



do berço
ao portão

PEGADA DE CARBONO DE VEÍCULOS LEVES FABRICADOS NO BRASIL

Panorama da pegada de carbono de veículos leves: Resultados do estado da arte

 **FGV EAESP**
CENTRO DE ESTUDOS
EM SUSTENTABILIDADE



UNICAMP



FEM

mover fundep fundação de
apoio da UFMG

Expediente

REALIZAÇÃO



APOIO



PROJETO

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

RELATÓRIO

Produto 3.1 – Relatório com resultados do estado da arte dos principais estudos nacionais e internacionais relacionados à pegada de carbono de veículos de passeio

COORDENAÇÃO GERAL

Mario Prestes Monzoni Neto

COORDENAÇÃO EXECUTIVA

Guarany Ipê do Sol Osório

AUTORES

Juliana Ferreira Picoli
Letícia Missiatto Gavioli
Layla Nunes Lambiasi
Lucas Cesilla de Souza
Tiago Zillio Soares
Luis Henrique Rigato Vasconcellos
André Pereira de Carvalho
Guarany Ipê do Sol Osório
Mario Prestes Monzoni Neto

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da “Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – FUNDEP, MOVER – Linha V, que financiou o projeto supracitado. Agradecemos também à equipe da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (FEM/UNICAMP), em especial Joaquim Seabra e Paulo Lima, pelas valiosas contribuições durante a elaboração do estudo.

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

José Roosevelt Junior | Mediacts

CITAR COMO

FGVces. Panorama da pegada de carbono de veículos leves: Resultados do estado da arte. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getulio Vargas. São Paulo, p. 101. 2024.

PARTICIPANTES

EXECUÇÃO DO PROJETO



FINANCIAMENTO



PARCEIROS



COMITÊ CONSULTIVO



Sumário Executivo

Para alinhar o setor de transportes brasileiro com as metas climáticas globais, nacionais e empresariais, é essencial que agentes dos setores públicos e privados compreendam com clareza os impactos ambientais da produção de diferentes opções de motorização e tomem decisões mais informadas, buscando soluções que efetivamente reduzam as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Quando baseada em escolhas metodológicas consistentes e dados confiáveis, metodologias como a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e a pegada de carbono permitem quantificar esses impactos ambientais ao longo de toda a cadeia produtiva e oferecem insumos para uma gestão mais eficiente das emissões.

É nesse contexto que o projeto “Do berço ao portão: Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil” está inserido. O projeto pretende fornecer resultados consistentes a respeito da produção de veículos no país, auxiliando processos de tomada de decisão e preenchendo importantes lacunas do conhecimento.

Com o intuito de apoiar as fases subsequentes do projeto, este relatório apresenta o estado da arte dos principais estudos nacionais e internacionais relacionados à ACV e pegada de carbono de veículos leves. O relatório fornece também uma visão geral da cadeia automotiva e do ciclo de vida da produção de veículos. Para além da equipe do projeto, este relatório pode ser útil a profissionais que buscam uma compreensão abrangente do setor automobilístico, especialmente no que diz respeito aos estudos de ACV e pegada de carbono, com foco em veículos leves.

O setor automobilístico no Brasil: contexto e tendências

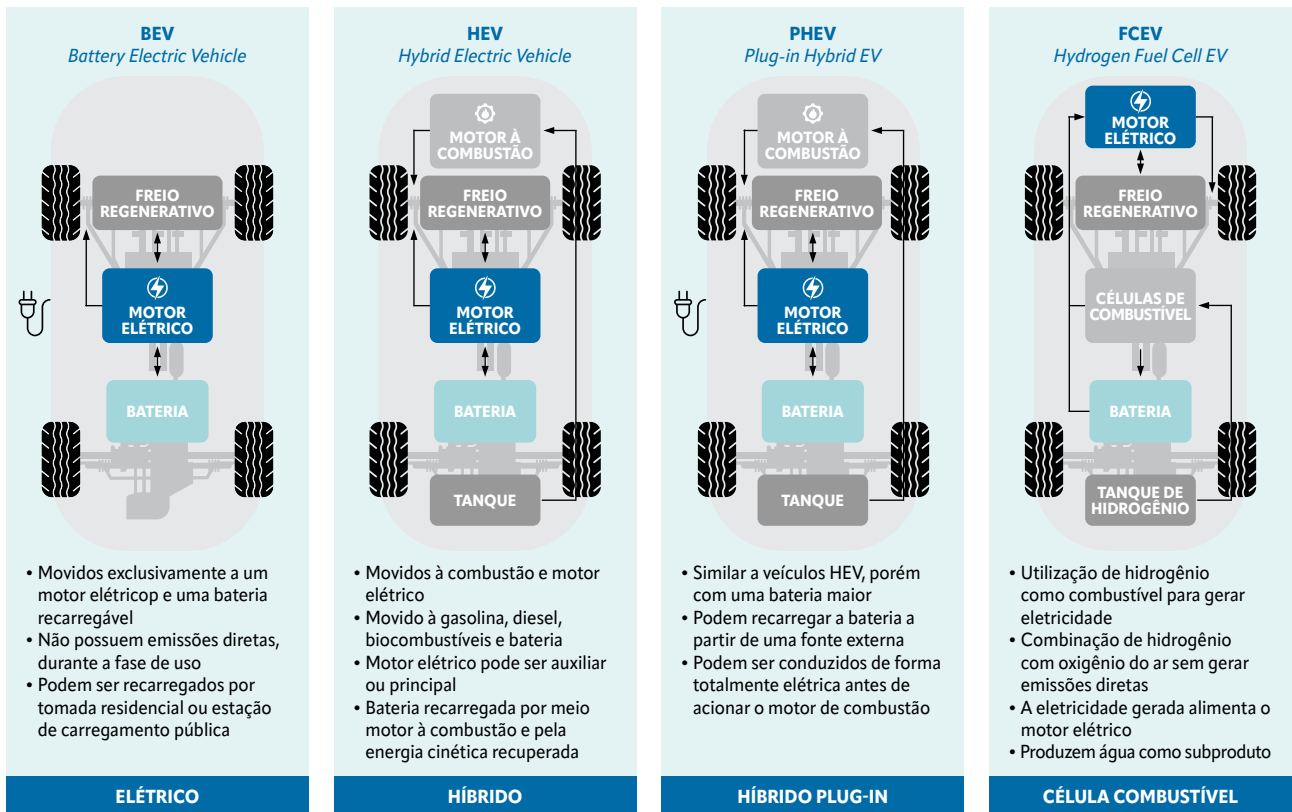
A indústria automobilística brasileira se destaca no cenário mundial, ocupando o posto de 8º maior produtor e 6º maior mercado interno de veículos. Com capacidade instalada de produção de 4,6 milhões de veículos e produção média nos úl-

timos 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.

A **Figura S.1** aborda os diferentes tipos de motorização dos veículos e a **Figura S.2** traz um panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil. 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. Ainda sobre as projeções globais, percebe-se que as baterias de íon-lítio continuarão a ter predominância no mercado de veículos eletrificados. Além disso, baterias com o cátodo do tipo NMC são mais frequentes nessa categoria de veículos, representando por volta de 60% das vendas globais, enquanto bateria do tipo LFP e NCA representam 30% e 8%, respectivamente.

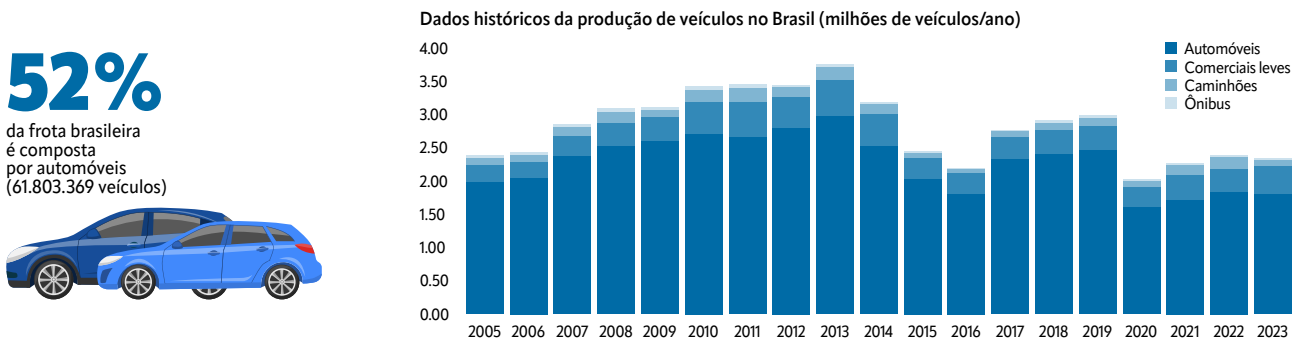
O comportamento do mercado automotivo brasileiro parece indicar que a eletrificação de veículos no país pode apresentar questões mais complexas do que a transição direta para veículos tipo BEV como ocorre em outros países, o que pode favorecer o ganho de importância regional dos veículos híbridos. Diversos 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, o país tem enfrentado desafios e conquistas. Se 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 observada no país. Por outro, o Brasil possui inúmeras vantagens comparativas – 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.

→| **Figura S.1 – Tipos de veículos eletrificados**

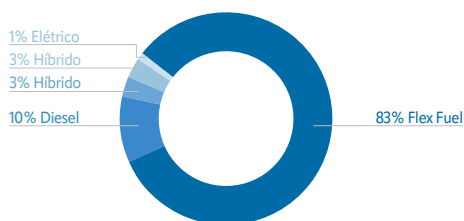


Fonte: Adaptado de AEA(2023).

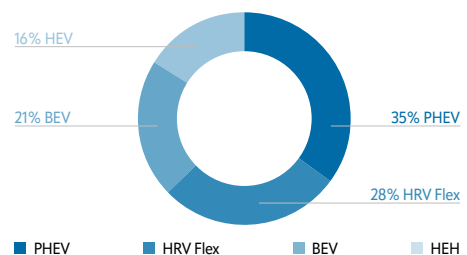
→| **Figura S.2 – Infográfico com panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil**



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).

Mapejamento da Cadeia Automotiva

De uma maneira simplificada a cadeia de suprimentos automotiva se inicia pelos insumos básicos, ou seja, as matérias-primas necessárias para a produção de um veículo. Por vezes estes insumos são adquiridos pelo setor de autopeças (modulistas) para processá-los a fim de se tornarem novas peças ou módulos, ou então são adquiridos diretamente pelas montadoras (no caso de vidros e do aço para a estamparia). Como o próprio nome diz, as montadoras são responsáveis pela montagem e acabamento do veículo, para então o fornecerem para as revendedoras e concessionárias, onde estes por sua vez comercializam o veículo para o cliente final. As Figuras a seguir apresentam um desenho simplificado da cadeia automobilística e as principais diferenças da cadeia automotiva eletrificada, quando comparada a cadeia tradicional.

Avaliação do ciclo de vida na cadeia automotiva

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.

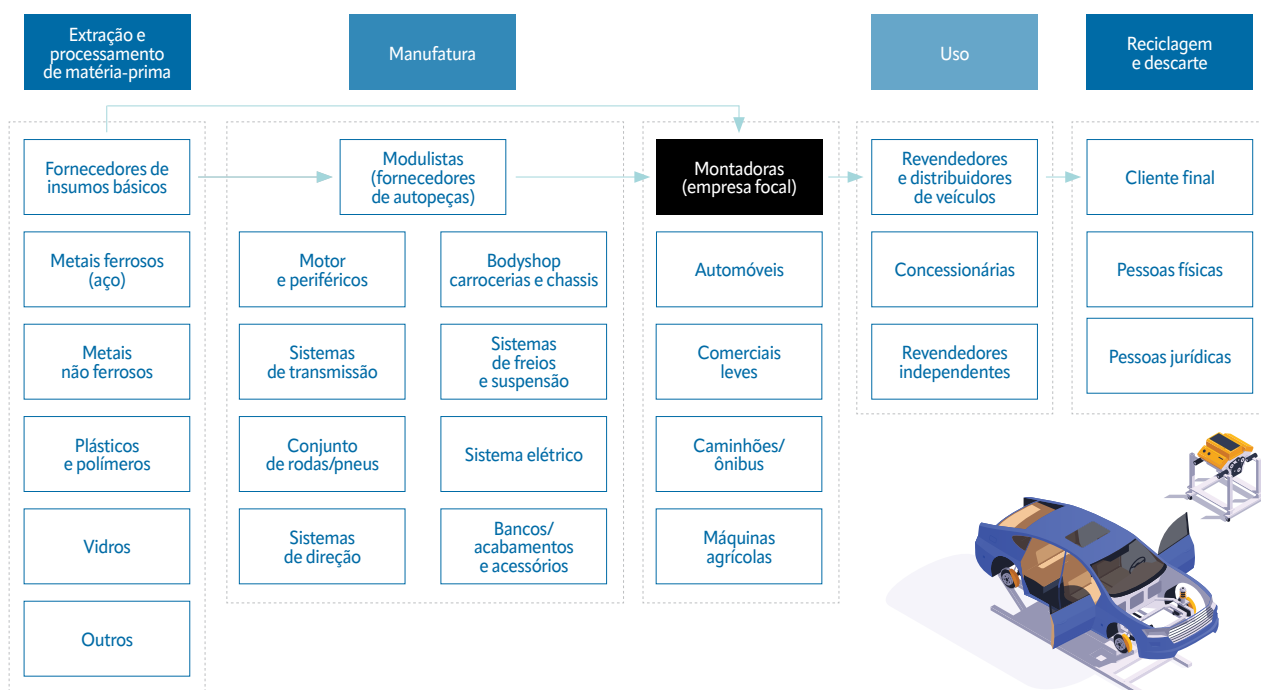
Por meio da ACV, é possível comparar diferentes tecnologias de propulsão (como motores a combustão interna, híbridos, elétricos) e identificar oportunidades de melhoria em cada etapa do ciclo de vida. Isso inclui a redução das emissões na produção de materiais, o uso de energias renováveis na fabricação, a eficiência

Figura S.3 – Desenho simplificado da cadeia automobilística



Fonte: Elaboração própria.

Figura S.4 – Cadeia automobilística para veículos elétricos



Fonte: Elaboração própria.

cia energética do veículo em operação, o gerenciamento adequado dos resíduos e a reciclagem de componentes.

A **Figura S. 5** traz, de forma simplificada, o ciclo de vida completo 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.

Revisão da Literatura de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida e Pegada de Carbono de Veículos Leves

Para essa revisão, foram avaliados os principais estudos nacionais e internacionais, buscando responder às seguintes perguntas:

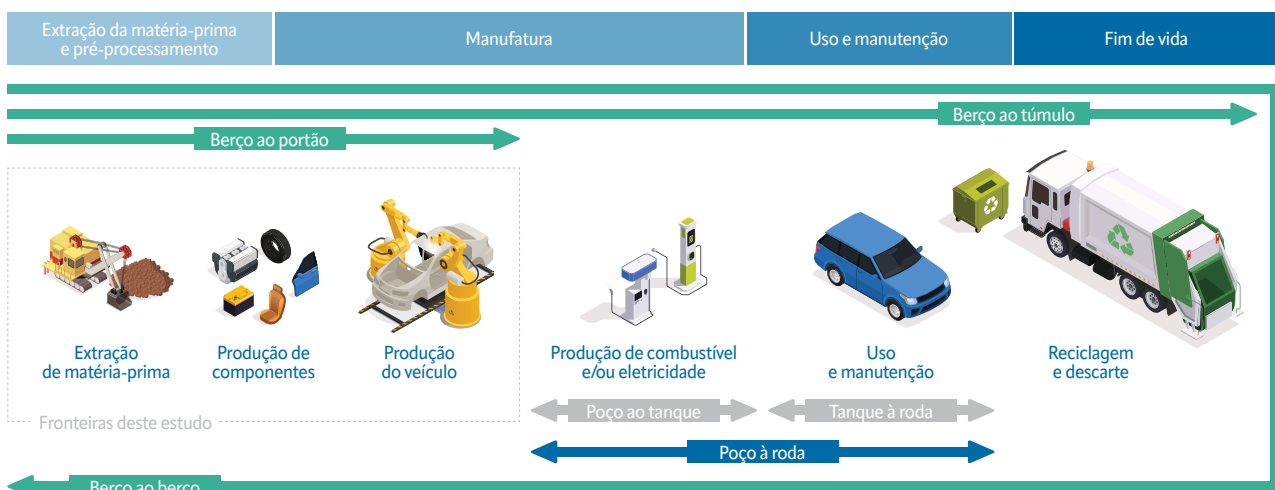
- Qual é o estado da arte sobre a ACV de veículos leves, especificamente na etapa de produção dos veículos (incluindo a bateria)?
- Quais são as principais escolhas metodológicas adotadas?
- Quais as principais fontes de dados utilizadas?
- Quais os valores de emissão de GEE de veículos, do berço ao portão da fábrica?
- Quais os principais pontos críticos e qual a contribuição da matriz energética?
- Quais são as principais lacunas em estudos de ACV de veículos leves?

No total, 58 artigos da literatura acadêmica foram avaliados. Além disso, buscando complementar a análise, foram considerados os seguintes documentos da literatura cinza (gray literature): 2 relatórios, 3 ferramentas e 4 estudos de ACV publicados por montadoras. Abaixo, os principais resultados encontrados.

Em linhas gerais, o mapeamento da pegada de carbono evidenciou ainda diferenças conforme a tecnologia de propulsão, principalmente em relação à fronteira adota. Quando considerada a fronteira do Berço ao Túmulo, BEV podem ter emissões inferiores em comparação com ICEV principalmente na fase de uso e em combinação com uma matriz elétrica mais renovável. No entanto, é importante notar que, quando consideradas as emissões somente até a manufatura dos veículos (fronteira do Berço ao Portão), a fabricação das baterias para BEV responde por uma parcela significativa das emissões totais, de forma que as emissões de veículos exclusivamente à bateria resultam em emissões superiores aos de veículos ICEV, com a etapa de manufatura das baterias respondendo por cerca de 40% das emissões totais. Entretanto, a abordagem do Berço ao Túmulo, predominante na maioria dos estudos avaliados, mostra-se importante para proporcionar uma visão mais completa das emissões de GEE, sendo possível determinar, por exemplo, qual a quilometragem mínima necessária que os veículos eletrificados precisam atingir para que tenham vantagens em relação aos veículos ICEV (ponto de *break-even*). Vale ressaltar que a grande maioria dos estudos desconsidera a trocar a bateria durante o tempo de vida útil do veículo.

Além disso, materiais como aço e alumínio se destacam em termos de emissões associadas à fabricação do veículo. No caso de veículos eletrificados, os principais contribuintes para as emissões da bateria estão associados à produção do mate-

→| **Figura S. 5 – Ciclo de vida de um veículo leve**



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

rial ativo do cátodo, como sulfato de cobalto e de níquel e ao consumo de energia na etapa de montagem da bateria. Por fim, destaca-se a predominância de estudos internacionais e a escassez de informações aprofundadas e dados primários sobre a etapa de produção do veículo (e de baterias), com enfoque do Berço ao Portão.

▲ Lacunas encontradas

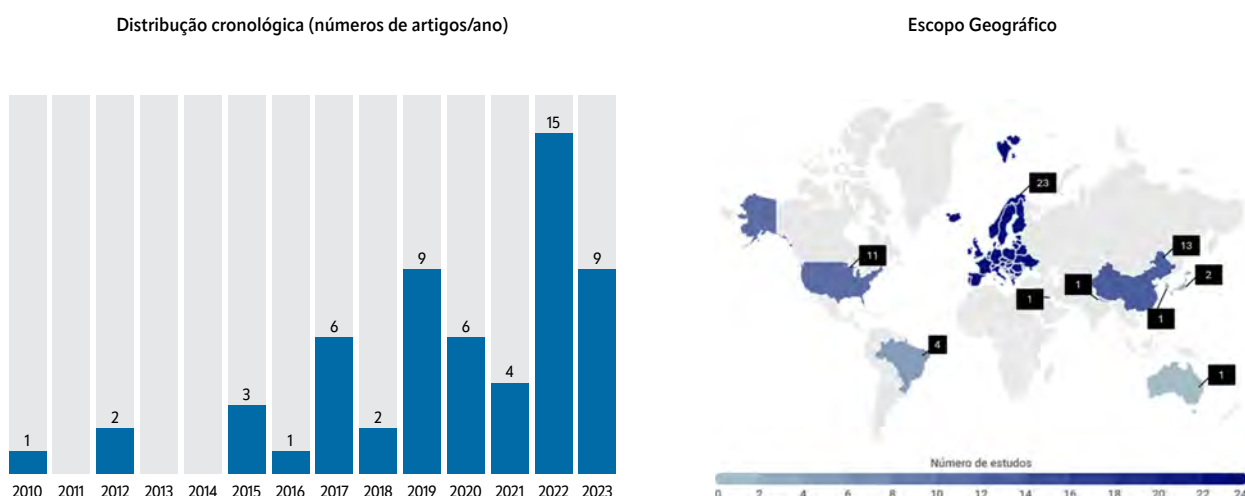
A partir da revisão de literatura realizada, algumas lacunas e pontos de atenção foram encontrados, sobretudo no contexto nacional.

1. É notável a falta de dados primários em estudos de ACV de baterias e das etapas de manufatura do veículo como um todo, com grande parte dos artigos tomando dados da ferramenta GREET, da literatura ou de bases de dados como o Ecoinvent.
2. Apenas um estudo avaliou impactos com escopo de produção no Brasil, evidenciando uma lacuna de conhecimento e justificando a importância de dados primários e transparentes no contexto nacional que permitam resultados de maior consistência e confiabilidade para possíveis comparações internacionais.
3. Poucos estudos de ACV consideram premissas sobre expectativa de vida da bateria em suas modelagens, assumindo apenas que o banco de bateria terá a mesma duração que o veículo. Essa afirmação, no entanto, não é atualmente respaldada por evidências consolidadas, havendo ape-

nas a indicação de aposentar a bateria uma vez que esta atinja 80% de sua capacidade de armazenamento.

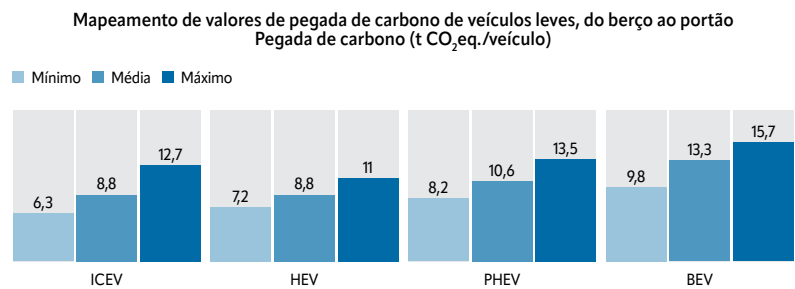
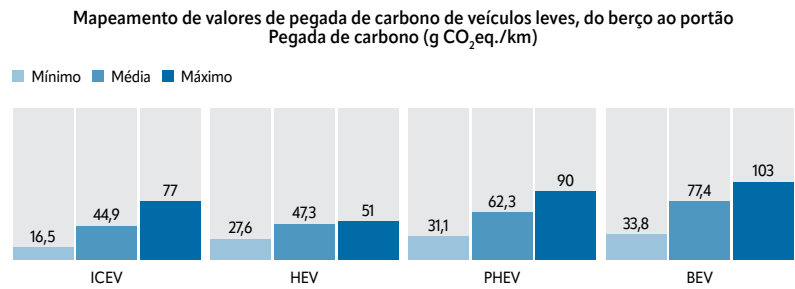
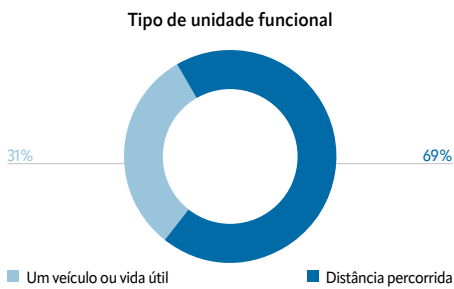
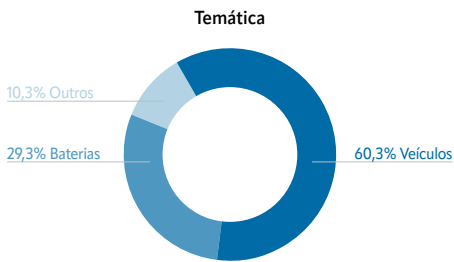
4. Análises de sensibilidade nos estudos avaliados revelam importantes considerações para a avaliação de ciclo de vida de veículos. As pesquisas indicam que mudanças no perfil energético podem significativamente influenciar as emissões de veículos, principalmente elétricos. Apesar disso, a grande maioria das análises se concentram na fase de uso e não fazem considerações sobre alterações na produção do veículo e seus materiais e componentes.
5. Os estudos de ACV de veículos leves carecem de padronização e diferem quanto a adoção de aspectos importantes, como a cobertura geográfica, temporal e tecnológica. Para suprir essa necessidade, pesquisadores desenvolveram ferramentas que utilizam uma abordagem padronizada e consistente para ACV de veículos, capazes de comparar diferentes tecnologias e cenários. Até o momento, não foram identificadas ferramentas similares em nível nacional que forneçam informações com o enfoque no ciclo de vida do veículo.
6. Por fim, embora as fronteiras mais citadas na literatura sejam as do Berço ao Túmulo, o estudo Pegada de Carbono em veículos leves no contexto brasileiro, adotará a abordagem do Berço ao Portão. Esta perspectiva permite um foco específico na produção de veículos, desde a extração de matéria-prima até a montagem, possibilitando uma análise mais detalhada das contribuições de impacto dessa etapa, e preenchendo uma lacuna relevante na literatura, principalmente considerando o contexto brasileiro.

→| Figura S. 6 – Visão geral da revisão da literatura acadêmica

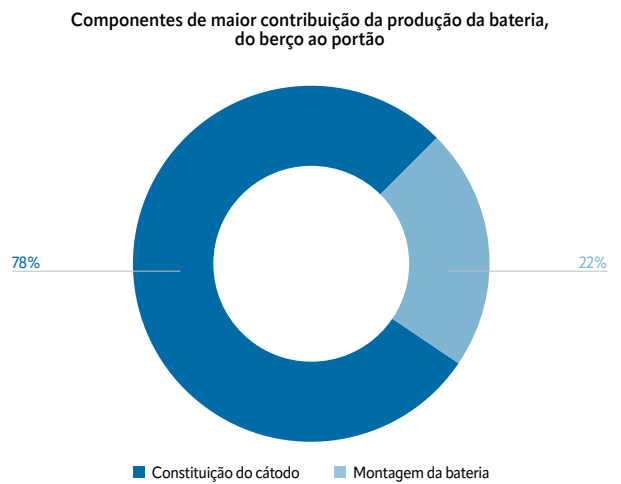
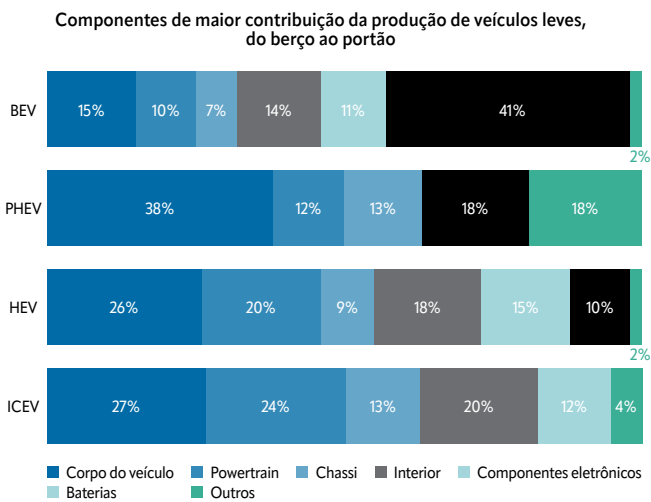
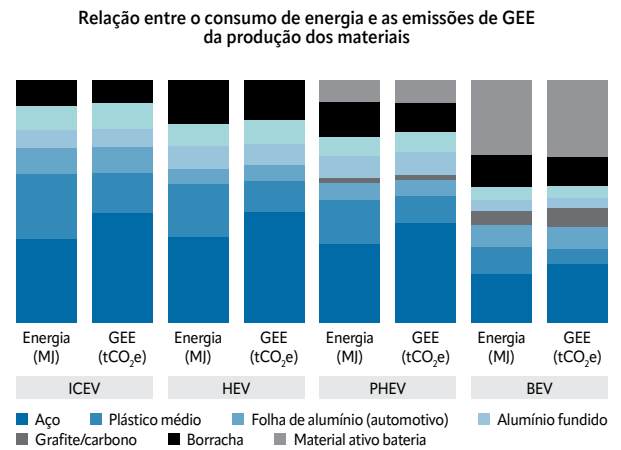
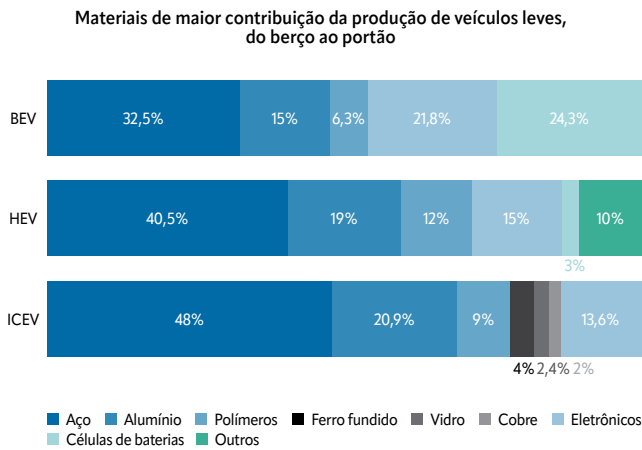


Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura S. 6 – Visão geral da revisão da literatura acadêmica (continuação)**

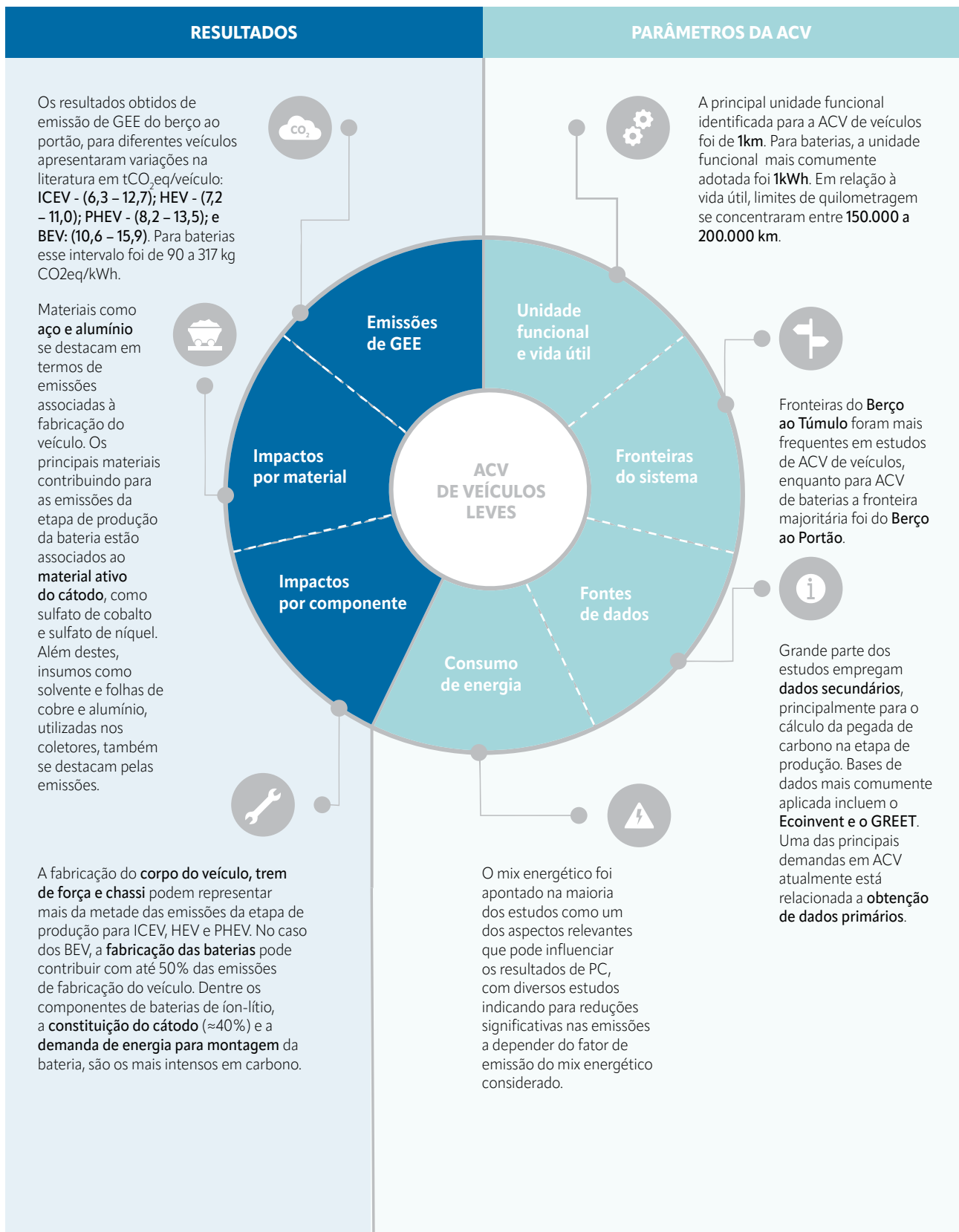


Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria. Os resultados foram uniformizados em a) t de CO₂eq./veículo ou b) g de CO₂eq./km considerando a vida útil especificada nos artigos avaliados.



Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura S.7 – Resumo dos principais resultados e parâmetros da revisão da literatura acadêmica**



Fonte: Elaboração própria.

Limitações do estudo

É importante salientar que, devido ao foco exclusivo na avaliação da pegada de carbono, este relatório não considera outras categorias de impacto ambiental. Portanto, não permite a análise de possíveis *trade-offs* entre a pegada de carbono e outros impactos ambientais relevantes, como a escassez hídrica e de metais raros, bem como o impacto na saúde, oriundo das emissões de poluentes atmosféricos. Além disso, o projeto se limita a análise do Berço ao Portão, ou seja, não contemplará as etapas de uso e fim de vida. Consequentemente, o estudo não incluirá as etapas de produção e queima de combustíveis/eletricidade utilizados na etapa de uso dos veículos.

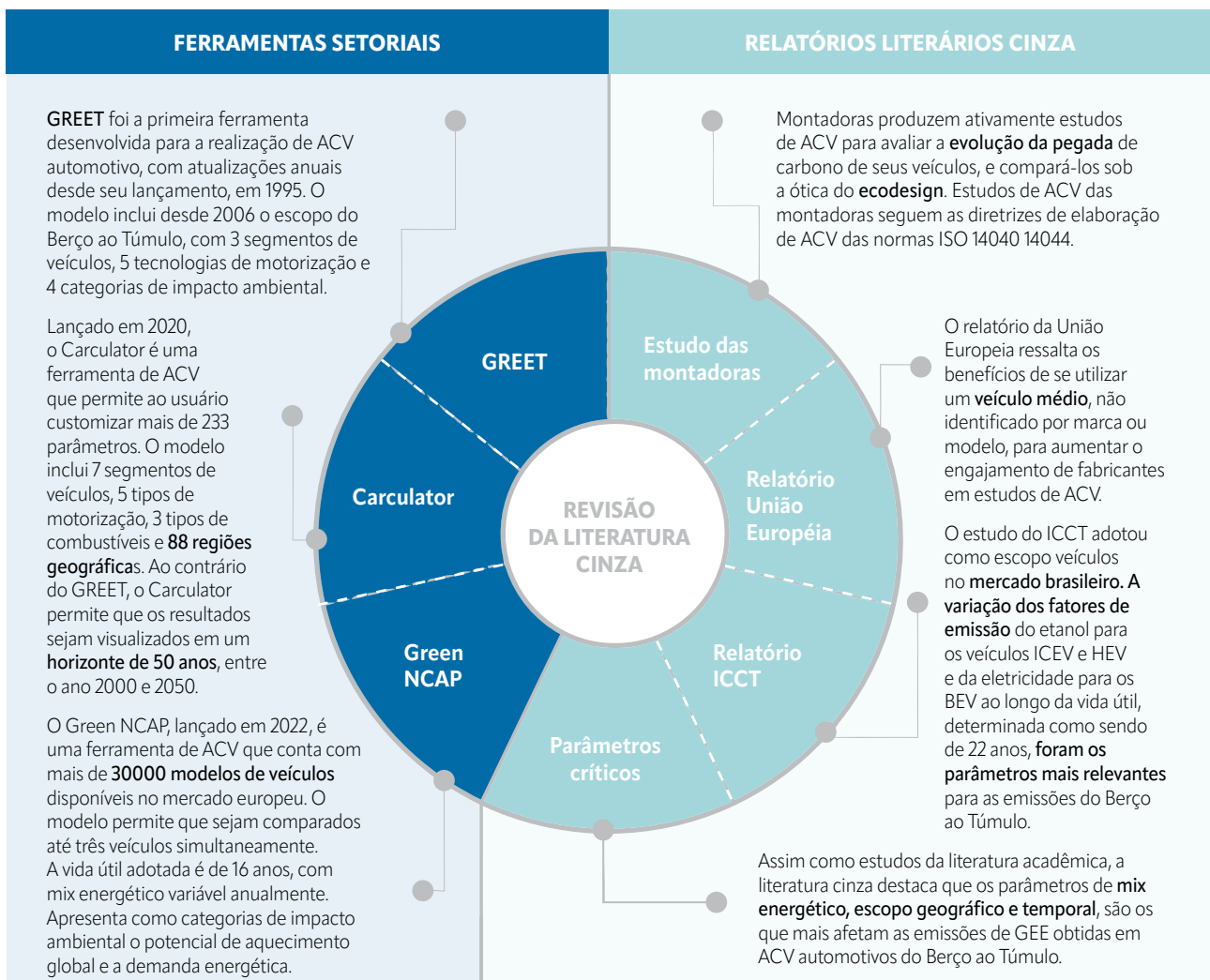
Os resultados apresentados indicam o estado da arte sobre a pegada de carbono da fabricação de veículos e visam contribuir para o avanço nas discussões sobre essa agenda na indústria automotiva. Esses resultados não são exaustivos e ofere-

cem elementos para futuros aprofundamentos e discussões com o setor e os demais setores da sociedade.

Com relação aos resultados aqui apresentados, o uso de diferentes metodologias e premissas dificultam a comparação dos dados dos estudos encontrados. Assim, o objetivo deste relatório não é realizar uma comparação direta entre os diferentes estudos e/ou veículos avaliados, mas sim demonstrar o que já foi explorado na literatura e qual o grau de variação existente entre os diferentes resultados.

Além disso, a maioria dos resultados explorados nesse relatório tem o foco do Berço ao Portão, no entanto, a melhor maneira de comparar os diferentes tipos de motorização de um veículo é por meio de um estudo completo de ACV conduzido para esta finalidade, incluindo todas as fases do ciclo de vida dos produtos e os mesmos aspectos metodológicos (unidade funcional, premissas, escopo, fronteiras, método de avaliação).

→| **Figura S. 8 – Resumo dos principais estudos da revisão da literatura cinza**



Fonte: Elaboração própria.

| | | |
|------------|--|----|
| 1 | Introdução | 17 |
| | Projeto "Do berço ao portão" | 19 |
| | Sobre esse documento | 20 |
| 1.1 | O setor automobilístico no Brasil: contexto e tendências | 21 |
| 1.1.1 | Mapeamento da cadeia automotiva | 24 |
| 2 | Avaliação do Ciclo de Vida na cadeia automotiva | 28 |
| 2.1 | Ciclo de Vida do veículo | 31 |
| 2.1.1 | Extração de matéria-prima e produção de materiais | 32 |
| 2.1.2 | Fabricação, montagem e distribuição | 33 |
| 2.1.3 | Uso, reúso e manutenção | 34 |
| 2.1.4 | Fim de vida | 34 |
| 2.2 | Ciclo de Vida de baterias de íon-lítio | 35 |
| 2.2.1 | Tipos de baterias | 35 |
| 2.2.2 | Extração de matéria-prima e produção de materiais | 37 |
| 2.2.3 | Fabricação de baterias de íon-lítio | 38 |
| 2.2.4 | Uso, reúso e manutenção | 38 |
| 2.2.5 | Fim de vida de baterias de íon-lítio | 39 |
| 3 | Revisão da literatura acadêmica | 40 |
| 3.1 | Metodologia | 41 |
| 3.1.1 | Protocolo de pesquisa | 41 |
| 3.1.2 | Análise de conteúdo | 42 |
| 3.2 | Resultados e discussão | 44 |
| 3.2.1 | Visão geral dos artigos selecionados | 44 |
| 3.2.2 | Veículos | 47 |
| 3.2.3 | Baterias | 58 |
| 3.2.4 | Análises de sensibilidade | 66 |
| 3.3 | Contribuições para o projeto "Do Berço ao portão" | 70 |
| 4 | Revisão de literatura cinza | 72 |
| 4.1 | Relatório "Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA" da Comissão Europeia | 73 |
| 4.2 | Relatório "Comparação das emissões de fases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil" do ICCT | 77 |
| 4.3 | Ferramentas setoriais | 80 |
| 4.3.1 | GREET vehicle cycle model | 80 |
| 4.3.2 | Calculator | 82 |
| 4.3.3 | Green NCAP | 82 |
| 4.4 | Estudos de montadoras | 84 |
| 4.5 | Contribuições para o projeto "Do berço ao portão" | 88 |
| 5 | Considerações finais | 92 |
| | Referências bibliográficas | 93 |
| | Apêndice | 97 |

Lista de figuras

| | | |
|----------------------|---|----|
| Figura 1.1 – | Infográfico com panorama das emissões e matriz energética nacionais e internacionais | 18 |
| Figura 1.2 – | Produtos elaborados pelo projeto | 19 |
| Figura 1.3 – | Fábricas por estado no Brasil em 2024 | 21 |
| Figura 1.4 – | Tipos de veículos eletrificados | 22 |
| Figura 1.5 – | Infográfico com panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil | 23 |
| Figura 1.6 – | Demanda global por baterias de íons de lítio até 2030, em GWh | 24 |
| Figura 1.7 – | Desenho simplificado da cadeia automobilística | 26 |
| Figura 1.8 – | Cadeia automobilística tradicional | 26 |
| Figura 1.9 – | Cadeia automobilística para veículos elétricos | 27 |
| Figura 2.1 – | Principais etapas do ciclo de vida de um produto | 28 |
| Figura 2.2 – | Estrutura da ACV: principais fases | 30 |
| Figura 2.3 – | Ciclo de vida de um veículo leve | 32 |
| Figura 2.4 – | Ciclo de vida de baterias de íon-lítio | 35 |
| Figura 2.5 – | Estrutura de uma bateria de íon-lítio | 36 |
| Figura 2.6 – | Principais características de três tipos de química de cátodo predominantes | 36 |
| Figura 2.7 – | Químicas de baterias ao longo das últimas décadas e projetadas para os próximos anos | 37 |
| Figura 2.8 – | Distribuição de massa entre componentes e matérias de uma bateria do tipo NMC | 38 |
| Figura 3.1 – | Etapas da revisão bibliográfica | 41 |
| Figura 3.2 – | Ilustração do protocolo de pesquisa aplicado | 41 |
| Figura 3.3 – | Semáforo da revisão bibliográfica | 42 |
| Figura 3.4 – | Subdivisão dos campos utilizados na matriz de revisão bibliográfica | 43 |
| Figura 3.5 – | Distribuição cronológica dos artigos selecionados neste estudo | 44 |
| Figura 3.6 – | Escopo geográfico dos artigos selecionados neste estudo | 45 |
| Figura 3.7 – | Subdivisão dos artigos selecionados neste estudo | 45 |
| Figura 3.8 – | Temática dos artigos selecionados neste estudo | 46 |
| Figura 3.12 – | Número de estudos por país que detalham o cenário de produção e fabricação de veículos leves | 47 |
| Figura 3.9 – | Tipos de unidade funcional dos artigos selecionados neste estudo | 48 |
| Figura 3.10 – | Mapeamento de vida-útil considerada nos artigos encontrados | 48 |
| Figura 3.11 – | Fronteiras consideradas nos estudos mapeados na revisão bibliográfica | 49 |
| Figura 3.13 – | Mapeamento de valores de pegada de carbono de veículos leves do Berço ao Portão, considerando duas unidades funcionais distintas: a) um veículo e b) distância percorrida | 51 |
| Figura 3.14 – | Contribuição de impacto média dos componentes dos veículos leves mapeados | 53 |
| Figura 3.15 – | Contribuição de impacto média dos materiais para os veículos leves | 54 |
| Figura 3.16 – | Composição do consumo de energia por etapa da fabricação de veículos leves | 55 |
| Figura 3.17 – | Consumo total de energia e emissões de GEE de veículos leves na China | 56 |
| Figura 3.18 – | Contribuição dos materiais para consumo de energia e emissões de GEE utilizados para a fabricação dos veículos e da bateria | 57 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| Figura 3.19 – | Contribuição mássica dos principais componentes de baterias de íon-lítio | 60 |
| Figura 3.20 – | Componentes de maior contribuição para emissões de GEE na fase de produção dentre os artigos considerados | 64 |
| Figura 3.21 – | Emissões de GEE por componente para baterias do tipo LFP e NMC | 66 |
| Figura 3.22 – | Resultado da revisão de literatura para a composição das emissões de GEE considerando os componentes da bateria mais intensos em carbono na etapa de produção | 66 |
| Figura 3.23 – | Principais direcionamentos para a incorporação de parâmetros na ACV de veículos leves com base nos resultados da revisão bibliográfica | 71 |
| Figura 4.1 – | Emissões de ciclo de vida de ICEV e BEV em 2020 segundo cenários de intensidade de carbono das cadeias de combustível e eletricidade, do Berço ao Túmulo | 74 |
| Figura 4.2 – | Cenário padrão de GWP por kg dos principais materiais utilizados na constituição de veículos e baterias | 76 |
| Figura 4.3 – | Emissões de ciclo de vida de GEE de ICEVs flex e BEVs dos segmentos compacto, médio e SUV compacto, bem como de HEVs e PHEVs do segmento médio, comercializados no Brasil em 2023. | 78 |
| Figura 4.4 – | Os modelos do GREET e as diferentes fronteiras consideradas | 81 |
| Figura 4.5 – | O modelo GREET 2 e os diferentes veículos e impactos ambientais avaliados | 81 |
| Figura 4.6 – | Representação esquemática da ferramenta Calculator | 82 |
| Figura 4.7 – | Resumo das ferramentas setoriais e estudos da literatura cinza | 88 |



Lista de tabelas

| | | |
|---------------------|---|----|
| Tabela 2.1 – | Composição aproximada da estrutura de um veículo leve | 33 |
| Tabela 2.2 – | Porcentagem de participação na produção global de insumos por material e país | 37 |
| Tabela 2.3 – | Porcentagem de participação na fabricação global de baterias de íon-lítio por país/região | 39 |
| Tabela 3.1 – | Exemplo de categorização de artigos na matriz de revisão bibliográfica | 43 |
| Tabela 3.2 – | Cenários de produção e dados sobre consumo de energia na fabricação de veículos leves a partir da literatura | 46 |
| Tabela 3.3 – | Resultados de emissões de CO ₂ eq. em estudos de pegada de carbono em veículos para abordagem do Berço ao Portão | 50 |
| Tabela 3.4 – | Inventário baterias de íon-lítio do tipo LFP e NCM | 61 |
| Tabela 3.5 – | Características mais comumente adotadas em ACV de baterias, resultados para a média, percentil 25% e percentil 75% | 61 |
| Tabela 3.6 – | Resumo dos resultados da revisão de literatura de bateria íon-lítio | 65 |
| Tabela 4.1 – | Características dos veículos representativos adotados para cada segmento | 77 |
| Tabela 4.2 – | Capacidade da bateria assumida para veículos do tipo BEV e PHEV | 78 |
| Tabela 4.3 – | Resumo dos resultados obtidos pelas montadoras, do Berço ao Portão | 84 |
| Tabela 4.4 – | Emissões do Berço ao Túmulo de veículos da Volvo, em t CO ₂ eq./veículo | 85 |

Lista de siglas e abreviações

| | |
|--------------------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação de Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| BEV | Veículo Elétrico a Bateria |
| CBU | Completamente montado ou " <i>Completely Built Up</i> " |
| CKD | Completamente desmontado ou " <i>Completely Knocked Down</i> " |
| CQNUMC | Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima |
| CO₂eq. | Dióxido de carbono equivalente |
| EV | Veículos Elétricos |
| FFV | Veículo a Combustível Flex |
| FGV | Fundação Getúlio Vargas |
| FGVces | Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas |
| FCEV | Veículos Elétricos a Célula de Combustível |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GNC | Gás Natural Comprimido |
| GWP | Potencial de Aquecimento Global |
| HEV | Veículos Elétricos Híbridos |
| ICEV | Veículos com Motor de Combustão Interna |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida |
| IPI | Imposto sobre Produtos Industrializados |
| ISO | Organização Internacional de Padronização |
| LAB | Bateria de chumbo-ácido |
| LFP | Fosfato de ferro-lítio |
| LIB | Baterias de Íons de Lítio |
| LMO | Óxido de Manganês-Lítio |
| LTO | Titanato de Lítio |
| MOVER | Programa Nacional de Mobilidade Verde e Inovação |
| NCA | Óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio |
| NCM | Óxido de lítio-níquel-magnésio-cobalto |
| NIB | Bateria de íons de sódio |
| PC | Pegada de Carbono |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PHEV | Veículo Elétrico Híbrido Plug-in |
| SKD | Semi desmontado ou " <i>Semi-Knocked Down</i> " |
| SUV | Veículo Utilitário Esportivo |
| UF | Unidade Funcional |

1. Introdução

A indústria automobilística brasileira se destaca no cenário mundial, ocupando o posto de 8º maior produtor e 6º maior mercado interno de veículos. Contribuindo com cerca de um quinto do Produto Interno Bruto (PIB) da indústria de transformação, o setor é responsável por gerar mais de 1,2 milhões de empregos diretos e indiretos (ANFAVEA, 2023).

A dimensão do mercado de veículos no Brasil, em conjunto com a dependência histórica da economia pelo modal rodoviário, produz efeitos impactantes sobre a saúde pública e meio-ambiente, principalmente em função da emissão de poluentes atmosféricos locais¹ e gases de efeito estufa (GEE)² causadores da mudança do clima. Apesar dos avanços alcançados nos últimos anos em prol da redução da emissão de poluentes locais, emissões de GEE ainda são significativas. Atualmente, o setor de energia representa 22% das emissões nacionais de GEE. Dessas, 44% advêm do transporte rodoviário (MCTI, 2020). A **Figura 1.1** apresenta um panorama das emissões e matriz energética nacionais e internacionais.

A fim de contribuir para a mitigação dos efeitos adversos causados pela mudança do clima, o Brasil assumiu metas de redução de emissões de GEE para as próximas décadas. Destaca-se, por exemplo, as contribuições oferecidas pelo País no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC) e o objetivo de alcançar a neutralidade climática em 2050 (BRASIL, 2023). Para tanto, todos os setores da economia brasileira deverão assumir responsabilidades, incluindo a indústria automobilística e sua cadeia de suprimentos.

O Programa MOVER (Programa Nacional de Mobilidade Verde e Inovação)³, sucessor do Programa Rota 2030 recentemente apro-

vado pelo governo, e outras políticas e iniciativas – como o *RenovaBio*, o *Proconve* - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, a *Regulação 2019/631* da União Europeia e a *Declaração de Glasgow* sobre carros e vans com emissão zero – são fortes indicativos de que o setor automobilístico deverá se adequar para permanecer em seu mercado, uma vez que é esperado um enrijecimento das legislações e conseqüentemente restrições às comercializações de produtos intensivos em emissões de carbono, para o país alcançar suas metas estabelecidas.

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. 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, principalmente, a eletrificação, o uso de energias renováveis e o uso de materiais reciclados (BMW, 2022; FORD, 2023; GM, 2023; HONDA, 2023; NISSAN MOTOR CO., 2023; RENAULT GROUP, 2023; STELLANTIS N.V., 2023; VOLVO CAR GROUP, 2023).

Para alinhar o setor de transportes no Brasil com as metas climáticas nacionais e empresariais, é crucial que tomadores de decisão dos setores públicos e privados compreendam as opções de motorização e produção de veículos, componentes e materiais que reduzem efetivamente as emissões de GEE.

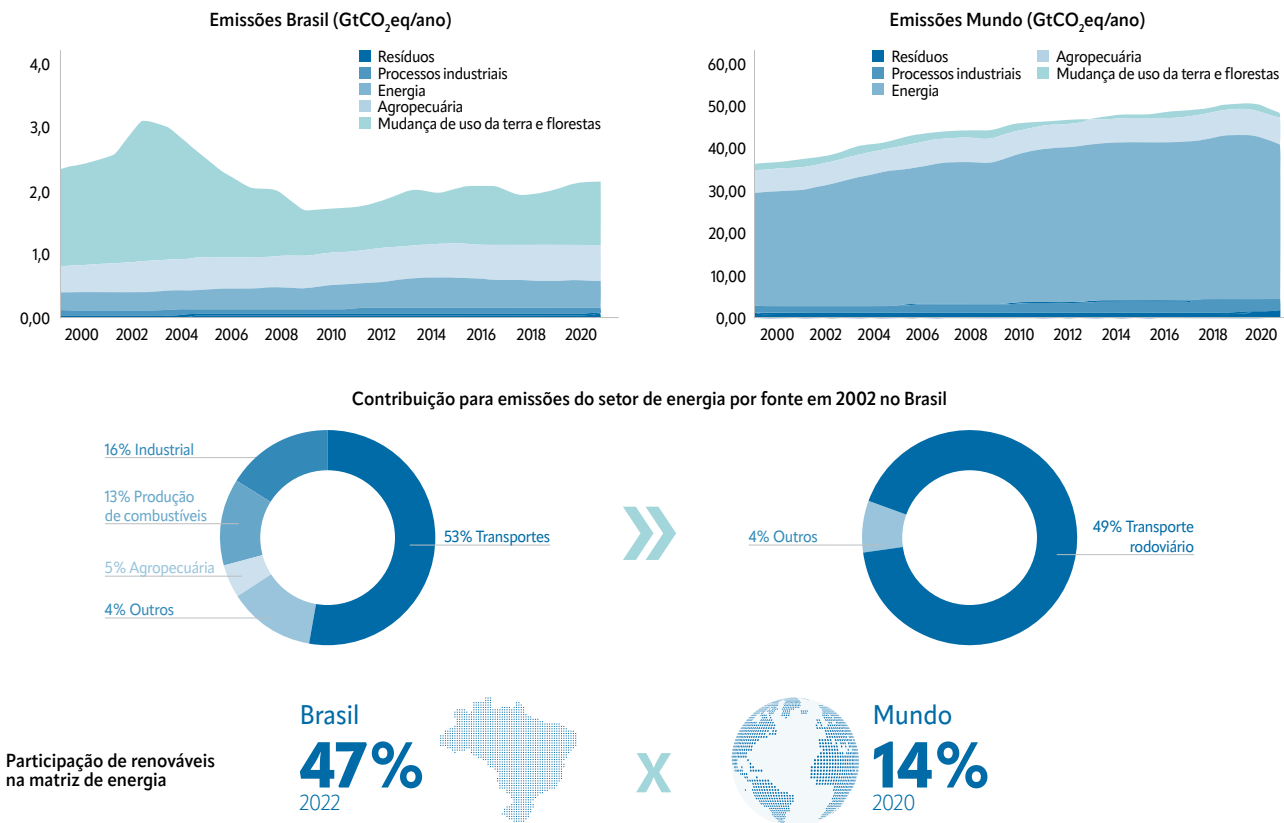
Metodologias como a *Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)* e a *Pegada de Carbono (PC)*, permitem quantificar os impactos ambientais associados aos processos e atividades em toda a

1 Monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, óxidos de enxofre, material particulado etc.

2 Em especial dióxido de carbono, metano e óxido nitroso.

3 Medida Provisória 1205/23 institui o Programa Mobilidade Verde e Inovação - MOVER, que tem o objetivo de apoiar uma economia de baixo carbono no ecossistema produtivo e inovativo de automóveis, de caminhões e seus implementos rodoviários, de ônibus, de chassis com motor, de máquinas autopropulsadas, e de autopeças.

→| **Figura 1.1 – Infográfico com panorama das emissões e matriz energética nacionais e internacionais**



Fonte: Elaboração própria.

cadeia produtiva e oferecem insumos para uma gestão mais eficiente de emissões. A ACV já é largamente utilizada no setor automobilístico como uma ferramenta de desenvolvimento de produtos, inovação e ecodesign, e está cada vez mais presente na gestão das metas climáticas empresariais (BMW, 2022; FORD, 2023; GM, 2023; HONDA, 2023; NISSAN MOTOR CO., 2023; RENAULT GROUP, 2023; STELLANTIS N.V., 2023; VOLVO CAR GROUP, 2023).

Nos últimos anos foram produzidos diversos estudos de PC comparando as emissões de GEE do ciclo de vida dos veículos leves, considerando tecnologias tradicionais (motores a combustão interna) e alternativas (híbridos, elétricos, com uso ou não de baterias, etc.) (EGESKOG et al., 2020; EUROPEAN COMMISSION et al., 2020; HAWKINS et al., 2013; MERA et al., 2023; VELANDIA VARGAS et al., 2019, 2020). Tais estudos mostram que uma parte significativa das emissões ocorrem na fase de uso do veículo, enquanto as emissões da produção de veículos leves constituem uma parcela menor das emissões totais. Por esse motivo, abordagens na literatura científica geralmente apresentam escopo mais amplo como do Berço ao Túmulo e do Poço à Roda, com foco principal nas análises das emissões da produção e consumo de combustível. Dessa forma, o sistema de manufatura brasileiro pode não ser representado adequadamente, não havendo tampouco acesso a dados

e informações característicos da etapa de produção dos veículos e seus componentes.

Por outro lado, o controle direto das emissões desta etapa de produção é altamente relevante para as montadoras, podendo potencialmente representar uma vantagem comparativa para o Brasil em relação a outros mercados globais. Isso se deve, em parte, à matriz energética brasileira, composta por uma parcela significativa de fontes renováveis. Além disso, as emissões de GEE do processo produtivo tendem a se tornar relativamente mais significativas à medida que a fase do “poço à roda” se descarboniza.

É nesse contexto que surge o projeto “Do berço ao portão: Pegada de carbono de veículos leves fabricados no Brasil”. O projeto, aqui referido apenas como “Do berço ao portão”, pretende fornecer resultados consistentes a respeito da produção de veículos no contexto brasileiro, auxiliando processos de tomada de decisão e criando uma cultura de gestão eficiente de emissões de GEE seja no âmbito público ou empresarial. Como consequência, espera-se promover a sensibilização do setor para o tema e a divulgação da importância da mitigação da mudança do clima para a sociedade brasileira, pavimentando o caminho para a fabricação de veículos – e seus componentes – que contribuam para a redução das emissões de GEE na atmosfera.

Projeto “Do berço ao portão”

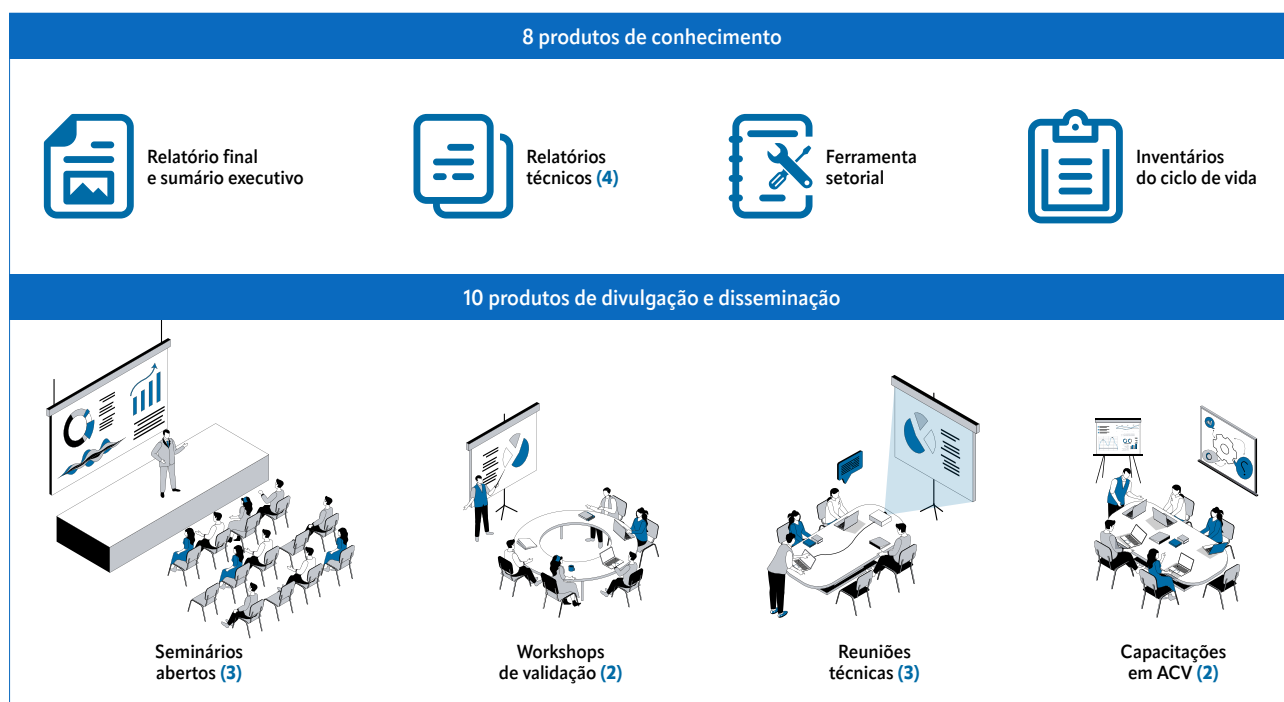
O projeto “Do berço ao portão”: Pegada de Carbono de veículos leves fabricados no Brasil” faz parte da Linha V do programa Rota 2030 (substituído pelo atual Programa MOVER) e é coordenado pelo Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas da Fundação Getulio Vargas (FGVces – FGV EAESP) em parceria com o Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (FEM – UNICAMP).

O objetivo central do projeto é calcular a Pegada de Carbono (PC) de veículos leves fabricados no Brasil, desde a extração da matéria-prima até a montagem dos veículos, ou seja, do Berço ao Por-

tão da fábrica. Assim, o projeto não contempla as etapas de uso e fim de vida do veículo, não contabilizando, portanto, a produção e queima de combustíveis/eletricidade ou processos de reciclagem.

A partir desta análise será realizado o mapeamento das principais fontes de emissão e das principais oportunidades de redução ao longo da cadeia de suprimentos, além da identificação das principais diferenças em relação à produção de veículos em outros países (benchmarking internacional). O projeto tem duração prevista de 36 meses, com finalização estimada para junho de 2026. Os produtos derivados desse projeto estão ilustrados na **Figura 1.2**.

→| **Figura 1.2 – Produtos elaborados pelo projeto**



Fonte: Elaboração própria.

Sobre esse documento

O presente relatório apresenta o estado da arte dos principais estudos nacionais e internacionais relacionados à ACV e pegada de carbono de veículos leves e tem por objetivo fornecer subsídio técnico para o projeto “Do berço ao portão”.

Para essa análise, serão considerados documentos produzidos por dois tipos de literatura: a literatura acadêmica e a literatura cinza (*gray literature*, em inglês). A primeira categoria inclui artigos acadêmicos publicados em revistas científicas, conferências acadêmicas e outras fontes que seguem um processo formal de revisão por pares (*peer-review*, em inglês) antes da publicação. Diferentemente da literatura acadêmica, a literatura cinza é geralmente produzida por organizações fora dos canais tradicionais de publicação e distribuição comerciais ou acadêmicos, e incluem relatórios, ferramentas e documentos governamentais e empresariais.

A análise do estado da arte dos principais estudos relacionados à ACV e PC de veículos leves será estruturante para o entendimento das cadeias de suprimentos e para a estimativa da PC dos produtos estudados, a ser desenvolvida no estudo-piloto. Os resultados desse relatório também serão utilizados para auxiliar na definição dos veículos a serem estudados, rotas alternativas, projeções futuras, análise comparativa internacional, premissas, entre outros.

Assim, o objetivo desse relatório é auxiliar na estruturação dos seguintes itens:

- Premissas gerais do estudo

- Definição do produto
- Simulação de rotas alternativas
- Projeções futuras
- Análise comparativa internacional
- Mapeamento da cadeia automotiva

Por último, este relatório pode ser útil a profissionais que buscam uma compreensão abrangente do setor automobilístico, especialmente no que diz respeito aos estudos de ACV e pegada de carbono, com foco em veículos leves. 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 governamentais.

Os próximos capítulos apresentam a abordagem metodológica e os resultados da análise do estado da arte, conforme descrito a seguir:

O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos relacionados a ACV e introduz informações relevantes sobre o ciclo de vida do veículo e da bateria, importante componente para veículos eletrificados. O Capítulo 3 traz uma análise dos procedimentos metodológicos e dos principais resultados encontrados em estudos da literatura acadêmica, enquanto o Capítulo 4 é dedicado à avaliação dos estudos da literatura cinza. Finalmente, o Capítulo 5 aponta as principais recomendações e considerações finais deste estudo.

1.1 O setor automobilístico no Brasil: contexto e tendências

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

2023). As fábricas estão localizadas nos estados: São Paulo, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Goiás, Bahia, Ceará, Amazonas e Pernambuco. A Figura 1.3 apresenta as fábricas presentes em cada estado no Brasil em 2024.

→ | **Figura 1.3 – Fábricas por estado no Brasil em 2024**



Fonte: Elaboração própria.

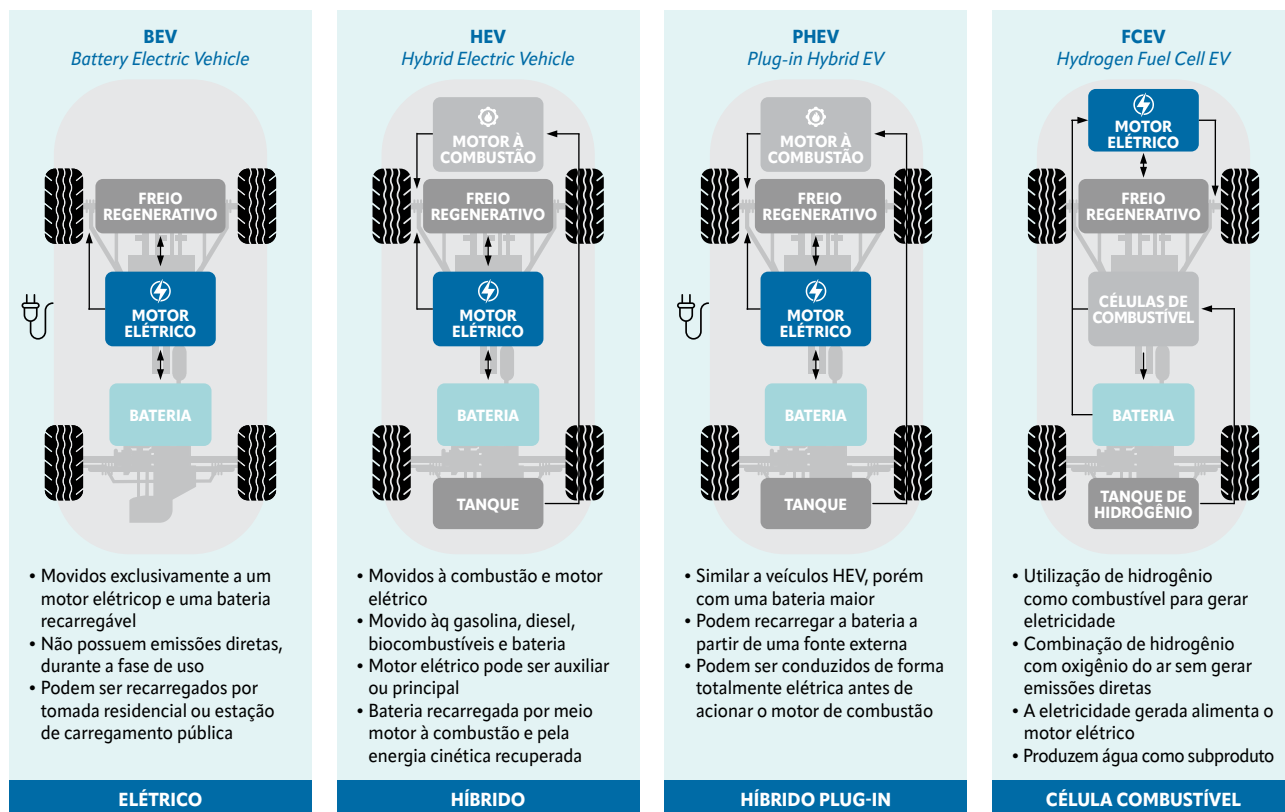
Os veículos leves, isto é, veículos de passeio e comerciais leves, compõem a maior parcela da frota brasileira, representando 53% do total de 111 milhões de veículos circulantes (CNT, 2022). Esse segmento é caracterizado por veículos com motor de combustão interna (ICEV, do inglês *internal combustion engine vehicles*) do tipo *flex*, que representam cerca de 91% das vendas de veículos de passeio (ANFAVEA, 2023). O restante está distribuído entre veículos ICEV mo-

vidos exclusivamente a diesel (3%) ou gasolina (3%) e veículos eletrificados (EV, do inglês *electric vehicles*) (3%), que podem ser divididos em quatro categorias, apresentados na **Figura 1.4** e no **Quadro 1.1**: 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*). Vale destacar que os veículos híbridos podem variar quanto à configuração do sistema de propulsão, podendo operar em paralelo ou em série (conhecido como *series hybrid*, em inglês), ou ainda, de modo exclusivamente auxiliar como nos híbridos leves (*mild hybrid*, em inglês).

Apesar da crescente participação das vendas de EV no país, 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 (BRIGHT CONSULTING, 2023). A Figura 1.5 traz um panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil.

→| **Figura 1.4 – Tipos de veículos eletrificados**



Fonte: Adaptado de AEA (2023).

Quadro 1.1 – As diferentes tecnologias de motorização de veículos leves

| | | |
|--|--|---|
| Veículos com motor de combustão interna | ICEV: <i>internal combustion engine vehicles</i> | Têm motores de combustão interna que são alimentados por combustíveis. Podem ser <i>flex</i> (utilizando gasolina e etanol) ou exclusivamente movidos a gasolina ou etanol ou diesel. |
| Veículos Elétricos a Bateria | BEV: <i>battery electric vehicles</i> | Funcionam exclusivamente com motores elétricos e são alimentados por baterias recarregáveis. |
| Veículos Elétricos Híbridos | HEV: <i>hybrid electric vehicles</i> | Combinam um motor de combustão interna um motor elétrico auxiliar. A bateria é recarregada pelo motor de combustão interna e pela energia cinética recuperada durante a frenagem. |
| Veículos Elétricos Híbridos Plug-in | PHEV: <i>plug-in hybrid electric vehicles</i> | Têm motores elétricos e motores de combustão interna com baterias que também podem ser carregadas através de uma estação de recarga. |
| Veículos Elétricos Híbridos em Série | s-HEV: <i>series HEV</i> s-PHEV: <i>series PHEV</i> | Têm motores elétricos e motores de combustão interna que, ao contrário dos demais, operam em série. O motor de combustão interna aciona um gerador elétrico que, por sua vez, carrega a bateria e alimenta o motor elétrico, responsável pela propulsão do veículo. |
| Veículos Elétricos Híbridos Leves | m-HEV: <i>mild HEV</i> m-PHEV: <i>mild PHEV</i> | Possuem sistema híbrido menos complexo, geralmente consistindo em um sistema start-stop, assistência de potência e/ou frenagem regenerativa. Não têm a capacidade de funcionar exclusivamente com motor elétrico. |
| Veículos Elétricos a Célula de Combustível | FCEV: <i>hydrogen fuel cell electric vehicle</i> | Usam hidrogênio para gerar eletricidade e alimentar um motor elétrico. |

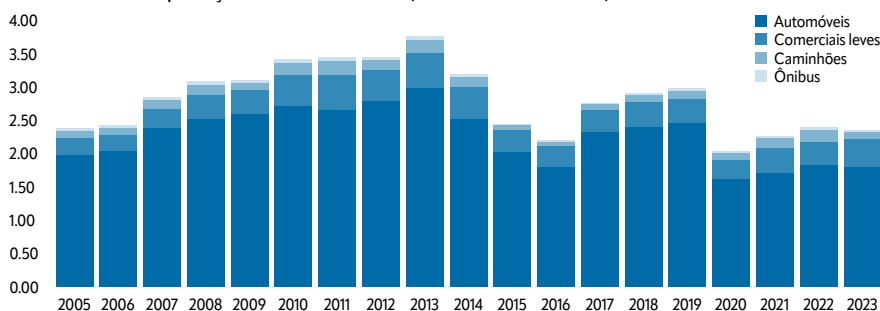
→| **Figura 1.5 – Infográfico com panorama atual da frota e produção de veículos leves no Brasil**

52%

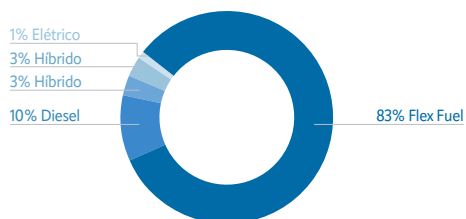
da frota brasileira é composta por automóveis (61.803.369 veículos)



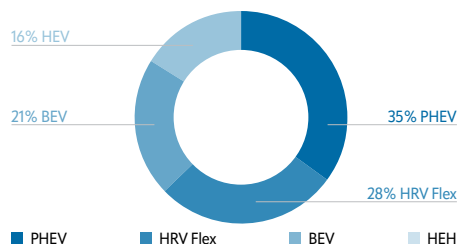
Dados históricos da produção de veículos no Brasil (milhões de veículos/ano)



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). Nesse contexto, a inclusão da variável ambiental nos modais veiculares e a adoção em larga escala de automóveis movidos à bateria se destacam como tendências nas maiores economias do mundo, em especial na China, Europa e Estados Unidos.

Em 2022, veículos elétricos representaram 14% das vendas de carros no período, com 60% destas ocorrendo na China (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Depois da China, a Europa permaneceu como o segundo maior mercado mundial para carros elétricos, representando 25% das vendas e 30% do estoque global. O terceiro maior mercado mundial de EV foi dos Estados Unidos, que respondeu por 10% do crescimento das vendas. Nesse mesmo ano, o estoque total de carros elétricos atingiu 3 milhões de unidades, representando 10% do total em âmbito global.

No cenário brasileiro, a adoção de veículos elétricos também faz parte de uma estratégia de mitigação das emissões de GEE e promoção da sustentabilidade. Para o crescimento desse segmento de veículos, o país tem enfrentado desafios e conquistas, como a implementação de infraestrutura para carregamento elétrico e a formulação de políticas que incentivam a aquisição de veículos elétricos. 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.

Velandia Vargas *et al.* (2020) aponta que o governo brasileiro tem implementado políticas públicas para incentivar o uso de veículos elétricos no país. Em 2018, o governo reduziu o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para veículos elétricos, tornando-os mais acessíveis para os consumidores. Além disso, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) concedeu R\$ 6,7 milhões em fundos para projetos de recarga de veículos elétricos. Em 2020, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) lançou a plataforma CBIO, que permite a comercialização de créditos de descarbonização, incentivando a adoção de veículos elétricos e outras tecnologias limpas.

Um exemplo de política de incentivo, é o Programa MOVER, com o intuito de fomentar práticas sustentáveis e inovadoras na indústria automobilística brasileira. Com foco em veículos mais eficientes e tecnologicamente avançados, o programa engloba diretrizes para a produção e importação de veículos novos, estabelecendo requisitos rigorosos de eficiência energética, redução de emissões e reciclabilidade. Destaca-se ainda a promoção da pesquisa e desenvolvimento, visando à competitividade internacional da indústria nacional e ao alinhamento com uma economia de baixo carbono.

Além disso, o Programa MOVER introduz o Fundo Nacional de Desenvolvimento Industrial e Tecnológico (FNDIT), destinado a financiar iniciativas compatíveis com os objetivos do programa, consolidando o comprometimento do governo com a inovação e a sustentabilidade no setor. Com vigência estipulada até 2028, a iniciativa promete revolucionar a indústria

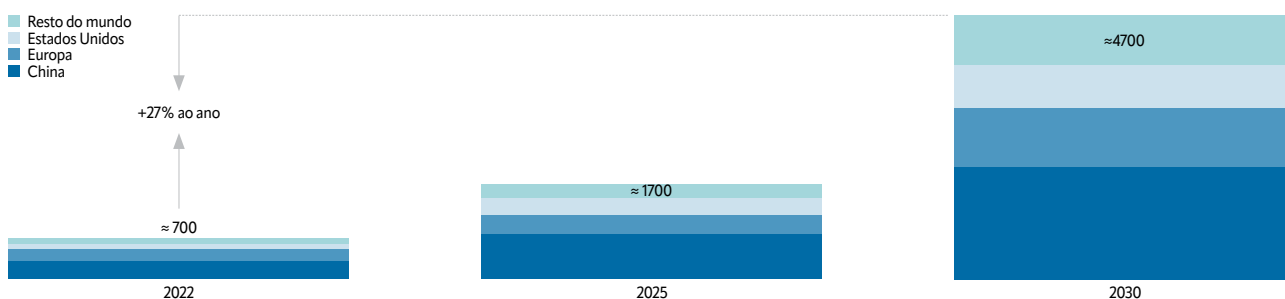
automobilística do Brasil, adequando-a às exigências globais por soluções de mobilidade mais verdes e tecnologicamente avançadas, e posicionando o país como um participante importante no mercado global de veículos sustentáveis.

O aumento da demanda por veículos elétricos impulsiona o mercado de baterias. Embora a corrida tecnológica ainda esteja em curso para se determinar qual será a tecnologia dominante nos próximos anos, as baterias de íon-lítio vêm sendo a mais empregada pela indústria automobilística mundial.

Nesse contexto, a produção global deste mineral – e de outros necessários à constituição das baterias, como cobalto, níquel,

manganês e cobre vem aumentando substancialmente. Somente para efeito ilustrativo, em apenas cinco anos, a porcentagem da produção mundial de lítio empregada em baterias para carros elétricos aumentou de 15% para 60% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Tal proporção pode chegar a 95% já em 2030 (FLEISCHMANN *et al.*, 2023). Projeções do mercado de baterias de íons de lítio para 2030 indicam receitas 5 vezes maiores ao longo da cadeia de suprimentos, principalmente no âmbito da produção de materiais ativos e da fabricação da célula da bateria, implicando na construção de aproximadamente 150 novas fábricas no horizonte considerado (FLEISCHMANN *et al.*, 2023). A **Figura 1.6** apresenta a demanda global por baterias de íons de lítio em 2022, 2025 e 2030, em GWh.

→| **Figura 1.6 – Demanda global por baterias de íons de lítio até 2030, em GWh**



Fonte: Adaptado de Fleischmann *et al.* (2023).

No Brasil, assim como no restante da América Latina, o alto preço de aquisição de um veículo à bateria, em conjunto com a falta de infraestrutura de recarga, colaboram para a baixa aderência deste segmento observada no país, que cresce em ritmo pouco acelerado quando em comparação com outros mercados globais. Além disso, o setor automobilístico brasileiro, consolidado em torno de veículos à combustão, exerce forte influência no paradigma de transporte adotado em âmbito nacional, o que somado a outros fatores do contexto local – como proeminência no mercado de biocombustíveis – indica que a eletrificação de veículos no Brasil pode apresentar questões mais complexas do que a transição direta para veículos tipo BEV como ocorre em outros países, e os veículos híbridos podem ganhar importância regional (VELANDIA VARGAS *et al.*, 2020). Por outro lado, o Brasil possui inúmeras vantagens comparativas – a exemplo de sua matriz energética predominantemente renovável – que podem ser exploradas pela indústria de automóveis na busca pela descarbonização da economia, o que também incluí o aumento estratégico da proporção de veículos à bateria.

▲ 1.1.1 Mapeamento da Cadeia Automotiva

A cadeia de suprimentos automobilística é formada por um conjunto de empresas que realiza atividades como a extração

e processamento de matérias-primas, a manufatura e a distribuição do produto, o uso e o reparo, a reciclagem e o descarte do produto. A dimensão da cadeia de suprimentos depende do número de empresas necessárias para que todas as etapas do processo produtivo e de distribuição do produto e de seus insumos e componentes sejam realizadas.

Dada a quantidade de agentes envolvidos, a cadeia automotiva é complexa e dinâmica, constituída por membros primários ou de apoio produzindo as peças necessárias para o automóvel. Para se entender o nível de complexidade na cadeia automotiva, considere que a fabricação de um veículo necessita de um número aproximado de peças entre 2.000 a 3.000, ou ainda, 70.000 a 90.000 ao se considerar cada item individualmente (MACARIO, 2021). São muitos itens fornecidos por inúmeros fornecedores que constituem uma complexa rede para montar um produto. Não é difícil se entender a importância dessa cadeia para a sociedade pelo título de uma das obras da literatura sobre a indústria automobilística mais relevantes: “A máquina que mudou o mundo” dos autores Womack, Jones e Ross (1992).

De forma a otimizar os processos de fabricação e racionalizar a cadeia como um todo, a indústria automotiva veio, nas últimas décadas, intensificando o uso da modularização de componen-

tes (HOWARD; SQUIRE, 2007). Nesse contexto, o módulo é visto como um agrupamento de peças ou componentes montados e fornecidos em uma única unidade. Ao simplificar a cadeia produtiva quando se adota o fornecimento de módulos ao invés de componentes isolados, a modularização pode implicar oportunidades de fornecimento para os fabricantes de componentes.

No conceito de modularização, alguns participantes da cadeia passaram a ser conhecidos como "sistemista", "modulista" ou "moduleiro". Na medida em que a produção dos

componentes ou módulos dos veículos como um todo deixou de ser a maior fonte geradora de lucro para as montadoras, essas passaram a dar ênfase para seus núcleos de competências, ou seja, aquelas atividades específicas da cadeia, na qual o valor agregado tende a ser maior e tem mais possibilidades de expansão como, por exemplo, o projeto do produto ou o composto marketing, financiamento e venda. Para os modulistas houve a possibilidade do ganho da escala produtiva pela possibilidade de fornecer os mesmos conjuntos de módulos diferentes montadoras.

Quadro 1.2 – Os diferentes sistemas de montagem de um veículo

No âmbito da produção dos componentes, montagem dos veículos e importação envolvida na indústria automobilística, três sistemas são utilizados para abordagens distintas: CKD (*Completely Knocked Down*), SKD (*Semi-Knocked Down*) e CBU (*Completely Built Up*). Cada um desses sistemas representa uma estratégia única para a manufatura e importação de veículos, e a escolha pode ser influenciada por fatores como regulamentações locais, custos de mão de obra e infraestrutura. O modelo utilizado pode influenciar não somente o valor do veículo, mas também a quantidade de emissões envolvidas no ciclo de vida. O sistema CKD, ou *Completely Knocked Down*, refere-se à prática de desmontar um veículo em seus componentes principais antes do transporte para o local de montagem final. Essa abordagem permite que os componentes podem ser fabricados em locais com custos mais baixos ou em lugares em que a demanda e o volume de produção não justifiquem plantas locais. Já o sistema SKD, ou *Semi-Knocked Down*, envolve o envio de veículos parcialmente montados, exigindo menos montagem local do que o CKD. Por fim, o sistema CBU, ou *Completely Built Up*, implica na importação de veículos totalmente montados, prontos para uso, o que simplifica o processo, mas pode ter o custo mais alto devido ao transporte e tarifas. Fonte: Adaptado de Abate *et al.* (2023).

Na cadeia automotiva as montadoras representam o papel da empresa focal. A empresa focal na cadeia de suprimentos é aquela que governa a cadeia, projeta os produtos que a cadeia oferece ou estabelece contato direto com o consumidor final (SEURING; MÜLLER, 2008).

A estrutura da cadeia de suprimentos automotiva será analisada a partir da perspectiva das montadoras. A montagem de automóveis demanda ampla gama de insumos. Para que os automóveis possam ser produzidos, vários outros setores são acionados, como o petroquímico, siderúrgico, vidros, produtos químicos, e acessórios para veículos, formando uma extensa e complexa cadeia produtiva.

De uma maneira simplificada a cadeia de suprimentos automobilística se inicia pelos insumos básicos, ou seja, as matérias-primas necessárias para a produção de um veículo. Por vezes estes insumos são adquiridos pelo setor de autopeças (modulistas) para processá-los a fim de se tornarem novas peças ou módulos, ou então são adquiridos diretamente pelas montadoras (no caso de vidros e do aço para a estamparia). Como o próprio nome diz, as montadoras são respon-

sáveis pela montagem e acabamento do veículo, para então o fornecerem para as revendedoras e concessionárias, onde estes por sua vez comercializam o veículo para o cliente final. A **Figura 1.7** apresenta um desenho simplificado da cadeia automobilística.

Cada parte dessa cadeia simplificada pode ser decomposta em diferentes agentes. Nesse estudo optou-se por adotar as divisões construtivas de um automóvel para representar alguns modulistas, como trem de força ou Powertrain (motor e transmissão), Bodyshop (carroceria e chassis), Sistema elétricos, etc. A Figura 1.8 apresenta a cadeia automobilística mais detalhada.

▲ A cadeia automotiva dos veículos eletrificados

A eletrificação dos veículos tem trazido mudanças profundas na cadeia automotiva. O padrão dominante da cadeia automotiva de veículos elétricos ainda é incerto, há indefinições quanto ao tipo de bateria e motor elétrico a utilizar, o nível de integração vertical das empresas e a própria arquitetura de produto do veículo. Diferentemente do carro movido a motor de combustão, o veículo 100% elétrico possui conjuntos mais

simples e acabam por dispensar motor a combustão, velas, correias, catalisador, escapamento, alternador, motor de partida, caixa de transmissão, entre outros.

Mesmo havendo uma redução no número de componentes, o carro 100% elétrico é tecnologicamente mais complexo e a sua produção pode custar mais do que um veículo convencional a combustão (COSTA *et al.*, 2021). O motivo principal do incremento do custo é o preço das baterias (de íons de lítio na maioria dos casos) e dos sistemas eletrônicos de controle.

Pela necessidade dos sistemas de gestão energética, dos motores elétricos e das baterias, a cadeia produtiva acaba sendo alterada. Surgem novos fornecedores para os novos sistemas e

algumas montadoras, principalmente as chinesas, acabam desenvolvendo seus próprios produtos, numa nítida iniciativa de integração vertical da cadeia, como é o caso da fabricação das próprias baterias, como as chinesas BYD e GWM. A **Figura 1.9** apresenta as principais diferenças da cadeia automotiva eletrificada, quando comparada a cadeia tradicional.

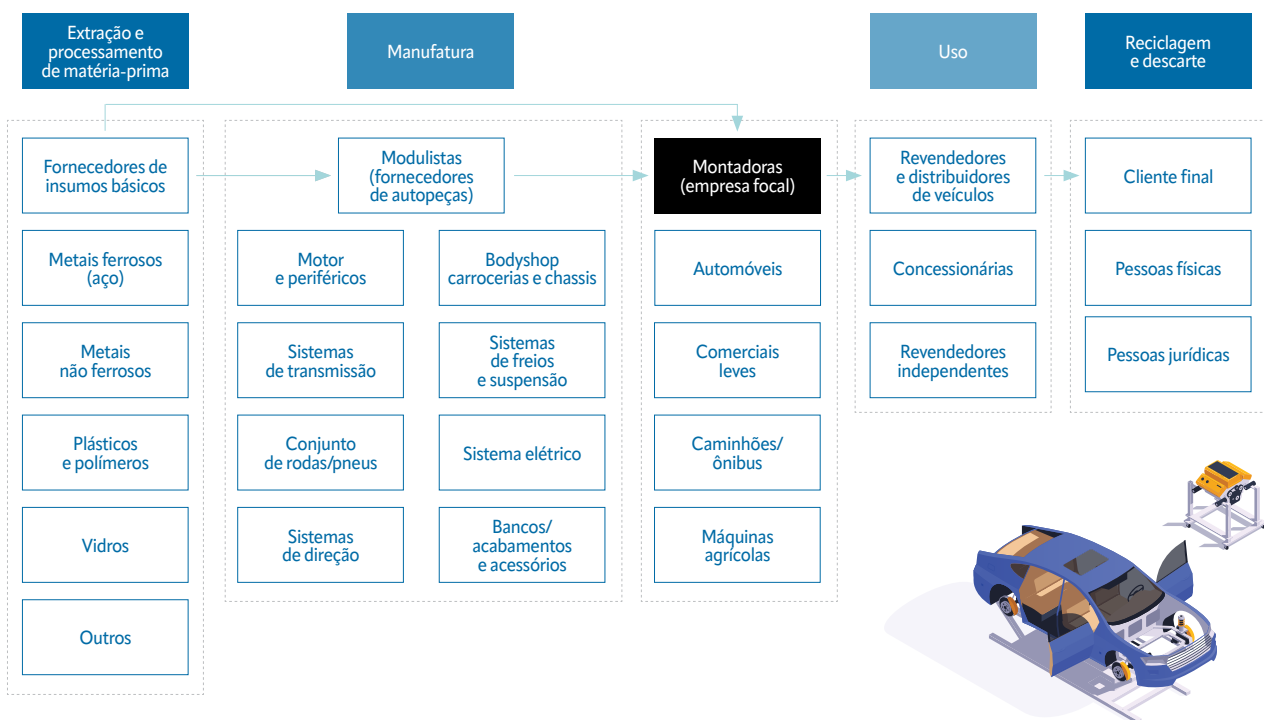
Uma das mais drásticas mudanças que a cadeia eletrificada traz em relação a cadeia de veículos à combustão é a adição de complexidade do número de insumos básicos, principalmente no bloco Metais Não Ferrosos. Controle de suprimentos como o Grafite, Lítio, Cobalto, Cobre, Níquel e Manganês ganham uma importância substancial para o domínio da cadeia produtiva.

→| **Figura 1.7 – Desenho simplificado da cadeia automobilística**



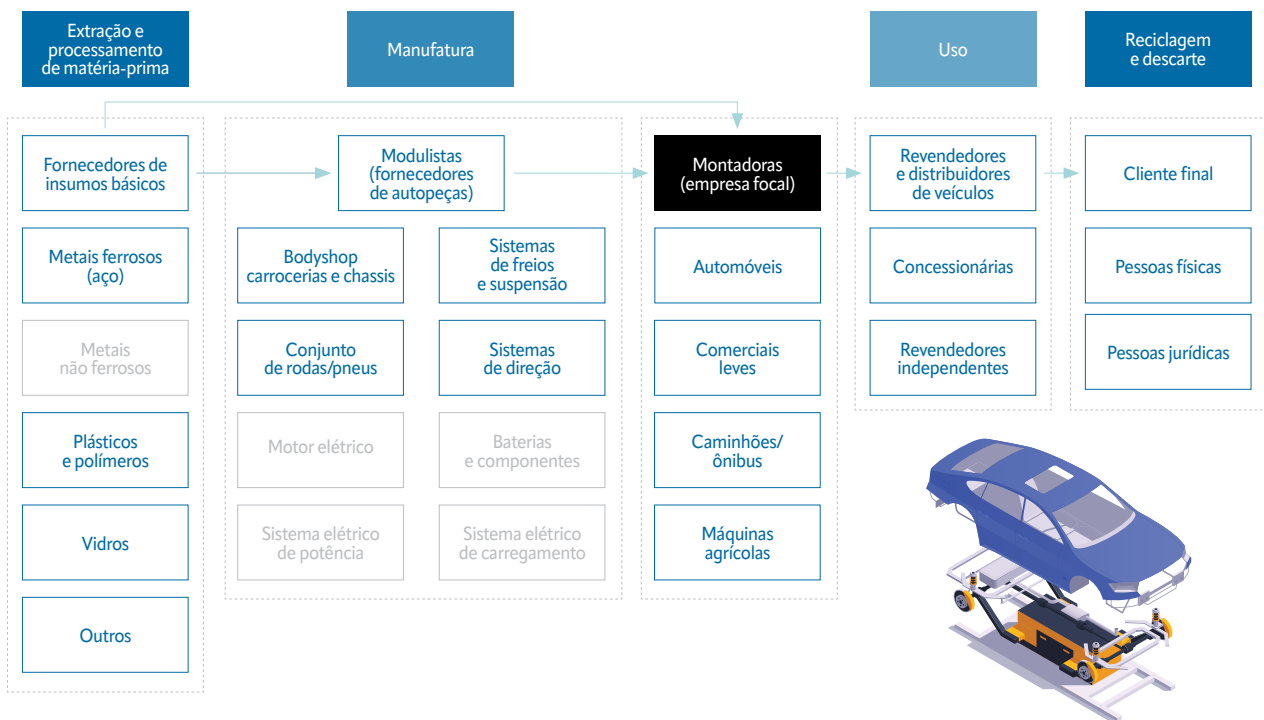
Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura 1.8 – Cadeia automobilística tradicional**



Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura 1.9 – Cadeia automobilística para veículos elétricos**



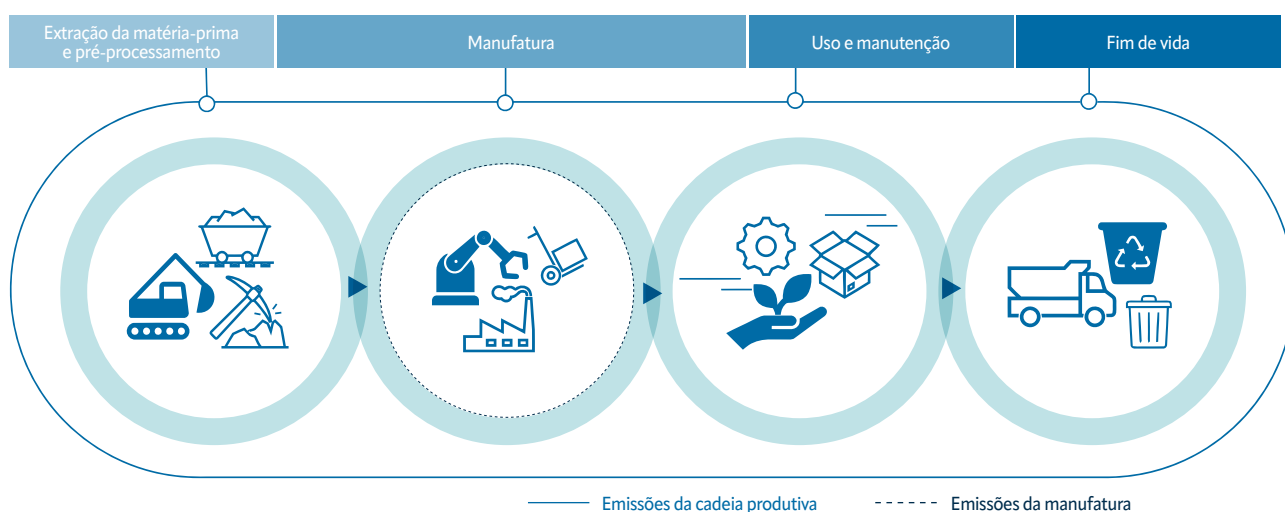
Fonte: Elaboração própria.

2. Avaliação do Ciclo de Vida na cadeia automotiva

A ACV é uma técnica reconhecida internacionalmente, aplicada para avaliar os diversos impactos ambientais causados por um produto durante todo o seu ciclo de vida, ou seja, desde a extração dos recursos naturais até sua disposição junto ao ambiente, passando pelas etapas de obtenção da matéria-prima, pré-processamento, produção,

distribuição, uso e fim de vida. A **Figura 2.1** ilustra as etapas do ciclo de vida de um produto. Quando a abordagem escolhida avalia apenas a categoria de impacto ambiental referente à mudança do clima, expressa por emissões de GEE, a denominação correta para tal avaliação é Pegada de Carbono (PC).

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



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

Assim como a ACV, a pegada de carbono é uma ferramenta valiosa para identificar e priorizar ações que reduzam significativamente o impacto no clima e melhorem a gestão de emissões de GEE dos processos produtivos e de sua cadeia de suprimentos. Seus resultados podem ser utilizados de diversas maneiras: como suporte para a tomada de decisão; no desenvolvimento e melhoria de produtos; no planejamento estratégico; na formulação de políticas públicas; na rotulagem ambiental, em marketing, entre outros (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2017; KISS; DINATO; FERNANDES, 2017).

Os princípios, requisitos e diretrizes para realizar um estudo de PC são descritos na norma ABNT ISO 14067: 2015 e estão completamente alinhados com as normas de Avaliação do Ciclo de Vida ABNT ISO 14040:2014 e ABNT ISO 14044:2014 (ABNT, 2014b, 2014a; ISO, 2013). Conforme pode ser observado na Figura 2.2, o estudo é realizado em quatro fases principais: (a) definição de objetivo e escopo; (b) elaboração do Inventário de Ciclo de Vida (ICV); (c) Avaliação dos Impactos de Ciclo de Vida (AICV) e (d) interpretação dos resultados (ABNT, 2014a, 2014b, 2015).

Escolhas metodológicas aplicadas em um estudo como esse precisam estar alinhadas ao objetivo e ao escopo da análise e devem ser definidas no início do projeto. O inventário de ciclo de vida é definido como a coleta de dados e procedimentos de cálculos que juntos irão quantificar entradas e saídas relevantes de um produto ou sistema, por exemplo, energia, matérias-primas, bem como produtos, coprodutos, resíduos, emissões atmosféricas, descartes em água e solo, entre outras saídas existentes.

A avaliação de impacto de ciclo de vida estuda a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto por meio de categorias de impactos e indicadores de catego-

rias, por exemplo mudanças climáticas e dióxido de carbono equivalentes (CO₂eq.). A interpretação da ACV é a consideração e análise de todas as constatações obtidas no inventário e na avaliação de impacto. Compete a essa fase o fornecimento de resultados consistentes com o objetivo e o escopo já definidos, chegando a conclusões e prevendo possíveis recomendações. Por fim, na fase de interpretação é assegurada a confiabilidade dos resultados. O **Quadro 2.1** resume os principais termos e definições importantes para um estudo de ACV.

A seguir são apresentadas as etapas e processos relacionados ao ciclo de vida de um veículo e o mapeamento das principais fontes de emissões de GEE.

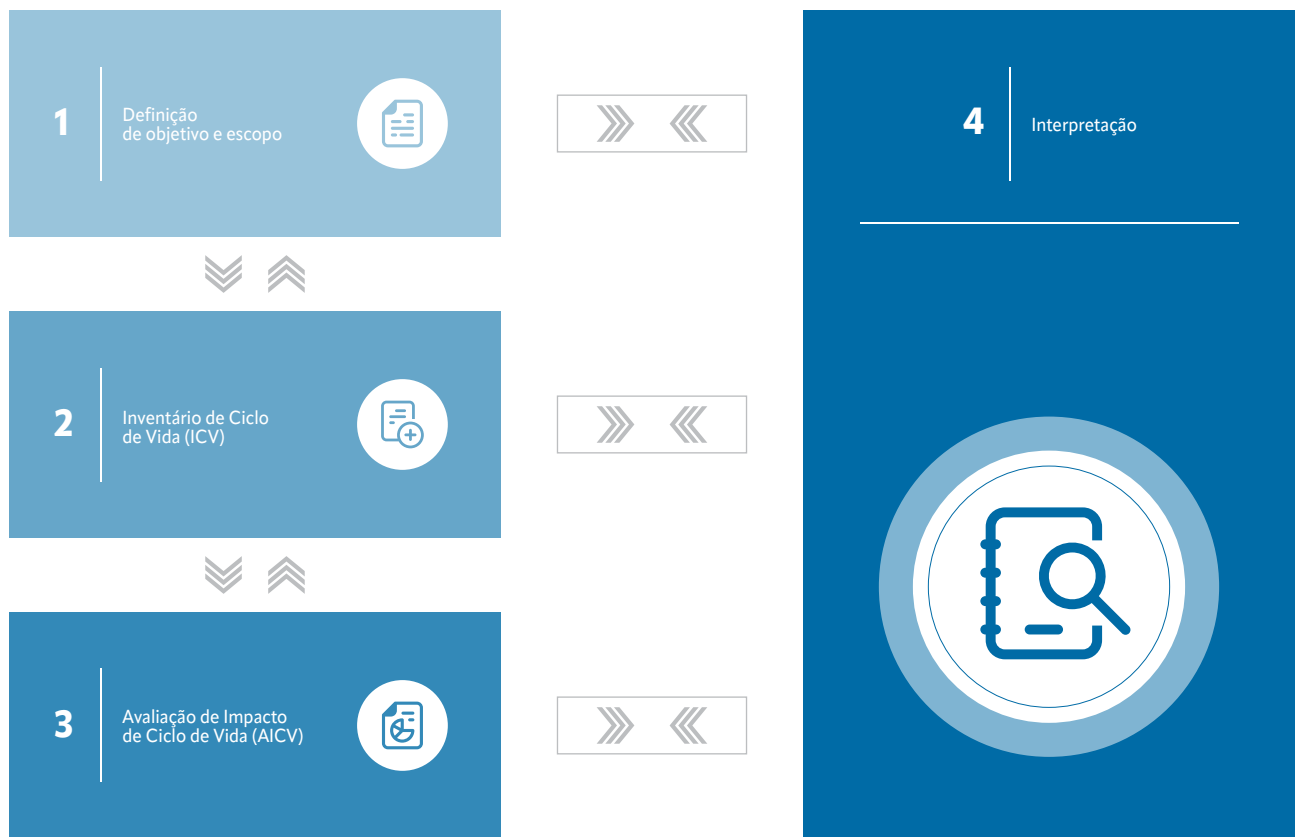
Quadro 2.1 – Termos e conceitos de um estudo de ACV

SISTEMA DE PRODUTO → conjunto de processos e fluxos do ciclo de vida do produto que desempenham uma ou mais funções definidas.

- ▶ **PRODUTO** → qualquer bem ou serviço que tenha a função que se adeque ao objetivo do estudo.
- ▶ **FUNÇÃO DO PRODUTO** → finalidade do objeto de estudo, a fim de atender uma necessidade.
- ▶ **UNIDADE FUNCIONAL** → quantificação das funções identificadas (características de desempenho) do produto, fornecendo uma referência às entradas e saídas e assegurando a comparabilidade dos resultados da ACV.
- ▶ **FLUXO DE REFERÊNCIA** → quantidade do produto necessária para que ele exerça a função da unidade funcional.
- ▶ **FRONTEIRAS DO SISTEMA** → critérios que especificam quais processos e fluxos estão incluídos.
- ▶ **CRITÉRIOS DE CORTE** → limites que delimitam as fronteiras do sistema, podem definir a exclusão de dados.
- ▶ **EXPANSÃO DO SISTEMA** → confere a diversos sistemas multifuncionais uma equivalência parcial de funções comparáveis em uma ACV.
- ▶ **ALOCAÇÃO** → repartição dos impactos dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto. Pode ser baseado propriedades físicas (por exemplo, massa) ou valor econômico, de forma que o procedimento reflita as relações entre os produtos, coprodutos, resíduos e suas funções.
- ▶ **MODELAGENS ATRIBUCIONAL** → análise dos fluxos de entrada e saída de todos os processos em um sistema à medida que ocorrem e o ciclo de vida do sistema é representado conforme sua configuração atual, seguindo uma lógica geral de cadeia de suprimentos.
- ▶ **MODELAGEM CONSEQUENCIAL** → representa uma cadeia genérica e teórica, na qual o sistema interage com os mercados de forma dinâmica, possibilitando alterações em demandas. Se concentra na modelagem dos processos no sistema de segundo plano, resultantes das decisões tomadas no sistema de primeiro plano.
- ▶ **DADOS PRIMÁRIOS** → dados específicos provenientes de medições nos processos operados, recomendados sempre que possível para assegurar dados fiéis ao sistema de produto estudado.
- ▶ **DADOS SECUNDÁRIOS** → utilizados quando não é possível a coleta de dados primários, sendo recomendado o uso de bases de dados bem documentadas e reconhecidas.

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

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



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

2.1 Ciclo de vida do veículo

Como já apontado, a fabricação de um veículo é um processo complexo, que envolve a produção de inúmeras peças compostas por diferentes materiais. São utilizados mais de 50 tipos de materiais diferentes, o que inclui desde itens essenciais, como rodas feitas de pneus de borracha, calotas de plástico e aros de metal, até itens acessórios, como ar-condicionado, composto por gás refrigerante, equipamentos de metal e sistema eletrônico (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020).

A **Figura 2.3** traz, de forma simplificada, o ciclo de vida completo 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. Deve-se ter em conta que em todas as etapas há consumo de recursos naturais, insumos e energia, além de serviços de transporte. Há ainda, em todas as etapas do ciclo de vida, emissões para o ar, para a água e para o solo.

Em relação ao escopo da ACV, vale ressaltar que um estudo pode abranger diferentes fronteiras, que por sua vez irão refletir o objetivo proposto. 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 2.2** a seguir e apresentados na **Figura 2.3**:

Quadro 2.2 – Diferentes abordagens 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” (well-to-wheels), 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”.

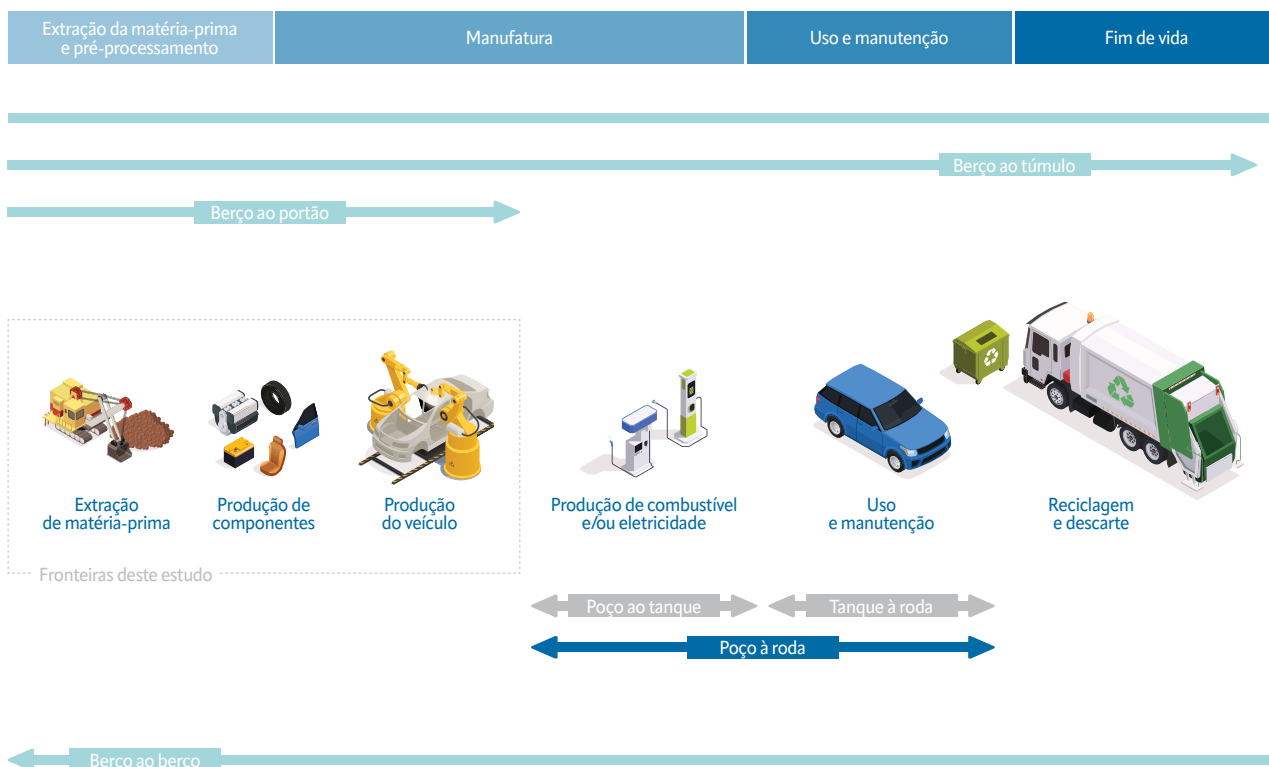
Do Portão ao Portão (gate-to-gate) – Avalia apenas a etapa de produção, dentro dos portões da fábrica.

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 (2014a, 2014b).

→| **Figura 2.3 – Ciclo de vida de um veículo leve**



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

Para facilitar a compreensão do perfil de emissões da cadeia automotiva, as seções a seguir apresentam, de forma resumida, os principais processos e fontes de emissões de cada etapa do ciclo de vida de um veículo. É importante salientar que, devido ao foco exclusivo na avaliação da PC, este projeto não considera outras categorias de impacto ambiental. Portanto, não permite a análise de possíveis *trade-offs* entre a PC e outros impactos ambientais. Além disso, o projeto se limita a análise do Berço ao Portão, ou seja, não contemplará as etapas de uso e fim de vida aqui descritas. Consequentemente, o estudo não incluirá as etapas de produção e queima de combustíveis/eletricidade utilizados na etapa de uso dos veículos.

Por outro lado, fatores como importação de componentes e aquisição integral do veículo, ampliam significativamente o escopo geográfico dentro da fronteira deste estudo, introduzindo distâncias internacionais e modos de transporte distintos. Todos esses pormenores devem ser considerados ao conduzir a pesquisa, com o intuito de garantir a fidedignidade dos resultados apresentados em relação ao contexto brasileiro.

Assim, a ACV desempenha um papel fundamental na descarbonização do setor automobilístico pois permite avaliar de forma abrangente o impacto ambiental de um veículo ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração de maté-

rias-primas até o descarte final. Por meio da ACV, é possível comparar diferentes tecnologias de propulsão (como motores a combustão interna, híbridos, elétricos) e identificar oportunidades de melhoria em cada etapa do ciclo de vida. Isso inclui a redução das emissões na produção de materiais, o uso de energias renováveis na fabricação, a eficiência energética do veículo em operação, o gerenciamento adequado dos resíduos e a reciclagem de componentes.

▲ 2.1.1 Extração de matéria-prima e produção de materiais

O ciclo de vida de um veículo começa com a extração de todas as matérias-primas, seguida da produção dos materiais presentes na sua composição. Quando avaliada com o recorte do Berço ao Portão, a fase de extração de matéria-prima e produção de materiais é uma das fases que mais contribuem para a pegada de carbono do veículo (EGESKOG *et al.*, 2020; EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020; HAWKINS *et al.*, 2013; MERA *et al.*, 2023; VELANDIA VARGAS *et al.*, 2019, 2020).

O peso médio dos veículos vendidos no Brasil pode ser estimado em cerca de 1.079 kg (BRITO; GRIGORI, 2022). A tabela a seguir apresenta a composição aproximada da estrutura de um veículo leve e as principais aplicações de cada material.

Tabela 2.1 – Composição aproximada da estrutura de um veículo leve

| Material | Percentual (m/m%) | Principais componentes |
|---------------|-------------------|--|
| Aço comum | 54,8% | carroceria e chassis |
| Aço especial | 16,7% | carroceria e chassis |
| Plásticos | 8,2% | diversas partes dos veículos, como parte interna, parte externa, chassi, motor e componentes elétricos |
| Alumínio | 6,2% | carroceria e chassis, rodas |
| Borrachas | 3,0% | pneus e outras peças de vedação e isolamento |
| Vidros | 2,5% | para-brisas, janelas e espelhos |
| Ferro fundido | 1,5% | carroceria e chassis |
| Tinta | 1,4% | primer, tinta automotiva |
| Têxteis | 0,8% | Espumas, tecidos, carpetes e forrações presentes no acabamento interior e bancos |
| Cobre | 0,8% | componentes eletrônicos, sistema de refrigeração |
| Chumbo | 0,5% | baterias |
| Zinco | 0,1% | revestimentos e acabamentos |
| Outros | 3,5% | |

Fonte: Adaptado de AEA (2020).

Dada a relevância desta etapa, estratégias para a redução da PC dos veículos podem envolver a adoção de práticas mais sustentáveis de produção materiais empregados na fabricação de veículos, a substituição de materiais convencionais por alternativos e/ou a ampliação do uso de materiais reciclados.

▲ 2.1.2 Fabricação, montagem e distribuição

Após a extração de matérias-primas e produção dos materiais, ocorre o transporte às autopeças para a transformação dos materiais em componentes, que, por sua vez, são destinados às linhas de montagem das montadoras para formar o veículo. Nas autopeças, materiais como aço, ferro, alumínio, vidro, borracha são recebidos para se tornarem os mais diversos componentes dos sistemas de um veículo: baterias, motor, transmissão, freio, direção e suspensão, elétrico e eletrônico, vidros, pneus, entre outros (SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS, 2023).

A fabricação do veículo, por sua vez, ocorre nas montadoras, percorrendo três etapas principais de uma linha de montagem: corte das chapas de aço que formam a estrutura do automóvel; pintura da carroceria; e encaixe dos componentes elétricos, mecânicos e de segurança (MOTOMURA, 2011). Tecnologias avançadas, como robôs industriais e sistemas automatizados, são frequentemente empregadas para otimizar a eficiência e a precisão nas linhas de montagem. Emissões de GEE desta etapa estão relacionadas majoritariamente ao consumo de energia elétrica e à queima de combustíveis fósseis em processos que demandam energia em forma de calor. As

principais etapas do processo de manufatura do veículo são detalhadas a seguir:

• Design de produto e desenvolvimento do projeto

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

• Estamparia

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

• Pintura

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

• Montagem final

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

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

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

▲ 2.1.3 Uso, reúso e manutenção

A fase de uso tem início com a aquisição do veículo pelo consumidor. Atividades dessa etapa incluem 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.

Em média, um veículo leve percorre cerca de 150.000 km ao longo de 10 anos e 9 meses (SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS, 2023). A etapa de uso contribui de forma significativa para a pegada de carbono, principalmente de veículos movidos à combustão interna, que do "poço a roda" emitem entre 60% e 80% das emissões totais do ciclo de vida do veículo (GAUTO et al., 2023).

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 nessa fase.

▲ 2.1.4 Fim de vida

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 e, em geral, envolve as seguintes etapas:

- Baixa da documentação do veículo no DETRAN. O carro deixa de ser um automóvel e passa a ser um conjunto de componentes a serem reutilizados e reciclados.
- Descontaminação do veículo. Óleos, gases e outros fluidos são removidos e descartados de forma segura, de acordo com regulamentações ambientais pertinentes.
- Desmontagem do veículo, avaliação e categorização das peças de acordo com as condições de reaproveitamento, podendo ser divididas entre peças prontas para reuso, peças com danos leves que serão vendidas por menor valor, e peças que não podem ser reaproveitadas (itens de segurança e baterias, por exemplo).
- Reciclagem de materiais: Os materiais recuperados durante a desmontagem, como metal, plástico e vidro, são enviados para instalações de reciclagem onde são processados e transformados em matéria-prima para a fabricação de novos produtos. A condução dessa etapa ajuda a reduzir a demanda por recursos naturais e minimiza o impacto ambiental associado à produção de novos materiais.

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).

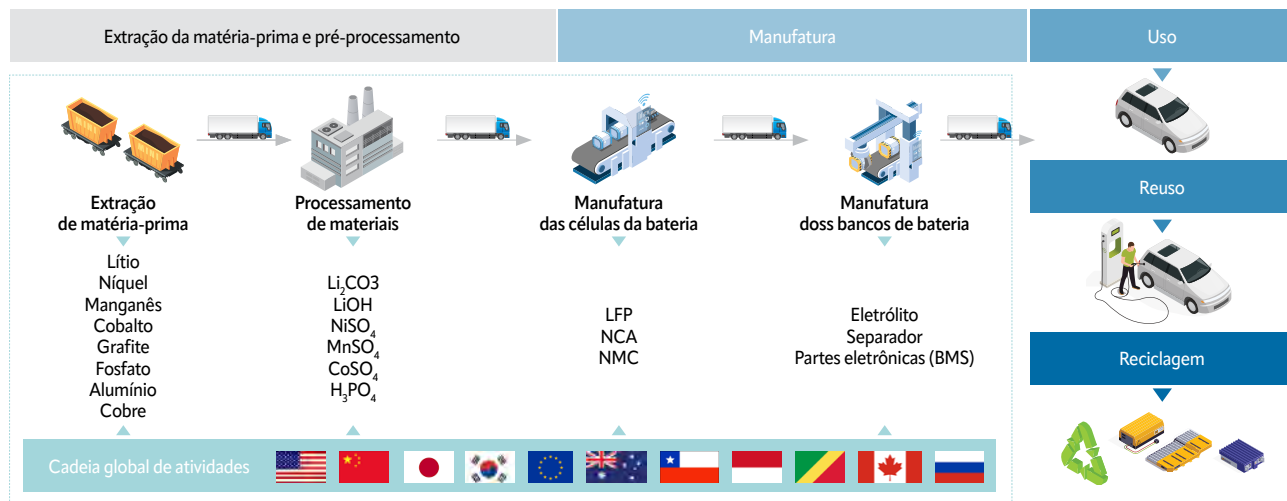
Como contextualizado anteriormente, a bateria é um dos componentes mais importantes em termos de impactos ambientais de veículos eletrificados. Assim, a seção a seguir detalha o ciclo de vida de uma bateria de íon-lítio. Vale ressaltar que a tecnologia de produção e a composição da bateria ainda não estão consolidadas e os processos e etapas mapeadas à frente podem se alterar no futuro.

2.2 Ciclo de vida de baterias de íon-lítio

A produção de baterias de qualquer tipo começa com a extração de matérias-primas, que ocorre principalmente por meio de atividades de mineração, e segue para o processamento de materiais, que envolve o refinamento e obtenção de componentes ativos do cátodo em conjunto com a preparação dos demais elementos que compõem a célula da bateria, como o ânodo e o eletrólito. Após a manufatura

das células e de seu agrupamento em módulos, são montados os bancos de baterias – a serem posteriormente instalados no veículo –, que incluem um sistema de gerenciamento do dispositivo, mecanismos de resfriamento e a caixa onde a bateria é armazenada (AICHBERGER; JUNGMEIER, 2020). A **Figura 2.4** sintetiza o ciclo de vida de baterias do tipo íon-lítio.

→ **Figura 2.4 – Ciclo de vida de baterias de íon-lítio**



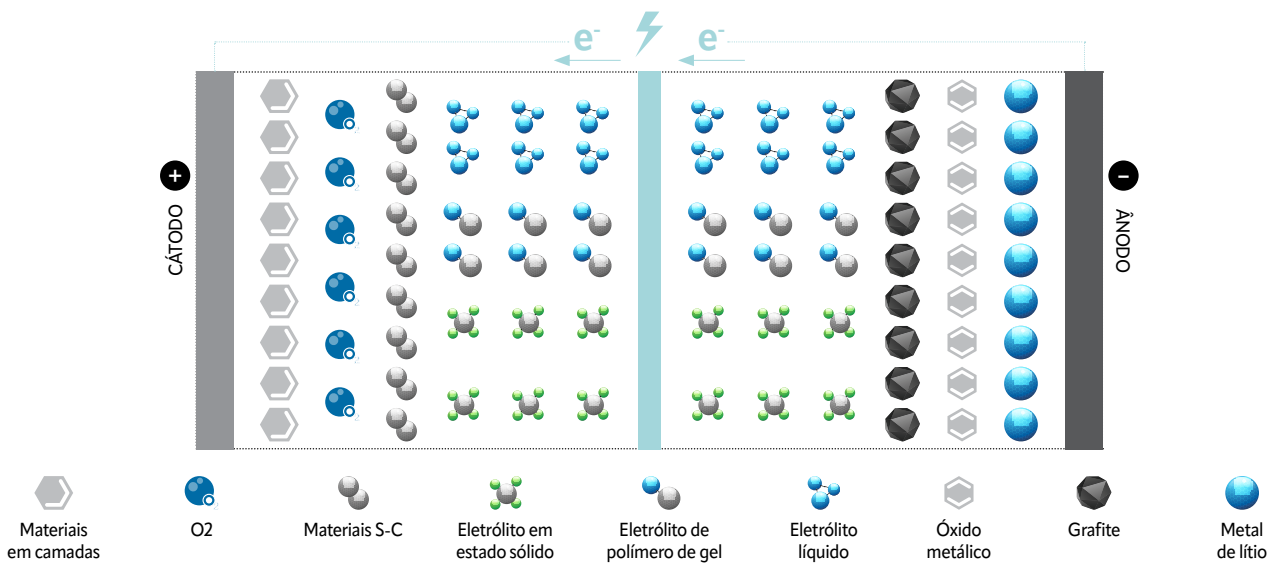
Fonte: Adaptado de Aichberger e Jungmeier (2020) e Llamas-Orozco (2023).

2.2.1 Tipos de baterias

Atualmente, o mercado de carros elétricos emprega majoritariamente baterias do íon-lítio (*lithium-ion batteries - LIBs*) para sistemas de armazenamento de energia de veículos movidos à eletricidade. Tais baterias são formadas por um cátodo – geralmente composto por uma mistura de lítio, magnésio, níquel e cobalto –, um ânodo feito de grafite e um eletrólito de sais de lítio. Além dos componentes presentes nas células químicas, a montagem

da bateria requer também materiais como alumínio e cobre em sua estrutura. A química do cátodo será um dos principais fatores influenciando o desempenho da bateria, com três composições sendo mais comumente aplicadas no mercado: óxido de lítio-níquel-magnésio-cobalto (*lithium nickel manganese cobalt oxide - NMC*), óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (*lithium nickel cobalt aluminum oxide - NCA*) e fosfato de lítio-ferro (*lithium iron phosphate - LFP*) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). A Figura 2.5 detalha a estrutura de uma bateria de íon-lítio.

→| **Figura 2.5 – Estrutura de uma bateria de íon-lítio**



Fonte: Adaptado de Fan *et al.* (2020).

Projeções da economia para os próximos anos indicam que as baterias de íon-lítio continuarão a ter predominância no mercado de veículos movidos à eletricidade, que por sua vez irá experimentar um crescimento vertiginoso no futuro próximo, como discutido na seção anterior. Além disso, baterias com o cátodo do tipo NMC são mais frequentes nessa categoria de veículos, representando por volta de 60% das vendas globais, enquanto bateria do tipo LFP e NCA representam 30% e 8%, respectivamente (INTERNA-

TIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Baterias do tipo LFP têm aumentado sua proporção de mercado na última década, principalmente dada a preferência de fabricantes chineses em função de seu menor custo para aplicações em veículos elétricos de entrada a serem produzidos em volumes elevados (LLAMAS-OROZCO *et al.*, 2023). Cada tipo de cátodo disponível no mercado apresenta vantagens e limitações. A **Figura 2.6** sintetiza algumas das principais características das três químicas mais comuns no mercado atualmente.

→| **Figura 2.6 – Principais características de três tipos de química de cátodo predominantes**

| | NMC | LFP | NCA |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Vantagens | Maior densidade de energia | Menor custo | Maior densidade de energia |
| | Valor elevado associado à recuperação | Maior segurança | Maior confiabilidade |
| | Maior confiabilidade | Maior número de ciclos de recarga | Maior durabilidade |
| | Maior durabilidade | Não contém componentes tóxicos | |
| Limitações | Menor segurança | Menor densidade de energia | Processos de produção demandantes |
| | | Compete pelas reservas de fósforo | Menor segurança |

Fonte: Adaptado de Arshad *et al.* (2022) e Fan *et al.* (2020).

No contexto de expansão do mercado de carros elétricos, incluindo avanços tecnológicos que confirmam maior autonomia ao veículo, mesmo as baterias atuais de maior densidade energética não serão suficientes em termos das demandas futuras de armazenamento de energia para dispositivos de armazenamento de energia para veículos elétricos, apesar de ainda não haver um entendimento completo dos seus mecanismos de funcionamento (FAN *et al.*, 2020).

Até o presente momento, existe apenas uma química viável que não é baseada em lítio. Constituídas de íons de sódio, baterias desse tipo implicam em custos reduzidos, porém possuem menor densidade de energia, o que as restringe ao contexto urbano (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). A Figura 2.7 apresenta a evolução dos tipos de químicas e materiais empregados em baterias destinadas à carros elétricos nas últimas décadas, bem como expectativas para os próximos anos.

→| **Figura 2.7 – Químicas de baterias ao longo das últimas décadas e projetadas para os próximos anos**

| | 2010 | 2020 | | 2030 | | |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------|---|---|
| CÁTODO | LCO | LMO LFP NMC/NCA | LFP NMC/NCA | LFP NMC/NCA LMFP/LMNO | NMC/NCA LMFP/LMNO Enxofre | LMFP/LMNO Enxofre |
| SEPARADOR/ ELETRÓLITO | Polímero/ Líquido | Polímero/ Líquido | Polímero/ Líquido | Polímero/ Líquido | Polímero/ Líquido | Líquido avançado Semissólido Sólido |
| ÂNODO | Grafite | Grafite | Grafite | Grafite Grafite e silicone | Grafite e silicone Metal de lítio Ânodo de silicone | Metal de lítio Ânodo de silicone |

LCO – Cobalto de lítio; LMO – Óxido de lítio-manganês; LFP – Lítio-ferro-fosfato; NMC – Lítio-magnésio-cobalto; NCA – Óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio; LMFP – Fosfato de ferro-manganês-lítio; LMNO – Óxido de lítio-magnésio-níquel.

Fonte: Adaptado de Fleischmann *et al.* (2023)

2.2.2 Extração de matéria-prima e produção de materiais

A fabricação de baterias do tipo íon-lítio se desenvolve por meio de uma cadeia global de suprimentos, incluindo diferentes países, com funções distintas no fluxo produtivo. Apesar da abrangência de sua cadeia de suprimentos, um número limitado de países concentra as atividades de extração mineral, processamento, manufatura de células e montagem dos bancos de baterias. Dentre os principais materiais utilizados para a confecção das baterias predominantes hoje no mercado (NMC, LFP e NCA), o lítio apresenta os maiores desafios de

atendimento da demanda, principalmente dado que a maior parte de sua produção é proveniente de apenas quatro países: Austrália, China, Chile e Argentina (LLAMAS-OROZCO *et al.*, 2023). Além disso, a extração desse mineral está associada a inúmeros impactos ambientais e sociais, como degradação do solo, perda de biodiversidade, contaminação por componentes tóxicos, violação de direitos humanos e efeitos adversos para comunidades locais, entre outros (FLEISCHMANN *et al.*, 2023). A **Tabela 2.2** apresenta a porcentagem de participação por país na produção global de diferentes insumos para baterias de íon-lítio.

Tabela 2.2 – Porcentagem de participação na produção global de insumos por material e país

| Material | País | % |
|----------|--------------------------------|-----|
| Níquel | Rússia | 38% |
| Níquel | Indonésia | 11% |
| Cobalto | República Democrática do Congo | 63% |
| Magnésio | África do Sul | 30% |
| Magnésio | Austrália | 12% |
| Grafite | China | 62% |
| Lítio | Austrália | 52% |
| Lítio | Chile | 22% |
| Lítio | Argentina | 7% |

Fonte: Adaptado de Llamas-Orozco *et al.* (2023).

Para além do material ativo do cátodo (NMC, LFP e NCA, entre outros) – comumente apontado como responsável pela maior parte do impacto ambiental associado à etapa de produção –, uma bateria de íon-lítio é composta por outros componentes, como: material ativo do ânodo (grafite); coletores do cátodo e do ânodo (folha de alumínio e folha de cobre, respectivamente); separador; eletrólito; ligante (polímeros); solvente; partes eletrônicas e estruturais. A predominância de cada um dos

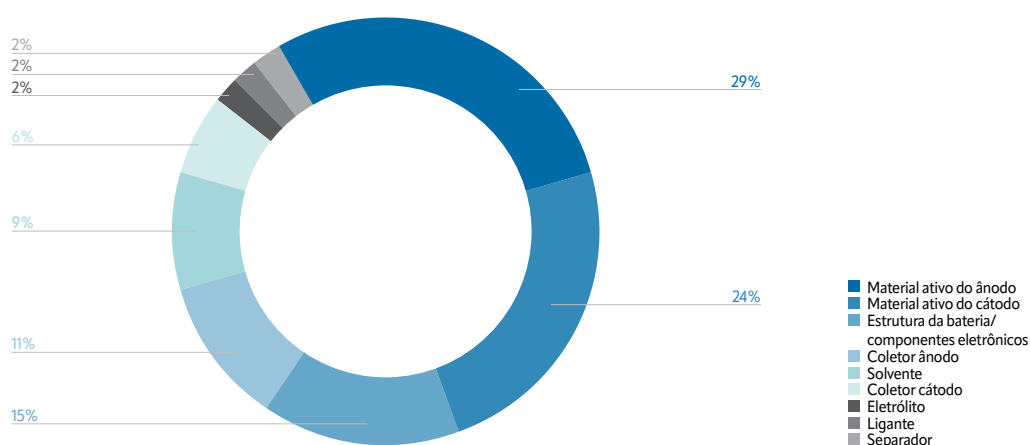
componentes em relação ao peso total da bateria não é um parâmetro fixo, de forma que diferentes proporções podem ser assumidas a depender de características específicas da célula manufaturada.

De forma geral, prevalecem os materiais constituintes do cátodo e do ânodo, como alumínio, cobre e grafite, além de insumos específicos da química do cátodo, a exemplo do ní-

quel, magnésio e cobalto. Por fim, componentes eletrônicos referentes à montagem dos bancos de bateria podem incluir a embalagem, o líquido de resfriamento e o sistema de gerenciamento do dispositivo (BMS). A participação percentual destes últimos na composição mássica da bateria também é mutável, podendo ou não ser significativa. Dado que a caracterização de materiais e componentes de baterias de íon-lítio varia de acordo com o dispositivo em análise, seu peso – e

sua proporção em relação ao peso do veículo – também irão depender do contexto, de forma que este parâmetro será discutido em maior detalhe na seção 3.2.3.1 de resultados. Para fins expositivos, a **Figura 2.8** apresenta premissas para os componentes de uma bateria do tipo NMC adotadas pela Comissão Europeia em um extenso estudo de ACV de veículos, publicado em 2020 e discutido com maior profundidade na seção 4.1 deste relatório.

→| **Figura 2.8 – Distribuição de massa entre componentes e matérias de uma bateria do tipo NMC**



Fonte: Adaptado de European Commission et al. (2020).

▲ 2.2.3 Fabricação de baterias de íon-lítio

Em relação ao processamento de materiais primários e fabricação das células e bancos de baterias, a China concentra a maior parte da capacidade de refinamento e manufatura do setor, padrão que deve se manter até depois de 2030. A **Tabela 2.3** apresenta a participação de diferentes países e regiões na produção global de baterias de íon-lítio.

O aumento exponencial da demanda por baterias de íon-lítio pelo setor automotivo indica ainda que dificilmente a produção conseguirá atender o mercado dentro de parâmetros sustentáveis, especialmente no contexto de uma próxima geração de baterias intensas em lítio (FLEISCHMANN *et al.*, 2023). Tanto os processos de aquisição de matéria-prima, quanto as etapas de manufatura da bateria requerem recursos energéticos em grande escala, principalmente aquelas relacionadas à obtenção do material ativo do cátodo e à montagem das células da bateria (AICHBERGER; JUNGMEIER, 2020). Assim, a matriz energética local possui grande relevância no cálculo das emissões de GEE associadas às fases tanto de extração de materiais, quanto de produção das baterias, sendo o consumo de energia um

dos fatores de maior contribuição para geração dos impactos associados às baterias de íon-lítio (LAI *et al.*, 2022).

▲ 2.2.4 Uso, reúso e manutenção

Durante a fase de uso, emissões associadas à bateria incluem fontes indiretas de GEE associadas ao consumo de eletricidade demandado pelo sistema de propulsão do veículo. Esse consumo irá depender de diversos outros fatores, como perdas decorrentes da conversão de energia e o peso total da bateria em relação ao peso do veículo, relacionados às condições operacionais do automóvel. Por outro lado, o valor final das emissões irá variar ainda de acordo com a matriz elétrica empregada na localidade de recarga da bateria (ARSHAD *et al.*, 2022). Outros aspectos influenciando emissões nesta etapa incluem a temperatura da bateria durante o uso, número de ciclos completos de carga e descarga e a potência disponibilizada pela infraestrutura de recarga.

De maneira geral, baterias de íon-lítio podem ser utilizadas em veículos elétricos por aproximadamente 8 anos, sendo a recomendação aposentar o dispositivo uma vez que sua capacidade se reduza a cerca 80% (LAI *et al.*, 2022). Além disso, eventos

Tabela 2.3 – Porcentagem de participação na fabricação global de baterias de íon-lítio por país/região

| País/Região | % |
|-----------------------|---------------------|
| China | Mais de 75% |
| Europa | Aproximadamente 10% |
| Estados Unidos | 6% |
| Japão e Coreia do Sul | 5% |

Fonte: Adaptado de Llamas-Orozco *et al.* (2023).

isolados podem comprometer a bateria, como curtos-circuitos, vazamentos e degradação da capacidade de fornecimento de energia (FAN *et al.*, 2020).

Para além da etapa de uso, estudos apontam para a possibilidade de reuso em estações de recarga, de forma que baterias não mais adequadas para a propulsão de veículos elétricos ainda possuíam estabilidade suficiente para integrar sistemas de armazenamento de energia para infraestrutura urbana (ARSHAD *et al.*, 2022). Nesta etapa, a bateria é desmontada para ser recomposta em uma estação de recarga de EV, onde pode permanecer operando até que sua capacidade se reduza a aproximadamente 60%, quando enfim seguirá para a reciclagem (FAN *et al.*, 2023). Apesar de amplamente avaliada enquanto alternativa de destinação para baterias usadas, Peters *et al.* (2017) aponta que as evidências até o momento não indicam benefícios significativos associados à prática. Nesse sentido, Fan *et al.*, (2023) destaca que a degradação da bateria envolve processos complexos e não lineares, principalmente durante o reuso em estações de recarga, que ainda carecem de conhecimento consolidado.

Também como parte da etapa de uso da bateria, atividades de manutenção consistem em ações necessárias ao funcionamento correto do dispositivo durante sua utilização em veículos elétricos, podendo inclusive influenciar seu consumo de energia durante a recarga (ARSHAD *et al.*, 2022). Para tanto, podem envolver demandas de reparação ou substituição de componentes em função de defeitos identificados (AEA, 2023).

▲ 2.2.5 Fim de vida de baterias de íon-lítio

Apesar do potencial que a reciclagem de baterias aposentadas representa, discussões sobre o tema ainda não são centrais na agenda de eletromobilidade ou em estudos de análise de ciclo de vida. Tal limitação se dá principalmente em decorrência dos processos de recuperação de materiais a partir de baterias usadas não estarem consolidados, o que dificulta a obtenção de dados relevantes (LAI *et al.*, 2022). Os benefícios, no entanto, são evidentes. Segundo revisão conduzida por Aichberger & Jungmeier (2020) a partir de 50 artigos publicados entre 2005 e 2020, o potencial médio de redução de emissões de GEE quando considerados processos de reciclagem seria de aproximadamente 21% em relação às emissões da etapa de produção da bateria.

Por outro lado, as vantagens da reciclagem não se reduzem às emissões de GEE, havendo ganhos ambientais e econômicos amplos advindos da prática. Além de recuperar metais raros, processos de reciclagem de componentes evitam a disposição inadequada e potencialmente tóxica de eletrólitos orgânicos e metais pesados (FAN *et al.*, 2020). Ainda assim, a incidência desses impactos têm crescido diariamente frente à ausência de uma cadeia sólida de reciclagem (ARSHAD *et al.*, 2022). Atualmente, existem diferentes técnicas de reciclagem para a recuperação de materiais em baterias aposentadas, como a Hidrometalurgia e Pirometalurgia, além de uma combinação das duas, que como os nomes sugerem, envolvem processos que aportam água e calor para a separação e obtenção de metais como cobre, níquel e lítio (FAN *et al.*, 2020).

3. Revisão da literatura acadêmica

Neste capítulo, é apresentada a revisão da literatura acadêmica de estudos de ACV e PC de veículos leves, conduzida com o objetivo de fornecer subsídio técnico às etapas subsequentes do projeto "Do berço ao portão". Foram avaliados os principais estudos nacionais e internacionais, buscando responder às seguintes perguntas:

- Qual é o estado do conhecimento sobre a ACV de veículos leves, especificamente no que diz respeito a etapa de produção dos veículos (incluindo a bateria)?
- Quais são as principais escolhas metodológicas adotadas para a realização da ACV (unidade funcional, vida útil, alocação etc.)?
- Quais as principais fontes de dados utilizadas?

- Quais os impactos potenciais estimados em termos de emissão de GEE para as diferentes etapas de produção do veículo?
- Quais os principais pontos críticos e qual a contribuição da matriz energética?
- Quais são as principais lacunas em estudos de ACV de veículos leves?

O capítulo está dividido em duas seções. Na primeira seção é apresentada a metodologia aplicada para levantamento e seleção de artigos relevantes, bem como uma análise dos artigos selecionados em termos de representatividade temática e geográfica. A segunda seção, por sua vez, traz os resultados da revisão, estando dividida em três itens: veículos; baterias e energia.



3.1 Metodologia

A metodologia utilizada para a revisão de literatura deste estudo foi subdividida nas etapas ilustradas na **Figura 3.1** e descritas nos subtópicos a seguir.

3.1.1 Protocolo de pesquisa

O protocolo de pesquisa é um conjunto de aspectos que direcionam a busca por referências na literatura, garantindo que esta seja realizada de forma transparente e possibilitando sua reprodutibilidade em novos estudos. Nesse sentido, um pro-

coloco foi definido para o mapeamento dos principais artigos dentro do escopo desta revisão bibliográfica, isto é, o estado da arte de estudos de ACV para veículos leves. Os procedimentos estabelecidos compreendem a delimitação de bases de dados, a seleção de palavras-chaves e a configuração das etapas de filtragem de artigos. O protocolo final de pesquisa, apresentado na **Figura 3.2** é, portanto, resultado de um processo iterativo de refinamento, conduzido com o objetivo reunir um volume de literatura relevante e suficiente que responda as perguntas propostas.

→ **Figura 3.1 – Etapas da revisão bibliográfica**



Fonte: Elaboração própria.

→ **Figura 3.2 – Ilustração do protocolo de pesquisa aplicado**

| | | |
|--|-----------------------|-----------------------------|
| Termos utilizados: "Vehicle" AND "LCA" | Análise bibliométrica | |
| Buscas nas plataformas Web of Science e Scopus | Scopus | Web of Science |
| Filtragem por: Artigo/ Artigo de revisão (Língua: inglês) | 1216 artigos | 915 artigos |
| Filtragem por termos: "carbon footprint" e "manufacturing" | 162 artigos | 15 artigos |
| Remoção de duplicatas/Amostra final | 176 artigos | + Artigos altamente citados |
| Análise dos resumos (Semáforo da revisão bibliométrica) | 58 artigos | |

Fonte: Adaptada de Velandia Vargas *et al.* (2020).

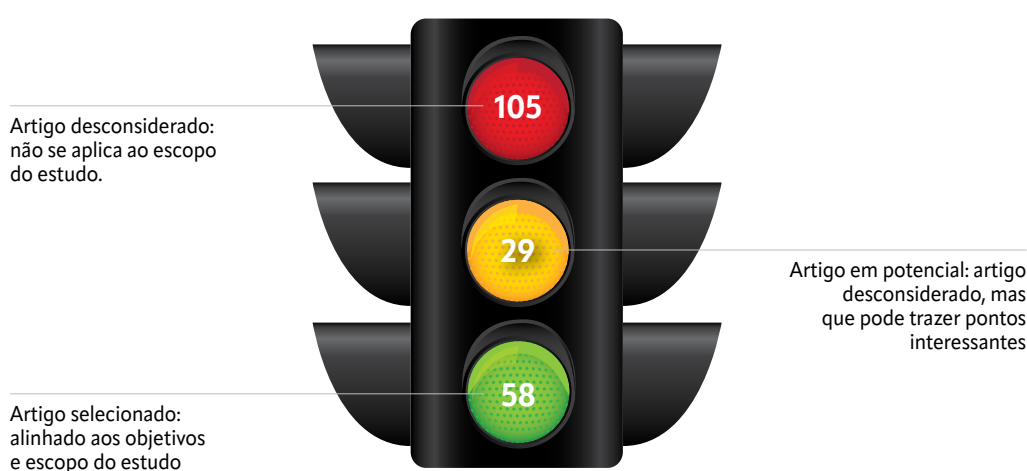
Como ilustrado na **Figura 3.2**, as palavras-chaves utilizadas foram "vehicle" e "LCA". As bases de dados escolhidas foram *Scopus* e *Web of Science* e a busca foi realizada no segundo semestre de 2023. Após a inserção das palavras-chaves foram realizadas três filtrações: (1) filtração por tipo do artigo: artigo e artigo de revisão; (2) filtração por idioma do documento: inglês; e (3) filtração por palavra-chave "carbon footprint" e "manufacturing".

A plataforma *Web of Science* também possui uma filtração descrita como "+Highly cited papers" ou artigos mais citados. Esse filtro foi utilizado posteriormente e os artigos foram adi-

cionados aos artigos já encontrados pelo protocolo. Após a junção dos artigos e a remoção de duplicatas, 176 artigos foram encontrados e passaram por um processo de seleção.

Com base nos artigos identificados, foram estabelecidos critérios para a seleção dos estudos a serem revisados, resultando na exclusão dos artigos que não se alinhavam com o escopo do estudo. Esse processo conduziu à criação de um "Semáforo de Revisão Bibliográfica", com base no qual foi realizada a análise dos resumos dos estudos, classificando-os em três categorias distintas, conforme ilustrado na Figura 3.3.

→| **Figura 3.3 – Semáforo da revisão bibliográfica**



Fonte: Elaboração própria.

Foram classificados como verde os artigos que apresentaram estudos específicos de ACV de veículos ou baterias/componentes e/ou que especificaram a contribuição dos impactos de componentes ou materiais pertinentes à cadeia automotiva. Foram classificados como amarelo estudos com escopo mais amplo, mas que apresentaram resultados segregados da etapa de manufatura do veículo e/ou apresentaram inventários detalhados de ciclo de vida ou discussões pertinentes relacionadas a essa etapa. Os artigos dessa categoria não são discutidos no presente relatório, porém servirão de insumo para etapas subsequentes do projeto.

Quando um artigo não se enquadrou nas classificações verde ou amarela, foi classificado como vermelho, indicando que este estava fora do escopo deste estudo. Dessa forma, 58 artigos foram selecionados na classificação verde, 29 na classificação amarela e 105 na vermelha. Após essa classificação, se iniciou a etapa de análise do conteúdo dos artigos em potencial, descrita na seção a seguir.

Além dos estudos selecionados, foram incorporados documentos da literatura cinza, detalhados no Capítulo 4, especialmente relatórios técnicos de ACV e ferramentas setoriais dedicadas ao cálculo da PC em veículos.

▲ **3.1.2 Análise de conteúdo**

Os estudos selecionados como "artigos selecionado" foram analisados e inseridos em uma matriz de revisão bibliográfica. Nessa matriz, foram definidos campos para categorizar os dados encontrados de acordo com a relevância para o presente projeto. A Figura 3.4 ilustra os campos utilizados na matriz de revisão bibliográfica. Os campos selecionados para a caracterização de dados podem ser subdivididos em três grupos: artigo; metodologia e conteúdo.

Para exemplificar o preenchimento da matriz de revisão bibliográfica, a Tabela 3.1 apresenta o mapeamento de dois artigos para algumas das categorias de dados utilizadas.

→| **Figura 3.4 – Subdivisão dos campos utilizados na matriz de revisão bibliográfica**

| Categorização do artigo | Categorização da metodologia | Categorização do conteúdo |
|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Título | Objetivo | Modelo (veículo/componente) |
| Autores | Escopo | Vida útil (veículo/componente) |
| Palavras-chaves | Abordagem | Materiais |
| Periódico | Fronteiras | Resultados (CO ₂ eq.) |
| Ano | Processos considerados | Hotspots |
| País | Alocação | Conclusões |
| Artigo/artigo de revisão | Metodologia de AICV | Outras informações relevantes |
| Escopo (veículo/componente) | Categorias de impacto | |

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3.1 – Exemplo de categorização de artigos na matriz de revisão bibliográfica

| | | |
|------------------------------------|--|---|
| Título | Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective | Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review |
| Autores | Mayyas A.; Omar M.; Hayajneh M.; Mayyas A.R. | Aichberger, C., & Jungmeier, G. |
| Palavras-chaves | Auto-bodies; Automotive; Electric vehicles; Life cycle analysis; Lightweight; Sustainability | LCA; electric vehicle; battery; literature review |
| Periódico | Journal of Cleaner Production | Energy |
| Ano | 2017 | 2020 |
| País | EUA | - |
| Artigo/artigo de revisão | Artigo | Revisão |
| Escopo (veículo/componente) | Veículo | Baterias |

Fonte: Elaboração própria.

Por meio da categorização das informações presentes nos artigos, os dados analisados foram consolidados, permitindo identificar o cenário atual da pesquisa e das lacunas a serem preen-

chidas. Além disso, essa categorização desempenhará um papel crucial na elaboração dos ICV do projeto, já que muitos estudos disponibilizam informações relevantes do inventário.

3.2 Resultados e discussão

Nos itens a seguir são apresentados os resultados obtidos da análise da matriz de revisão bibliográfica. O item 3.1.2 apresenta uma análise da amostra considerada, enquanto os itens 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4 trazem discussões a respeito da ACV aplicada à produção de veículos, à manufatura de baterias e ao consumo de energia durante esses processos, respectivamente. Tais itens foram definidos em função dos grupos temáticos identificados durante a análise de conteúdo. O foco em energia reflete a relevância deste componente para o cálculo da pegada de carbono.

Vale ressaltar que o uso de diferentes metodologias e premissas dificultam a comparação dos dados e dos resultados dos estudos encontrados. Assim, o objetivo dessa seção não é realizar uma comparação direta entre os diferentes estudos e/ou veículos avaliados, mas sim demonstrar o que já foi explorado na literatura e qual o grau de variação existente entre os diferentes resultados. Além disso, a maioria dos resultados explorados nesse relatório tem o foco do Berço ao Portão, no entanto, a melhor maneira de comparar os diferentes tipos de motorização de um veículo é por meio de um estudo comple-

to de ACV conduzido para esta finalidade, incluindo todas as fases do ciclo de vida dos produtos e os mesmos aspectos metodológicos (unidade funcional, premissas, escopo, fronteiras, método de avaliação).

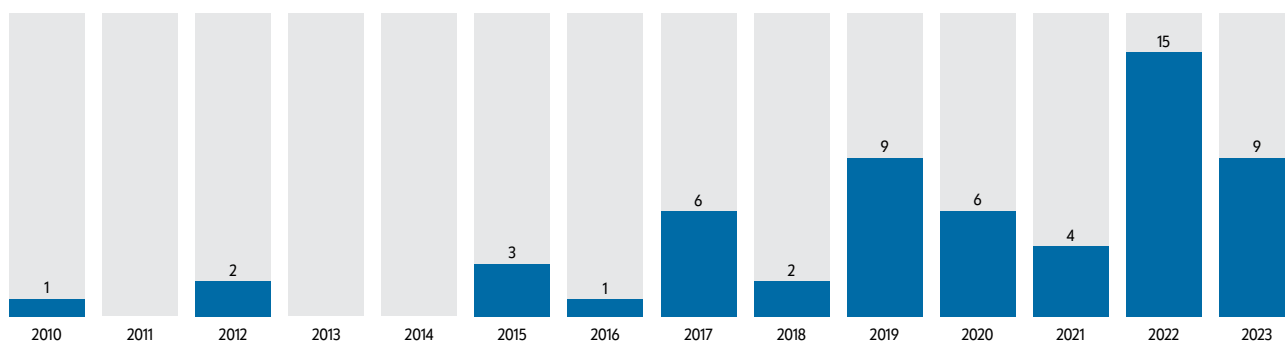
3.2.1 Visão geral dos artigos selecionados

Na sequência são apresentadas as métricas dos artigos reunidos a partir do protocolo de pesquisa, indicando aspectos quantitativos e qualitativos da amostra selecionada, como escopo temático e geográfico.

Do ponto de vista cronológico foi observado um crescimento no número de artigos publicados nos últimos anos, com a maior parte da literatura situada entre 2019 e 2023 (Figura 3.5), o que revela o caráter atual e urgente do tema. O maior volume de publicações recentes é especialmente relevante para a qualidade dos estudos referentes à produção de baterias elétricas, cujo rápido desenvolvimento tecnológico torna resultados obtidos em estudos no início da década passada potencialmente obsoletos.

→| **Figura 3.5 – Distribuição cronológica dos artigos selecionados neste estudo**

(Número de artigos/ano)



Fonte: Elaboração própria.

Além da evolução das publicações ao longo dos anos, foi realizado um mapeamento das localidades que originaram tais es-

tudos. A **Figura 3.6** apresenta o escopo geográfico dos artigos selecionados.

→| **Figura 3.6 – Escopo geográfico dos artigos selecionados neste estudo**



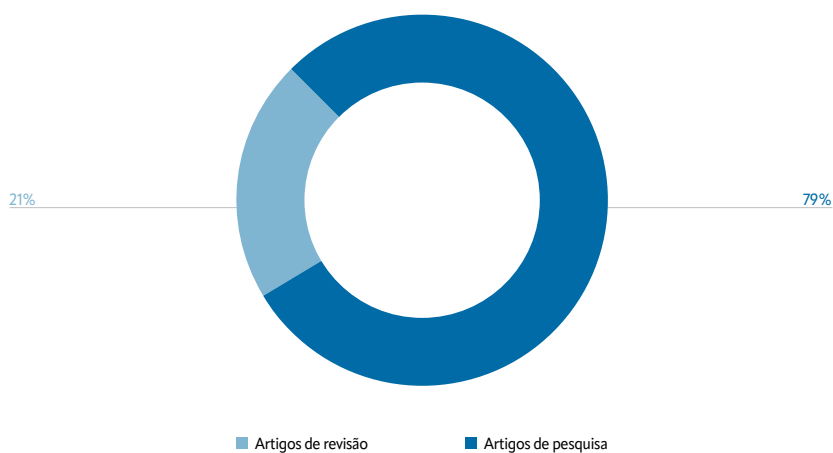
Fonte: Elaboração própria.

Dos 58 artigos de revisão considerados, a análise do escopo geográfico revelou uma distribuição diversificada. A China liderou com 14 artigos, destacando sua posição proeminente nas pesquisas sobre emissões de carbono associadas à veículos. A Europa também se destacou entre a produção no tema, com 23 artigos dedicados a examinar a pegada de carbono nessa região. Os Estados Unidos apareceram em terceiro lugar, com 11 artigos, seguidos pelo Brasil, com 4 artigos. Além desses, outros países e regiões figuraram em menor escala, como o Ja-

pão com dois estudos e, Austrália, Coreia do Sul, Kuwait e Nepal, cada um com 1 artigo. Essa distribuição geográfica sugere uma compreensão mais abrangente dos impactos ambientais relacionados aos veículos leves nos países de maior frota de veículos elétricos, como China, Europa e Estados Unidos.

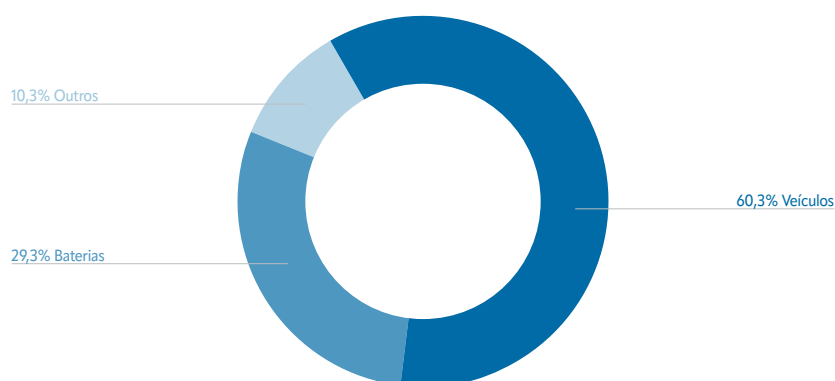
Dentre os artigos considerados, 21% são de revisão de literatura, conforme ilustra a **Figura 3.7**, e serviram de maneira complementar ao mapeamento do estado da arte.

→| **Figura 3.7 – Subdivisão dos artigos selecionados neste estudo**



Fonte: Elaboração própria.

→| **Figura 3.8 – Temática dos artigos selecionados neste estudo**



Fonte: Elaboração própria.

Conforme será relatado a seguir, o consumo energético para a produção dos materiais e montagem dos veículos é um grande contribuinte para a pegada de carbono dos veículos. Seus impactos variam, principalmente, com a localização geográfica e o mix de eletricidade, além das tecnolo-

gias e consumo energético para a produção dos materiais.

A **Tabela 3.2** apresenta um mapeamento da literatura avaliada que informa com detalhes o cenário de produção e o consumo de energia para a fabricação de diferentes veículos.

Tabela 3.2 – Cenários de produção e dados sobre consumo de energia na fabricação de veículos leves a partir da literatura

| Autores | Tecnologia de veículo/bateria | Cenário de produção e mix energético |
|--|-------------------------------|--|
| | | Veículos |
| (XIONG; JI; MA, 2019) | PHEV / BEV | China |
| (QIAO <i>et al.</i> , 2017) | ICEV / BEV | China |
| (YANG <i>et al.</i> , 2022) | ICEV / BEV | China |
| (JOSHI; SHARMA; BARAL, 2022) | ICEV / BEV | Coreia do sul (GREET) - Fator de emissão do mix de 588 g CO ₂ eq./kWh |
| (ONAT; KUCUKVAR; TATARI, 2015) | ICEV / HEV / PHEV / BEV | EUA (GREET) |
| (XIE, 2023) | ICEV | China |
| (SHAFIQUE <i>et al.</i> , 2022) | ICEV / PHEV / BEV | Não específica (dados do GREET, Ecoinvent e literatura) |
| (BAUER <i>et al.</i> , 2015) | HEV | Global (Ecoinvent 3.4) |
| (ELGOWAINY <i>et al.</i> , 2018) | ICEV / HEV / PHEV / BEV | EUA (GREET) |
| (GARCÍA <i>et al.</i> , 2020) | HEV | Não específica (dados do GREET) |
| (GAUTO <i>et al.</i> , 2023) | ICEV / HEV / PHEV / BEV | Europa |
| (HAO <i>et al.</i> , 2017) | ICEV | China e EUA (dados primários e GREET) |
| (HAWKINS <i>et al.</i> , 2013) | ICEV / BEV | Europa (GREET) |
| (HIRZ; NGUYEN, 2022) | ICEV / HEV / BEV | ICEV: Alemanha, HEV: Japão (veículo) e China (bateria), BEV: Alemanha (veículo) e China (bateria) |
| (TAGLIAFERRI <i>et al.</i> , 2016) | ICEV / HEV / PHEV / BEV | Não específica (manufatura do veículo e da bateria baseadas no Ecoinvent v.2.1 e dados da literatura, respectivamente) |
| (VELANDIA VARGAS <i>et al.</i> , 2019) | BEV | Brasil (adaptado do Ecoinvent) |

Tabela 3.2 – Cenários de produção e dados sobre consumo de energia na fabricação de veículos leves a partir da literatura

| Baterias | | |
|--|-----------|--|
| (CUSENZA <i>et al.</i> , 2019) | LMO – NMC | Japão |
| (LAI <i>et al.</i> , 2022) | - | China |
| (CHUL KIM; LEE; J. WALLINGTON, 2023) | NMC | EUA (GREET) - Fator de emissão do mix de 449 g CO ₂ eq./kWh |
| (CHEN; DING; LIU, 2019) | NMC | China |
| (PHILIPPOT <i>et al.</i> , 2019) | NCA | China, Alemanha, França, Coreia do Sul, Polônia, Suécia |
| (GUO <i>et al.</i> , 2023) | NIB e LFP | China |
| (LAVIGNE PHILIPPOT <i>et al.</i> , 2023) | NMC | Alemanha |

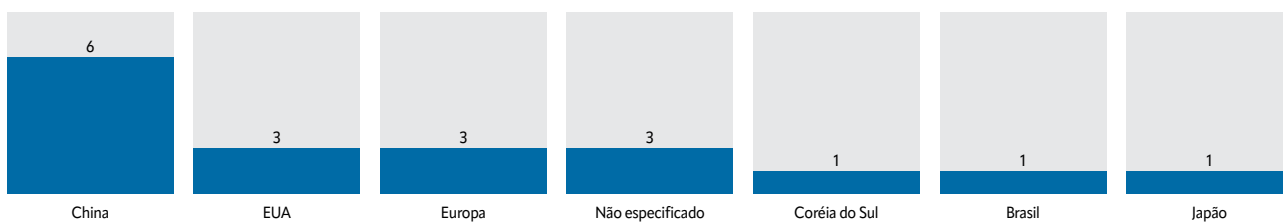
Nota: ICEV: veículo com motor de combustão interna; HEV: veículo elétrico híbrido; PHEV: veículo elétrico híbrido Plug-in; BEV: veículo elétrico a bateria; LFP: fosfato de ferro-lítio; LMO: óxido de manganês-lítio; LTO: titanato de lítio; NIB: bateria de íons de sódio; NMC: óxido de lítio-níquel-magnésio-cobalto; NCA: óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio.

Fonte: Elaboração própria.

Dos 58 artigos avaliados nessa revisão da literatura, 24 consideram cenários de produção e consumo de energia. A maior parte consi-

dera o cenário de produção de diferentes veículos leves na China, seguidos dos EUA e Europa, conforme expresso na [Figura 3.12](#).

→ **Figura 3.12 – Número de estudos por país que detalham o cenário de produção e fabricação de veículos leves**



Fonte: Elaboração própria.

Nas seções a seguir, as análises dos estudos dos temas de veículos e baterias serão aprofundadas.

3.2.2 Veículos

Dos 58 artigos analisados na revisão bibliográfica, 36 abordaram especificamente a ACV de veículos, representando 62% do total. Deste conjunto, 4 artigos realizaram revisões de literatura sobre o assunto, enquanto 32 desenvolveram pesquisas originais. Dentre os países que tiveram como foco o ciclo de vida dos veículos, a China se destacou em relação à PC de veículos elétricos, o que pode estar relacionado com a liderança do país nas vendas do setor.

A seguir, no item 3.2.2.1, é apresentada uma análise e discussão a respeito dos principais parâmetros e premissas adotados ao longo dos artigos considerados. A avaliação crítica dos parâmetros adotados por cada autor desempenha um papel crucial na compreensão do item 3.2.2.2. Resultados de emissões de GEE, uma vez que a influência desses parâ-

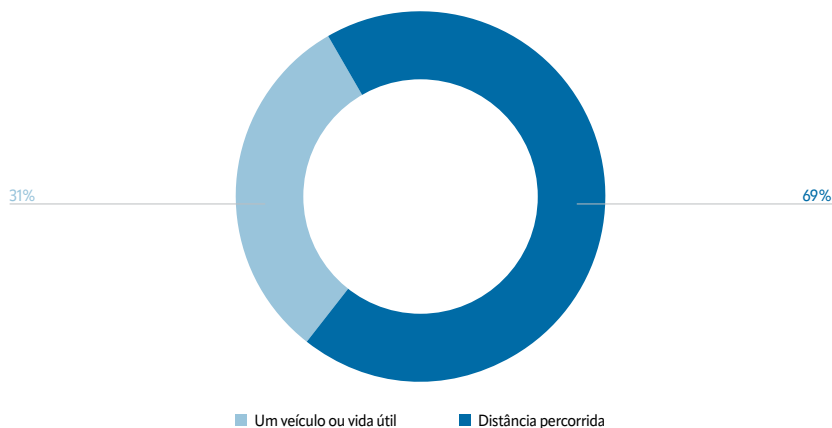
metros pode impactar diretamente os resultados obtidos.

3.2.2.1 Parâmetros da ACV

• Unidade funcional

A partir da análise da unidade funcional adotada pelos estudos, é possível classificá-los em dois grandes grupos relacionados à: distância percorrida ou um veículo ao longo de sua vida útil ([Figura 3.9](#)). Constatou-se que 15 dos 36 artigos dedicam-se exclusivamente à avaliação da pegada de carbono em veículos, e optaram por adotar 1 km como unidade funcional, representando cerca de 41,6 % dos estudos. Adicionalmente, outros 10 artigos também adotaram como unidade funcional a distância percorrida, porém considerando valores acima da unidade (1km), dos quais 4 estabeleceram a unidade funcional em 100 km dirigidos. Por fim, 9 artigos apresentaram as emissões totais referentes a vida útil completa do veículo, enquanto apenas dois artigos escolheram 1 veículo como unidade funcional, sendo que estes estudos consideraram a abordagem do Berço ao Portão.

→| **Figura 3.9 – Tipos de unidade funcional dos artigos selecionados neste estudo**

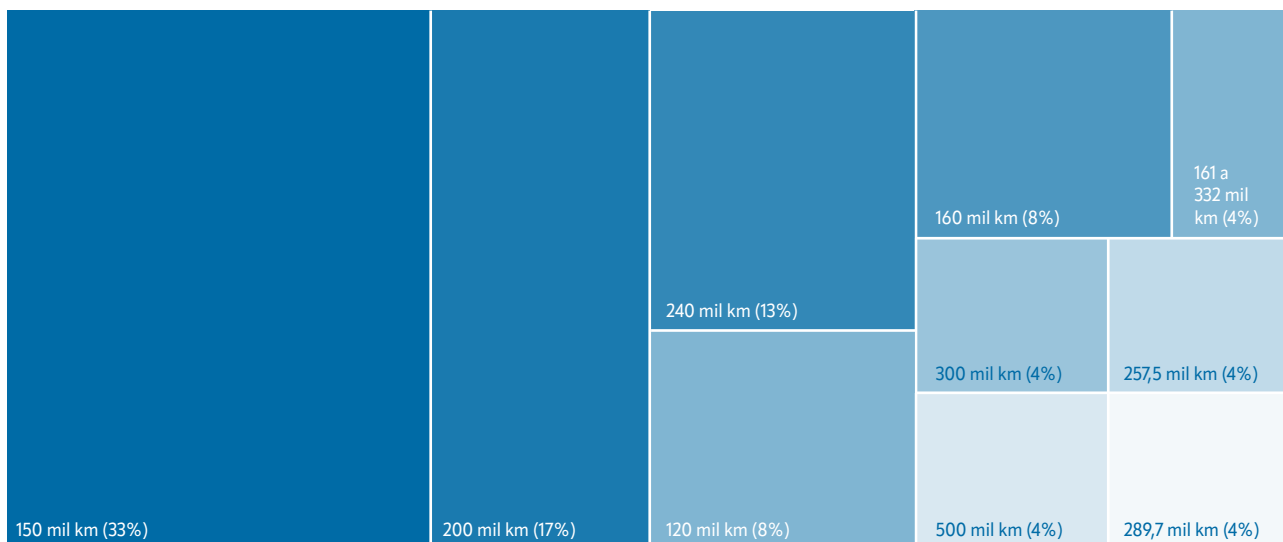


Fonte: Elaboração própria.

Entre as diferentes quilometragens de vida útil consideradas em cada artigo, observou-se pela **Figura 3.10** uma variação entre 120.000 km e 500.000 km, sendo que sete estudos adotaram o valor de 150.000 km como vida útil do

veículo estudado, enquanto quatro optaram pela marca de 200.000 km e três utilizaram 240.000 km. Outras distâncias foram consideradas com menor frequência entre os artigos selecionados.

→| **Figura 3.10 – Mapeamento de vida-útil considerada nos artigos encontrados**



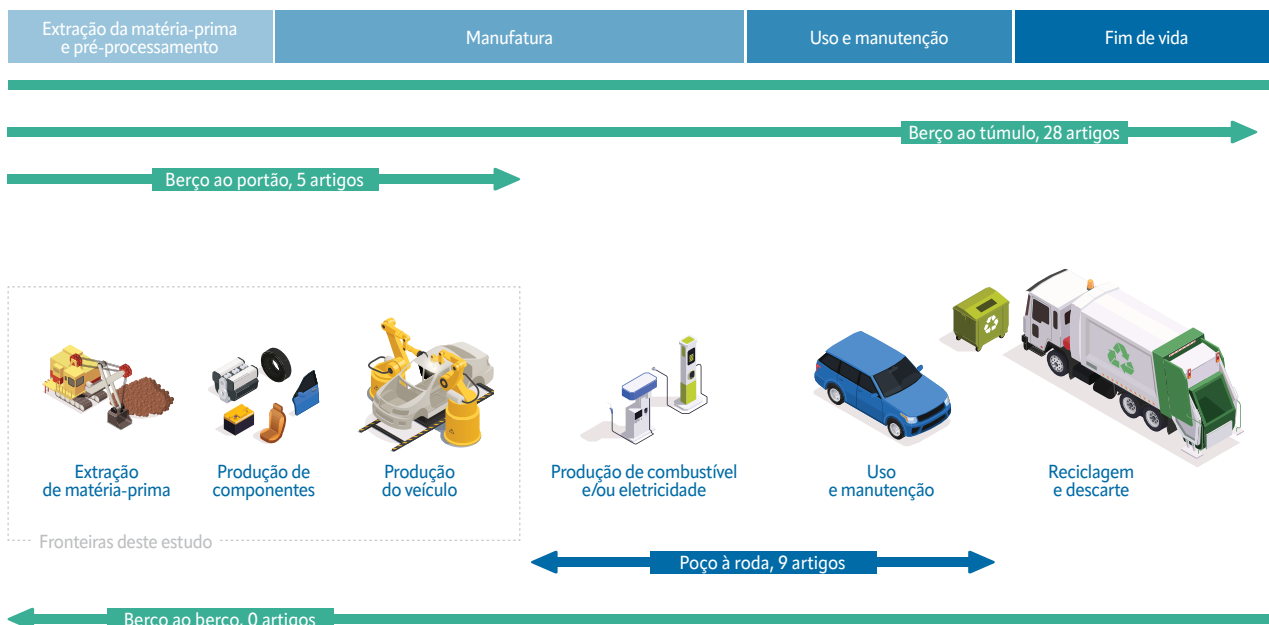
Fonte: Elaboração própria.

• **Fronteiras do sistema**

A análise das fronteiras adotadas pelos artigos selecionados revelou uma variedade de abordagens para a avaliação da pegada de carbono associada aos veículos. Foram identificados dois estudos que adotaram as fronteiras “do poço

à roda” ou em inglês, “*Well-to-Wheels*”, que considera as emissões de produção, transporte e consumo de combustíveis e eletricidade durante a operação do veículo, etapa que não faz parte do escopo deste estudo. A **Figura 3.11** ilustra as fronteiras do sistema do setor automobilístico.

→| **Figura 3.11 – Fronteiras consideradas nos estudos mapeados na revisão bibliográfica**



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

Um único estudo abordou a fronteira do Berço ao Uso (*Cradle-to-Use*), que engloba desde a extração de matéria-prima até a fase de utilização do veículo (ALRAMADHAN *et al.*, 2022), incluindo a produção de baterias, geração de eletricidade para carregamento e uso do veículo. Nesse artigo, a fase de disposição final das baterias foi excluída da análise, com a justificativa de que esta representa menos de 5% do impacto ambiental total e é considerada a menos significativa entre todas as fases do ciclo de vida. Ainda assim, ressalta-se que a reciclagem da bateria, apesar de ainda pouco compreendida, pode auxiliar na redução do impacto de outras etapas do ciclo de vida. No mais, além das emissões de CO₂eq. consideradas na pegada de carbono, outras categorias de impacto da ACV podem ser relevantes para a disposição final das baterias, como por exemplo a ecotoxicidade de água e solo, toxicidade humana, acidificação e eutrofização, devido ao descarte de materiais com metais pesados.

Dos 36 artigos focados na ACV de veículos, 77,8% (28 estudos) optaram pela abordagem do Berço ao Túmulo ou *Cradle-to-Grave*, que investiga o ciclo de vida completo dos veículos desde a extração de matéria-prima até o descarte. Estudos com essa fronteira destacam a predominância das emissões associadas à fase de uso em veículos à combustão, para os quais essa etapa se revela como a principal fonte de GEE. Por outro lado, apenas cinco estudos apresentaram como fronteira a abordagem do Berço ao Portão ou *Cradle-to-Gate*, o que aponta a escassez de estudos focando especificamente na manufatura de veículo e de seus componentes. Entre eles, três estudos são da China e os outros dois são dos Estados Unidos, ressaltando a ausência de estudos específicos para o contexto brasileiro.

Em síntese, a análise de escopo dentre os artigos desta revisão revela uma variedade de abordagens, com destaque para a predominância de fronteiras do Berço ao Túmulo. Apesar desse tipo de abordagem abranger, por definição, a etapa de produção do veículo, em geral, essa etapa é apresentada de forma menos detalhada. Poucos artigos tiveram como abordagem a fronteira do Berço ao Portão – foco do presente estudo – sendo identificada uma lacuna de conhecimento em relação à esta etapa do ciclo de vida de veículos leves, para a qual há escassez de dados primários e de informações aprofundadas sobre processos produtivos e cadeias de suprimento. Esta lacuna pode ser especialmente relevante para o Brasil, cujos setores extrativo e automotivo possuem forte representatividade na economia.

• Fonte de dados

A partir da revisão de literatura realizada, um dos pontos de atenção encontrado foi a falta de utilização de dados primários para composição dos inventários para a ACV. A maioria dos artigos encontrados utilizou a ferramenta GREET, seja para a caracterização dos veículos utilizados, obtenção de dados de manufatura e/ou composição de materiais ou para o cálculo das emissões de GEE no ciclo de vida de veículos. Outra fonte de dados citada foi a base de dados suíça Ecoinvent, amplamente utilizada em estudos de ACV. Entretanto, apesar dessa base de dados fornecer dados globais e específicos para diversos países, em alguns casos não existem processos para o contexto brasileiro. Assim, alguns estudos realizam ajustes para aprimorar a consistência da pesquisa, por exemplo: modificar processos de outros países para que se assemelhem ao país estudado, utilizar processos de países que tem o método de

produção similar e alterar apenas o mix de eletricidade e/ou, quando possível, utilizar dados primários que representem a realidade do país em questão.

3.2.2.2 Resultados de emissões de GEE

Dentre os 36 estudos com foco na ACV do veículo, 10 apresentaram resultados quantitativos de emissões de GEE para a etapa de produção, com alguns estudos trazendo apenas valores percentuais em gráficos. Ainda assim, a comparação

de resultados deve ser feita com cautela, visto que cada trabalho lista aspectos diferentes, como fronteiras do estudo, unidade funcional, escopo geográfico, escopo temporal, além de materiais e veículos de referência diferentes. Dessa forma, a **Tabela 3.3** sumariza os valores de emissões encontrados na literatura considerando a fronteira do Berço ao Portão. Os resultados foram uniformizados em t de CO₂eq./veículo. Para tanto, os artigos que apresentam valores em g de CO₂eq./km tiveram seus resultados multiplicados pela vida útil especificada.

Tabela 3.3 – Resultados de emissões de CO₂eq. em estudos de pegada de carbono em veículos para abordagem do Berço ao Portão

| Autores | Tipo de veículos | País | Resultados (t CO ₂ eq./veículo) | | | | Principais impactos |
|--|----------------------|-----------------|---|------------------------------|-------------------------------|--|--|
| | | | ICEV | HEV | PHEV | BEV | |
| (VELANDIA VARGAS <i>et al.</i> , 2019) | ICEV, BEV | Brasil | 8,3 | - | - | Brasil 13,7 Global 15,7 | peso dos veículos; produção de chassi e corpo. |
| (GAUTO <i>et al.</i> , 2023) | ICEV, HEV, PHEV, BEV | Europa e Brasil | gasolina 7,3; etanol 7,3; biometano 7,7 | etanol 7,2; biometano 7,6 | etanol 9,0; biometano 9,5 | Brasil 11,8; Europa 11,8 ⁴ | Para ICEV, HEV e PHEV: produção do veículo; Para BEV Brasil e Europa: produção da bateria. |
| (ELGOWAINY <i>et al.</i> , 2018) | ICEV, HEV, PHEV, BEV | EUA | 7,8 | aprox. 8,0 | aprox. 9,0 | 9,8 | produção do corpo e chassi do veículo |
| (HAWKINS <i>et al.</i> , 2013) | ICEV / BEV | Europa | 6,5 | - | - | 13,1 a 14,3 | Para ICEV: produção do corpo do veículo; para BEV: produção da bateria. |
| (SHAFIQUE <i>et al.</i> , 2022) | ICEV, PHEV e BEV | China | 6,3 | - | 8,2 | 10,6 | Para ICEV e PHEV: produção do corpo do veículo; para BEV: produção da bateria. |
| (ONAT; KUCUKVAR; TATARI, 2015) | ICEV, HEV, PHEV, BEV | EUA | 8,9 | 11 | PHEV18: 11,2; PHEV62: 13,2 | 13,7 | produção dos materiais e para BEV: produção da bateria. |
| (XIE, 2023) | ICEV | China | 8,3 | - | - | - | produção de aço e alumínio. |
| (JOSHI; SHARMA; BARAL, 2022) | ICEV, BEV | Nepal | 12 | - | - | 15,4 | ICEV: produção do corpo do veículo; BEV: produção da bateria |
| (PATTERSON <i>et al.</i> , 2012) | ICEV, HEV, BEV | Europa | 8,7 | 10,2 | - | 10,2 | Para ICEV, HEV: produção do corpo do veículo; Para BEV: produção da bateria |

⁴ **Nota:** Apesar do estudo apresentar a abordagem do Berço ao Túmulo, não houve distinção das emissões da produção do veículo (do Berço ao Portão), sendo considerado o mesmo inventário para os cenários no Brasil e Europa. As alterações realizadas se limitaram a fase de uso, com especiais considerações para a produção e consumo de eletricidade, visto que as matrizes energéticas do Brasil e Europa são divergentes para abastecerem os veículos do tipo BEV.

Tabela 3.3 – Resultados de emissões de CO₂eq. em estudos de pegada de carbono em veículos para abordagem do Berço ao Portão

| | | | | | | | |
|--------------------------|------------------|-------|------------|---|-------------|-------------|---|
| (YANG; WANG; JIAO, 2020) | ICEV, PHEV e BEV | China | 9,3 - 11,6 | - | 11,1 - 13,5 | 12,2 - 15,5 | Para manufatura: BEV e PHEV: produção de aço e alumínio, e produção de baterias |
|--------------------------|------------------|-------|------------|---|-------------|-------------|---|

Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

Fonte: Elaboração própria.

A partir da tabela acima, é possível tecer considerações a respeito das emissões de GEE do Berço ao Portão associadas a diferentes tipos de veículos. No estudo de Velandia Vargas *et al.* (2019) no Brasil, a análise destaca os impactos significativos da produção de chassi e corpo, que influenciam diretamente as emissões de CO₂eq. Já Gauto *et al.* (2023) aborda cenários na Europa e Brasil, identificando as etapas de produção e reciclagem do veículo como centrais na pegada de carbono, com destaque para a produção da bateria em BEV.

Outros estudos, como o de Hawkins *et al.* (2013) na Europa, destacam a produção do corpo do veículo como a mais intensa em carbono, enquanto Shafique *et al.* (2022), na China, também aponta para a produção da bateria como um dos principais fatores de emissão para o ciclo de vida completo do BEV. Outros estudos em localidades diversas também sugerem grande influência para os mesmos processos, como Joshi *et al.* (2022) no Nepal, que destaca o corpo do veículo como o principal contribuinte de impacto, exceto para veículos elétricos, nos quais a bateria assume essa posição, levando em consideração as fronteiras do Berço ao Portão.

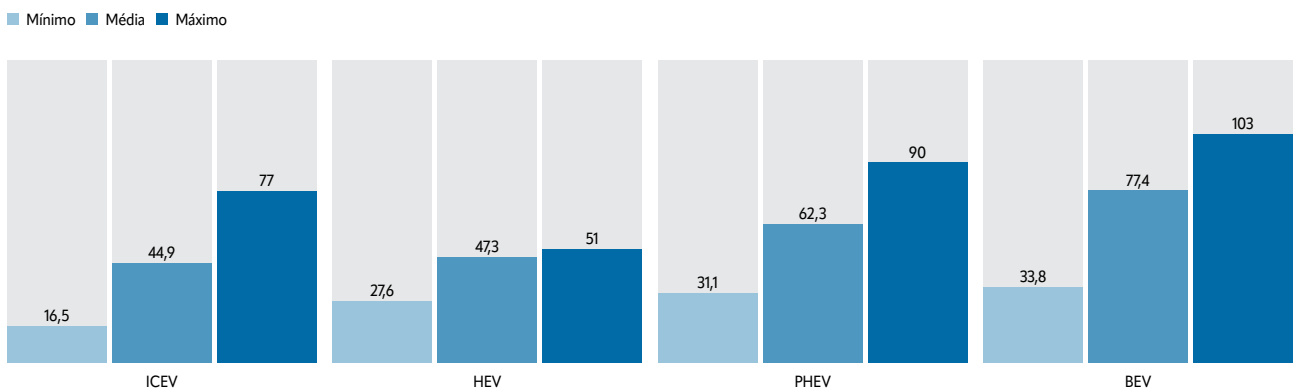
O mapeamento da pegada de carbono evidenciou, ainda, di-

ferenças conforme a tecnologia de propulsão, principalmente em relação à fronteira adotada. Quando considerada a fronteira do Berço ao Túmulo, BEV podem ter emissões inferiores em comparação com ICEV principalmente na fase de uso e em combinação com uma matriz elétrica mais renovável. No entanto, é importante notar que, quando consideradas as emissões somente até a manufatura dos veículos (fronteira do Berço ao Portão), a fabricação das baterias para BEV responde por uma parcela significativa das emissões totais, de forma que as emissões de veículos exclusivamente à bateria podem resultar em emissões superiores aos de veículos ICEV, conforme apresentado na **Figura 3.13**.

Dessa forma, ressalta-se que uma parcela importante das emissões de veículos BEV se concentra no recorte do Berço ao Portão, até a etapa de manufatura. Entretanto, a abordagem do Berço ao Túmulo, predominante na maioria dos estudos avaliados, mostra-se importante para proporcionar uma visão mais completa das emissões de GEE, sendo possível determinar, por exemplo, qual a quilometragem mínima necessária que os veículos eletrificados precisam atingir para que tenham vantagens em relação aos veículos ICEV (ponto de *break-even*⁵).

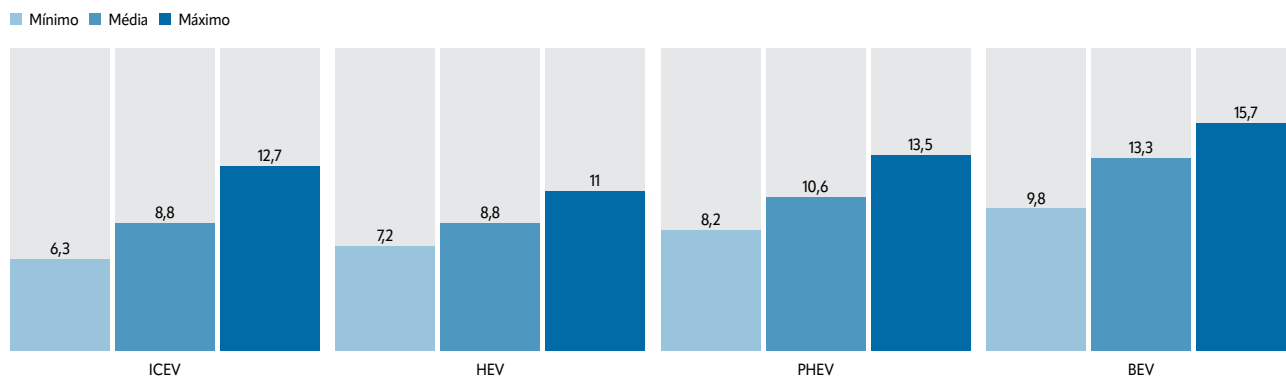
→ **Figura 3.13 – Mapeamento de valores de pegada de carbono de veículos leves do Berço ao Portão, considerando duas unidades funcionais distintas: a) um veículo e b) distância percorrida.**

a) Mapeamento de valores de pegada de carbono de veículos leves, do berço ao portão
Pegada de carbono (g CO₂eq./km)



⁵ Ponto de *break-even*: quilometragem na qual as emissões do ciclo de vida de veículos BEV e ICEV se igualam, de forma que quanto maior for a disparidade de emissões na fase de manufatura dos veículos, maior tende a ser a quilometragem para atingir o ponto de *break-even*.

b) Mapeamento de valores de pegada de carbono de veículos leves, do berço ao portão
Pegada de carbono (t CO₂eq./veículo)



Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria. Os resultados foram uniformizados em a) t de CO₂eq./veículo ou b) g de CO₂eq./km considerando a vida útil especificada nos artigos avaliados.

Fonte: Elaboração própria.

A análise detalhada dos resultados para a etapa de manufatura dos veículos revelou que determinados fatores podem exercer influência significativa nos valores de pegada de carbono obtidos. Estudos conduzidos na China, por exemplo, se destacam por emissões de GEE mais elevadas em comparação com outros países, o que resulta principalmente da matriz energética adotada para a etapa de produção, reconhecidamente intensa em carbono por conta principalmente da elevada participação de carvão no mix. Além disso, considerações a respeito da vida útil do veículo, relacionadas à unidade funcional segundo discussões anteriores, também é um dos fatores impactando os resultados. Como exemplo, o valor mínimo que aparece na **Figura 3.13** para ICEV, 16,5 g CO₂eq./km, decorre da elevada vida útil considerada pelo autor, fixada em 500.000 km, superior à média de 150.000 km adotada pela maioria dos pesquisadores. Tal disparidade pode ser notada também em outros valores do item a) da **Figura 3.13**, na qual todos os valores são referentes à vida útil que cada autor considerou para o respectivo veículo. Isso ressalta a importância em se uniformizar critérios para o cálculo da pegada de carbono, de forma a garantir comparações mais precisas e representativas no contexto da ACV.

Por fim, observa-se que a manufatura de veículos, incluindo a produção de materiais e baterias, é um componente crítico nas emissões de GEE. A variabilidade nos resultados destaca a complexidade das análises, sendo essencial considerar os contextos específicos de cada estudo para uma melhor compreensão. Muitos estudos destacam que a produção e reciclagem dos veículos são estágios críticos nas emissões totais. A fabricação de materiais, especialmente aço e alumínio, bem como a produção das baterias, pode ser um fator preponderante. Por esse motivo, estratégias que visam a redução de emissões nessas fases podem ter um impacto significativo na pegada de carbono dos veículos.

• Contribuição de impacto por componentes do veículo

Dentre os 36 estudos focados especificamente na pegada de carbono de veículos, 17 apresentaram resultados detalhando a contribuição de impacto por componente. Alguns artigos trouxeram subdivisões mais extensas de componentes, enquanto outros diferenciaram os resultados apenas em partes, como, por exemplo, veículo e bateria ou veículo e *powertrain*.

O estudo de Velandia Vargas *et al.* (2019), por exemplo, apresentou a contribuição de impacto de um veículo elétrico subdividido para o cenário de 2030 em: bateria, chassi e corpo, manutenção e eletricidade. Essas subdivisões foram contabilizadas para dois cenários de redução de massa, uma utilizando maior percentual de plástico e outra com maior percentual de alumínio. Para ambos os cenários, o maior potencial de impacto ambiental foi referente ao processo de produção do chassi e corpo do veículo, seguidos pelo consumo de eletricidade, produção de bateria e por fim manutenção. Por outro lado, Hirz e Nguyen (2022) destacam a contribuição de impacto por componentes para os veículos leves dos tipos ICEV, HEV e BEV. De acordo com os autores, para os modelos ICEV e HEV, os componentes que mais contribuem para o potencial impacto ambiental são a produção do sistema de *powertrain* e do corpo do veículo, com percentuais entre 35-65% e 28-52%, respectivamente. Já para o modelo BEV, somente o sistema de bateria tem a contribuição de impacto entre 30-60%.

Em outra abordagem, Hao *et al.* (2017) classificaram emissões de GEE a partir de três categorias distintas: componentes originais, componentes consumíveis e montagem. Os componentes originais abrangem peças fabricadas com aço, alumínio e outros materiais, enquanto os componentes consumíveis englobam freios, fluidos e baterias. De acordo com os autores, ao dividir as emissões totais provenientes da produção de veículos na China

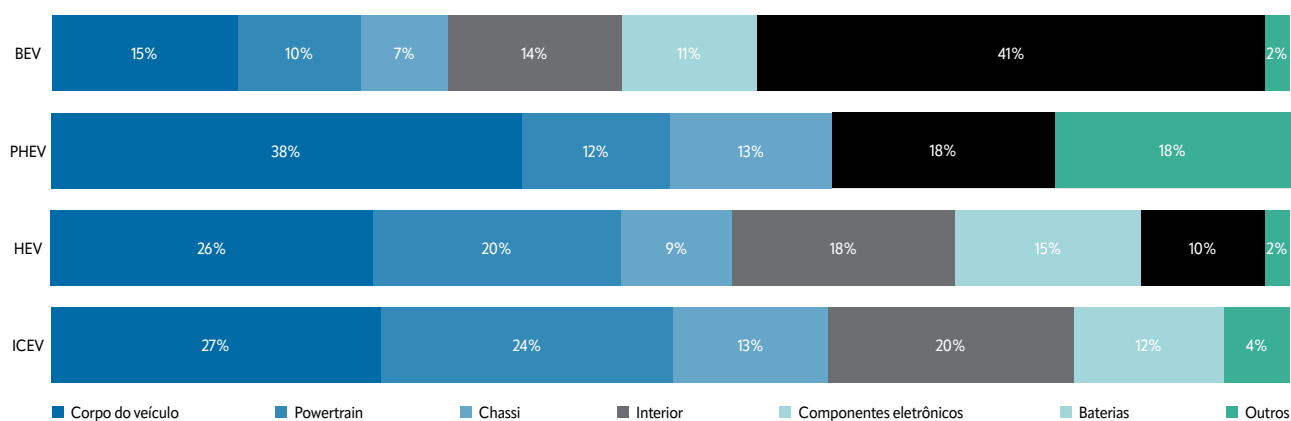
e nos Estados Unidos, constatou-se que os componentes originais são responsáveis por aproximadamente 75% do total de emissões, ao passo que os componentes consumíveis e a montagem contribuem com cerca de 14% cada.

O estudo de QIAO *et al.* (2017) traz uma subdivisão detalhada de componentes, incluindo corpo do veículo, chassi, sistema de *powertrain*, sistema de transmissão, motor de tração, controle eletrônico, bateria de chumbo-ácido, bateria de lítio-íon, fluidos, freios e montagem. Os autores incluem em seu estudo os modelos ICEV e BEV, com duas opções de bateria: NMC (níquel manganês cobalto) e LFP (fosfato de ferro-lítio) e escopo geográfico na China. Para o veículo ICEV, o estudo destaca que por volta de 45,3% das emissões de CO₂eq. para a produção do veículo são referentes a produção do corpo do veículo e chassi.

Para os veículos elétricos estudados, o corpo do veículo e chassi representam aproximadamente 47,5% do total de emissões. Com relação a produção das baterias, o modelo NMC representou cerca de 19,3% e o modelo LFP representou cerca de 20,2% das emissões totais.

Com base na análise de conteúdo conduzida, foi feito um mapeamento da contribuição de impacto média dos componentes de veículos leves em relação à pegada de carbono, apresentado na **Figura 3.14**. A partir dos resultados, é possível observar que a contribuição de impacto da bateria é significativamente maior para os veículos BEV em comparação com outros tipos de veículos eletrificados. Isso se dá em função desse tipo de veículo depender exclusivamente desses dispositivos para sua propulsão, resultando em tamanhos de bateria consideravelmente maiores.

→| **Figura 3.14 – Contribuição de impacto média dos componentes dos veículos leves mapeados**



Nota: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

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

O corpo do veículo tem maior contribuição em modelos à combustão e híbridos, enquanto para exclusivamente elétricos, a maior proporção do impacto advém do sistema de baterias, que responde em média por 41% dos impactos. Observa-se que, para todos os tipos de veículos, o *powertrain* tem uma contribuição significativa, sendo este sistema proporcionalmente mais impactante em ICEV, principalmente devido ao seu sistema de propulsão ser exclusivamente à combustão, seguido por HEV, PHEV e BEV.

Considerando as análises dos diversos estudos sobre a pegada de carbono em veículos, é possível extrair conclusões significativas sobre a contribuição dos diferentes componentes para esse impacto ambiental. Em veículos ICEV e HEV, observa-se que o corpo do veículo e o sistema de *powertrain* desempenham pa-

péis proeminentes, respondendo por uma parte considerável das emissões totais. Por outro lado, nos veículos totalmente elétricos, a bateria se destaca como o principal contribuinte, representando em média cerca de 41% das emissões. É importante ressaltar que o *powertrain* também possui uma contribuição significativa em todos os tipos de veículos, sendo mais expressivo nos ICEV devido à sua dependência exclusiva da combustão. Esses achados fornecem uma compreensão relevante para estratégias de mitigação de emissões ao longo do ciclo de vida dos veículos, destacando áreas-chave para foco e melhoria na busca por soluções mais sustentáveis na indústria automotiva.

• Contribuição de impacto por materiais

Dentre os estudos analisados que tratam de emissões do Berçao ao Portão, alguns destacam a contribuição de impacto seg-

mentada por material utilizado na etapa de manufatura de veículos leves. Essa subdivisão é importante para a avaliação dos elementos com maior potencial de impacto ambiental no ciclo de produção dos veículos. A interpretação desses resultados possibilita a identificação de áreas passíveis de aprimoramento nos processos produtivos, métodos de extração e entendimento do potencial de incorporação de materiais recicláveis.

O estudo de Hirz e Nguyen (2022) destaca a contribuição de impacto por materiais para os veículos leves dos tipos ICEV, HEV e BEV. Para o ICEV e o HEV, os materiais com maior contribuição de impacto são aço e depois alumínio, enquanto para o BEV, as células de baterias e elétricos e eletrônicos são os maiores contribuintes. Para o ICEV, o aço contribui com 35 - 50% e o alumínio de 15 - 25 %, seguidos por eletrônicos com 10-20% e os polímeros com 10-15%. Já para o modelo HEV, o aço contribuiu com 33-48%, o alumínio com 13-25%, componentes elétricos e eletrônicos com 10-20% e os polímeros com 9-15%. Enquanto isso, para o modelo BEV, a contribuição das células de baterias está entre 20-30%, os componentes elétricos e eletrônicos entre 20-25%, o aço entre 17-25%, o alumínio com 18-18% e os polímeros entre 5-8%.

A revisão de literatura mostrou que, principalmente para os veículos ICEV, os materiais que mais contribuem para o impacto ambiental são o aço e o alumínio. O estudo de HAO et al. (2017), por exemplo, analisou as emissões na fase de produção para o modelo ICEV, destacando que para a China e os Estados Unidos, o aço contribui com 67% e 72% do impacto, en-

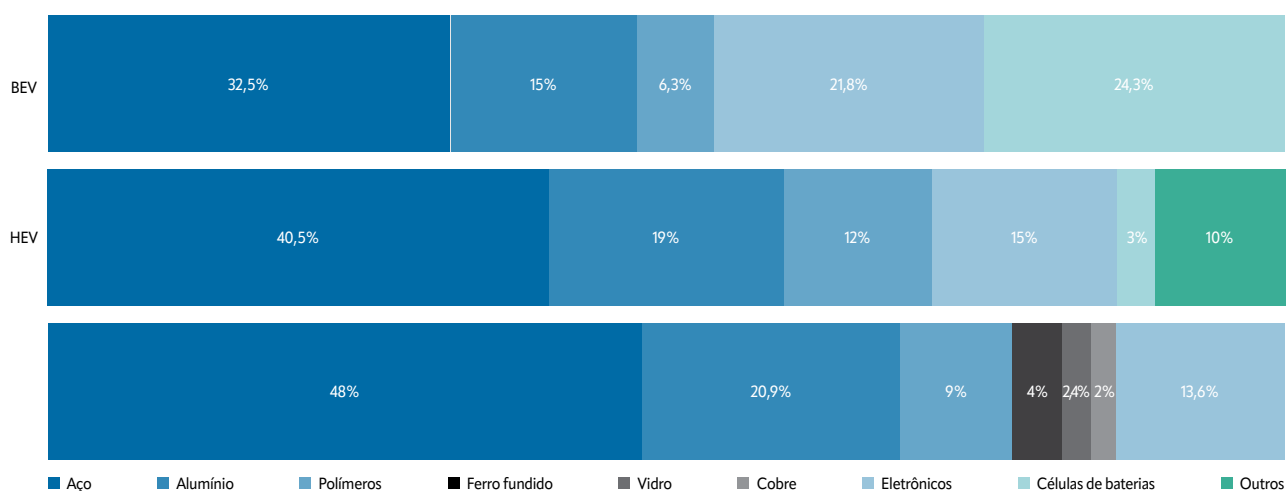
quanto o alumínio contribui com 21% e 10%, respectivamente.

Qiao *et al.* (2017) investigaram as emissões de GEE decorrentes da fabricação de veículos na China, concentrando-se especificamente nos modelos ICEV e BEV, considerando baterias do tipo NMC e LFP. Os pesquisadores realizaram uma análise detalhada da contribuição dos diferentes materiais, destacando que o aço e o material ativo das baterias são os principais responsáveis pelos impactos ambientais, com o aço representando 50,6% das emissões associadas ao ICEV, 46,3% para o BEV - NMC e 45,8% para o BEV - LFP. Quanto ao material ativo das baterias estudadas, sua contribuição foi identificada em 12,4% das emissões totais para o modelo com bateria NMC e 10,8% para o modelo com bateria LFP.

Outro estudo, sobre as emissões associadas ao ciclo de vida de veículos na China foi conduzido por Xie (2023), que calculou a pegada de carbono das etapas de produção e manutenção de um veículo do tipo ICEV, explorando a contribuição dos diferentes materiais ao longo desse ciclo. Os resultados revelaram que o alumínio desempenhou um papel preponderante, contribuindo com expressivos 47,3% das emissões totais. O aço apareceu como segundo maior contribuinte, respondendo por 45,6% das emissões. Outros materiais mencionados no estudo incluíram ferro fundido e cobre, que contribuíram com 4,74% e 2,33% das emissões, respectivamente.

Com base nesses resultados, a **Figura 3.15** apresenta a contribuição de impacto média dos materiais para os veículos leves.

→| **Figura 3.15 – Contribuição de impacto média dos materiais para os veículos leves**



Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

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

Considerando as análises dos estudos sobre a contribuição de impacto dos materiais na fabricação de veículos leves, fica evidente a importância dessa segmentação para compreender os elementos com maior potencial de impacto ambiental ao longo do ciclo de produção. Essa abordagem permite não apenas identificar áreas passíveis de aprimoramento nos processos produtivos, mas também compreender melhor o potencial de incorporação de materiais recicláveis. Os estudos examinados destacam que, especialmente para veículos com motores de combustão interna, os materiais que mais contribuem para o impacto ambiental são o aço e o alumínio. Além disso, é importante notar que os materiais que compõem as células de bateria também têm contribuições significativas, respondendo em média por cerca de 25% do impacto ambiental total nos veículos elétricos a bateria.

No entanto, é importante ressaltar que a escassez de estudos que realizam a separação da contribuição de impacto por materiais limita nossa capacidade de realizar uma análise mais aprofundada neste momento. Outro aspecto a ser considerado é que uma quantificação realista das emissões de veículos na sua fase de produção está diretamente atrelada às cadeias de fornecimento de materiais e energia, assim como às tecnologias de manufatura do país ou localização geográfica do estudo. Nota-se que mesmo estudos brasileiros, utilizam processos produtivos internacionais em seus inventários, o que

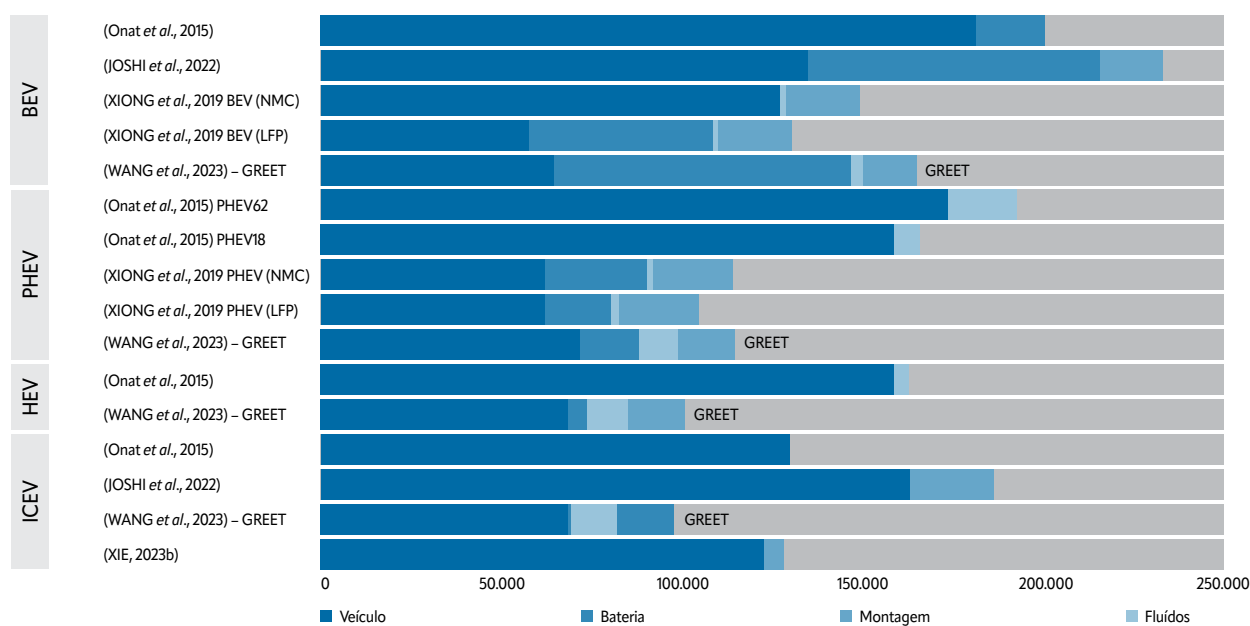
pode não refletir a realidade brasileira. Esta lacuna pode ser preenchida com o avanço do projeto em curso e o eventual cálculo da pegada de carbono de veículos leves representativos no contexto brasileiro. À medida que mais pesquisas são conduzidas e dados primários são coletados, torna-se possível uma compreensão mais abrangente e detalhada do impacto ambiental dos diferentes materiais ao longo do ciclo de vida dos veículos. Esse progresso contribuirá significativamente para a identificação de áreas prioritárias para intervenções e melhorias na indústria automotiva, visando reduzir sua pegada de carbono e promover práticas mais sustentáveis.

• Consumo de energia e emissões de GEE

Conforme discutido anteriormente, o consumo de energia nas diferentes etapas do ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas até a montagem, é um componente importante para a determinação da pegada de carbono dos veículos e dos seus componentes.

De modo geral, é possível agregar o consumo de energia e as emissões de GEE da fabricação do veículo em relação à etapa fabricação em quatro fases: produção de componentes (sem a bateria); produção da bateria; produção de fluídos; e etapa de montagem. A [Figura 3.16](#) apresenta o perfil de consumo de energia para quatro fases, obtido a partir de diferentes estudos da literatura.

→| **Figura 3.16 – Composição do consumo de energia por etapa da fabricação de veículos leves**



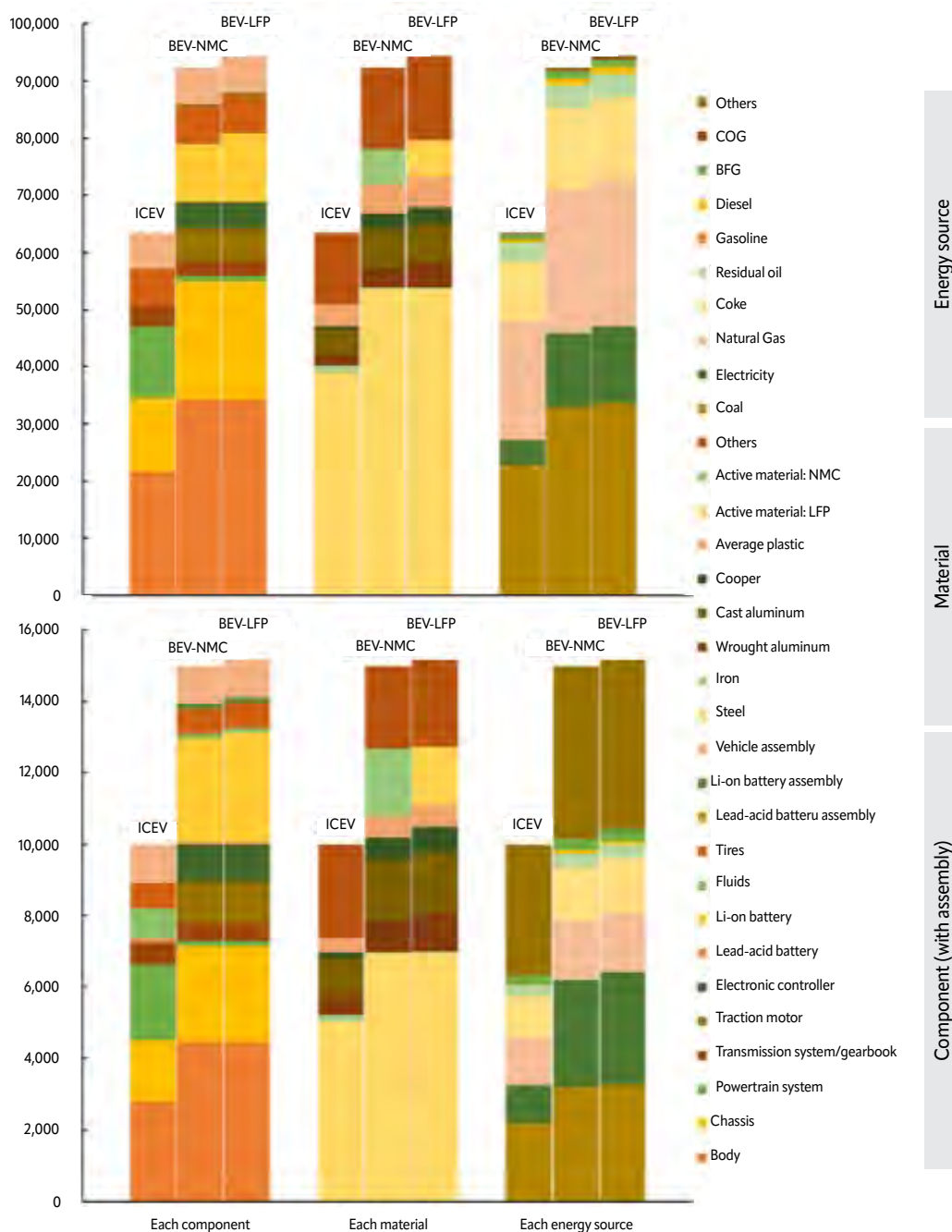
Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria. Xie (2023) não segrega o consumo de energia na etapa da fabricação da bateria e dos fluídos; Wang et al.(2023) considera também na etapa da montagem o consumo de energia da pintura, disposição final do veículo e reciclagem; Onat et al. (2015) não apresenta o consumo de energia segregado para etapa de fabricação de fluídos e montagem; Joshi et al. (2022) não apresenta consumo de energia dos fluídos.

Fonte: Adaptado de Joshi, Sharma e Baral (2022); Onat, Kucukvar e Tatari (2015); Wang et al. (2023); Xie (2023) e Xiong, Ji e Ma (2019).

Foi possível perceber por meio dos estudos que grande parte do consumo de energia do Berço ao Portão é atribuído à fabricação dos componentes do veículo, seguidos da fabricação da bateria para o caso dos BEV, bem como da etapa de montagem. A **Figura 3.17** apresenta a análise de contribuição por

fonte de energia, material e componente para o consumo de energia e emissões de GEE da fabricação de ICEV e BEV na China do estudo de Qiao *et al.* (2017), que apontam a fabricação da carroceria e do chassi como maiores contribuintes para o consumo total de energia e emissões de GEE.

→| **Figura 3.17 – Consumo total de energia e emissões de GEE de veículos leves na China**



Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; BEV-NMC: Veículos Elétricos a Bateria de níquel manganês cobalto. BEV-LFP: Veículos Elétricos a Bateria de fosfato de ferro-lítio.

Fonte: Qiao *et al.* (2017).

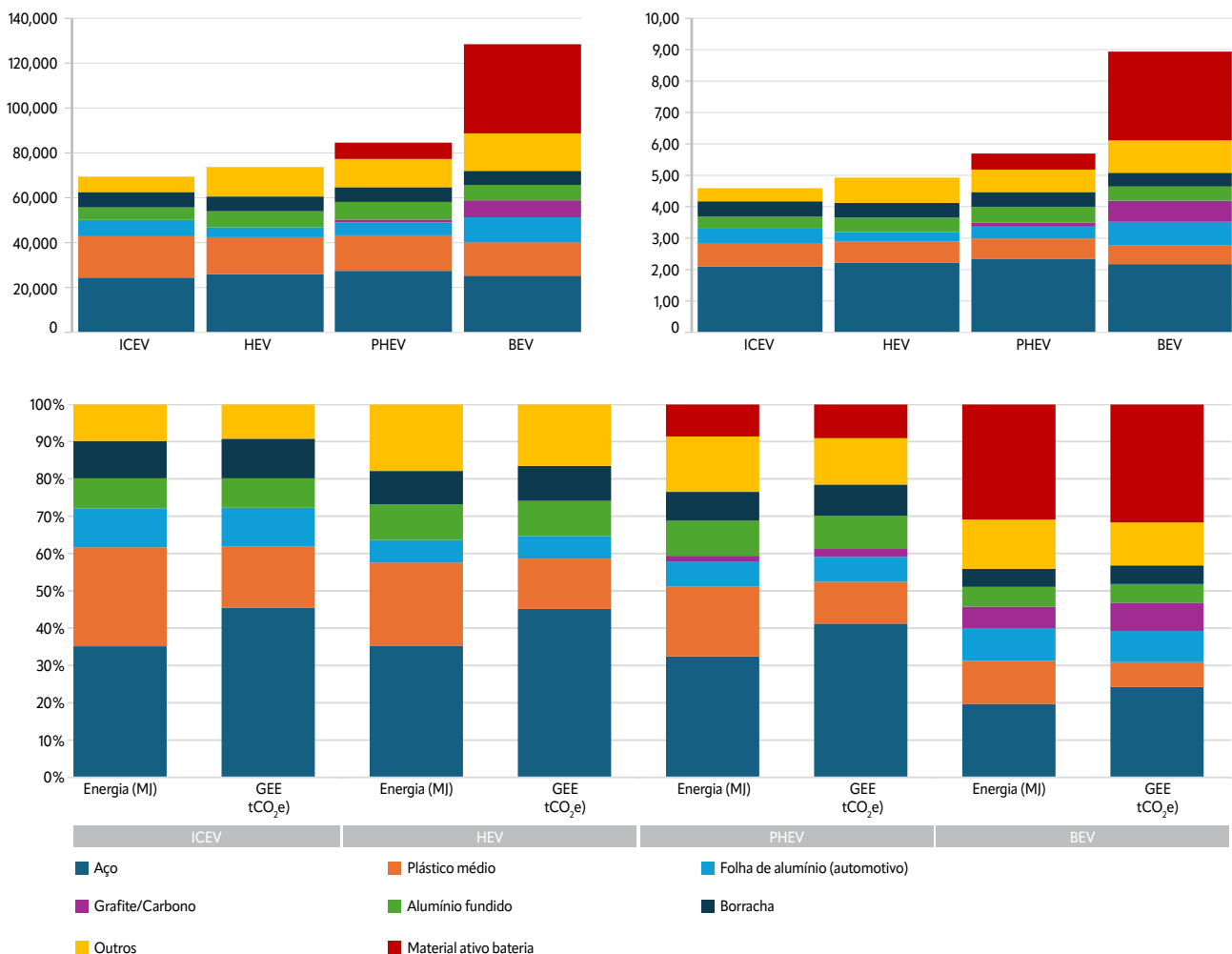
Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Joshi, Sharma e Baral (2022) em que 67% do consumo total de energia para fabricação do ICEV foi atribuído à fabricação da carroceria (57% das emissões de GEE) e 12% do consumo à fabricação do chassi. No caso do BEV, 44% do consumo total de energia foi atribuído à fabricação da carroceria (36% das emissões de GEE) e 35% à fabricação da bateria (37% das emissões de GEE).

Do ponto de vista dos materiais, o estudo de Qiao *et al.* (2017) destaca que o aço foi responsável por cerca de 60% do consumo total de energia da fabricação do ICEV e cerca de 50% das emissões de GEE devido às grandes quantidades de carvão e coque utilizados nas rotas de produção na China. No caso do BEV, o aço, o alumínio e os materiais ativos da bateria representaram cerca de 60%, 10% e 7% do consumo total de energia e 50%, 17% e 11% do total das emissões de GEE, respectivamente. A matriz energética considerada no estudo teve

predominância de combustíveis fósseis como carvão, coque, eletricidade e gás natural (QIAO *et al.*, 2017). De forma similar, Xie (2023) apontou em seu estudo que o aço contribuiu com cerca de 43% do consumo de energia da fabricação do ICEV, seguidos do alumínio (33%), borracha (9%), plástico (7%), ferro fundido (4%), cobre (2%) e vidro (1%).

A ferramenta GREET (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2023) é amplamente utilizada na literatura para estimar as emissões do ciclo de vida da fabricação dos veículos e permite estratificar o consumo de energia e as emissões de GEE por diferentes materiais. A **Figura 3.18** apresenta o resultado padrão obtido a partir da ferramenta referente ao consumo de energia e emissões de GEE por tipo de material, considerando somente a etapa de produção dos componentes e baterias para veículos convencionais de passageiros. Cabe destacar que a ferramenta GREET possui inventários voltados para o cenário dos Estados Unidos.

→ **Figura 3.18 – Contribuição dos materiais para consumo de energia e emissões de GEE utilizados para a fabricação dos veículos e da bateria**



Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria. Não foram consideradas as etapas de montagem do veículo e da bateria e fabricação dos fluidos).

Fonte: Elaboração própria com dados obtidos da ferramenta GREET 2023 para veículos leves (WANG *et al.*, 2023).

Assim como apontado pelos demais estudos revisados, o aço foi um dos principais materiais que contribuíram para o consumo de energia e emissões de GEE no ciclo de vida dos veículos. Os materiais plásticos, alumínio e borracha também se destacaram. Para o BEV, a fabricação dos materiais ativos da bateria teve predominância no consumo de energia e emissões de GEE. Os resultados evidenciam a importância de se investigar não só a etapa de montagem dos veículos, como também a cadeia de produção dos materiais e se estes podem ou não ser produzidos no contexto brasileiro, considerando o contexto de uma matriz energética mais renovável em relação aos demais países. A baixa contribuição relativa do alumínio em relação à maioria dos estudos da literatura justifica-se pois no inventário extraído do GREET, foi considerado um fator de emissão médio para o alumínio, composto tanto pelo metal virgem quanto pelo reciclado. Este fator de emissão é aproximadamente três vezes menor do que o fator do alumínio virgem, e assim os resultados mostram uma contribuição relativa menor deste metal em relação a estudos que consideram apenas o alumínio virgem.

Elgowainy *et al.* (2018) ao avaliar as emissões da fabricação de ICEV, BEV e PHEV nos Estados Unidos mostraram que as emissões podem cair de 8-12 t CO₂eq. para 6-9 t CO₂eq. em função da redução da intensidade de carbono da eletricidade no país. Hao *et al.* (2017), por sua vez, avaliaram as emissões da fabricação de um ICEV na China e nos EUA. Os autores concluíram que as emissões da produção na China foram 54% superiores, especialmente por conta do mix energético, de forma que 39% dos impactos da produção dos materiais foram atribuídos ao consumo de eletricidade, 29% carvão, 15% coque e 11% gás natural.

Dos estudos avaliados, apenas Velandia Vargas *et al.* (2019) compararam as emissões da produção de BEV no Brasil com a média global (mix global da base de dados Ecoinvent). O estudo indicou uma emissão 13% menor da produção de BEV no Brasil, não apresentando, no entanto, as possíveis contribuições do mix energético para esta redução. O estudo de Gauto *et al.* (2023), por sua vez, também buscou avaliar o cenário de emissões do ciclo de vida de veículos leves no Brasil, no entanto, considerou inventários europeus para calcular as emissões da etapa de fabricação, tendo em vista a falta de dados e informações nacionais.

Dada a importância da energia para a determinação das emissões, a fabricação de veículos leves no Brasil pode apresentar um menor patamar de emissões de GEE em relação aos pares internacionais. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética, a participação da oferta de energias renováveis na matriz energética brasileira foi de 47,4% em 2022, enquanto em 2020 a média mundial foi de 14,1% (EPE, 2023). Cabe destacar, no entanto, que a cadeia de produção dos veículos envolve a fabricação de diferentes componentes e materiais que não

necessariamente podem ser produzidos no país, sendo importante considerar as possibilidades de nacionalização para o estudo de ciclo de vida da produção de veículos no Brasil.

▲ 3.2.3 Baterias

Nesta seção são apresentados os resultados da revisão de literatura sobre ACV e pegada de carbono para baterias de íon-lítio aplicadas no contexto de veículos elétricos. O objetivo do conteúdo apresentado é compor um quadro conceitual e técnico a respeito das etapas que envolvem a produção de baterias, discutindo os principais parâmetros e premissas adotados em aplicações de ACV, além de trazer um panorama de estimativas de emissões de GEE associadas aos processos considerados. Dos 58 artigos selecionados para compor o estado da arte, 17 foram classificados como voltados especificamente para ACV de baterias, sendo sete destes artigos de revisão.

Dentre os dez artigos trazendo estudos de pegada de carbono de bateria no contexto do setor automobilístico, dois artigos tinham como objeto a análise de protótipos de baterias, de forma que, apesar das contribuições em termos mais gerais, esses artigos não foram considerados para a compilação de dados e análise de parâmetros de aplicação da ACV. Por outro lado, um estudo com foco em veículo à bateria se destacou por seu detalhamento na fase de produção das baterias, sendo este incluído no escopo desta seção. Dentre os estudos selecionados, dois são do ano de 2019, quatro de 2022 e três de 2023, com predominância geográfica da China, responsável por cinco dos nove artigos considerados, o que reflete a influência do país tanto no mercado de veículos elétricos, quanto na produção de conhecimento sobre o tema.

Dado que em estudos de ACV de baterias, em geral, não especificam o tipo de veículo para o qual o produto analisado será destinado, focando mais em especificações como peso e capacidade, na presente seção, não serão feitas distinções entre veículos elétricos, como BEV e PHEV.

▲ 3.2.3.1 Parâmetros da ACV

Na sequência são discutidos os principais parâmetros e premissas relevantes para a aplicação da ACV de baterias de íon-lítio. A opção por priorizar a análise de estudos voltados apenas para baterias, em contraposição com artigos que consideram a cadeia completa de veículos elétricos, se justifica pelo escopo do presente trabalho estar direcionado às etapas de produção de materiais e manufatura de automóveis, sendo necessário dados precisos dos processos envolvidos nessa fase do ciclo de vida de seus componentes. Além disso, a diversidade de tecnologias em termos de material ativo, complexidade produtiva e participação das baterias em termos do total de emissões da

fase de produção, fundamentam o enfoque dado que este seria o principal sistema compondo veículos elétricos.

• Fronteiras do sistema

Dentre os artigos considerados que têm como foco específico a ACV de baterias de íon-lítio, três estudos definiram como fronteira uma abordagem do Berço ao Túmulo, considerando as etapas de produção, uso e fim de vida da bateria. Outros três estudos adotaram a fronteira do Berço ao Portão, que abrange apenas as etapas de aquisição de matéria-prima e manufatura da bateria. Por fim, três estudos restantes optaram pela abordagem do Berço ao Berço, que além das etapas de produção e uso, analisa possíveis processos de reciclagem de baterias aposentadas.

A partir da análise de 80 artigos abordando o ciclo de vida de baterias de íon-lítio, Arshad *et al.* (2022) observou que a maior parte (38%) adotou uma abordagem do Berço ao Portão, com 18% dos artigos escolhendo a fronteira do Berço ao Túmulo e outros 18% tendo como enfoque a abordagem do Poço à Roda, refletindo estudos de ACV do veículo e não somente da bateria. Observa-se que, diferentemente dos estudos que têm como foco o veículo, dentre os quais fronteiras do Berço ao Túmulo são mais comuns – como discutido na seção anterior –, artigos sobre baterias são mais frequentemente centrados nas etapas de produção, ou seja, adotam a abordagem do Berço ao Portão.

• Unidade Funcional

Oito dos nove artigos analisados adotaram como unidade funcional o fornecimento por baterias de íon-lítio de 1 kWh de capacidade. Apenas um artigo definiu como unidade funcional a distância percorrida (136.877 km) em um veículo de peso definido (1.860 Kg) até que a bateria atingisse 81,31% de sua capacidade (CUSENZA *et al.*, 2019). Por outro lado, Lavigne Philippot *et al.* (2023) adotaram também 1 vkm (veículo-quilometro) como segunda unidade funcional com o objetivo de aumentar a comparabilidade dos resultados com valores obtidos por outros estudos. A unidade de veículo-quilometro representa uma medida de fluxo de tráfego, obtido pela multiplicação do número de veículos em uma dada via pela distância média das viagens percorridas.

Arshad *et al.* (2022) destacam que as três unidades funcionais que aparecem com maior frequência na literatura sobre baterias de íon-lítio são a distância percorrida pelo carro, a energia fornecida pela bateria e a massa correspondente ao banco de bateria. Ainda segundo os autores, a unidade funcional de 1 kWh é a mais comumente adotada quando o escopo do trabalho envolve a comparação de diferentes químicas de cátodo ou tem como foco as etapas de aquisição de matéria-prima e produção da bateria. Peters *et al.* (2017), analisando os principais parâmetros da ACV de baterias de íon-lítio, optou por

extrair e recalculer os resultados de 36 artigos em termos de 1 Wh de capacidade de armazenamento, indicando as vantagens em termos de comparação e obtenção de valores médios. Em Chen *et al.* (2022) também é destacado como 1 kWh de capacidade de unidade funcional permite conduzir análises quantitativas e em especial confrontar emissões de gases de efeito estufa em cada etapa do ciclo de vida, tanto de baterias quanto de veículos elétricos.

• Materiais e componentes da bateria

Grande parte dos nove estudos que calculam a pegada de carbono especificamente para baterias tem como foco cátodos com químicas de lítio. Os tipos de baterias de íon-lítio mais comumente analisados são NCM e LFP, com outras químicas dessa categoria incluindo NCA (óxido de lítio níquel-cobalto-alumínio), LMO (óxido de lítio manganês) e LTO (titanato de lítio). Apenas um artigo, considera baterias de íons de sódio (NIB) em comparação com baterias do tipo LFP (GUO *et al.*, 2023). Fan *et al.* (2023), em conjunto com a ACV de baterias do tipo NMC e LFP, inclui baterias LAB (chumbo-ácido), alternativas mais antigas e que implicam em menores custos, geralmente aplicadas em sistemas de ignição e iluminação. Tais resultados corroboram Aichberger e Jungmeier (2020), que observaram a grande proporção de artigos voltados para o estudo das químicas mais utilizadas na atualidade, principalmente em função da disponibilidade de dados. Além disso, Peters *et al.* (2017) aponta como a maioria dos estudos de ACV de baterias analisa apenas uma ou duas químicas de cátodos, padrão observado também entre os nove artigos considerados.

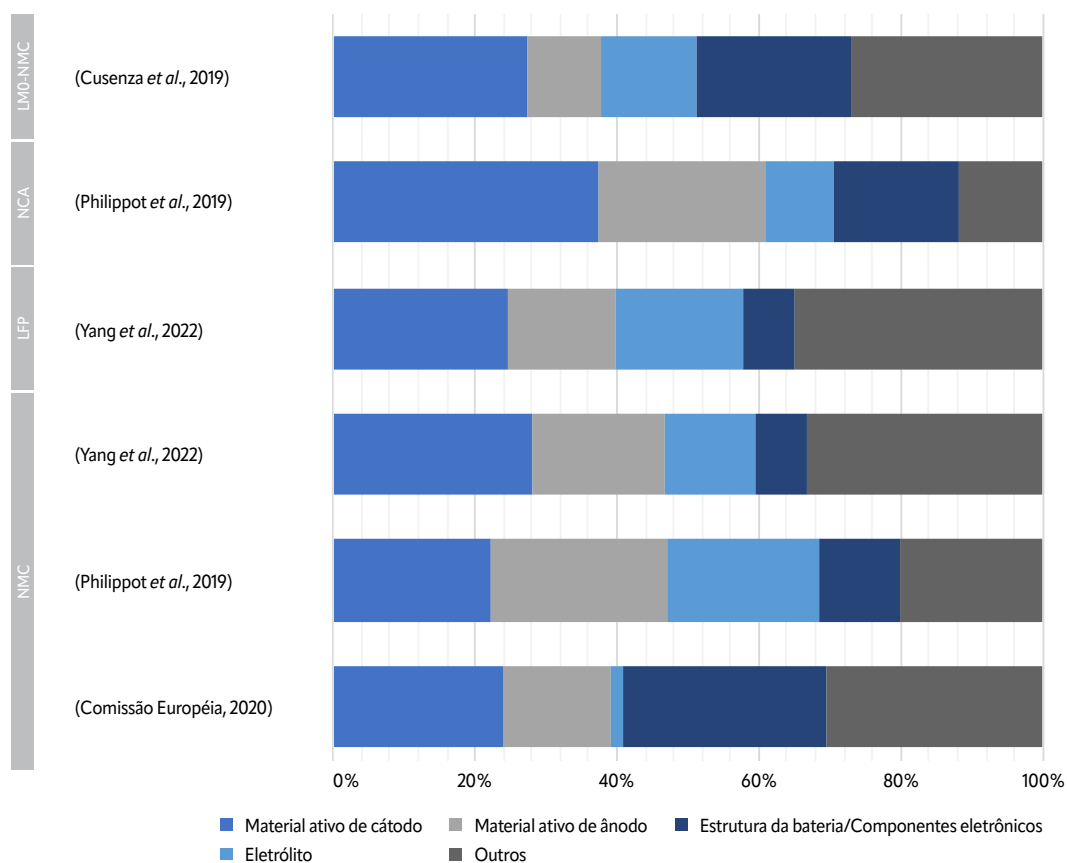
A fabricação de baterias para veículos elétricos no contexto da análise de ciclo de vida se divide majoritariamente em duas etapas, sendo a primeira delas a produção de materiais para a bateria, que inclui a extração e processamento de matéria-prima, enquanto a segunda envolve a manufatura das células e dos bancos de bateria. Para emissões de GEE, Aichberger e Jungmeier (2020) observam resultados por componente ou por etapa do processo de produção, para outras categorias de impacto, no entanto, o mais comum são resultados por banco de bateria, para os quais há maior disponibilidade de dados no geral. Dentre os nove artigos analisados, apenas dois apresentam resultados discriminados por materiais, enquanto oito trazem resultados separados por componentes da bateria. Os materiais abordados com maior frequência incluem: pasta do cátodo; alumínio; grafite; aço; cobre; lítio; solvente; eletrólito; e polímero. Já entre os componentes da bateria se destacam: cátodo; ânodo; sistema de gerenciamento da bateria; caixa da bateria (embalagem); e sistema de resfriamento.

Como discutido na seção 2.2.2, que fala da etapa de extração de matéria-prima no contexto da produção de baterias de ío-

n-lítio, a composição mássica de uma bateria varia de acordo com características específicas do dispositivo adotado. A partir dos estudos analisados que trazem dados de inventário a respeito dos materiais e componentes da bateria, foram levantadas as proporções em relação à massa total da bateria para os principais componentes, apresentadas na Figura 3.19. De forma

geral, se confirma a predominância do material ativo do cátodo, que representa em média 27% da massa do dispositivo. Na sequência, se destaca o material ativo do ânodo, respondendo por 18% da massa em média. Por fim, o eletrólito e a estrutura da bateria correspondem a aproximadamente 13% e 16% do peso da bateria, respectivamente.

→| **Figura 3.19 – Contribuição mássica dos principais componentes de baterias de íon-lítio**



Nota: As siglas correspondem aos materiais ativos das baterias. NMC: Óxido de lítio-níquel-mangânês-cobalto, LFP: Fosfato de ferro-lítio, NCA: Fosfato de ferro-lítio, LMO: Óxido de Manganês-Lítio.

Fonte: Elaboração própria.

O detalhamento dos impactos, principalmente das emissões de GEE, em seções de resultados reflete em grande parte a disponibilidade ou não de dados de inventário de ciclo de vida. Da amostra considerada, apenas cinco artigos apresentaram informações relativas à composição das baterias, discriminando materiais e quantidades. Dentre eles, Cusenza et al., (2019), além de trazer um BoM (*Bill of Materials*), ou seja, uma lista completa de todos os materiais necessários para a produção da bateria, explicando o que é cada componente, os materiais e as quantidades empregadas para sua fabricação, fornece dados do inventário utilizados na modelagem, indicando o consumo de energia e quais proces-

os foram obtidos por meio de fontes de dados secundárias.

Por outro lado, Yang et al (2022), apesar de apresentar o inventário completo dos veículos adotados, para baterias, traz apenas a composição e massa dos materiais empregados na fabricação de diferentes químicas. Da mesma forma, Philippot et al. (2019) e Philippot et al. (2022) detalham os principais componentes da célula da bateria, discriminando a repartição de massas, porém não apresentam a composição dos elementos descritos. A Tabela 3.4 apresenta um exemplo de inventário para dois dos principais tipos de químicas no mercado atualmente.

Tabela 3.4 – Inventário baterias de íon-lítio do tipo LFP e NCM

| | LFP (bateria/Kg) | | NMC (bateria/Kg) | |
|-------------------------|-----------------------------------|------------|----------------------|------------|
| CÁTODO | LFP | 82 | NMC | 92 |
| | Alumínio | 68 | Alumínio | 64 |
| | Fluoreto de polivinilideno (PVDF) | 4 | PVDF | 4 |
| ÂNODO | Grafite | 51 | Grafite | 60 |
| | Cobre | 41 | Cobre | 37 |
| | PVDF | 4 | PVDF | 4 |
| ELETRÓLITO | LiPF ₆ | 9 | LiPF ₆ | 6 |
| | Carbonato de etileno | 26 | Carbonato de etileno | 18 |
| | Carbonato de dimetil | 26 | Carbonato de dimetil | 18 |
| DIAFRAGMA | Polipropileno (PE) | 6 | PE | 6 |
| | Polietileno (PP) | 1 | PP | 1 |
| CAIXA | PP | 4 | PP | 4 |
| | Aço | 5 | Aço | 5 |
| | Fibra de vidro | 1 | Fibra de vidro | 1 |
| LÍQUIDO DE RESFRIAMENTO | Etilenoglicol | 3 | Etilenoglicol | 3 |
| BMS | Transistor | 2 | Transistor | 2 |
| | Resistor | 2 | Resistor | 2 |
| TOTAL | | 335 | | 326 |

Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2022).

• Fonte de dados

De forma relacionada, é notável a falta de dados primários em estudos de ACV de baterias, com grande parte dos artigos tomando dados da literatura ou de bases de dados como o Ecoinvent, principalmente no que diz respeito à produção de materiais e consumo de energia (ARSHAD *et al.*, 2022; PETERS *et al.*, 2017). Aichberger e Jungmeier (2020) destacam ainda que muitos dos dados de inventários são alterados e utilizados de maneira não transparente, tornando difícil o mapeamento da origem e avaliação de resultados. Além disso, os autores apontam como a escolha de base de dados pode influenciar o cálculo das emissões de GEE na etapa de produção de materiais, por exemplo em função de diferentes métodos de processamento, variação proporção de materiais primários para a

composição da bateria e local onde a produção se desenvolve.

Dentre os estudos analisados, apenas dois possuem alguma parcela de dados primários, provenientes do desmantelamento de baterias, de forma que todos os demais têm como principal fonte de informações estudos anteriores, com muitas referências se repetindo ao longo de diferentes artigos, ou bases secundárias de softwares como SimaPro e GREET. Além das diferenças de inventário, variações nos dados e premissas da ACV incluem características específicas das baterias como capacidade, peso, energia específica, distância percorrida por ciclo, e expectativa de vida. A **Tabela 3.5** apresenta os resultados da revisão de Aichberger e Jungmeier (2020) em relação a esses parâmetros.

Tabela 3.5 – Características mais comumente adotadas em ACV de baterias, resultados para a média, percentil 25% e percentil 75%

| | | |
|--------------------------------|--------|---------------------------|
| Capacidade (kWh) | | 30 (25 – 40) |
| Peso (Kg) | | 250 (170 – 440) |
| Densidade de energia (Wh/Kg) | | 115 (100 – 135) |
| Distância percorrida por ciclo | | 190 (110 – 300) |
| Expectativa de vida | km | 180,000 (150.000–200.000) |
| | Ciclos | 1850 (1100–3200) |
| | Anos | 13 (8–14) |
| TOTAL | | |

Fonte: Adaptado de Aichberger e Jungmeier (2020).

Dos nove artigos considerados nessa revisão, sete definiram a expectativa de vida da bateria a partir da distância percorrida em quilômetros, com dois artigos não especificando premissas em relação a esse parâmetro. Os valores assumidos variaram de 120.000 km (CHEN *et al.*, 2022) a 225.000 km (CHUL KIM; LEE; J. WALLINGTON, 2023), ficando a média em 167.000 km aproximadamente. Por outro lado, apenas dois artigos incluíram também a expectativa de vida da bateria em anos, com Phillipot *et al.* (2022) estabelecendo um período de 15 anos para o uso do banco de bateria e Chen *et al.* (2022) fixando esse parâmetro em 8 anos.

Em relação ao peso e capacidade da bateria, somente dois dos artigos analisados não apresentam dados para esses parâmetros (DU *et al.*, 2022; FAN *et al.*, 2023). Os valores declarados para o peso do banco de bateria variaram de 114,8 kg a 600 kg, estando a média em torno de 305 kg, o que poderia representar entre 20 e 30% do peso do veículo. Em relação à capacidade da bateria, o menor valor abordado na literatura foi de 7,6 kWh, enquanto o

maior valor ficou em 74 kWh, com a média se estabelecendo em aproximadamente 37 kWh. Do peso e da capacidade da bateria é possível derivar a densidade de energia, sendo que dentre os artigos considerados, esse parâmetro variou entre 65 Wh/kg e 225 Wh/kg, com média de 129 Wh/kg. De forma similar, Gauto *et al.* (2023), a partir de informações fornecidas pelos principais fornecedores globais de baterias de íon-lítio, reportou médias para o peso da bateria, a capacidade e a densidade de energia da ordem de 221 kg, 27 kWh e 125Wh/kg, respectivamente.

Atualmente, a busca por baterias de maior densidade de energia é um dos principais objetivos na agenda de eletromobilitade, dado que baterias com maior capacidade de armazenamento por unidade de massa possibilitam menor consumo de eletricidade na propulsão (ARSHAD *et al.*, 2022). Ainda assim, diversos outros fatores irão influenciar o desempenho de baterias de íon-lítio ao longo de sua vida útil, que inclusive podem reduzir sua capacidade de armazenamento e durabilidade. Tais fatores são aprofundados no **Quadro 3.1**.

Quadro 3.1 - Fatores influenciando o desempenho de baterias de íon-lítio no contexto da ACV

Apesar de grande parte dos estudos apresentar valores de expectativa de vida da bateria em quilômetros, todos abordam a ACV da etapa de produção a partir da unidade funcional de 1 kWh de capacidade de armazenamento, o que pode dificultar a comparação de parâmetros específicos relacionados à química da bateria e seu desempenho ao longo do ciclo de vida. Peters *et al.* (2017) ressalta que baterias do tipo LFP, que em geral apresentam menor densidade de energia e maior emissões de GEE por kWh, podem apresentar expectativas de vida mais alongadas. Apesar disso, o autor aponta que poucos estudos de ACV consideram premissas sobre expectativa de vida da bateria em suas modelagens, assumindo apenas que o banco de bateria terá a mesma duração que o veículo.

Essa afirmação, no entanto, não é atualmente respaldada por evidências consolidadas, havendo apenas a indicação de aposentar a bateria uma vez que esta atinja 80% de sua capacidade de armazenamento. Tanto baterias que precisem ser substituídas durante a vida útil do veículo – o que poderia representar a total inviabilização do automóvel –, quanto baterias que durem muito mais do que a expectativa de uso do automóvel, não são interessantes do ponto de vista ambiental. Não obstante, aspectos característicos da fase de uso podem interferir no desempenho da bateria, afetando sua capacidade de armazenamento e, conseqüentemente, sua expectativa de vida. Fatores como o número de ciclos completos de carga e descarga da bateria, além da temperatura de armazenamento, estão relacionados à degradação do dispositivo, sendo raramente incorporados em estudos de ACV em decorrência da ausência de informações de longo-prazo (PETERS *et al.*, 2017). Ademais, padrões de comportamento do usuário como aceleração e desaceleração, velocidade de condução, carga do veículo e hábitos de recarga também podem impactar a autonomia do carro elétrico, alterando o desempenho da bateria (AEA, 2023).

Por outro lado, em relação à eficiência, que remete a perda de energia que ocorre a cada ciclo de carga e descarga, Peters *et al.* (2017) destaca ainda fatores adicionais que podem interferir na performance da bateria, como a taxa e a temperatura de recarga, bem como o sistema de gerenciamento utilizado. O autor destaca que a eficiência da bateria tem potencial de impactar a magnitude das emissões de ciclo de vida na mesma ordem que os processos produtivos envolvidos na sua fabricação. Contudo, Arshad *et al.* (2022) aponta que em decorrência da escassez de dados, a maior parte dos estudos de ACV apenas assumem – se é que consideram essa variável – valores amplamente adotados na literatura, que variam entre 85 e 90%.

3.2.3.2 Resultados de emissões de GEE

Diferentes revisões de literatura, considerando uma variedade de escopos, apontam para possíveis intervalos de valores de emissões de gases de efeito estufa associados ao ciclo de vida das baterias de íon-lítio. Apesar disso, persiste a baixa comparabilidade dos resultados, dado que diferenças na especificação das baterias, nas tecnologias empregadas e nas entradas dos inventários de ciclo de vida complexificam a interpretação e a comparação direta de valores reportados (ARSHAD *et al.*, 2022). Nesse sentido, Lai *et al.* (2022) destacam o papel central dos dados de inventário, de forma que a variedade de fontes empregadas em estudos de ACV, resultam igualmente em uma variedade de resultados obtidos. Além disso, os autores apontam diferenças de escopo e localidade como diretamente relacionados às variações de valores associados às emissões de GEE na etapa de produção, principalmente por conta de recursos associados à transporte e energia. Peters *et al.* (2017) ressaltam que muitos estudos de ACV, além do escopo limitado, empregam metodologias de avaliação próprias, o que também dificulta a comparação entre diferentes literaturas.

Discrepâncias entre resultados podem ser observadas a partir do componente identificado como maior responsável pelas emissões de GEE na etapa de produção. Enquanto muitos estudos apontam a etapa de aquisição e processamento de matéria-prima para a composição do cátodo como a mais intensa em carbono, outros indicam a manufatura da célula da bateria como a principal fonte de emissão de gases do efeito estufa. Aichberger e Jungmeier (2020) explicam tais diferenças com base em dois aspectos: o tipo de abordagem empregado para contabilização do consumo de energia; e a capacidade e o nível de utilização assumidos da planta de produção das baterias.

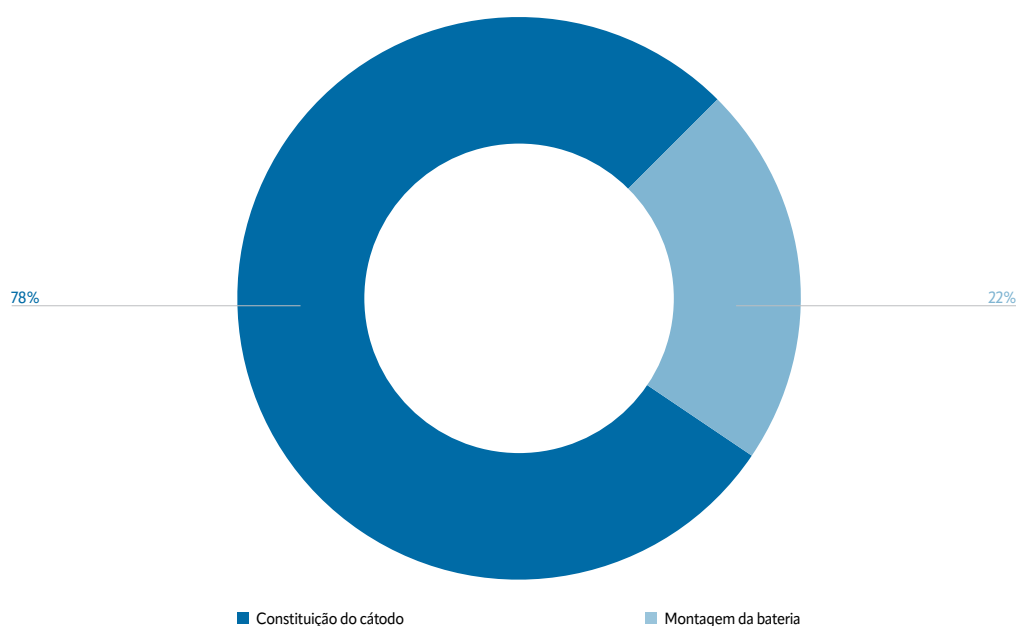
No primeiro caso, estudos que escolhem uma abordagem *top-down*, ou seja, que alocam o consumo de energia da bateria com base no consumo total da planta de produção, obtém valores de demanda energética significativamente maiores quando em comparação a abordagens do tipo *botton-up*, que quantifica essa demanda a partir da soma do consumo de energia de processos isolados, por exemplo. Tal fenômeno é descrito de maneira similar por Peters *et al.* (2017), que observou como

estudos *top-down* reportam maiores demandas por energia.

Enquanto abordagens *top-down* podem incluir demandas por energia não diretamente relacionadas à produção da bateria, abordagens *botton-up* possivelmente excluem aspectos importantes do consumo energético total. Nesse contexto, estudos *top-down*, em geral, concluem que a manufatura da célula da bateria é a principal fonte de emissões de GEE, enquanto estudos *botton-up* atribuem a maior parcela das emissões à produção do cátodo. Por outro lado, aspectos industriais da planta de produção considerada, como capacidade produtiva e volume de produção, que traduzem o nível de eficiência da instalação, podem influenciar os resultados de emissões de GEE quando expressos em kg CO₂eq./kWh (AICHBERGER; JUNGMEIER, 2020). Variações em função desses dois aspectos podem resultar em resultados de demanda energética com até uma ordem de magnitude de diferença (ARSHAD *et al.*, 2022), impactando diretamente o cálculo das emissões associadas.

Dos nove artigos considerados, 2 identificaram a etapa de montagem da bateria, que envolve a manufatura das células e do banco da bateria, como as mais intensas em carbono, enquanto 7 artigos apontaram a constituição do cátodo, que abrange a aquisição de matéria-prima, processamento de materiais e formação do eletrodo, como o maior responsável pelas emissões de GEE na etapa de produção. Para essa compilação, seguindo as considerações dos parágrafos anteriores, foi considerado que a montagem da bateria, da forma como é discriminada nos artigos, representa principalmente o consumo de energia decorrente dessa atividade, com alguns autores apontando esse consumo como energia associada aos processos de produção, a exemplo de Du *et al.* (2022). Esse mesmo entendimento é descrito pela Comissão Europeia em seu relatório de 2020 (EUROPEAN COMMISSION *et al.*, 2020). Assim, tanto resultados identificados como manufatura da bateria, quanto consumo de energia durante processos associados, foram agregados como montagem da bateria. Por outro lado, vale destacar que a constituição do cátodo também demanda energia na etapa de mineração e refinamento de materiais, sendo essa a maior fonte de emissões de GEE segundo alguns artigos (CHUL KIM; LEE; J. WALLINGTON, 2023; LAI *et al.*, 2022). Tal proporção é apresentada na **Figura 3.20**.

→| **Figura 3.20 – Componentes de maior contribuição para emissões de GEE na fase de produção dentre os artigos considerados**



Fonte: Elaboração própria.

Globalmente, a maior parte das emissões de GEE decorrentes da produção de baterias de íon-lítio se concentram na China, que, para químicas do tipo NMC, o país responde por 45% das emissões totais desta etapa e 27% das emissões relacionadas apenas à produção do cátodo (LLAMAS-OROZCO *et al.*, 2023). Para baterias do tipo LFP, a China pode representar 57% das emissões totais de produção, com a Austrália aparecendo em segundo lugar com 17% do total (LLAMAS-OROZCO *et al.*, 2023). Mesmo que em menor proporção, o restante das emissões associadas a etapa de produção, que incluem mineração, refinamento e processamento de materiais, permanecem concentradas entre poucos países, refletindo a tanto distribuição escassa de metais raros como o lítio ao redor do mundo, quanto a centralização de capacidade produtiva da cadeia de baterias em países mais desenvolvidos.

Como mencionado, diversos fatores irão influenciar os resultados de pegada de carbono obtidos a partir de estudos de ACV. Revisões sistemáticas de literatura descrevem intervalos de valores de emissões associados à fase de produção de baterias relativamente amplos, mesmo quando produzidos com base em metodologias similares. Peters *et al.* (2017) identificou resultados variando desde 50 até 350 kg CO₂eq./kWh, com uma média de 110 kg CO₂eq./kWh. Llamas-Orozco *et al.* (2023) apontam que emissões do Berço ao Portão para baterias de íon-lítio na literatura variam de 39 a 196 kg CO₂eq./kWh.

De maneira análoga, Aichberger e Jungmeier (2020) iden-

tificaram emissões médias de 120 kg CO₂eq./kWh na etapa de produção da bateria, com os quantis 25% e 75% marcando 70 e 175 kg CO₂eq./kWh, respectivamente. Os autores apontam que grande parte das variações nos resultados observados decorrem de premissas a respeito dos processos de manufatura das células da bateria, de forma que poucos artigos consideram diferenças de localidade e matriz elétrica na etapa de aquisição de matéria-prima e processamento de materiais, mesmo diante da relevância do consumo de energia para o cálculo das emissões. Disso resulta que emissões associadas à mineração e à preparação de material ativo para composição da bateria, por exemplo, podem estar sendo subestimadas em função da escassez de dados primários.

Dentre os artigos analisados, emissões associadas à produção de baterias do tipo NMC (6 referências) variaram entre 91,21 e 317 kg CO₂eq./kWh, com a média ficando em torno de 156 kg CO₂eq./kWh. Para baterias do tipo LFP (4 referências), os valores variaram entre 90 e 113,67 kg CO₂eq./kWh, registrando 99 kg CO₂eq./kWh na média. Outras baterias consideradas incluem do tipo NCA, com emissões de 123 kg CO₂eq./kWh (PHILIPPOT *et al.*, 2019), LAB com 120 kg CO₂eq./kWh (FAN *et al.*, 2023), LMO com 118,4 kg CO₂eq./kWh (YANG *et al.*, 2022) e LMO-NMC com 313 kg CO₂eq./kWh. Tais resultados, apresentados na **Tabela 3.6**, estão de acordo com os intervalos discutidos anteriormente e confirmam a diversidade de valores obtidos em estudos de ACV.

Tabela 3.6 – Resumo dos resultados da revisão de literatura de bateria íon-lítio

| Referência | Componente de maior contribuição | Mix elétrico na fase de produção | Peso | Capacidade | Densidade de energia | Expectativa de vida | Resultados (t CO ₂ eq./veículo) | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|------------------------|-------------------------------------|---------------------|--|----------------|--|
| | | | | | | | NMC | LFP | Outras |
| (CUSENZA <i>et al.</i> , 2019) | Montagem da bateria | Japão | 175 Kg | 11,4 kWh (80 células) | 65 | 136.877 Km | - | - | LMO-NMC – 313 |
| (CHUL KIM; LEE; J. WALLINGTON, 2023) | Constituição do cátodo | Estados Unidos | 138 Kg | 13,6 kWh (96 células) | 99 | 225.000 Km | 101 | - | - |
| (PHILIPPOT <i>et al.</i> , 2022) | Montagem da bateria | Japão | 114,8 Kg | 7,6 kWh (144 células) | 66 | 133.668 Km | 317 | - | - |
| (CHEN <i>et al.</i> , 2022) | Constituição do cátodo | Europa | 327,12 Kg | 74 kWh (188 células) | 226 | 120.000 Km | 91,21 | - | - |
| (PHILIPPOT <i>et al.</i> , 2019) | Constituição do cátodo | China | 6702 g | 0,012 kWh (uma célula) | - | Não específica | - | - | NCA - 123 (planta de capacidade média) |
| (GUO <i>et al.</i> , 2023) | Constituição do cátodo | Korea | 600 Kg | 57 kWh | 95 | 200.000 Km | - | Não específica | Não específica |
| (DU <i>et al.</i> , 2022) | Constituição do cátodo | China | Não específica | Não específica | - | Não específica | 175,54 | 113,67 | - |
| (FAN <i>et al.</i> , 2023) | Constituição do cátodo | China | Não específica | Não específica | - | 150.000 Km | 140 | 90 | LAB - 120 |
| (YANG <i>et al.</i> , 2022) | Constituição do cátodo | China | LFP - 335 NMC - 326 LMO - 429 LTO - 950 | 57 kWh | LFP - 170 NMC - 175 LMO - 133 | 200.000 Km | 113 | 93,7 | LMO - 118,4 LTO - 383,6 |

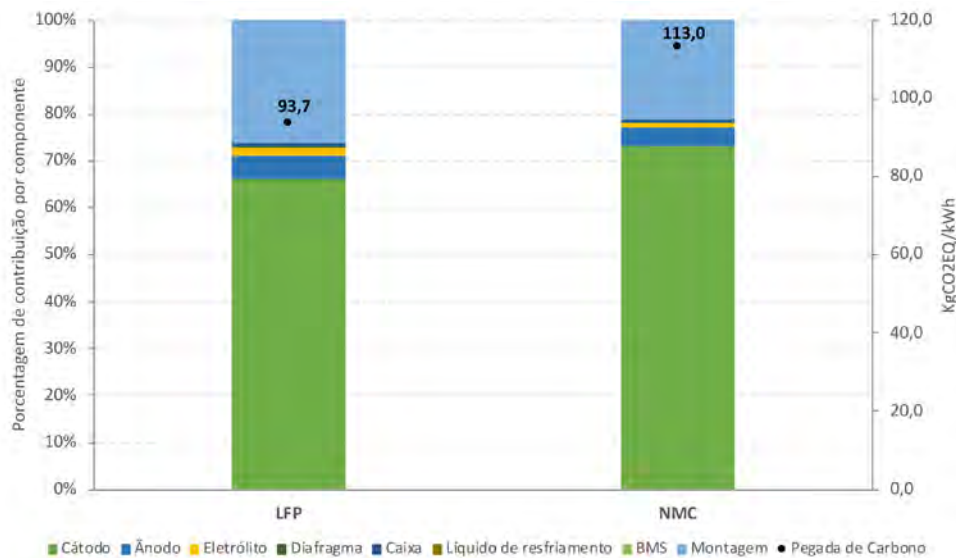
Fonte: Elaboração própria.

• Contribuição de impacto por materiais e componentes

Em relação a apresentação dos resultados, apenas dois dos artigos considerados trazem a pegada de carbono detalhada por material. Fan *et al.* (2023) aponta que o material responsável pela maior parcela das emissões de GEE para baterias do tipo NMC seria o sulfato de cobalto, que responde por mais de 30% do total, com o sulfato de níquel e o consumo de energia aparecendo em segundo lugar e juntos somando quase 40% das emissões. Para baterias de LFP, por outro lado, o impacto da pegada de carbono é menos concentrado, com nenhum material representando mais de 20% das emissões isoladamente. Apesar disso, dentre os materiais mais intensos em carbono destaca-se a o solvente NMP, amônia e a folha de cobre. De forma similar, Guo *et al.* (GUO *et al.*, 2023) apresenta a repartição da pegada de carbono entre os materiais empregados para a fabricação de baterias do tipo NIB e LFP. No primeiro caso, minério de níquel e consumo de energia se destacam como mais intensos em carbono, enquanto no segundo caso o consumo de eletricidade e calor, em conjunto com o solvente NMP, respondem pela maior parte das emissões na etapa de produção.

Por outro lado, sete dos nove artigos analisados apresentam resultados de emissões de GEE divididos por componente da bateria. Mesmo assim, tais resultados são de difícil comparação, dado que cada autor identifica os componentes da bateria de maneira distinta. Chul Kim *et al.* (2023), por exemplo, agrupa os resultados de emissão da célula da bateria sem fazer diferenciação entre os eletrodos e, portanto, não determina a pegada de carbono específica do cátodo. Sob outro enfoque, Philippot *et al.* (2022) apresenta as emissões sem diferenciar os componentes da célula da bateria, não indicando os resultados associados à constituição do cátodo ou ao consumo de energia para a montagem da bateria. Outra barreira na comparação de resultados decorre de que a maioria dos artigos não traz valores tabelados, apenas por meio de gráficos, o que em muitos casos, dificulta a interpretação. Mesmo os artigos que apresentam resultados por componentes de maneira clara, muitas vezes diferem em caracterização e nomenclatura. A Figura 3.21 traz as emissões de GEE obtidas por Yang *et al.* (2022) para os componentes de dois tipos de baterias, representando uma das abordagens mais uniformizadas dentre os artigos analisados.

→| **Figura 3.21 – Emissões de GEE por componente para baterias do tipo LFP e NMC**



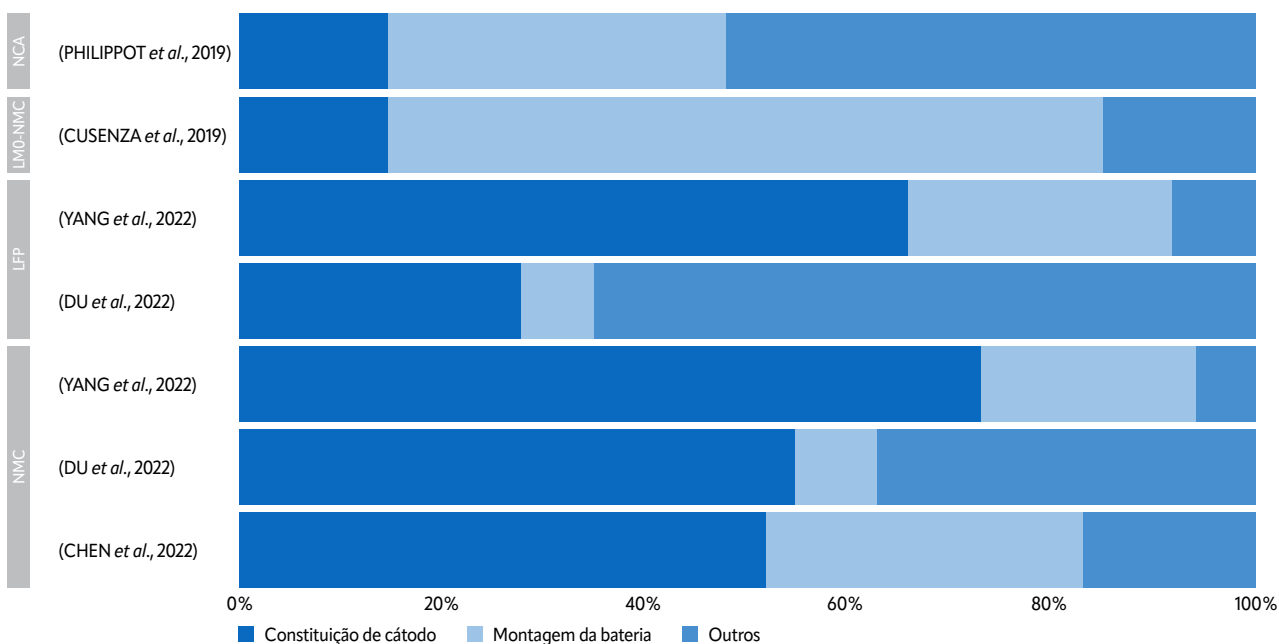
Nota: As siglas correspondem ao material ativo das baterias, sendo: LFP Fosfato de ferro-lítio; NMC Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto.

Fonte: Yang *et al.* (2022).

Apesar dos obstáculos descritos, foi feito um esforço de compatibilização dos resultados de pegada de carbono por componente, de forma a agrupar valores dentro das duas categorias de emissões identificadas na literatura como mais relevantes: a constituição do cátodo e a montagem da bateria. O primeiro abrange principalmente a produção dos materiais do

cátodo, enquanto o segundo representa sobretudo o consumo de energia na etapa de manufatura da bateria, como discutido anteriormente. Na categoria outros, foram agrupadas as emissões decorrentes dos demais componentes, que variam na maneira como são apresentados pelos artigos analisados. A Figura 3.22 apresenta os resultados consolidados.

→| **Figura 3.22 – Resultado da revisão de literatura para a composição das emissões de GEE considerando os componentes da bateria mais intensos em carbono na etapa de produção**



Nota: As siglas correspondem ao material ativo das baterias, sendo: NMC: Óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto; LFP: Fosfato de ferro-lítio; LMO: Óxido de Manganês-Lítio; NCA: Óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio.

Fonte: Elaboração própria.

Para além dos impactos específicos relacionados à produção da bateria, incluindo materiais e componentes, é interessante observar a perspectiva de participação desses impactos no conjunto do veículo. Nesse sentido, Xiong, Ji e Ma (2019) estudaram a contribuição de impacto da produção de componentes ao longo do ciclo de vida de veículos, com foco especial nas implicações ambientais associadas à produção das baterias. Os resultados revelaram que, para os veículos BEV - LFP e BEV - NMC, a fabricação das respectivas baterias contribuiu com 28,8% e 38,3% das emissões totais de GEE. No caso dos veículos PHEV - LFP e PHEV - NMC, a produção das baterias contribuiu com 13,4% e 21,6% das emissões totais de GEE, respectivamente. Em Hawkins *et al.* (2013), resultados do Berço ao Túmulo para o contexto europeu, indicaram que emissões de CO₂eq. referentes à manufatura dos veículos elétricos são o dobro das emissões dos veículos a combustão, com 35 a 41% estando relacionadas ao sistema de baterias, o que reafirma a importância desse componente no contexto de pegada de carbono.

A complexidade das baterias de veículos elétricos, que são mais pesadas e maiores em comparação com as dos veículos híbridos, resulta em um aumento na quantidade de materiais e energia necessários para sua produção e montagem, levando a emissões GEE mais elevadas. Além disso, baterias do tipo NMC apresentam emissões mais elevadas em comparação com as baterias LFP. Essa diferença é atribuída principalmente ao processo de produção intensivo em energia envolvido nos processos de extração e transformação do cobalto, utilizado em alto teor nas baterias NMC, e que resultam em baterias de maior densidade energética (XIONG; JI; MA, 2019). Além disso, esses resultados sugerem que, embora veículos elétricos possam apresentar menor impacto durante a operação, a manufatura e especialmente a produção de materiais e baterias, continua a ser um fator preponderante nas emissões totais, reforçando a importância de estratégias específicas para a redução de emissões dentro da fronteira do Berço ao Portão

• Consumo de energia e emissões de GEE

No caso de veículos elétricos, o consumo de energia do Berço ao Portão pode ser ainda mais significativo em função da fabricação da bateria. Quando comparado aos demais componentes que compõem o BEV (chassi, carroceria, motor etc.), alguns estudos apontam que bateria pode ser responsável por 35% a 50% do consumo total de energia e por 37% a 51% das emissões totais da fabricação do veículo (JOSHI; SHARMA; BARAL, 2022; WANG *et al.*, 2023; XIONG; JI; MA, 2019). Desse modo, países com mix de eletricidade com menor participação de combustíveis fósseis (especialmente carvão), podem apresentar emissões de GEE mais baixas para a fabricação de baterias do que em regiões com elevada participação de carvão na rede elétrica, como a China (AICHBERGER; JUNGMEIER, 2020; PHILIPPOT *et al.*, 2019).

O estudo de Chen *et al.* (2022) avaliou a evolução temporal das emissões de GEE da fabricação de LIB na China e os resultados mostraram uma possível redução de 75% na pegada de carbono da bateria em relação ao ano base, em função da redução da intensidade de carbono da eletricidade no país em 2050. Resultados semelhantes foram obtidos por Lai *et al.* (2022) com uma possível redução de 12% em 2030 e de 75% em 2050 da pegada de carbono da fabricação da bateria em relação a 2020, levando em consideração uma matriz elétrica mais renovável na China. Neste sentido, os estudos analisados reforçam a importância da matriz energética para a determinação da PC da fabricação dos veículos e de seus componentes.

Do ponto de vista das baterias, os cenários de produção mais abordados nos trabalhos revisados foram China e Europa. Peters *et al.* (2017) ao revisar 36 artigos sobre baterias identificaram que 36% utilizaram o mix de energia dos EUA, 25% da Europa, 19% não especificado e 5% do Japão. Em quase todos os trabalhos, o mix elétrico identificado apresentou composição fóssil entre 50% a 70%. Já Arshad *et al.* (2022) em seu estudo de revisão identificaram que 57% dos artigos usaram o mix de energia europeu, 21% dos EUA, 6% da China.

Adicionalmente, Llamas-Orozco *et al.* (2023) destacam o papel central do consumo de energia para a composição das emissões associadas à produção de baterias, fator que representa por volta de 40% das emissões dessa etapa segundo revisão conduzida pelos autores. O artigo aponta assim a importância da descarbonização da matriz global para redução da pegada de carbono de veículos elétricos, bem como a relevância da especificação da localidade em estudos de ACV.

Mesmo com uma matriz energética atualmente intensa em carbono, é previsto que o mercado chinês mantenha sua predominância na indústria de manufatura e comércio de veículos à bateria nas próximas décadas (FLEISCHMANN *et al.*, 2023). Em contrapartida, recentemente o Brasil estreou dentre os maiores produtores globais de lítio, além de já figurar entre os países provedores de outras matérias-primas também relevantes no contexto da fabricação de baterias, como alumínio, grafite e níquel. A governança global da cadeia produtiva de baterias depende de aspectos econômicos, políticos e ambientais complexos, porém sua reorganização carrega potencial significativo de redução da pegada de carbono. Nesse sentido, Llamas-Orozco *et al.* (2023) estima uma possível redução de até 26% das emissões, por exemplo, a partir do avanço da mineração no Brasil, refinamento nos Estados Unidos e manufatura na Hungria.

▲ 3.2.4 Análises de sensibilidade

Análises de sensibilidade em avaliações de ciclo de vida têm como objetivo estimar a influência que certas premissas podem

exercer nos resultados. Tal abordagem é especialmente relevante em contextos de escassez de dados primários, nos quais diversos parâmetros da ACV precisam ser estimados ou assumidos a partir da literatura (CUSENZA *et al.*, 2019). Dessa forma, análises dessa natureza procuram identificar e caracterizar fatores de incerteza, incorporando-os à interpretação dos resultados. Comumente, é conduzido o estudo de diferentes cenários nos quais se variam parâmetros identificados como centrais para a ACV, podendo os resultados serem utilizados para fins de otimização e melhorias de processo (GUO *et al.*, 2023).

Nesse sentido, a análise de sensibilidade realizada por Xiong, Ji e Ma (2019) abordou o perfil de eletricidade da China em 2020 e 2030, comparando-os com o perfil de 2017 e destacando potenciais impactos para as emissões para a abordagem do Berço ao Túmulo. De acordo com os cenários considerados, em 2020, as emissões relacionadas à geração de energia seriam reduzidas em 19,25%, enquanto em 2030 essa redução prevista seria de 27,32%, sugerindo possíveis diminuições nas emissões ao longo do ciclo de vida completo dos veículos. Para o cenário de 2020, previu-se uma diminuição de 5,8% e 6,6% nas emissões para os veículos BEV - NMC e BEV - LFP, respectivamente. Quanto aos veículos híbridos PHEV - NMC e PHEV - LFP, as reduções previstas foram de 2,7% e 2,8%, respectivamente. Já para o horizonte de 2030, as projeções indicaram reduções mais expressivas, atingindo 19,4% e 21,8% para os veículos BEV - NMC e BEV - LFP, e 10,6% e 11% para PHEV - NMC e PHEV - LFP, respectivamente. A partir deste estudo, destaca-se que a influência de alterações no perfil de eletricidade de um país tem potencial de interferir mais expressivamente em veículos elétricos do que em veículos híbridos, ao considerar a fronteira do Berço ao Túmulo

De forma mais ampla, Yang *et al.* (2022) conduziram uma análise de sensibilidade considerando cenários futuros, em comparação com o ano de 2020, que envolvem o desenvolvimento de veículos mais leves (15% em 2025 e 25% em 2030) e assim, alterações nas emissões da manufatura dos materiais e componentes, eficiência no carregamento de baterias (aumentando de 90% em 2020 para 95% em 2025, e para 99% em 2030) e a proporção de fonte de eletricidade (aumento de fontes renováveis), correspondendo a alterações relacionadas à fase de uso e manutenção (Berço ao Túmulo). Com as mudanças projetadas ao longo do ciclo de vida completo dos veículos, as emissões de GEE de BEV baseados em baterias LFP, NCM, LMO e LTO teriam o potencial de diminuir em 28,7%, 28,5%, 28,2% e 37,8%, respectivamente em 2025. No cenário de 2030, as estimativas indicam uma redução ainda mais significativa, com as emissões diminuindo em 49,7%, 49,0%, 49,7% e 55,1% para LFP, NCM, LMO e LTO, respectivamente.

No estudo conduzido por Velandia Vargas *et al.* (2019), a aná-

lise de sensibilidade foi implementada em cenários que envolviam a redução de massa, utilizando protótipos fabricados com plástico e alumínio. A diminuição de massa considerou alterações principalmente na manufatura dos materiais e componentes dos veículos, pelo uso de plástico foi de aproximadamente 58%, enquanto o uso de alumínio resultou em uma redução de cerca de 59%. Ao contextualizar os resultados no cenário brasileiro projetado para 2030 e compará-los com o cenário de 2015, considerou-se também alterações no percentual de fontes renováveis no mix de eletricidade com fronteira do Berço ao Túmulo, observamos que os veículos elétricos com redução mássica por adição de alumínio (BEV BR AL) e por adição de plástico (BEV BR PL) apresentaram uma redução equivalente de 8,8% nas emissões de CO₂eq. Avaliando o cenário global projetado para 2030, o estudo sugere que os veículos BEV GLO AL e BEV GLO PL poderiam potencialmente reduzir as emissões em até 11,5% e 8,3%, respectivamente. Este estudo enfatiza a influência do peso dos componentes e do veículo como um todo nas emissões de GEE, indicando que a substituição de materiais convencionais por materiais mais leves na fabricação de veículos tem o potencial de reduzir a pegada de carbono.

Elgowainy *et al.* (2018) realizaram uma avaliação abrangente de cenários relacionados às emissões de GEE para o período futuro (2025-2030), em relação ao cenário base de 2015. A análise abordou uma variedade de veículos no contexto dos Estados-Unidos, incluindo aqueles com motores de combustão interna a gasolina e diesel (ICEV), veículos *flex-fuel* (FFV) alimentados por E85 (mistura de 85% de etanol de milho e 15% de gasolina em volume), veículos a gás natural comprimido (GNC), veículos híbridos elétricos (HEV), veículos a célula de combustível (FCEV), veículos elétricos a bateria (BEV) e veículos híbridos plug-in (PHEV). A análise de sensibilidade conduzida envolveu tecnologias avançadas para produção de combustíveis e energia, envolvendo por exemplo pirólise de resíduos florestais, uso de biomassa, produção de diesel a partir de processamento de soja, entre outras citadas, analisando alterações do Berço ao Túmulo. Os autores concluíram que a utilização dessas novas tecnologias pode resultar em uma redução de 11,4% nas emissões de CO₂eq. da produção do veículo ICEV e 25,5% na produção do BEV.

De forma similar, diferentes parâmetros de sensibilidade podem influenciar os resultados de ciclo de vida para baterias de íon-lítio. Aichberger e Jungmeier (2020), a partir de uma revisão extensa de literatura, destacam as principais variáveis aplicadas em análises desse tipo, que incluem, em ordem de frequência de aparição: matriz elétrica; densidade de energia; vida-útil da bateria; demanda de energia na etapa de produção; taxa de reciclagem; capacidade da bateria; e escala de produção, entre outras.

Cusenza *et al.* (2019), por exemplo, a partir da contribuição de impacto identificada para cada componente de uma bateria do tipo LMO – NMC, conduziu, para a etapa de produção com fronteira do Berço ao Portão, a análise de sensibilidade de dois parâmetros: quantidade de solvente; e eletricidade demandada para montagem da célula. Além disso, para a etapa de uso, os autores consideraram como sensíveis a matriz elétrica, a eficiência da bateria, a relação peso e demanda energética e a vida útil do dispositivo. Os resultados mostraram que a quantidade de solvente exerce pouca influência na variação dos resultados. A demanda de eletricidade para montagem, por outro lado, é determinante na composição dos impactos associados à produção, de forma que esta etapa se mantém como a mais significativa do ciclo de vida em todos os cenários analisados.

Em outra abordagem, GUO *et al.* (2023), analisando a sensibilidade dos resultados à uma variação de $\pm 10\%$ no consumo de energia elétrica e na demanda por recursos primários como níquel e cobre na etapa de produção da bateria, apontou para a relevância da matriz elétrica na contribuição dos impactos, destacando a importância em se considerar a distribuição regional de recursos energéticos. Por fim, YANG *et al.* (2022), além das análises de sensibilidade conduzidas para veículos, avaliaram como a densidade de energia da bateria e a demanda de eletricidade para a montagem da célula poderiam influenciar os impactos associados à produção, na fronteira do Berço

ao Portão. Os resultados mostraram que para um aumento de 10% na densidade de energia, o GWP para baterias do tipo LFP, NMC, LMO e LTO diminuiu em 4,75%, 5,17%, 5,27% e 7,43%, respectivamente. Em contrapartida, uma redução de 10% no consumo de eletricidade na montagem resultou em emissões 1,43%, 1,21%, 1,55% e 1,49% menores para baterias LFP, NMC, LMO e LTO, respectivamente. Os valores apresentados confirmam a elevada sensibilidade da pegada de carbono em relação à densidade de energia da bateria.

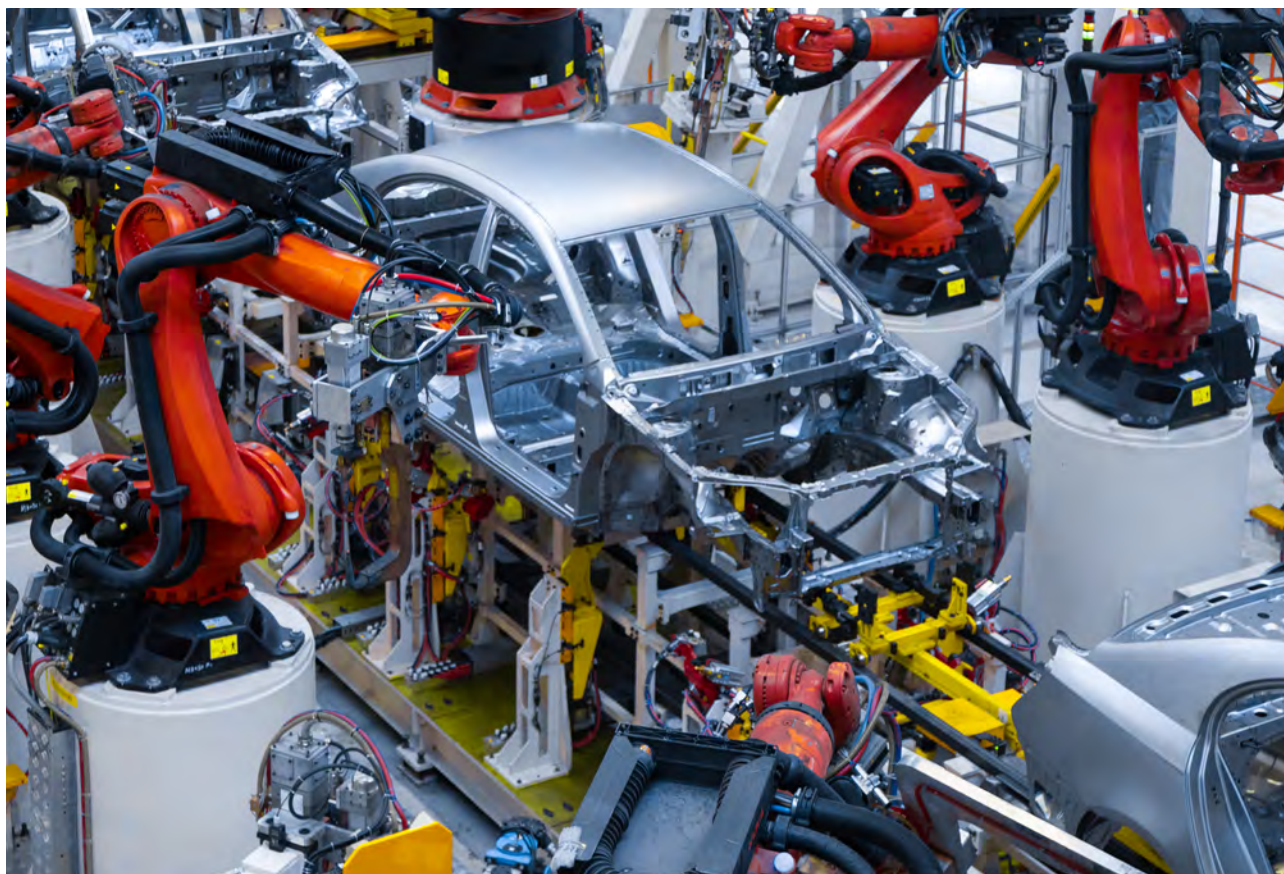
Em resumo, as análises de sensibilidade nos estudos abordados revelam importantes considerações para a avaliação de ciclo de vida de veículos. As pesquisas na China indicam que mudanças no perfil energético podem significativamente influenciar as emissões de veículos, principalmente elétricos, com projeções promissoras de reduções até 2030. Estudos prospectivos destacam que melhorias na eficiência dos veículos, veículos mais leves, bateria de maior densidade de energia e fontes de eletricidade renovável têm potencial para reduzir consideravelmente as emissões ao longo do ciclo de vida. A análise de sensibilidade em relação à escolha de materiais na fabricação também sugere impactos positivos nas emissões. Em conjunto, essas descobertas enfatizam a importância de abordagens inovadoras e a consideração de diferentes cenários para orientar estratégias visando uma mobilidade menos intensa em carbono.

3.3 Contribuições para o projeto “Do berço ao portão”

Na busca por compreender e quantificar a pegada de carbono em veículos leves no contexto brasileiro, é fundamental orientar-se por recomendações sólidas provenientes de estudos anteriores. A revisão bibliográfica realizada revelou uma variedade de parâmetros essenciais para a realização de uma ACV abrangente e precisa. Assim, este tópico apresenta uma síntese desses parâmetros, incluindo direcionamentos para sua consideração no projeto “Do berço ao portão”.

Nesse sentido, a **Figura 3.23** é uma representação visual dos principais direcionamentos derivados da revisão biblio-

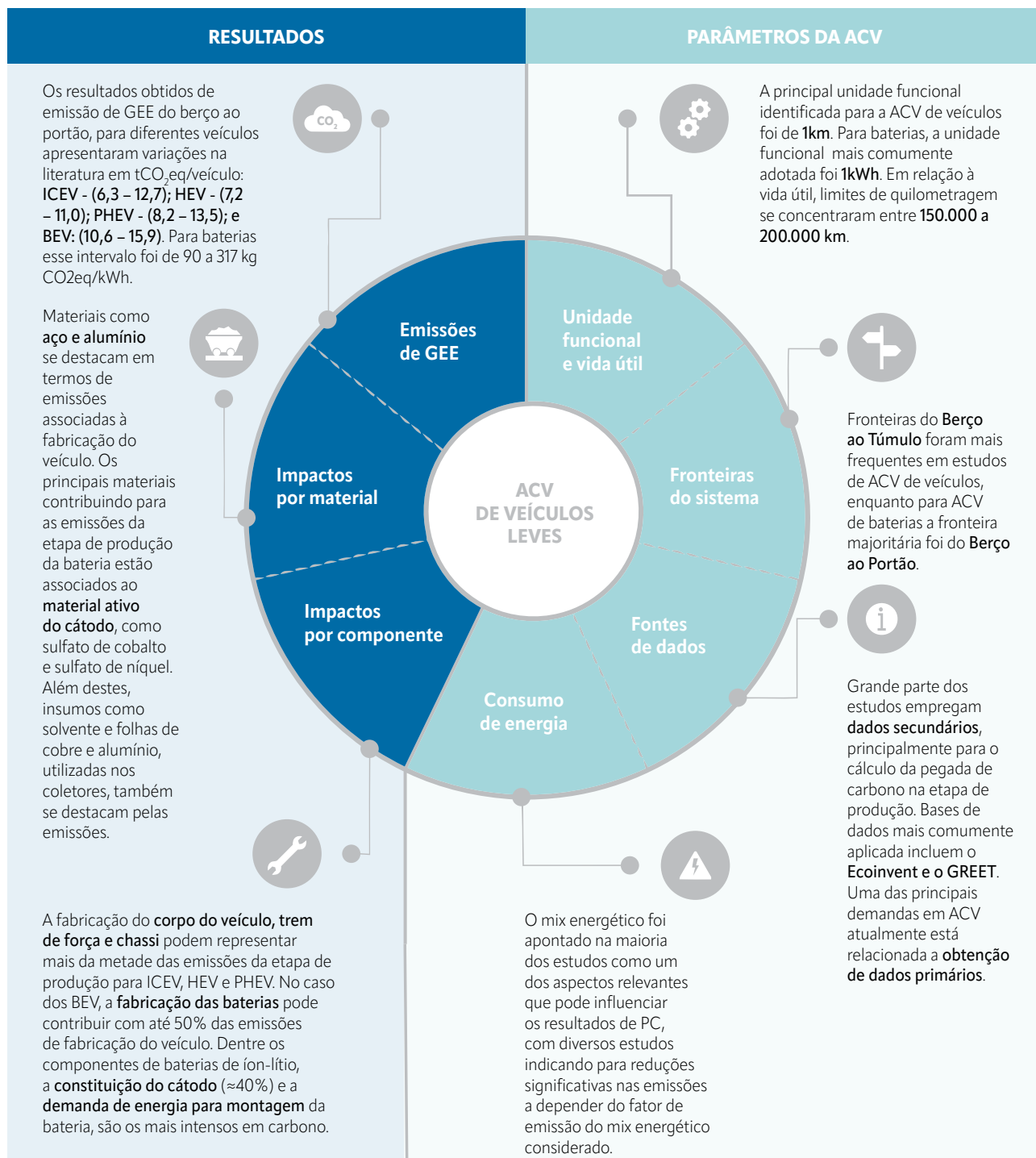
gráfica sobre ACV em veículos leves. Os pontos destacados representam possíveis caminhos para a incorporação de parâmetros no projeto. Ao considerar esses aspectos fundamentais, não apenas se estabelece uma base robusta para análise, mas se viabiliza comparações com estudos futuros. Dentre os diversos elementos considerados, destacam-se os tipos de veículos mais frequentemente abordados, a escolha da unidade funcional, a estimativa da vida útil dos veículos, a subdivisão comum de componentes e materiais, os principais pontos críticos identificados e as principais tecnologias de baterias examinadas.



É relevante observar que, embora as fronteiras mais citadas na literatura sejam as do Berço ao Túmulo, o estudo Pegada de Carbono em veículos leves no contexto brasileiro, adotará a abordagem do Berço ao Portão. Esta perspectiva permite um foco específico na produção de veículos, desde a extração de matéria-prima até a montagem, possibilitando uma análise mais detalhada das contribuições de impacto dessa etapa, e preenchendo uma lacuna relevante na lite-

ratura, principalmente considerando o contexto brasileiro. O intuito é fornecer uma compreensão aprofundada dos valores de PC associados à produção de veículos no Brasil, mapeando pontos críticos, como materiais, processos e transporte, presentes nessas fronteiras. Com isso, este estudo visa fornecer uma base sólida para investigações subsequentes que possam incluir abordagens do Berço ao Túmulo e do Poço à Roda.

→ **Figura 3.23 – Principais direcionamentos para a incorporação de parâmetros na ACV de veículos leves com base nos resultados da revisão bibliográfica**



Fonte: Elaboração própria.

4. Revisão de literatura cinza

Buscando complementar a análise da literatura acadêmica apresentada no capítulo anterior, este capítulo traz uma análise da literatura cinza, isto é, inclui documentos produzidos por organizações fora dos canais tradicionais de publicação e normalmente não revisados por pares. Foram avaliados relatórios de ACV publicados por montadoras,

ferramentas setoriais e documentos produzidos por duas importantes organizações. Apesar de não contar com o mesmo rigor dos estudos científicos, os dados e evidências apresentados aqui são relevantes e contribuem para a análise do estado da arte. A seguir, os principais resultados são apresentados.



4.1 Relatório "Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA" da Comissão Europeia

Esse relatório, publicado pela Comissão Europeia em 2020, é um dos estudos de grande relevância, tendo avaliado por meio da Análise de Ciclo de Vida catorze categorias de impactos ambientais – dentre elas, a pegada de carbono – para um conjunto de alternativas de veículos leves e pesados. Dentre as opções consideradas, o estudo incluiu sete tipos diferentes de veículos rodoviários, com doze opções de transmissões automotivas propulsoras (trem de força), totalizando 65 combinações genéricas. Além disso, abrangeu ainda 60 cadeias de combustível e 14 de eletricidade potencialmente aplicáveis nos contextos analisados, cobrindo um horizonte temporal de 2020 a 2050 e incluindo as fases de produção, uso e fim de vida do veículo.

A metodologia aplicada partiu de uma revisão de literatura de mais de 350 artigos, bem como da consulta a aproximadamente 100 organizações relevantes na área, incluindo atores da academia, indústria, tomadores-de-decisão e organizações não-governamentais. Como resultado da revisão de literatura, o estudo destacou três conclusões centrais: a categoria de impacto mais comumente empregada é a pegada de carbono, que avalia o potencial de aquecimento global (GWP, expresso em kg CO₂eq.); a maior parte das abordagens tem como foco veículos de passageiros; e combustíveis e fontes de energia convencionais – como diesel e eletricidade – são estudados de forma mais ampla. Alinhado às discussões do capítulo anterior, a comparação entre resultados extraídos da literatura mostrou também a grande variabilidade associada ao cálculo de impactos potenciais, decorrentes principalmente de diferenças em fontes de dados e premissas de modelagem.

Além de reafirmar muitas das principais conclusões observadas em artigos acadêmicos, o estudo da Comissão Europeia apresenta um extenso diagnóstico dos parâmetros que podem influenciar uma ACV, conduzindo diferentes

análises de sensibilidade e discutindo possíveis abordagens. Nesse sentido, três parâmetros foram identificados como mais determinantes para o cálculo dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida de diferentes veículos: a intensidade de carbono do mix de energia empregado; a expectativa de vida em quilômetros dirigidos; e os padrões das viagens realizadas.

Em relação ao consumo de energia, principalmente eletricidade, nas etapas que envolvem a produção, uso e fim de vida do veículo, é destacado como premissas temporais e espaciais podem alterar os resultados, de forma que são previstas reduções significativas das emissões associadas a este componente em função dos esforços de descarbonização em âmbito global. Para a União Europeia, foco do estudo, é projetada uma redução de 80% das emissões associadas a matriz elétrica entre até 2050. Dado o papel central da energia em todas as fases do ciclo de vida de veículos elétricos para o cálculo das emissões de GEE, esse parâmetro é um dos mais decisivos na comparação da performance entre esse tipo de veículo e veículos à combustão interna.

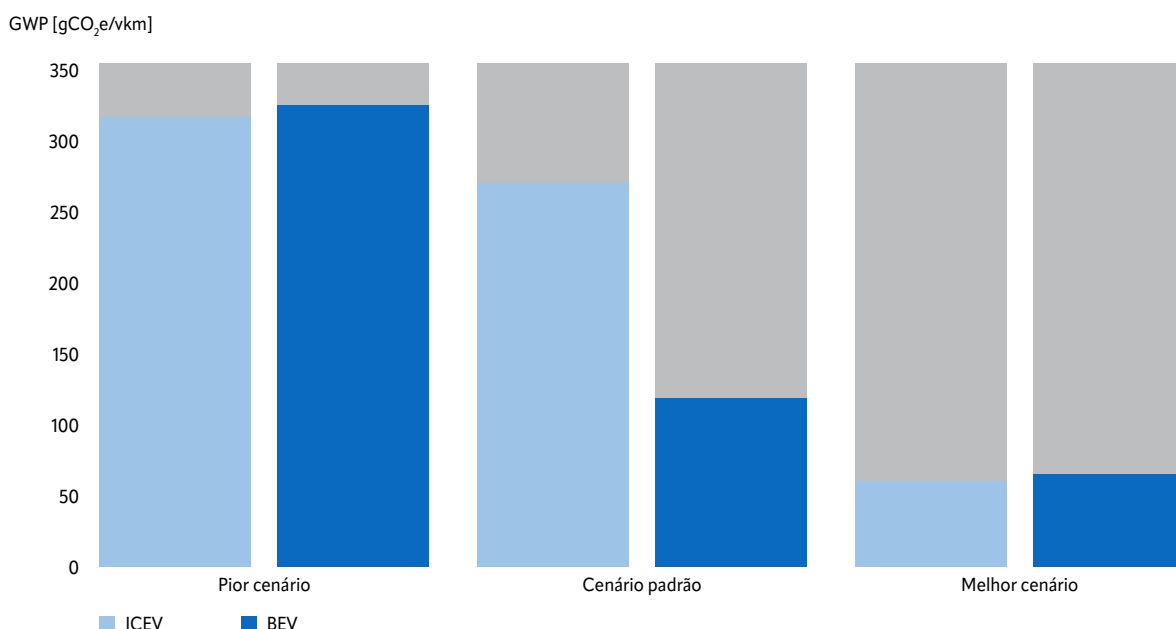
De fato, a análise de sensibilidade conduzida no estudo com base em diferentes cadeias de combustível e fontes de energia demonstrou que o pior cenário de GWP para BEV se equipara ao pior cenário para ICEV. O mesmo ocorre para o melhor cenário em ambos os casos, sendo a diferença significativa principalmente no cenário tomado como base, no qual as emissões dos veículos à combustão são mais que o dobro das emissões daqueles movidos à bateria, como mostra a [Figura 4.1](#).

O exercício conduzido considerou diferentes cenários de produção de combustível e intensidades de carbono da rede elétrica. Para BEV, o melhor cenário corresponde às emissões médias associadas a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis,

enquanto o pior cenário é dado pela eletricidade gerada exclusivamente a partir de carvão. No caso de ICEV, o melhor cenário é aquele de produção do etanol por meio de uma técnica de manejo que envolve a poda de curta rotação, com o pior cenário

correspondendo ao etanol produzido a partir do trigo. O estudo destaca ainda que o consumo de energia – e, portanto, sua origem e fonte – é um dos fatores de maior influência na composição dos impactos associados ao ciclo de vida de veículos leves.

→| **Figura 4.1 – Emissões de ciclo de vida de ICEV e BEV em 2020 segundo cenários de intensidade de carbono das cadeias de combustível e eletricidade, do Berço ao Túmulo**



Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

Fonte: Adaptado de EUROPEAN COMMISSION *et al.* (2020).

Por outro lado, a expectativa de vida expressa em quilômetros irá afetar o balanço entre as etapas de produção e uso do veículo, principalmente no caso de veículos movidos à bateria, de forma que expectativas de vida mais altas resultam em uma diluição dos impactos associados à etapa de produção, a mais intensa em carbono para veículos elétricos. De qualquer forma, diversos fatores temporais também irão influenciar o desempenho dos veículos elétricos. É esperado, por exemplo, avanços em termos de refinamento tecnológico, aumento de eficiência e de capacidade de produção em escala, o que possivelmente reduziria emissões associadas à manufatura. Adicionalmente, considerações a respeito do fim de vida das baterias, envolvendo processos de reciclagem e reúso desse componente – que ainda são bastante incipientes – possuem potencial de impactar as emissões totais dos veículos elétricos. Vale ressaltar que nenhum dos artigos avaliados pela Comissão, nem o estudo de ACV por eles conduzidos, considerou que seria necessário trocar a bateria durante o tempo de vida do veículo.

Os 7 tipos de transmissões automotivas propulsoras consideradas no estudo foram: ICEV – Veículo com motor de combustão interna convencional (e híbrido moderado); HEV – Veículo elé-

trico totalmente híbrido; PHEV – Veículo elétrico híbrido plug-in; BEV – Veículo elétrico a bateria; FCEV – Veículo elétrico com célula de combustível de hidrogênio; FC-REEV – Veículo Elétrico Estendido com Célula de Combustível de Hidrogênio; HEV/BEV-ERS – Veículo Híbrido / Elétrico a Bateria que também pode operar em Sistema Rodoviário.

Para veículos leves de passageiros, apenas os primeiros 5 tipos mencionados foram simulados, combinando diferentes tipos de combustível e considerando duas categorias de segmento, sendo elas, veículos C (por exemplo, VW Golf) em conjunto com SUV médios (por exemplo, VW Golf); e SUV grandes (por exemplo, BMW X5, Land Rover Range Rover, Volkswagen Touareg, Volvo XC90, entre outros). O **Quadro 4.1** traz considerações a respeito do processo de definição de veículos em estudos de ACV. Outras premissas do estudo incluem uma expectativa de vida de 225.000 km em 15 anos e baterias de 58 kWh de capacidade quando aplicáveis, além de empregar a medida de vkm (veículo-quilômetro) como unidade funcional. A principal base de dados empregada foi o Ecoinvent, sendo usados dados de outras fontes quando necessário.

Quadro 4.1 – Especificação do veículo em estudos de ACV

Um aspecto de especial relevância para o projeto “Do berço ao portão” está relacionado à especificação do veículo, que pode ser desde simples e baseada em premissas típicas e representativas de um veículo médio, até complexas nas quais o veículo é caracterizado a partir de modelos existentes de forma detalhada ou ainda com base em simulações. Nesse sentido, a Comissão Europeia aponta para os benefícios da adoção de um modelo de veículo representativo médio em estudos comparativos, ou seja, de marca e modelo indefinido que reflita a realidade da média dos produtos disponíveis no mercado. Tal abordagem contribui para o engajamento do setor como um todo e facilita a coleta e divulgação de informações, realizada sempre de maneira agregada, não havendo exposição de dados sensíveis e nem limitação do número de atores que podem teoricamente contribuir. Assim, ao se considerar veículos representativos médios para o cálculo da pegada de carbono é possível confrontar o desempenho de diferentes cenários com maior consistência, facilitando o entendimento de como cada um dos parâmetros adotados pode potencialmente influenciar os resultados. Da mesma forma, essa abordagem permite a realização de análises de sensibilidade para os parâmetros identificados como centrais, permitindo flexibilidade e garantindo robustez ao estudo.

Fonte: EUROPEAN COMMISSION *et al.* (2020).

De forma geral, o relatório conclui que veículos convencionais à combustão apresentam maiores emissões na fase operacional, enquanto as de veículos elétricos concentram-se na etapa de manufatura. Apesar disso, veículos elétricos, principalmente BEV, apresentam emissões significativamente menores do que outros tipos de veículos. Tais benefícios, no entanto, são dependentes de fatores regionais e operacionais, como a matriz energética do local de fabricação e as fontes de eletricidade no local de uso do veículo. Ademais, VE carregam uma parcela maior de emissões incorporadas durante as fases de produção e fim de vida quando em comparação com ICEV, principalmente em função dos materiais necessários à sua constituição.

O estudo destaca ainda que veículos à bateria resultarão em maiores benefícios ambientais apenas se puderem alcançar menores emissões durante fase de uso, diretamente relacionada ao consumo de eletricidade, de forma a compensar a alta demanda por recursos naturais na etapa de manufatura. Com efeito, a etapa de manufatura do BEV representa por volta da metade dos impactos totais estimados para essa categoria durante todo seu ciclo de vida, o que significa impactos em média 66% mais elevados quando em comparação com veículos que possuem outros tipos de transmissões propulsoras.

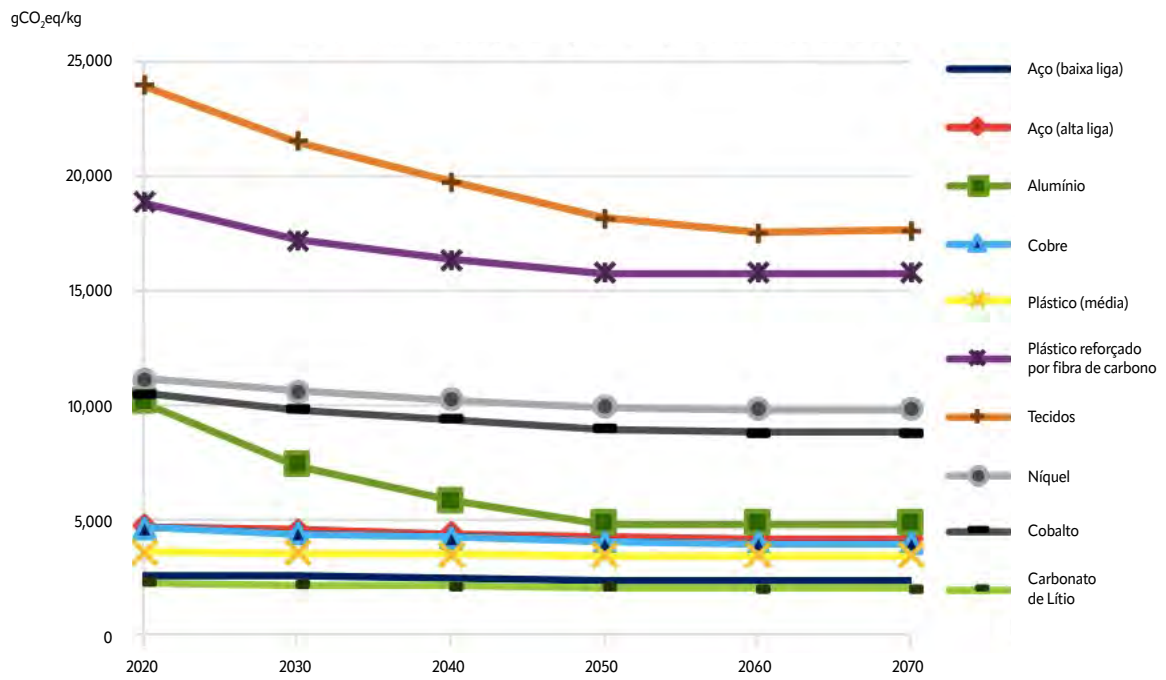
Em conjunto com dados detalhados de inventário de ciclo de vida, o relatório da Comissão Europeia traz os resultados de GWP para os principais materiais constituintes do glider. Dentre estes, materiais como aço (22,6% das emissões), tecidos

(18.4%), plástico (9,6%) e alumínio se destacam como mais intensos em carbono, resultado que se relaciona tanto ao volume de material empregado, quanto à aspectos produtivos da cadeia, como o consumo de eletricidade no caso do alumínio e dos tecidos. Nesse sentido, é apresentada também a evolução das emissões de GEE associadas a produção de um kg de material para produção de veículos e baterias, apresentada na **Figura 4.2**, que se refere ao cenário padrão para veículos de passageiros de porte pequeno e médio. Além disso, é destacado que as emissões de BEV associadas a fabricação da bateria responderiam por aproximadamente 45% das emissões totais da etapa de produção de veículos desse tipo.

Apesar de serem apresentados gráficos de GWP para todo o ciclo de vida de cada tipo de veículo simulado, separando etapas de produção, uso e fim de vida, o relatório não traz valores numéricos específicos para cada fase.

O documento também detalha a pegada de carbono por kg dos materiais, de forma que é possível observar que muitos dos materiais mais intensos em carbonos não apresentam emissões elevadas em decorrência da menor massa aplicada para a constituição do veículo, como no caso do magnésio, lítio e silicone, principais materiais emissores nessa categoria. Apesar disso, é destacado como alguns desses materiais são também cotados para integrar estruturas automotivas mais leves no futuro, como o alumínio, o plástico reforçado por fibra de carbono e o próprio magnésio, de forma que a proporção desses constituintes – de elevada emissão por unidade de massa – deve aumentar.

→| **Figura 4.2 – Cenário padrão de GWP por kg dos principais materiais utilizados na constituição de veículos e baterias**



Fonte: Adaptado de EUROPEAN COMMISSION *et al.* (2020).

4.2 Relatório “Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil” do ICCT

O relatório abordado nessa seção, especialmente relevante para o contexto brasileiro, foi publicado pelo ICCT (*The International Council on Clean Transportation*) em outubro de 2023, e traz as emissões de GEE associadas ao ciclo de vida de veículos leves para diferentes combinações de motorização e rotas produção de combustível. Para o cálculo da pegada de carbono, o estudo considerou desde a fabricação do veículo, incluindo a produção da bateria para veículos elétricos, até às emissões de manutenção e escapamento, que abrangem também aquelas decorrentes da produção de combustível e eletricidade. Os autores incluem ainda nas fronteiras do sistema as emissões associadas à mudança de uso da terra para a produção de etanol, além de processos de reciclagem do chassi e do trem de força do veículo. Dessa forma, o enfoque descrito corresponde às fronteiras do Poço à Roda e do Berço ao Túmulo. Destaca-se ainda o uso de uma abordagem consequential para o cálculo das emissões de mudança de uso da terra, refletindo impactos da economia de forma ampla.

Em relação aos veículos considerados, são comparados automóveis do tipo flex – movidos a etanol hidratado e gasolina

C, que contém uma mistura de etanol anidro – além de BEV, HEV, PHEV e FCEV, este último correspondendo aos elétricos movidos a célula de combustível a hidrogênio. Os veículos representativos dos três maiores segmentos de veículos no Brasil – compactos, médios e SUV compactos – são avaliados para ICEV e BEV, sendo os demais comparados apenas em segmentos específicos (HEV e PHEV para carros médios e FCEV no caso de SUV compactos). A **Tabela 4.1** apresenta a potência e o peso assumidos para cada veículo considerado.

Em relação à vida útil do veículo, o estudo ressalta que segundo dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação de 2020, 50% dos veículos no Brasil permanecem em uso por aproximadamente 23 anos, de forma que foi assumida uma vida útil de 22 anos, que correspondem à 288.000 km de quilometragem acumulada. Além disso, a unidade funcional adotada foi de 1 km.

Para a bateria é assumida uma energia específica de 148 Wh/kg, da qual é derivado o peso do conjunto de baterias que compõe a estrutura dos veículos elétricos. Além disso, para a esti-

Tabela 4.1 – Características dos veículos representativos adotados para cada segmento

| Segmento | Tipo de motorização | Potência do motor (kW) | Peso em ordem de marcha (kg) |
|--------------|---------------------|------------------------|------------------------------|
| Compacto | ICEV flex | 66 | 1.039 |
| | BEV | 100 | 1.455 |
| Médio | ICEV flex | 80 | 1.100 |
| | HEV | 95 | 1.415 |
| | PHEV | 169+65 | 1.390 |
| | BEV | 116 | 1.390 |
| SUV compacto | ICEV flex | 87 | 1.261 |
| | BEV | 110 | 1.708 |
| | FCEV | 120 | 1.814 |

Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

Fonte: MERA *et al.* (2023).

mativa da pegada de carbono associada à fabricação da bateria, é adotado um fator de emissão de 67 kg de CO₂eq./kWh de capacidade da bateria, extraído de Bieker Georg (2021), para uma química do tipo NMC e ponderada a partir repartição da produção global em 2022 entre os cinco principais países/regiões – China (76%), Estados Unidos (7%), União Europeia (7%), Japão (5%) e Coreia do Sul (5%) – e suas respectivas intensidades de carbono segundo o modelo GREET. Em relação

à vida útil das baterias, foi assumido, com base em premissas para baterias de íon-lítio de última geração, que estas durariam mais que a vida útil do veículo, apresentando 90 a 95% da capacidade original mesmo após 3 mil ciclos completos de carga e descarga rápidas, correspondendo a uma quilometragem de até 1.200.000 km, com base em Harlow et al. (2019). A Tabela 4.2 apresenta a capacidade da bateria assumida para veículos BEV e PHEV em 2023.

Tabela 4.2 – Capacidade da bateria assumida para veículos do tipo BEV e PHEV

| Segmento | Tipo de motorização | Capacidade bruta (kWh) |
|--------------|---------------------|------------------------|
| Compacto | BEV | 50 |
| Médio | PHEV | 10 |
| | BEV | 41 |
| SUV compacto | BEV | 66 |

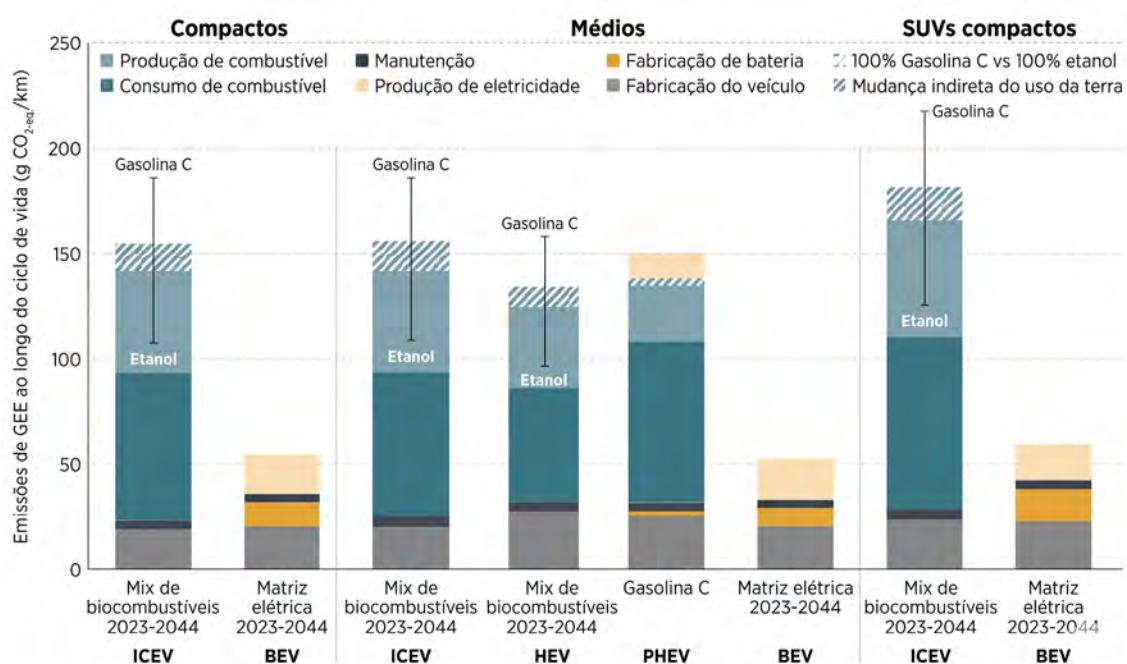
Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

Fonte: Mera et al. (2023).

Os resultados do estudo são apresentados na **Figura 4.3**, com as barras de erro indicando a operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo). Segundo os autores, as emissões do BEV são potencialmente 67% mais baixas do que do ICEV flex movido a gasolina C e

65% menores no caso de utilização do etanol. Por outro lado, HEV apresentaram emissões 14% mais baixas que do ICEV quando empregadas as mesmas proporções de combustíveis, enquanto PHEV resultam em emissões apenas 3% menores do que a dos veículos a combustão.

Figura 4.3 – Emissões de ciclo de vida de GEE de ICEVs flex e BEVs dos segmentos compacto, médio e SUV compacto, bem como de HEVs e PHEVs do segmento médio, comercializados no Brasil em 2023



Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; PHEV: Veículos Elétricos Híbridos Plug-in; BEV: Veículos Elétricos a Bateria.

Fonte: Mera et al. (2023).

Os valores obtidos pelo ICCT para as emissões de ciclo de vida de veículos do tipo BEV são bem inferiores às dos demais tipos considerados. Para fins de comparação, Gauto et al. (2023), avaliando emissões do poço à roda de veículos ICEV e BEV no Brasil, obteve valores menos discrepantes entre essas duas alternativas de motorização. Enquanto no estudo do ICCT a pegada de carbono média calculada para carros compactos e médios ICEV foi de 107 g CO₂eq./km e para BEV 55 g CO₂eq./km, em Gauto et al. (2023) esses valores ficaram em torno de 121 g CO₂eq./km para o ICEV e 105 g CO₂eq./km para o BEV. Em ambos os casos foi considerado o ICEV movido a etanol hidratado e o BEV consumindo eletricidade da matriz brasileira.

A diferença entre estes resultados deve-se às premissas relacionadas à intensidade de carbono das etapas de produção e uso dos veículos e baterias. O ICCT considerou como fator de emissão do etanol uma mistura de biomassas de cana-de-açúcar e milho, assim como o efeito de mudanças indiretas no uso do solo, enquanto Gauto et al. (2023) considerou apenas etanol de cana-de-açúcar, sem efeitos de mudanças no uso do solo, argumentando que cadastros incluídos no RenovaBio não podem ser provenientes de áreas desmatadas.

No caso dos BEV, os primeiros consideraram a evolução da matriz elétrica brasileira entre 2023 e 2044, período no qual projeta-se um acréscimo da participação de energias renováveis, e uma consequente queda no fator de emissão da eletricidade, sendo que os segundos consideraram o consumo de eletricidade pelos veículos elétricos a partir da matriz de 2018, com

um fator de emissão fixo ao longo da vida útil dos veículos. Por outro lado, a vida útil do veículo assumida em Gauto et al. (2023) foi de 160.000 km, muito inferior ao valor de 288.000 km adotado pelo ICCT. Como discutido em capítulos anteriores, valores de vida útil mais elevados favorecem uma pegada de carbono menor para veículos elétricos quando a fase de uso é considerada, pois as emissões do Berço ao Portão e de fim de vida são menos representativas do todo neste caso.

Ademais, enquanto o ICCT assume, como mencionado, um fator de emissão de 67 kg de CO₂eq./kWh para a fabricação da bateria, Gauto et al. (2023) adota para este mesmo parâmetro o valor de 114,5 kg CO₂eq./kWh, estabelecido com base em uma revisão de literatura. Ainda em relação às emissões da fase de produção dos veículos, Gauto et al. (2023), diferentemente do ICCT, inclui emissões decorrentes da instalação de infraestrutura de recarga de veículos elétricos.

Assim, pode-se dizer que mesmo estudos que adotam o mesmo escopo geográfico e escolhas de veículos e combustíveis semelhantes ainda podem divergir significativamente sobre a quantificação de emissões de ciclo de vida, chegando a conclusões diferentes sobre a melhor alternativa tecnológica para o Brasil. O contraste entre os resultados ilustra o efeito do escopo temporal na realização de um estudo de ACV, principalmente no caso das emissões da fase de uso de BEV, para os quais a evolução do fator de emissão da eletricidade ao longo de sua vida útil é um fator determinante para a quantificação de emissões de GEE.

4.3 Ferramentas setoriais

Conforme discutido anteriormente, os estudos de ACV de veículos leves carecem de padronização e diferem quanto a adoção de aspectos importantes, como a cobertura geográfica, temporal e tecnológica. Isso significa que os resultados obtidos por esses estudos são válidos apenas para premissas e contornos específicos e não permitem extrapolações para outras realidades.

Para suprir essa necessidade, pesquisadores de instituições da Europa e América do Norte desenvolveram ferramentas capazes de customizar parâmetros sensíveis de maneira a fornecer um panorama completo dos impactos ambientais de veículos leves ao longo de todo o seu ciclo de vida, apoiando a tomada de decisão de fabricantes, reguladores e consumidores em geral. O presente relatório mapeou as seguintes ferramentas: GREET (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2023), Green NCAP 2022 (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023) e Calculator (PAUL SCHERRER INSTITUT, 2024).

Até o momento, não foram identificadas ferramentas similares em nível nacional que forneçam informações com o enfoque no ciclo de vida do veículo. No entanto, considerado o escopo do Poço à Roda, o Brasil dispõe da RenovaCalc (ANP, 2020), a calculadora da intensidade de carbono de biocombustíveis da Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio, lei nº 13.576/2017).

Entre as vantagens dessas ferramentas, destaca-se a abordagem padronizada e consistente para ACV de veículos, o que facilita a comparação entre diferentes tecnologias e cenários. Além disso, as ferramentas ampliam o número de usuários para além dos especialistas em ACV, economizam tempo na condução de estudos tradicionais e garantem maior confiabilidade e credibilidade aos resultados obtidos. No entanto, as ferramentas disponíveis ainda são pouco customizáveis

quando se considera o recorte do Berço ao Portão, geralmente apresentando dados de emissões limitados para as fases de produção de veículos e seus componentes e muitas vezes não refletindo de maneira adequada as especificidades de cada região (MEHTA *et al.*, 2023). Por exemplo, a maioria dessas ferramentas só permite avaliar diferentes mix de eletricidade durante a fase de uso do veículo, deixando de lado outras etapas relevantes do ciclo de vida. A seguir, é apresentado um resumo das principais ferramentas mapeadas.

▲ 4.3.1 GREET vehicle-cycle model

Para obter uma imagem completa dos impactos energéticos e ambientais das tecnologias de transporte, os pesquisadores do *Argonne National Laboratory* desenvolveram, em 1995, a ferramenta de avaliação do ciclo de vida chamada GREET (do inglês, *Greenhouses gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies*).

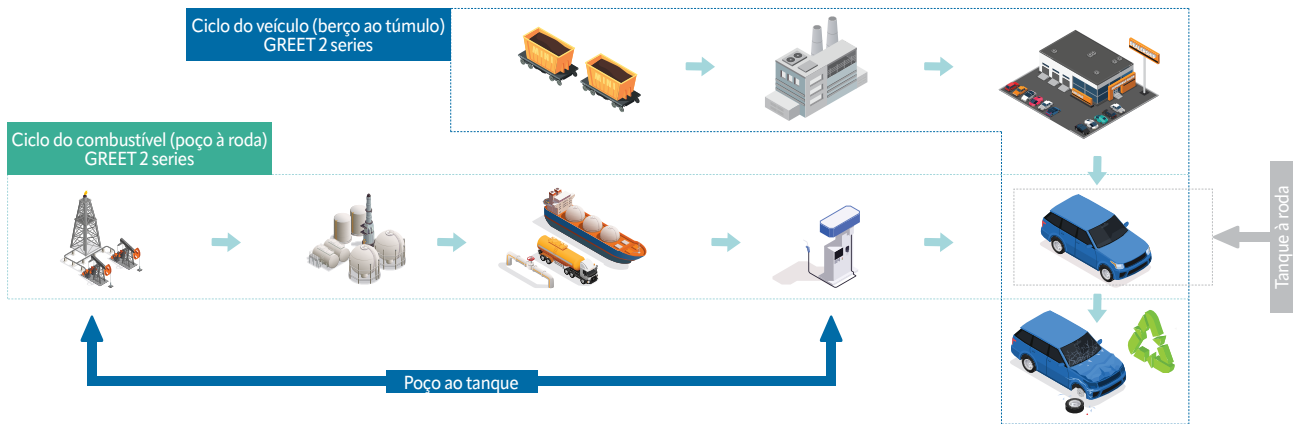
Com atualizações anuais desde o seu lançamento, o GREET se consolidou como uma das ferramentas de ACV relacionadas ao transporte e ao setor de energia mais utilizadas no mundo, com mais de 50.000 usuários. A ferramenta pode ser usada para orientar a tomada de decisão, pesquisa e desenvolvimento, bem como a formulação de instrumentos regulatórios.

Originalmente, o GREET apresentava como foco a análise do ciclo de vida dos combustíveis, em uma perspectiva do Poço à Roda. Somente em 2006, a ferramenta ganhou um modelo para a análise do ciclo de vida do veículo, passando a examinar o uso de energia e os impactos ambientais dos processos de produção e descarte de veículos, incluindo as etapas de recuperação e extração de matéria-prima, processamento e fabricação de materiais, produção de componentes de veículos, montagem de veículos e descarte e reciclagem de veículos –

ou seja, tendo a partir daí do Berço ao Túmulo como fronteira (BURNHAM; WANG; WU, 2006). A **Figura 4.4** apresenta um

esquema dos dois modelos – GREET 1 "Fuel-cycle" e GREET 2 "Vehicle-cycle" – disponíveis na versão Excel da ferramenta⁶.

→ **Figura 4.4 – Os modelos do GREET e as diferentes fronteiras consideradas**



Fonte: Adaptado de BURNHAM; WANG; WU (2006).

A versão mais recente do modelo de GREET 2, foi atualizada para incluir três tipos de veículos: veículos de passeio (passenger cars), veículos esportivos (SUV – Sport Utility Vehicle) e picapes (PUT – pick-up truck), além de cinco tecnologias de propulsão de veículos: combustão interna (ICEV), híbrido (HEV), híbrido plug-in (PHEV), elétrico a bateria (BEV) e célula de combustível (FCV) com configuração híbrida. Para os veículos eletrificados, é possível customizar o tipo de bateria Ni-MH ou Li-Ion e a composição do cátodo, incluindo as baterias do tipo NMC, LFP e LMO.

O GREET 2 "Vehicle-cycle" permite avaliar quatro categorias de impactos ambientais: pegada de carbono (emissões de GEE do ciclo de vida), consumo de água, uso de energia e emissões de poluentes atmosféricos, comparando o desempenho ambiental das diferentes tecnologias de motorização para um determinado tipo de veículo e composição de materiais e componentes. A **Figura 4.5** sumariza os modelos de veículos e os impactos ambientais que podem ser avaliados pela ferramenta:

→ **Figura 4.5 – O modelo GREET 2 e os diferentes veículos e impactos ambientais avaliados**



Fonte: Elaboração própria.

⁶ Mais informações em: <https://greet.anl.gov/index.php>.

Berço ao Túmulo. Com a ferramenta, é possível avaliar os impactos de mudanças climáticas e o consumo energético (demanda de energia primária) de mais de 30.000 modelos de veículos de diferentes marcas e modelos disponíveis no mercado europeu (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023).

O usuário consegue comparar até três veículos simultaneamente, além de personalizar alguns poucos parâmetros como quilometragem anual percorrida (de 5.000 a 50.000 km) e país (27 países da UE e Reino Unido). Dentre as tecnologias de motorização dos modelos disponíveis, tem-se: o ICEV, HEV, BEV e FCEV com baterias de íons de lítio provenientes da Europa (56%), China (31%) e EUA (13%) (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023).

A ferramenta considera como padrão uma vida útil de 240.000 km, percorridos em no máximo 16 anos. O mix de energia va-

ria de acordo com o país escolhido e os valores baseiam-se na previsão de mudança do mix energético durante os 16 anos de vida útil dos veículos, em um horizonte de 2020 até 2050.

Os resultados de emissões de GEE e demanda energética são apresentados tanto por 1 km rodado como por valores absolutos de um veículo ao longo de sua vida útil (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023). De acordo com o Green NCAP, o desempenho ambiental dos veículos varia principalmente em relação a três fatores: (i) peso do veículo; (ii) capacidade da bateria e (iii) eficiência energética por quilômetro rodado. Ainda segundo as análises do consórcio, a produção da bateria apresenta uma influência significativa nos resultados dos veículos eletrificados BEV e PHEV. Já para os ICEV, a principal contribuição está concentrada na fase de uso (JUNGMEIER; CANELLA; SCHWARZINGER, 2023).

4.4 Estudos de montadoras

Como mencionado na introdução deste documento, a ACV já é uma ferramenta amplamente utilizada pelas montadoras para o desenvolvimento de produtos alinhados com as metas climáticas empresariais, sendo especialmente útil para a comparação da performance ambiental do portfólio de veículos de cada fabricante. Apesar de estudos da literatura cinza não terem o mesmo nível de rigor dos da literatura acadêmica, as próprias diretrizes para a realização de ACV, padronizadas pelas normas ISO 14044:2006 e ISO 14040:2006, são bastante abrangentes, permitindo que fabricantes de veículos que realizem ACV de acordo com estas normas obtenham resultados relevantes,

principalmente considerando a maior disponibilidade de dados primários ao longo de sua própria cadeia de suprimentos.

Os estudos de ACV resumidos a seguir, realizados pela Volvo, BMW, Renault e Toyota, consideram na sua maioria um escopo do Berço ao Túmulo. No entanto, será dado enfoque na análise dos resultados a partir de um escopo do Berço ao Portão, dado que este é o foco do presente trabalho. A Tabela 4.3 a seguir consolida os principais resultados obtidos pelas montadoras, discutidos em maior profundidade nos itens subsequentes.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos pelas montadoras, do Berço ao Portão

| Montadora | Mix elétrico do Berço ao Portão | Tipos de veículos | Ano | Resultados t CO ₂ eq./veículo | Principais conclusões |
|-----------|---------------------------------|-------------------|------|--|---|
| Volvo | Média Global | ICEV, BEV | 2021 | ICEV – 15,7 BEV – 25,5 | Caso o mix elétrico fosse considerado como uma média da Europa, as emissões seriam 17% menores. |
| BMW | Europa | ICEV, BEV | 2023 | ICEV – 11,1 BEV – 17,0 | As emissões seriam 13,5% maiores para o ICEV se o alumínio utilizado na sua produção fosse de origem exclusivamente primária, e se a energia consumida no processamento deste metal não fosse renovável. |
| Renault | Europa | ICEV | 2017 | ICEV – 5,4 | A Renault avaliou o efeito de se alocar aos veículos emissões referentes à construção das fábricas que realizam a fase de montagem, e também o efeito de se dobrar a distância de transporte logístico na cadeia de suprimentos. Para ambas as análises, o acréscimo de emissões foi bem menor do que 1%. |
| Toyota | Japão | ICEV, HEV, FCEV | 2015 | FCEV e HEV, respectivamente, possuem emissões 5% e 40% maiores do que o ICEV | As emissões da fase de montagem representaram em torno de um terço das emissões totais do Berço ao Portão, um percentual bem superior aos demais estudos. Isto se deve, pois, a Toyota considerou tanto a montagem do veículo final, quanto a dos sistemas dos veículos por parte de seus fornecedores. |

Nota: ICEV: Veículos com Motor de Combustão Interna; HEV: Veículos Elétricos Híbridos; BEV: Veículos Elétricos a Bateria; FCEV: Veículos Elétricos a Célula de Combustível.

Fonte: Elaboração própria.

• Volvo

A Volvo lançou, em 2019, uma meta, alinhada ao Acordo de Paris, de reduzir a pegada de carbono de seus veículos em 40% entre 2018 e 2025. Assim, a fabricante realizou em 2020 e 2021 dois estudos de ACV analisando o impacto em termos de potencial de aquecimento global de três de seus veículos, o XC40 ICE, o XC40 Recharge e o C40 Recharge, sendo o primeiro a combustão interna e os outros elétricos a bateria.

A unidade funcional adotada foi de um veículo para cada modelo, considerando uma vida útil de 200.000 km. O escopo adotado pela Volvo foi do Berço ao Túmulo, incluindo as fases de extração de matéria-prima, fabricação de componentes, montagem de veículos, produção e consumo de combustíveis e eletricidade, e fim de vida.

Para a fase de extração e fabricação de materiais e componentes, fatores de emissão refletindo médias globais foram utilizados, considerando somente materiais primários, com base na biblioteca Ecoinvent. Quando certos materiais não pude-

ram ser corretamente identificados na biblioteca em questão, sendo o caso para determinados tipos de polímeros, a Volvo adotou uma premissa conservadora, considerando o maior fator de emissão identificado para o tipo de material ao qual o elemento não identificado pertence. A pegada de carbono da fabricação de baterias de íons de lítio foi realizada pelos fornecedores da montadora, seguindo um escopo do Berço ao Portão. O cálculo das emissões referentes à montagem dos veículos foi realizado de acordo com a média de eletricidade, calor e combustíveis consumidos com base em dados primários referentes à cada unidade da Volvo. Para a fase de uso dos veículos elétricos, foram considerados: um mix de eletricidade referente à média global; um para a União Europeia; e outro para energia 100% renovável de fonte eólica.

Os resultados mostram que, para todas as condições estabelecidas na fase de uso, os modelos elétricos tiveram menor pegada de carbono do que o veículo à combustão. As emissões para cada modelo separadas em suas fases encontram-se na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 – Emissões do Berço ao Túmulo de veículos da Volvo, em t CO₂eq./veículo

| Veículo (mix energético na fase de uso) | Extração e processamento de materiais | Produção de baterias | Montagem de veículos | Fase de uso | Fim de vida | Total |
|---|---------------------------------------|----------------------|----------------------|-------------|-------------|-----------|
| C40 Recharge (global) | 18 | 7 | 1,4 | 24 | 0,5 | 50 |
| C40 Recharge (EU-28) | 18 | 7 | 1,4 | 16 | 0,5 | 42 |
| C40 Recharge (eólica) | 18 | 7 | 1,4 | 0,4 | 0,5 | 27 |
| XC40 Recharge (global) | 17 | 7 | 1,5 | 28 | 0,5 | 54 |
| XC40 Recharge (EU-28) | 17 | 7 | 1,5 | 18 | 0,5 | 44 |
| XC40 Recharge (eólica) | 17 | 7 | 1,5 | 0,4 | 0,5 | 27 |
| XC40 ICE (gasolina E5) | 14 | - | 1,7 | 43 | 0,6 | 59 |

Fonte: Adaptado de Volvo (2021).

Considerando as emissões do Berço ao Portão, os modelos elétricos apresentaram emissões 70% maiores do que para veículos convencionais. Os materiais que tiveram maior participação foram o alumínio e aqueles associados ao módulo das baterias elétricas, cada um representando em torno de 30% do total. Para o veículo a combustão interna, ferro e aço representaram 35% do total, seguidos pelo alumínio, com 34%. Nota-se que a maior presença do alumínio em relação ao aço no sistema estrutural dos veículos elétricos os torna mais emissores do que os convencionais na fase de processamento de materiais, devido ao maior fator de emissão do alumínio. O estudo da Volvo conclui que as emissões do Berço ao Portão de veículos elétricos tornam-se cada vez mais representativas à medida em que a eletricidade com que são abastecidos na

fase de uso torna-se menos intensa em carbono. Nesse sentido, para a redução das emissões de processamento de materiais e produção das baterias, a Volvo realizou uma análise de sensibilidade considerando o efeito da realização destas fases na Europa, com cadeias de fornecimento locais, ao invés da premissa inicial do estudo que utiliza médias globais, concluindo que as emissões destas fases podem reduzir-se em 17%.

• BMW

A BMW realizou estudos de ACV para os veículos 520i e i5 eDrive40, ambos modelos produzidos em 2023, sendo o primeiro a combustão interna, e o segundo elétrico a bateria. O escopo adotado foi o mesmo escolhido pela Volvo, como discutido anteriormente, considerando

as emissões de Berço ao Túmulo para ambos os modelos.

Apesar do estudo de referência da BMW não ser tão detalhado quanto o da Volvo, não tendo incluído, por exemplo, detalhes sobre o inventário de ciclo de vida utilizado, a fabricante alemã adotou premissas similares às da montadora sueca. Ambas utilizaram a mesma unidade funcional para a ACV, considerando um veículo com vida útil de 200.000 km e com consumo extraídos do banco de dados do *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure* (WLTP), além de considerarem o mesmo tratamento para a fase de fim de vida.

Ao contrário da Volvo, a BMW optou por adotar tanto quanto possível dados primários para as fases de extração e processamento de materiais, considerando a utilização de materiais reciclados e de fontes energéticas renováveis, quando aplicáveis, ao longo de sua cadeia de suprimentos.

O resultado obtido pela BMW, em relação às emissões na fase de montagem de ambos os modelos, foi 0,7 t CO₂eq., menores do que as encontradas pela Volvo nesta mesma fase, que foi de 1,4 t CO₂eq. para o modelo elétrico e de 1,7 t CO₂eq. para o veículo a combustão. Para a fase de extração e processamento de materiais, a fabricante alemã obteve valores de 10,4 t CO₂eq. para o modelo a combustão e 16,3 t CO₂eq. para o elétrico. Estes valores também são menores do que os obtidos pela fabricante sueca para a mesma fase, que foram de 14 t CO₂eq. para o veículo a combustão e de 25 t CO₂eq. para o veículo elétrico.

A diferença entre os resultados obtidos pela BMW e a Volvo para as mesmas fases da ACV pode ser entendida do ponto de vista da diferença entre os inventários de ciclo de vida escolhidos. A Volvo optou por utilizar dados da bibliotecaecoinvent, ou seja, dados secundários, com fatores de emissão de materiais refletindo médias globais, e sem considerar a utilização de materiais reciclados na produção dos veículos. Já a BMW optou por incluir tanto quanto possível dados primários para avaliar as emissões de Berço ao Portão, incluindo maior consumo de fontes energéticas renováveis e materiais reciclados. Esta escolha da fabricante alemã pode ajudar a explicar os valores menores obtidos para as emissões do Berço ao Portão de seus veículos em comparação com a montadora sueca.

Além dos resultados principais, a BMW também realizou uma análise de sensibilidade, avaliando os efeitos da utilização de materiais reciclados e fontes energéticas renováveis nos resultados da ACV. Para o veículo a combustão interna, caso não fosse considerado um percentual de consumo de alumínio reciclado nos veículos, e nem o efeito da produção de alumínio primário a partir de fontes renováveis, as emissões da fase de extração e processamento de materiais seria de 12,6 t CO₂eq.,

ao contrário do valor obtido no cenário base, de 11,1 t CO₂eq. No mesmo sentido, a análise de sensibilidade conduzida pela Volvo, ao avaliar o efeito de utilizar fatores de emissão europeus ao invés de globais na fase de extração e processamento de materiais, mostrou que as emissões neste caso seriam 17% menores, ou seja, de 11,6 t CO₂eq. ao invés de 14 t CO₂eq. considerado no cenário base. Portanto, ambas as análises de sensibilidade conduzidas de maneira independente pelas fabricantes ressaltam a importância de se adotar dados que melhor reflitam a realidade das respectivas cadeias de valor.

A análise conduzida pela BMW destaca, por último, a importância de se produzir as células das baterias elétricas automotivas a partir de fontes renováveis, que foi o cenário base adotado pela montadora. Caso as células fossem produzidas a partir de mix energéticos regionais, o i5 eDrive40 apresentaria emissões, do Berço ao Portão, 11,7% maiores.

• Renault

Em 2017, a Renault realizou um estudo de ACV comparando os modelos a combustão interna Mégane III, produzido a partir de 2008, e Mégane IV, cuja produção iniciou-se em 2016. No intuito de comparar a evolução dos veículos em termos de performance ambiental, foram avaliados diversos impactos ambientais, dentre eles o potencial de aquecimento global. Assim como os estudos anteriores, a unidade funcional adotada foi de um veículo para cada modelo, sendo a vida útil de 10 anos e percorrendo 150.000 km neste período, de acordo com o padrão *New European Driving Cycle*.

O escopo da ACV realizada compreende as fases de produção, uso e fim de vida, da mesma forma que os estudos anteriores. O software utilizado para a avaliação dos impactos foi o Gabi, versão 6.0. Em relação ao inventário de ciclo de vida utilizado na fase de produção, a Renault considerou a fase de extração e processamento de matérias-primas como sendo realizada majoritariamente na Europa. A fabricação dos veículos foi realizada apenas com materiais virgens, e o transporte de materiais até as fábricas foi considerado como sendo realizado apenas por caminhões, com uma distância média de 2.000 km até as unidades produtivas.

Os resultados obtidos pela Renault na fase do Berço ao Portão em termos de emissões de GEE é quase idêntico para ambos os modelos, sendo 5,4 t CO₂eq. A vantagem do Mégane IV em relação ao III se dá na fase de uso, na qual sua maior eficiência energética acarreta emissões do Berço ao Túmulo 14,1% menores do que o seu antecessor.

Em relação às emissões do Berço ao Portão, a extração e processamento de metais e polímeros responde por mais de 80% das emissões de GEE, sendo que a montagem e o transporte

logístico representam juntos menos de 20%. O valor obtido pela Renault, de 5,4 t CO₂eq, é aproximadamente metade dos obtidos pela BMW e um terço dos da Volvo. Estas diferenças podem ser explicadas, além das premissas da ACV em termos dos inventários utilizados, pelo fato de que o Renault Mégane IV pesa 1302 kg, um valor bem menor do que os 1690 kg do Volvo XC40 ICE e os 1800 kg do BMW 520i.

Adicionalmente, a Renault conduziu uma análise de sensibilidade para avaliar as emissões do Berço ao Portão caso as emissões referentes à construção das unidades produtivas fossem alocadas aos veículos, e de se dobrar a distância média do transporte logístico das matérias-primas de 2000 km para 4000 km. Em ambos os cenários, avaliados independentemente, os impactos representaram um acréscimo bem menor de 1% do cenário base, e por isso a Renault concluiu que as incertezas relacionadas à quantificação destas variáveis não são relevantes para a análise.

• Toyota

A Toyota efetuou, em 2015, um estudo de ACV comparando três modelos de veículos no segmento premium, com diferentes tipos de motorização, sendo o primeiro a combustão interna, o segundo híbrido e o terceiro a hidrogênio. Foram avaliadas três categorias de impacto ambiental, incluindo o potencial de aquecimento global. A unidade funcional adotada foi um veículo de cada modelo, com a mesma vida útil, de 10 anos, e quilometragem percorrida de 100.000 km, considerando um ciclo de condução japonês (JC08), e 150.000 km para o *New European Driving Cycle*.

O estudo da fabricante japonesa adotou um escopo do Berço ao Túmulo, sendo que na fase do Berço ao Portão foram consideradas as fases de extração e processamento de matérias-pri-

mas, montagem dos veículos e transporte logístico. O inventário de ciclo de vida utilizado variou de acordo com o escopo geográfico, pois a análise foi conduzida tanto para condições do Japão, quanto da Europa. Para o primeiro, o inventário utilizado foi o JICA, que adota uma cadeia de suprimentos japonesa para avaliar os fatores de emissão das matérias-primas. No escopo europeu, o inventário utilizado foi o GaBi4.

Os resultados obtidos pela Toyota em termos de emissões de GEE são relativos, e não absolutos, não sendo possível compará-los com resultados de demais montadoras. As emissões do Berço ao Portão dos veículos híbridos e a hidrogênio foram, respectivamente, em torno de 5% e 40% maiores do que o veículo a combustão interna. Para os híbridos, as maiores emissões em relação ao veículo convencional referem-se à bateria elétrica, enquanto para os veículos a hidrogênio este aumento ocorre devido ao tanque de armazenamento de hidrogênio, que é composto por polímeros especiais e fibra de carbono, sendo que ambos apresentam elevado fator de emissão.

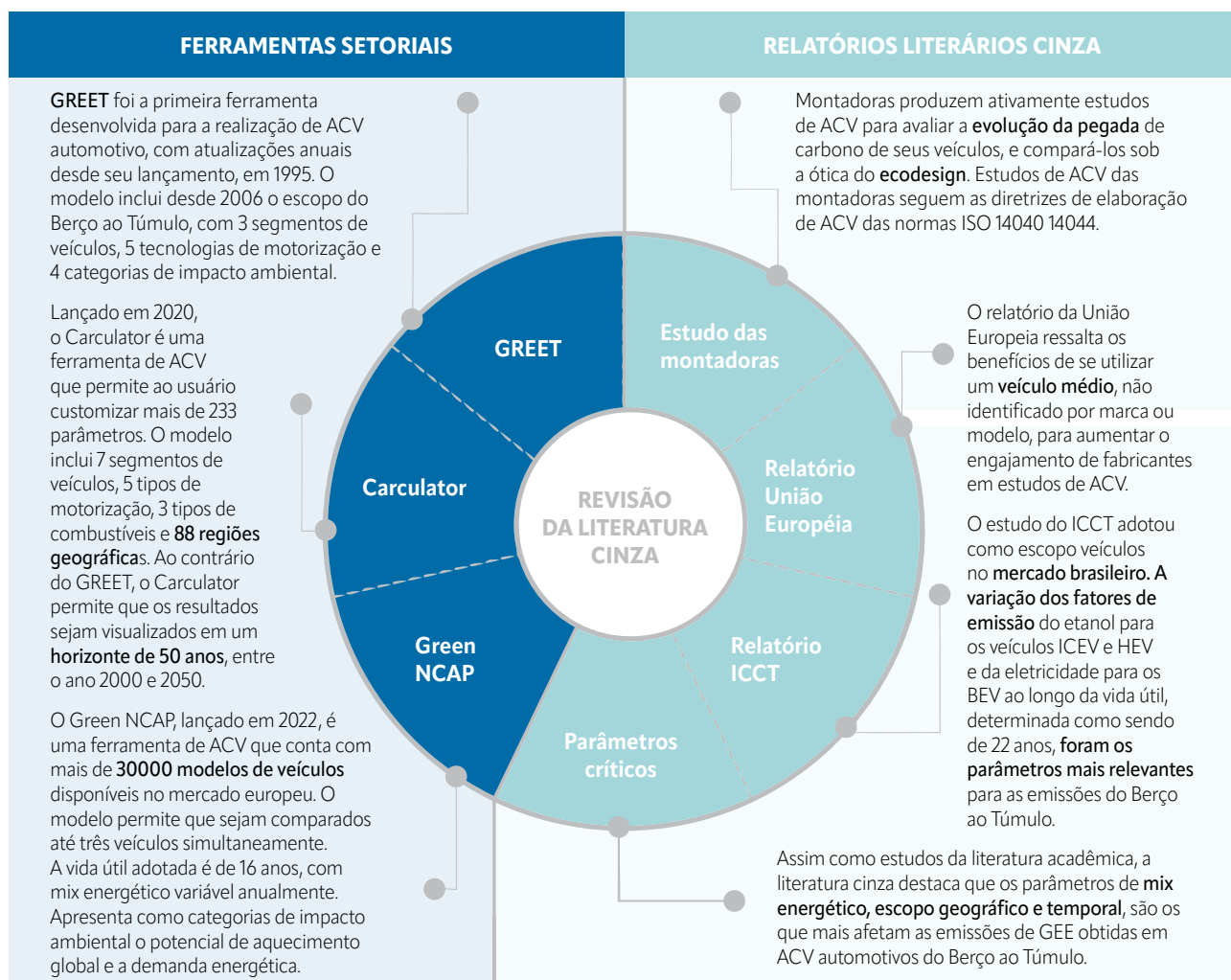
Em contraste com os demais estudos de montadoras, a ACV realizada pela Toyota apresentou elevada participação da fase de montagem dos veículos nas emissões Berço ao Portão. Para os três modelos de veículos avaliados, as emissões de montagem representaram em torno de um terço das emissões do Berço ao Portão, enquanto para nenhum dos estudos anteriores esta fase representou mais de 15% das emissões. Uma possível causa para este contraste é que a Toyota inclui na fase de montagem tanto a fabricação do produto final, quanto a montagem dos demais sistemas do veículo por parte de seus fornecedores, sendo que estas emissões foram alocadas junto com a fase de extração e processamento de matérias-primas nos estudos avaliados anteriormente.

4.5 Contribuições para o projeto "Do berço ao portão"

A revisão da literatura cinza complementa os estudos da literatura acadêmica, trazendo pontos de vista de organizações importantes dentro do ecossistema de estudos de ACV, e destacando as principais ferramentas e softwares

para a realização de avaliações de ciclo de vida automotivos. A Figura 4.7 sintetiza os principais aspectos das ferramentas setoriais e os principais resultados obtidos nos estudos da literatura cinza.

→| **Figura 4.7 – Resumo das ferramentas setoriais e estudos da literatura cinza**



Fonte: Elaboração própria.

Em resumo, os estudos da literatura cinza corroboram e complementam muitos dos resultados da literatura acadêmica. É possível observar um engajamento crescente de diversos stakeholders, públicos e privados, na realização de trabalhos e ferramentas de

ACV no intuito de melhor dimensionar impactos ambientais e definir os parâmetros críticos que mais afetam a performance ambiental de veículos leves, refletindo a demanda global para a transição para setores de transporte de baixo carbono.



5. Considerações finais

Este relatório realizou uma análise do estado da arte dos principais estudos nacionais e internacionais relacionados à ACV e pegada de carbono de veículos leves. Por meio de uma extensa revisão bibliográfica, foi possível avaliar 58 artigos científicos, 2 relatórios de instituições internacionais, 3 ferramentas e 4 estudos de ACV publicados por montadoras. Os resultados obtidos oferecem uma visão geral do conhecimento existente na literatura, destacando as variações entre os diferentes estudos e as lacunas de conhecimento, bem como parâmetros sensíveis e pontos críticos importantes para a análise da pegada de carbono. Vale destacar que esses resultados não são exaustivos e oferecem elementos para futuros aprofundamentos e discussões com o setor automotivo e os demais segmentos da sociedade.

De modo geral, o mapeamento da pegada de carbono revelou disparidades dependendo da tecnologia de motorização avaliada. Quando considerada a abordagem do Berço ao Túmulo, veículos BEV podem apresentar menores emissões em comparação com veículos ICEV, principalmente durante a fase de uso e em combinação com uma matriz elétrica mais renovável. No entanto, a grande maioria dos estudos desconsidera a substituição da bateria ao longo da vida útil do veículo, além de não detalhar outros parâmetros que podem também influen-

ciar o desempenho do veículo e principalmente sua pegada de carbono. É importante notar ainda que, quando consideradas apenas as emissões até a fabricação dos veículos (fronteira do Berço ao Portão), a produção das baterias para os veículos BEV responde por uma parcela significativa das emissões totais, de forma que as emissões de veículos exclusivamente à bateria resultam em emissões superiores às de veículos com motor de combustão, com a etapa de manufatura das baterias contribuindo com até 40% das emissões totais.

Além disso, materiais como aço e alumínio se destacam em termos de emissões associadas à fabricação do veículo. No caso de veículos eletrificados, os principais materiais contribuintes para as emissões da bateria estão associados à produção do material ativo do cátodo, como sulfato de cobalto e de níquel. Por fim, destaca-se a predominância de estudos internacionais e a escassez de informações aprofundadas e dados primários sobre a etapa de produção do veículo (e de baterias), com enfoque do Berço ao Portão. Assim, os resultados aqui apresentados evidenciam a importância de dados primários e transparentes no contexto nacional para garantir resultados mais consistentes e confiáveis, possibilitando comparações internacionais e reforçando a importância do Projeto “Do berço ao portão”.

Referências bibliográficas

- ABATE, E.; NEGUSSIE, Y.; GEBREHIWET, L. Identifying Standard SKD/CKD and Automotive Manufacturing Development Stage in Ethiopia. **International Journal of Research**, v. 10, n. 6, p. 265–294, 26 jun. 2023. Disponível em: <<https://ijrjournal.com/index.php/ijr/article/view/955>>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- 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**.
- AEA. **Cartilha Eletromobilidade: Veículos eletrificados**. Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, 2023.
- AEA, P. **Cartilha de Destinação de Materiais Veiculares AEA**. [s.l.: s.n.].
- AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. Comissão debate reciclagem de veículos no Brasil. **Agência Câmara de Notícias - Câmara dos Deputados**, 2022. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/900068-comissao-debate-reciclagem-de-veiculos-no-brasil/>>.
- AICHBERGER, C.; JUNGMEIER, G. Environmental Life Cycle Impacts of Automotive Batteries Based on a Literature Review. **Energies**, v. 13, n. 23, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/23/6345>>.
- ALRAMADHAN, D.; ALABDULJALEEL, S.; ALMULLA, D.; ALEISA, E. Multicriteria optimization for electric vehicles in an arid oil state based on a triple bottom line approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 27, n. 1, p. 138–156, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11367-021-02009-6>>.
- ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2023**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.anfavea.com.br>.
- ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **The GREET life-cycle model**. Disponível em: <https://greet.anl.gov/greet_2_series>.
- ARSHAD, F.; LIN, J.; MANURKAR, N.; FAN, E.; AHMAD, A.; TARIQ, M. un N.; WU, F.; CHEN, R.; LI, L. Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106164, 1 maio 2022.
- BAUER, C.; HOFER, J.; ALTHAUS, H. J.; DEL DUCE, A.; SIMONS, A. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. **Applied Energy**, v. 157, p. 871–883, 1 nov. 2015.
- BIEKER GEORG. White Paper: A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars - International Council on Clean Transportation. n. July, 2021.
- BLACK, F. A carroceria do seu carro é feita por máquinas de até 1.600 toneladas. **Quatro Rodas**, 2021a. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/a-carroceria-do-seu-carro-e-feita-por-maquinas-de-ate-1-600-toneladas>>.
- BLACK, F. Fabricação das tintas automotivas é tão complexa quanto a pintura. **Quatro Rodas**, 2021b. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/fabricacao-das-tintas-automotivas-e-tao-complexa-quanto-a-pintura>>.
- BMW. **BMW-Group-Report-2022-en**. 2022.
- BRASIL. **Federative Republic of Brazil Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement under the UNFCCC**. Disponível em: <[https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil First NDC 2023 adjustment.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil%20First%20NDC%202023%20adjustment.pdf)>.
- BRIGHT CONSULTING. **Bright Consulting Final Delivery - Projeto “Do berço ao portão” 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>>.
- BURNHAM, A.; WANG, M.; WU, Y. **Development and Applications of GREET 2.7-The Transportation Vehicle-Cycle Model**. [s.l.: s.n.].

Disponível em: <www.anl.gov>.

- CARVALHO, I. Como funciona uma linha de montagem de automóveis? **Quatro Rodas**, 2021. Disponível em: <<https://quatorodas.abril.com.br/noticias/como-funciona-uma-linha-de-montagem-de-automoveis/>>.
- CHEN, Q.; LAI, X.; GU, H.; TANG, X.; GAO, F.; HAN, X.; ZHENG, Y. Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 369, p. 133342, 1 out. 2022.
- CHEN, Y.; DING, Z.; LIU, J. Life Cycle Assessment of Environmental Emissions and Scenario Simulation of an Automotive Power Seat Considering Scrap Recycling. **Environmental Engineering Science**, v. 36, n. 10, p. 1349–1363, 2019.
- CHUL KIM, H.; LEE, S.; J. WALLINGTON, T. Cradle-to-Gate and Use-Phase Carbon Footprint of a Commercial Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery. **Environmental Science and Technology**, v. 57, n. 32, p. 11834–11842, 29 jul. 2023.
- CLIMATE WATCH. **Climate Watch - Historical GHG Emissions**.
- CNT. Anuário CNT do Transporte 2022: Estatísticas consolidadas. p. 1–25, 2022.
- COSTA, C. M.; BARBOSA, J. C.; CASTRO, H.; GONÇALVES, R.; LANCEROS-MÉNDEZ, S. Electric vehicles: To what extent are environmentally friendly and cost effective? – Comparative study by european countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 11548, 1 nov. 2021.
- COX, B.; BAUER, C.; MENDOZA BELTRAN, A.; VAN VUUREN, D. P.; MUTEL, C. L. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. **Applied Energy**, v. 269, p. 115021, jul. 2020.
- CUSENZA, M. A.; BOBBA, S.; ARDENTE, F.; CELLURA, M.; DI PERSIO, F. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 634–649, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619300678>>.
- DU, S.; GAO, F.; NIE, Z.; LIU, Y.; SUN, B.; GONG, X. Comparison of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Recycling Allocation Methods. **Environmental Science and Technology**, v. 56, n. 24, p. 17977–17987, 2022.
- EGESKOG, A.; HAGDAHL, K. H.; KREWER, C.; RÅDE, I.; BOLIN, L. Carbon Footprint Report. Battery Electric XC40 Recharge and the XC40 ICE. **Volvo Cars-Sustainability Center**, p. 1–42, 2020.
- 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.
- EPE. **Balanco Energético Nacional - Ano base 2022**. [s.l: s.n.].
- EUROPEAN COMMISSION; DIRECTORATE-GENERAL FOR CLIMATE ACTION; HILL, N.; AMARAL, S.; MORGAN-PRICE, S.; NOKES, T.; BATES, J.; HELMS, H. **Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCAPublications Office of the European Union**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://op.europa.eu/sv/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1>>.
- FAN, E.; LI, L.; WANG, Z.; LIN, J.; HUANG, Y.; YAO, Y.; CHEN, R.; WU, F. Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects. **Chemical Reviews**, v. 120, n. 14, p. 7020–7063, 22 jul. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00535>>.
- 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, n. July, p. 108126, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108126>>.
- FLEISCHMANN, J.; HANICKE, M.; HORETSKY, E.; IBRAHIM, D.; JAUTELAT, S.; LINDER, M.; SCHAUFUSS, P.; TORSCHT, L.; RIJT, A. Van De. Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. Battery demand is growing — and so is the need for. **McKinsey & Company**, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular#>.
- FORD. **Integrated Sustainability and Financial Report 2023**. [s.l: s.n.].
- GARCÍA, A.; MONSALVE-SERRANO, J.; MARTÍNEZ-BOGGIO, S.; RÜCKERT ROSO, V.; DUARTE SOUZA ALVARENGA SANTOS, N. Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles. **Renewable Energy**, v. 150, p. 58–77, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119319743>>.
- GAUTO, M. A.; CARAZZOLLE, M. F.; RODRIGUES, M. E. P.; DE ABREU, R. S.; PEREIRA, T. C.; PEREIRA, G. A. G. Hybrid vigor: Why hybrids with sustainable biofuels are better than pure electric vehicles. **Energy for Sustainable Development**, v. 76, p. 101261, 1 out. 2023.
- GM. **2022 Sustainability Report**. [s.l: s.n.].
- GUO, W.; FENG, T.; LI, W.; HUA, L.; MENG, Z.; LI, K. Comparative life cycle assessment of sodium-ion and lithium iron phosphate batteries in the context of carbon neutrality. **Journal of Energy Storage**, v. 72, 2023.
- HAO, H.; QIAO, Q.; LIU, Z.; ZHAO, F.; CHEN, Y. Comparing the life cycle Greenhouse Gas emissions from vehicle production in China

- and the USA: implications for targeting the reduction opportunities. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 5, p. 1509–1522, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10098-016-1325-6>>.
- HARLOW, J. E.; MA, X.; LI, J.; LOGAN, E.; LIU, Y.; ZHANG, N.; MA, L.; GLAZIER, S. L.; CORMIER, M. M. E.; GENOVESE, M.; BUTEAU, S.; CAMERON, A.; STARK, J. E.; DAHN, J. R. A Wide Range of Testing Results on an Excellent Lithium-Ion Cell Chemistry to be used as Benchmarks for New Battery Technologies. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 166, n. 13, p. A3031–A3044, 2019.
- HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Montpellier: Springer International Publishing, 2017. 1215 p.
- HAWKINS, T. R.; SINGH, B.; MAJEAU-BETTES, G.; STRØMMAN, A. H. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 1, p. 53–64, 1 fev. 2013. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- HIRZ, M.; NGUYEN, T. T. Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems. **World Electric Vehicle Journal 2022**, Vol. 13, Page 61, v. 13, n. 4, p. 61, 31 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2032-6653/13/4/61/htm>>. Acesso em: 10 ago. 2023.
- HONDA. **Honda Report 2023**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://global.honda/en/sustainability/integratedreport/pdf/Honda_Report_2023-en-all.pdf>.
- HOWARD, M.; SQUIRE, B. Modularization and the impact on supply relationships. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 27, n. 11, p. 1192–1212, 2007.
- HYUNDAI. **Hyundai Mobis: Life cycle assessment (LCA) Report 2022**. [s.l.: s.n.].
- IBICT. **Guia Geral para Avaliações do Ciclo de Vida Orientações Detalhadas**. [s.l.: s.n.]319 p.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Electric Vehicle Outlook 2023 - Catching up With Climate Ambitions**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf>>.
- ISO. **ISO 14067: Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication**. [s.l.: s.n.]
- JOSHI, A.; SHARMA, R.; BARAL, B. Comparative life cycle assessment of conventional combustion engine vehicle, battery electric vehicle and fuel cell electric vehicle in Nepal. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134407, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622039798>>.
- JUNGMEIER, G.; CANELLA, L.; SCHWARZINGER, S. **Estimated Greenhouse Gas Emissions and Primary Energy Demand of Passenger Vehicles – 2nd edition: Life Cycle Assessment Methodology and DataGreen NCAP**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.greenn-cap.com/wp-content/uploads/Green-NCAP-Life-Cycle-Assessment-Methodology-and-Data_2nd-edition.pdf>.
- KISS, B.; DINATO, R.; FERNANDES, M. **Experiências e reflexões sobre a gestão do ciclo de vida de produtos nas empresas brasileiras: Ciclos 2015 e 2016**. [s.l.: s.n.].
- LAI, X.; CHEN, Q.; TANG, X.; ZHOU, Y.; GAO, F.; GUO, Y.; BHAGAT, R.; ZHENG, Y. Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective. **eTransportation**, v. 12, p. 100169, 1 maio 2022.
- LAVIGNE PHILIPPOT, M.; COSTA, D.; CARDELLINI, G.; DE SUTTER, L.; SMEKENS, J.; VAN MIERLO, J.; MESSAGIE, M. Life cycle assessment of a lithium-ion battery with a silicon anode for electric vehicles. **Journal of Energy Storage**, v. 60, n. January, p. 106635, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106635>>.
- LLAMAS-OROZCO, J. A.; MENG, F.; WALKER, G. S.; ABDUL-MANAN, A. F. N.; MACLEAN, H. L.; POSEN, I. D.; MCKECHNIE, J. Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: A temporal, geographical, and technological perspective. **PNAS Nexus**, v. 2, n. 11, p. 1–16, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad361>>.
- MACARIO, I. Correio técnico: quantas peças ao todo tem um carro como o Chevrolet Onix? **Quatro Rodas**, 2021.
- MEHTA, R.; GOLKARAM, M.; VOGELS, J. T. W. E.; LIGTHART, T.; SOMEREN, E.; FERJAN, S.; LENNARTZ, J. BEVSIM: Battery electric vehicle sustainability impact assessment model. **Journal of Industrial Ecology**, v. 27, p. 1266–1276, 2023.
- MERA, Z.; BIEKER, G.; REBOUÇAS, A. B.; CIEPLINSKI, A. **Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://theicct.org/publication/comparacao-das-emissoes-de-gee-ao-longo-do-ciclo-de-vida-de-motores-de-combustao-flex-e-eletricos-veiculos-de-passageiros-brasil-oct23/>>.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1>>.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Estatísticas - Frota de Veículos - SENATRAN**.
- MOTOMURA, M. Como se fabrica um carro? **Super interessante**, 2011. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-se-fabrica-um-carro>>.
- NISSAN MOTOR CO. **ESG data book 2023**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.nissan-global.com/EN/SUSTAINABILITY/LIBRARY/SR/2023/ASSETS/PDF/ESGDB23_E_All.pdf>.

- ONAT, N. C.; KUCUKVAR, M.; TATARI, O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. **Applied Energy**, v. 150, p. 36–49, 15 jul. 2015.
- 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.
- PAUL SCHERRER INSTITUT. **Some facts about calculator**. Disponível em: <<https://calculator.psi.ch/>>. Acesso em: 3 mar. 2024.
- PETERS, J. F.; BAUMANN, M.; ZIMMERMANN, B.; BRAUN, J.; WEIL, M. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 491–506, 1 jan. 2017.
- PHILIPPOT, M.; ALVAREZ, G.; AYERBE, E.; VAN MIERLO, J.; MESSAGIE, M. Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs. **Batteries**, v. 5, n. 1, p. 23, 19 fev. 2019. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2313-0105/5/1/23>>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- PHILIPPOT, M.; COSTA, D.; HOSEN, M. S.; SENÉCAT, A.; BROUWERS, E.; NANINI-MAURY, E.; VAN MIERLO, J.; MESSAGIE, M. Environmental impact of the second life of an automotive battery: Reuse and repurpose based on ageing tests. **Journal of Cleaner Production**, v. 366, p. 132872, 15 set. 2022.
- QIAO, Q.; ZHAO, F.; LIU, Z.; JIANG, S.; HAO, H. Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China. **Applied Energy**, v. 204, p. 1399–1411, 15 out. 2017.
- RENAULT GROUP. **2022 - 2023 Integrated Report**. [s.l.: s.n.].
- SACCHI, R.; BAUER, C.; COX, B.; MUTEL, C. When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, n. April, p. 112475, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112475>>.
- SEEG. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa**.
- SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1699–1710, 1 out. 2008.
- SHAFIQUE, M.; AZAM, A.; RAFIQ, M.; LUO, X. Life cycle assessment of electric vehicles and internal combustion engine vehicles: A case study of Hong Kong. **Research in Transportation Economics**, v. 91, p. 101112, 1 mar. 2022.
- SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS. **Anuário do Sindipeças 2023**. [s.l.: s.n.].
- STELLANTIS NV. **Corporate Social Responsibility Report 2022**. [s.l.: s.n.].
- TAGLIAFERRI, C.; EVANGELISTI, S.; ACCONCIA, F.; DOMENECH, T.; EKINS, P.; BARLETTA, D.; LETTIERI, P. Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 112, p. 298–309, 1 ago. 2016.
- VELANDIA VARGAS, J. E.; FALCO, D. G.; DA SILVA WALTER, A. C.; CAVALIERO, C. K. N.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption evolution. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 10, p. 1878–1897, 1 out. 2019. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-019-01615-9>>. Acesso em: 9 ago. 2023.
- VELANDIA VARGAS, J. E.; SEABRA, J. E. A.; CAVALIERO, C. K. N.; WALTER, A. C. S.; SOUZA, S. P.; FALCO, D. G. The New Neighbor across the Street: An Outlook for Battery Electric Vehicles Adoption in Brazil. **World Electric Vehicle Journal**, v. 11, n. 3, p. 60, 11 set. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2032-6653/11/3/60>>. Acesso em: 1 dez. 2023.
- VERMA, S.; DWIVEDI, G.; VERMA, P. Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 49, p. 217–222, 1 jan. 2022.
- VOLVO CAR GROUP. **Annual and Sustainable Report 2022**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://vp272.alertir.com/afw/files/press/volvo-car/202303076447-1.pdf>>.
- WANG, M.; ELGOWAINY, A.; LU, Z.; BAEK, K.; BALCHANDANI, S.; BENAVIDES, P.; BURNHAM, A.; CAI, H.; CHEN, P.; GAN, Y.; GRACIDA-ALVAREZ, U.; HAWKINS, T.; HUANG, T.-Y.; IYER, R.; KAR, S.; KELLY, J.; KIM, T.; KOLODZIEJ, C.; LEE, K.; LEE, U.; LIU, X.; MASUM, F.; MORALES, M.; NG, C.; OU, L.; PODDAR, T.; REDDI, K.; SHUKLA, S.; SINGH, U.; SUN, L.; SUN, P.; SYKORA, T.; VYAWAHARE, P.; ZHANG, J. **Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies Model® (2023 .Net)**. United States. 2023. Disponível em: <<https://www.osti.gov/doi/code/biblio/113208>>.
- WOMACK, J.; JONES, D.; ROOS, D. **A máquina que mudou o mundo**. [s.l.: s.n.]. 336 p.
- XIA, X.; LI, P. A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. **Science of The Total Environment**, v. 814, p. 152870, 25 mar. 2022.
- XIE, J.-B. Evaluation of carbon footprint and energy input of internal combustion engine vehicles in China. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 42, n. 1, 2023.
- XIONG, S.; JI, J.; MA, X. Comparative Life Cycle Energy and GHG Emission Analysis for BEVs and PhEVs: A Case Study in China. **Energies**, v. 12, n. 5, p. 834, 3 mar. 2019.

- YANG, Y.; LAN, L.; HAO, Z.; ZHAO, J.; LUO, G.; FU, P.; CHEN, Y. Life Cycle Prediction Assessment of Battery Electrical Vehicles with Special Focus on Different Lithium-Ion Power Batteries in China. **Energies**, v. 15, n. 15, 2022.
- YANG, Z.; WANG, B.; JIAO, K. Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China. **Energy**, v. 198, p. 117365, 1 maio 2020.

Tabela A – Artigos avaliados na revisão da literatura acadêmica

| Autores | Título | Periódico | Ano |
|--|---|--|------------|
| García, A., Monsalve-Serrano, J., Martínez-Boggio, S., Roso, V. R., & Santos, N. D. S. A | Potential of bio-ethanol in different advanced combustion modes for hybrid passenger vehicles | Renewable Energy | 2020 |
| 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 | 2023 |
| 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 | The International Journal of Life Cycle Assessment | 2019 |
| Elgowainy, A., Han, J., Ward, J., Joseck, F., Gohlke, D., Lindauer, A., ... & Wallington, T. J. | Current and Future United States Light-Duty Vehicle Pathways: Cradle-to-Grave Lifecycle Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment | Environmental Science & Technology | 2018 |
| Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H. J., Del Duce, A., & Simons, A. | The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework | Applied Energy | 2015 |
| Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. | Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles | Research and Analyssis | 2012 |
| 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 | 2022 |
| 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 | 2015 |
| Onat, N. C., Kucukvar, M., Tatari, O., & Zheng, Q. P. | Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. | Journal of Cleaner Production | 2015 |
| Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. | Estimation of CO ₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA | Sustainability | 2019 |
| Tagliaferri, C., Evangelisti, S., Acconcia, F., Domenech, T., Ekins, P., Barletta, D., & Lettieri, P. | Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach | Chemical Engineering Research and Design | 2016 |

Tabela A – Artigos avaliados na revisão da literatura acadêmica

| | | | |
|--|---|--|------|
| Xie, J.-B. | Evaluation of carbon footprint and energy input of internal combustion engine vehicles in China | Environmental Progress and Sustainable Energy | 2023 |
| 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 | 2022 |
| Xiong S.; Wang Y.; Bai B.; Ma X. | A hybrid life cycle assessment of the large-scale application of electric vehicles | Energy | 2021 |
| 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 | 2020 |
| Cusenza, M. A., Bobba, S., Ardente, F., Cellura, M., & Di Persio, F. | Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles | Journal of Cleaner Production | 2019 |
| Arshad, F., Lin, J., Manurkar, N., Fan, E., Ahmad, A., Wu, F., ... & Li, L. | Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review | Resources, Conservation and Recycling | 2023 |
| Hao H.; Qiao Q.; Liu Z.; Zhao F.; Chen Y. | Comparing the life cycle Greenhouse Gas emissions from vehicle production in China and the USA: implications for targeting the reduction opportunities | Clean Technologies and Environmental Policy | 2017 |
| Mayyas A.; Omar M.; Hayajneh M.; Mayyas A.R. | Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective | Journal of Cleaner Production | 2017 |
| Xin Lai Quanwei Chen, Xiaopeng Tang, Yuanqiang Zhou, Furong Gao, Yue Guo, Rohit Bhagat, Yuejiu Zheng | Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective | eTransportation | 2022 |
| Xiong S.; Ji J.; Ma X. | Comparative life cycle energy and GHG emission analysis for BEVs and PHEVs: A case study in China | Energies | 2019 |
| Cox B.; Bauer C.; Mendoza Beltran A.; van Vuuren D.P.; Mutel C.L. | Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios | Applied Energy | 2020 |
| Fan E.; Li L.; Wang Z.; Lin J.; Huang Y.; Yao Y.; Chen R.; Wu F. | Sustainable Recycling Technology for Li-Ion Batteries and Beyond: Challenges and Future Prospects | Chemicals Review | 2020 |
| Chul Kim, H., Lee, S., & J. Wallington, T. | Cradle-to-Gate and Use-Phase Carbon Footprint of a Commercial Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery | Environmental Science & Technology | 2023 |
| Yang Y.; Lan L.; Hao Z.; Zhao J.; Luo G.; Fu P.; Chen Y. | Life Cycle Prediction Assessment of Battery Electrical Vehicles with Special Focus on Different Lithium-Ion Power Batteries in China | Energies | 2022 |
| Patterson J.; Gurr A.; Marion F.; Williams G. | Strategic selection of future EV technology based on the carbon payback period | World Electric Vehicle Journal | 2012 |
| Chen Q.; Lai X.; Gu H.; Tang X.; Gao F.; Han X.; Zheng Y. | Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China | Journal of Cleaner Production | 2022 |
| Hernandez M.; Messagie M.; Hegazy O.; Marengo L.; Winter O.; Van Mierlo J. | Environmental impact of traction electric motors for electric vehicles applications | The International Journal of Life Cycle Assessment | 2017 |
| Yang, L., Yu, B., Yang, B., Chen, H., Malima, G., & Wei, Y. M. | Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China | Journal of Cleaner Production | 2020 |

Tabela A – Artigos avaliados na revisão da literatura acadêmica

| | | | |
|--|--|---|------|
| Aichberger, C., & Jungmeier, G. | Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review | Energy | 2020 |
| Hirz, M., & Nguyen, T. T. | Life-Cycle CO ₂ -Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems | World Electric Vehicle Journal | 2022 |
| A. Schiessl; R. Müller; R. Volk; F. Schultmann | Site-specific environmental impact assessment as a basis for supplier selections – exemplary application to aluminum | Journal of Cleaner Production | 2021 |
| Delogu M.; Zanchi L.; Dattilo C.A.; Pierini M. | Innovative composites and hybrid materials for electric vehicles lightweight design in a sustainability perspective | Materials Today Communications | 2017 |
| Dong Y.; Zhao Y.; Hossain M.U.; He Y.; Liu P. | Life cycle assessment of vehicle tires: A systematic review | Cleaner Environmental Systems | 2021 |
| Jursova, S., Burchart-Korol, D., & Pustejovska, P. | Carbon Footprint and Water Footprint of Electric Vehicles and Batteries Charging in View of Various Sources of Power Supply in the Czech Republic | Environments | 2019 |
| Philippot M.; Alvarez G.; Ayerbe E.; Mierlo J.V.; Messagie M. | Eco-efficiency of a lithium-ion battery for electric vehicles: Influence of manufacturing country and commodity prices on ghg emissions and costs | Batteries | 2019 |
| Xia, X.; Li, P. | A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries | Science of the Total Environment | 2021 |
| Verma, S., Dwivedi, G., & Verma, P. | Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review | Materials Today: Proceedings | 2022 |
| Lavrador, R. B., & de Sá Teles, B. A. | Life cycle assessment of battery electric vehicles and internal combustion vehicles using sugarcane ethanol in Brazil: A critical review | Cleaner Energy Systems | 2022 |
| Guo W.; Feng T.; Li W.; Hua L.; Meng Z.; Li K. | Comparative life cycle assessment of sodium-ion and lithium iron phosphate batteries in the context of carbon neutrality | Journal of Energy Storage | 2023 |
| Peters, Jens F.; Baumann, Manuel; Zimmermann, Benedikt; Braun, Jessica; Weil, Marcel | The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters - A review | Renewable and Sustainable Energy Reviews | 2017 |
| A. Picatostea; D. Justela; J. M. F. Mendoza | Circularity and life cycle environmental impact assessment of batteries for electric vehicles: Industrial challenges, best practices and research guidelines | Renewable and Sustainable Energy Reviews | 2022 |
| L. Bushi; T. Skrzek; T. Reaburn | New ultralight automotive door life cycle assessment | Life Cycle Sustainability Assessment | 2019 |
| Moro, A., Lonza, A. | Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles | Transportation Research Part D | 2018 |
| Chen Y.; Ding Z.; Liu J. | Life Cycle Assessment of Environmental Emissions and Scenario Simulation of an Automotive Power Seat Considering Scrap Recycling | Environmental Engineering Science | 2019 |
| Larrabide A.; Rey I.; Lizundia E. | Environmental Impact Assessment of Solid Polymer Electrolytes for Solid-State Lithium Batteries | Advanced Energy and Sustainability Research | 2022 |
| Sen, B., Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. | Material footprint of electric vehicles: A multiregional life cycle assessment | Journal of Cleaner Production | 2019 |

Tabela A – Artigos avaliados na revisão da literatura acadêmica

| | | | |
|---|--|--|------|
| 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 | 2017 |
| Priarone P.C.; Catalano A.R.; Settineri L. | Additive manufacturing for the automotive industry: on the life-cycle environmental implications of material substitution and lightweighting through re-design | Progress in Additive Manufacturing | 2023 |
| Alramadhan D.; Alabduljaleel S.; Almulla D.; Aleisa E. | Multicriteria optimization for electric vehicles in an arid oil state based on a triple bottom line approach | International Journal of Life Cycle Assessment | 2022 |
| Notter, D. A., Gauch, M., Widmer, R., Wäger, P., Stamp, A., Zah, R., & Althaus, H.-J. | Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles | Environmental Science & Technology | 2010 |
| Du S.; Gao F.; Nie Z.; Liu Y.; Sun B.; Gong X. | Comparison of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Recycling Allocation Methods | Environmental Science and Technology | 2022 |
| Zahoor A.; Yu Y.; Zhang H.; Nihed B.; Afrane S.; Peng S.; Sâpi A.; Lin C.J.; Mao G. | Can the new energy vehicles (NEVs) and power battery industry help China to meet the carbon neutrality goal before 2060? | Journal of Environmental Management | 2023 |
| Lavigne Philippot M.; Costa D.; Cardellini G.; De Sutter L.; Smekens J.; Van Mierlo J.; Messagie M. | Life cycle assessment of a lithium-ion battery with a silicon anode for electric vehicles | Journal of Energy Storage | 2023 |
| 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 | 2023 |
| Akasapu U.; Hehenberger P. | A design process model for battery systems based on existing life cycle assessment results | Journal of Cleaner Production | 2023 |
| Vargas, Jorge Enrique Velandia; Seabra, Joaquim E. A.; Cavaliero, Carla K. N.; Walter, Arnaldo C. S.; Souza, Simone P.; Falco, Daniela G. | The New Neighbor across the Street: An Outlook for Battery Electric Vehicles Adoption in Brazil | World electric vehicle journal | 2020 |

Tabela B – Artigos avaliados na revisão da literatura cinza

| Autores | Título | Ano |
|--|---|------------|
| Internacional Council on Clean Transportation | Comparação das emissões de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil. | 2023 |
| European Commission, Directorate-General for Climate Action, Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S. et al. | Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA | 2020 |
| M. Wang, A. Elgowainy, U. Lee, K. Baek, S. Balchandani, P. Benavides, A. Burnham, H. Cai, P. Chen, Y. Gan, U. Gracida-Alvarez, T. Hawkins, T. Huang, R. Iyer, S. Kar, J. Kelly, T. Kim, C. Kolodziej, K. Lee, X. Liu, Z. Lu, F. Masum, M. Morales, C. Ng, L. Ou, T. Poddar, K. Reddi, S. Shukla, U. Singh, L. Sun, P. Sun, T. Sykora, P. Vyawahare, J. Zhang | Summary of Expansions and Updates in R&D GREET® 2023 | 2023 |
| Green NCAP | Green NCAP – Life Cycle Assessment Methodology and Data | 2023 |
| BMW Group | BMW Group Vehicle Footprint BMW i5 eDrive40 | 2023 |
| BMW Group | BMW Group Vehicle Footprint BMW 520i Page | 2023 |
| Renault | RENAULT MÉGANE IV - 2017: LIFE CYCLE ASSESSMENT RESULTS | 2017 |
| Volvo Cars | Carbon footprint report: Volvo C40 Recharge | 2021 |
| Volvo Cars | Carbon footprint report: Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICE | 2020 |
| Toyota | The MIRAI Life Cycle Assessment Report | 2015 |



do berço ao portão

PEGADA DE CARBONO DE VEÍCULOS LEVES FABRICADOS NO BRASIL

FGV EAESP
CENTRO DE ESTUDOS
EM SUSTENTABILIDADE



UNICAMP



FEM

Coord. Técnica Linha V

Coordenadora Linhas IV, V e VI

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



fundep fundação de
apoio da UFMG

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA,
COMÉRCIO E SERVIÇOS

