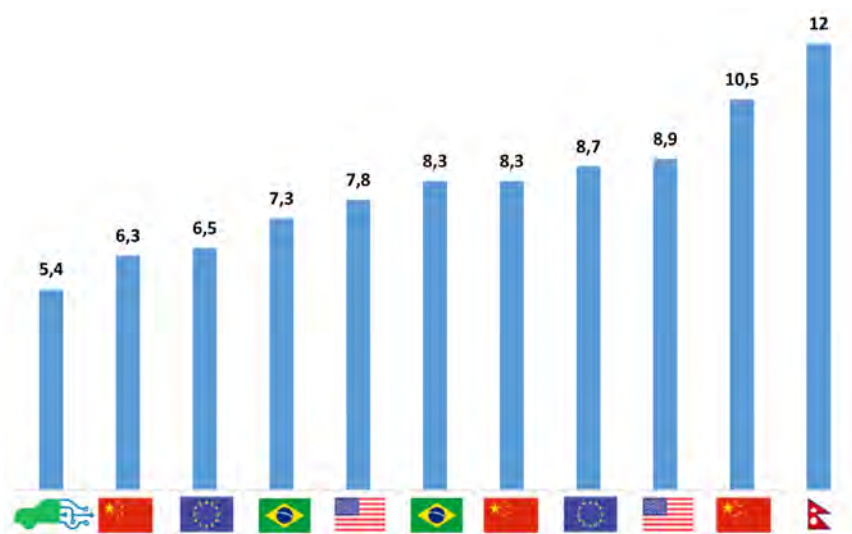
Ainda em relação ao cenário “100% GLO”, a relação entre a pegada de carbono dos veículos e o peso destes também está alinhada com a literatura. Para os veículos ICEV, o kg CO₂e/kg de veículo obtidos neste estudo variam entre 5,34 e 5,60 dependendo do segmento no cenário base. Buberger *et al.* (2022) e Qiao *et al.* (2017) obtiveram valores de, respectivamente, 5,24 e 6,96 kg CO₂e/kg de veículo, enquanto Hawkins *et al.* (2013) estimou este valor em 5 kg CO₂e/kg veículo, fornecendo uma média entre 4 e 6.5 kg CO₂e/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 CO₂e/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 CO₂e/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 **Tabela 4.4**, o valor é notoriamente menor. Em complementação à esta análise, a **Figura 4.15** 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 3.15 – Comparação internacional da pegada de carbono do veículo ICEV-SUV em tCO₂eq/veículo**

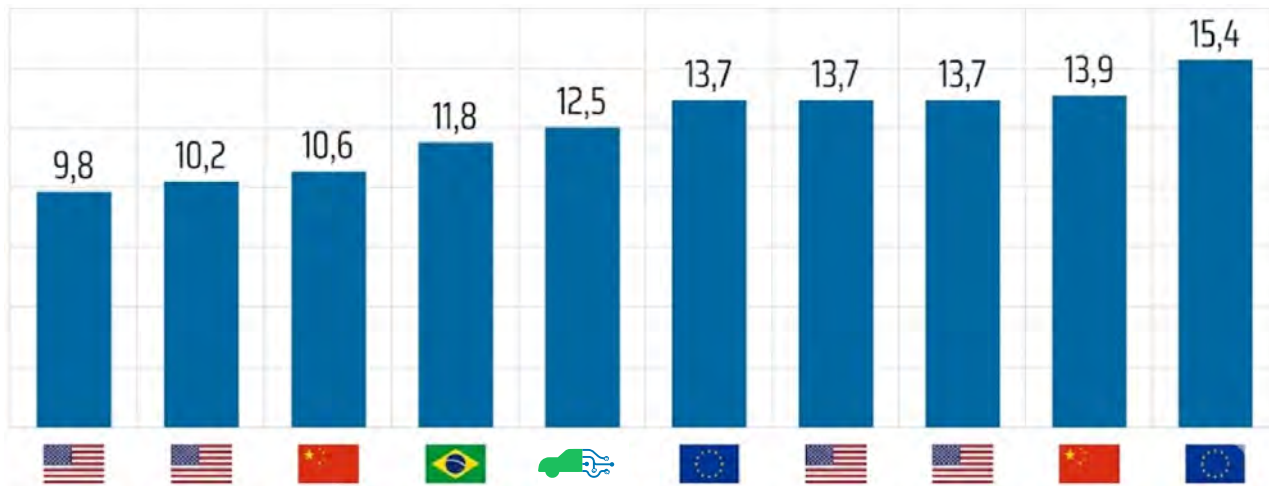


Fonte: Elaboração própria; dados de literatura baseados em Velandia Vargas *et al.* (2019); Gauto *et al.* (2023); Elgowainy *et al.* (2018); Hawkins *et al.* (2013); Shafique *et al.* (2022); Onat, Kucukvar e Tatari (2015); Xie (2023); Joshi, Sharma e Baral (2022); Patterson *et al.* (2012) e Yang, 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 [Figura 4.16](#).

→| **Figura 4.16 – 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).

4. Desafios e aprendizados

Ao longo do período de execução do Projeto, importantes desafios associados à realização de estudos de ACV no contexto do setor automobilístico brasileiro foram identificados, tanto de caráter técnico, quanto institucional. Dentre eles, um dos principais esteve relacionado à coleta de dados primários junto a montadoras e suas cadeias de suprimentos, especialmente devido à elevada complexidade e diversidade de atores envolvidos. Conforme discutido no relatório, o acesso direto a informações de produtores e fornecedores de materiais e autopeças, além de dados de composição de veículos e sua produção nas montadoras, demandou intenso processo de engajamento e alinhamento técnico, bem como uma padronização metodológica que garantisse a aderências entre diferentes formatos de reporte e a abordagem adotada no estudo. O processo de compartilhamento enfrentou ainda restrições próprias à confidencialidade de dados representativos de processos industriais específicos, limitando seu alcance e detalhamento.

Paralelamente, a adaptação dos inventários de ciclo de vida para o contexto brasileiro enfrentou um cenário de escassez de dados setoriais nacionais consolidados, tendo sido adotados diversos inventários internacionais provenientes das bases de dados ecoinvent e GREET. Nesse contexto, esforços adicionais de modelagem foram empreendidos para materiais identificados como de maior relevância para a pegada de carbono que se relacionam com a composição mássica do veículo, entre eles, aço, alumínio e polímeros. Como resultado, o projeto contribuiu, para além da adaptação de fatores de emissão, com o entendimento aprofundado de processos produtivos centrais à cadeia automotiva, sem o qual não é possível planejar a descarbonização do setor. Nesse caso, o desafio se transformou não apenas em aprendizado, mas em insumo técnico.

Em relação aos contornos metodológicos do estudo, a disponibilidade desigual de dados e a distinção entre realidades produtivas para veículos a combustão, híbridos e elétricos limitou

a adoção de premissas equivalentes entre todos os modelos analisados, reforçando a necessidade de cautela na interpretação dos resultados, que não deve assumir caráter comparativo. Adicionalmente, a adoção da fronteira do berço ao portão, embora adequada aos objetivos do estudo, não contempla os impactos associados às fases de uso, manutenção e fim de vida, essenciais à compreensão integral do desempenho ambiental dos veículos, representando um desafio de comunicação e compreensão adequada dos resultados do Projeto.

Apesar desses desafios, o Projeto trouxe importantes aprendizados que contribuem para o avanço de estudos de pegada de carbono e ACV no setor automotivo brasileiro. Entre os principais aprendizados, destaca-se a importância do engajamento multissetorial para a construção de inventários mais robustos e representativos, evidenciando que a cooperação é um elemento fundamental na ampliação da qualidade e da transparência dos dados disponíveis e, portanto, da potencial aderência dos resultados. Após inúmeras reuniões individuais e coletivas para engajamento dos atores, o Projeto conseguiu contar com a participação de 15 empresas e 11 associações setoriais, possibilitando a geração de resultados úteis e mais próximos da realidade do setor.

Por outro lado, as modelagens desenvolvidas no âmbito do Projeto para melhor representar a produção nacional demonstram a relevância de metodologias que reflitam em profundidade a realidade brasileira, de forma a revelar vantagens comparativas, como aquelas associadas à sua matriz elétrica predominantemente renovável. 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, o estudo gerou relatórios técnicos e uma ferramenta setorial com informações mais representativas sobre a produção automotiva no contexto brasileiro.

Além disso, o Projeto demonstra a importância do fortalecimento e consolidação de uma base de dados e inventários de ciclo de vida nacional. A experiência acumulada pelo Projeto reforça que a regionalização dessas informações representa elemento estratégico para apoiar políticas públicas,

regulamentações e iniciativas empresariais de descarbonização. Ao todo 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.

5. Considerações finais e recomendações

O Projeto “Do Berço ao Portão” representa um avanço significativo na compreensão da pegada de carbono da produção de veículos leves no Brasil. Após três anos de pesquisa, o Projeto gerou dados inéditos e adaptados à realidade nacional, preenchendo uma importante lacuna de conhecimento sobre as emissões de GEE associadas ao escopo do berço-ao-portão.

Os resultados gerados 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.

A adoção da abordagem de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), em conformidade com as normas ISO 14040 e 14044, permitiu a construção de uma base técnica robusta. No entanto, é importante ressaltar que os resultados trazidos neste estudo contemplam o escopo do berço-ao-portão e analisam somente a categoria de impacto ambiental “Mudança do Clima” – em outras palavras, avaliam apenas o impacto das emissões de GEE envolvidas deste a etapa de extração de matérias-primas até a etapa de fabricação do veículo. Nesse sentido, os resultados do estudo não devem ser utilizados para estabelecer valores normativos definitivos ou médias nacionais, nem mesmo para realizar afirmações comparativas quanto à superioridade ou equivalência ambiental dos veículos estudados.

As principais conclusões e recomendações do estudo incluem:

- A geração de mais de 200 inventários de ciclo de vida e 50 fatores de emissão “tropicalizados”, aliados ao desenvolvimento da ferramenta setorial “Mover-se”, fornecem ao setor automobilístico uma base técnica robusta para apoio à gestão de emissões, tanto no âmbito empresarial quanto público.

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;

- O fato de o Brasil possuir uma matriz elétrica nacional composta por quase 90% de fontes renováveis, confere ao Brasil uma potencial vantagem na produção de veículos e materiais (como aço, alumínio, baterias e polímeros), quando em comparação com a produção conduzida em outras regiões do mundo. A análise do cenário de nacionalização demonstram que a pegada de carbono, para os veículos cuja fabricação é realizada no Brasil (100% BR) resultam em emissões sistematicamente menores do que o cenário 100% GLO;
- 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;
- 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 de GEE para todos os veículos avaliados. Isso demonstra que o avanço da descarbonização no Brasil depende da cadeia completa e reforça o papel das montadoras como empresas focais, que podem 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;
- Em geral, 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 redução de perdas ao longo da cadeia de suprimentos automotiva. Recomenda-se, portanto, incentivar políticas públicas e ações empresariais voltadas à nacionalização de insumos, descarbonização da cadeia de valor e expansão da economia circular.

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 e especiais como aço, alumínio, polímeros e baterias íon-lítio;
- Aprimoramento da ferramenta setorial "Mover-se", incluindo a atualização periódica dos inventários de ciclo de vida e dos fatores de emissão e o refinamento das funcionalidades da ferramenta setorial;
- 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

- 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.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 14040:** Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014a. 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, 2014b. 46 p.
- ABVE. **Elétricos crescem em todas as regiões do Brasil.** São Paulo: Associação Brasileira do Veículo Elétrico, 2024.
- AEA. **Cartilha de destinação de materiais veiculares.** São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2020.
- AEA. **Cartilha Eletromobilidade:** veículos eletrificados. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2023.
- AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. **Comissão debate reciclagem de veículos no Brasil.** Brasília: Câmara dos Deputados, 2022. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/900068-comissao-debate-reciclagem-de-veiculos-no-brasil/>>. Acesso em: 2022.
- ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2023.** São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2023. Disponível em: <www.anfavea.com.br>.
- BRIGHT CONSULTING. **Bright Consulting Final Delivery – Projeto “Do Berço ao Portão”.** [s.l.]: Bright Consulting, 2023.
- BRITO, A.; GRIGORI, P. Autópsia da sucata: para onde vão os carros após a morte? **Correio Braziliense**, 4 ago. 2022. Disponível em: <<https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/dab58aeb-fc15-4b09-b440-f0aaab1c32af.pdf>>.
- 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/>>.
- CNT. **Anuário CNT do Transporte 2022:** estatísticas consolidadas. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2022. p. 1–25.
- 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 INTERNATIONAL AB. **General Programme Instructions for the International EPD® System.** Version 4.0. Stockholm: EPD International, 2024.
- 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 LCA.** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. Disponível em: <<https://op.europa.eu/sv/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1>>.
- FAN, T.; LIANG, W.; GUO, W.; FENG, T.; LI, W. Life cycle assessment of electric vehicles' lithium-ion batteries reused for energy storage.

- Journal of Energy Storage**, v. 71, p. 108126, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108126>>.
- FENABRAVE. **Relatório informativo de emplacamentos**. São Paulo: Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores, 2023. Disponível em: <<https://www.fenabrave.org.br>>.
- FGVCES. **Panorama da pegada de carbono de veículos leves: resultados do estado da arte**. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, p. 102, 2026.
- 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. 140. 2026.
- 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, out. 2023.
- GREET. The GREET life-cycle model. Argonne: 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, fev. 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>>. 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.]: Hyundai, 2022.
- IBICT. **Guia geral para avaliações do ciclo de vida: orientações detalhadas**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, 2014. 319 p.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- 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>>.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Estatísticas – Frota de Veículos – SENATRAN. Brasília: Ministério dos Transportes, 2023.
- MOTOMURA, M. Como se fabrica um carro? **Super Interessante**, São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-se-fabrica-um-carro>>.
- 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, jul. 2015.
- 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.
- 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, out. 2017.
- 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, 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, mar. 2022.
- 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, 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, jan. 2022.
- 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, 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, 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, maio 2020.





do berço ao portão

PEGADA DE CARBONO DE VEÍCULOS LEVES FABRICADOS NO BRASIL

FGV EAESP
CENTRO DE ESTUDOS
EM SUSTENTABILIDADE



UNICAMP



FEM

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

Coord. Técnica Linha V



Coordenadora Linhas IV, V e VI



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA,
COMÉRCIO E SERVIÇOS

