



RELATÓRIO PARCIAL

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de caminhões com motores elétrico à bateria e ciclo diesel Euro VI produzidos pela indústria brasileira

Projeto aprovado na Chamada
CNPq/FNDCT/MCTI 15/2022.

Título do Projeto	Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de caminhões com motores elétrico à bateria e ciclo diesel Euro VI produzidos pela indústria brasileira
Organização Financiadora	Chamada CNPq/FNDCT/MCTI 15/2022
Organização executora	Laboratório de Transporte de Cargas (LTC) da COPPE/UFRJ
Organização parceira	<i>Man Latin America</i> Industria e Comercio de Veículos LTDA
Termo de responsabilidade	As informações contidas neste relatório foram compiladas e/ou calculadas a partir de fontes consideradas credíveis. O LTC não se responsabiliza por qualquer perda ou dano decorrente da utilização das informações contidas neste documento.
Versão	Versão 1.1. Relatório Parcial.
Equipe do projeto	Marcio de Almeida D'Agosto (Coordenador) Ana Carolina Maia Angelo Daniel Neves Schmitz Gonçalves George Vasconcelos Goes Lino Guimarães Marujo Mariane Gonzales da Costa Pedro Carneiro Tassia Faria de Assis
Contato	dagosto@pet.coppe.ufrj.br
Colaboração e parceria nacional	Profa. Da. Suzana Kahn Ribeiro, Diretora da COPPE/UFRJ
Colaboração e parceria internacional	Gian Gomes Marques, Mestre em Engenharia de Transportes e Gestor de Projetos da Volkswagen Group Wolfsburg-Alemanha.

Sumário Executivo

CONFIDENCIAL

Sumário

Sumário Executivo	3
Lista de Tabelas.....	5
Lista de Figuras	6
Lista de Siglas e Abreviaturas	Erro! Indicador não definido.
1. Introdução	7
1.1. Contextualização	7
1.2. Breve revisão da literatura	9
1.3. Estrutura do Estudo de ACV	8
2. Objetivo e escopo do Estudo.....	9
2.1. Objetivo e aplicação pretendida	9
2.2. Descrição dos veículos analisados.....	9
2.3. Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência.....	10
2.4. Limites do Sistema.....	10
2.4.1. Descrição do Sistema Geral.....	Erro! Indicador não definido.
2.5. Coberturas temporal e geográfica.....	Erro! Indicador não definido.
2.6. Cobertura de impacto	15
2.7. Procedimento de alocação.....	17
2.8. Qualidade dos dados, fontes e premissas.....	Erro! Indicador não definido.
2.8.1. Coleta de dados.....	Erro! Indicador não definido.
2.8.2. Uso de Banco de Dados.....	Erro! Indicador não definido.
2.8.3. Premissas.....	Erro! Indicador não definido.
2.9. Análise de sensibilidade	Erro! Indicador não definido.
2.10. Análise das incertezas	Erro! Indicador não definido.
2.11. Revisão crítica.....	Erro! Indicador não definido.
3. Inventário do Ciclo de Vida.....	18
4. Resultados	Erro! Indicador não definido.
4.1. Análise comparativa	Erro! Indicador não definido.
4.2. Análise de contribuição	Erro! Indicador não definido.
4.3. Análise de Sensibilidade	Erro! Indicador não definido.
5. Conclusões.....	Erro! Indicador não definido.
6. Referências	23

Lista de Tabelas

Tabela 1. Classificação dos artigos de aplicação de ACV em caminhões 6
--	---------

CONFIDENCIAL

Lista de Figuras

Figura 1. Etapas do Ciclo de Vida de sistemas de transportes	9
Figura 2. Produção científica anual relacionada ao tema	2
Figura 3. Produção científica no mundo.....	3
Figura 4. Nuvem de palavras	4
Figura 5. Estrutura do Relatório	8
Figura 6. Modelo VW e-Delivery 14	10
Figura 7. Fronteira do Sistema adotada do berço ao túmulo.....	12

CONFIDENCIAL

1. Introdução

1.1. Contextualização

Diante do contexto da busca por estratégias de descarbonização através das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), o Brasil visa reduzir 37% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) até 2025 e 50% até 2030, em comparação com os níveis de 2005 estimados no 4º Inventário Nacional (Brasil, 2020). O setor de Energia apresenta um dos maiores potenciais para o alcance das metas da NDC brasileira (La Rovere et al., 2019), uma vez que responde por cerca de 30% das emissões nacionais de CO_{2Eq} (Brasil, 2020), sendo o setor de transportes responsável por quase metade dessas emissões.

É evidente a importância do setor de transportes como elemento estratégico para o alcance das metas de redução de emissões de GEE brasileiras, uma vez que as emissões de carbono do setor aumentaram 48% entre 2005 e 2016 (Brasil, 2020), sendo que, neste mesmo período, o Produto Interno Bruto (PIB) nacional cresceu cerca de metade desse percentual (23%) (Wills, 2018). Cabe ressaltar ainda, que no resto do mundo, o transporte também tem um papel fundamental na mitigação das emissões de CO_{2Eq}, pois é o maior consumidor de combustíveis derivados do petróleo, com 57% da demanda global (BD, 2018).

Apesar da tecnologia ser um vetor estratégico nos compromissos assumidos e planos lançados pelos países (Goes et al., 2020), no Brasil ressalta-se o papel da penetração de biocombustíveis (convencionais e avançados) e da mobilidade elétrica como medidas de mitigação-chave a serem implantadas em 2030 para viabilizar um cenário em 2050 compatível com a meta global 1 do Acordo de Paris (ICS, 2021).

Como o transporte de carga no Brasil apresentou, nos últimos 50 anos, 57% da sua atividade média (em toneladas-km) dependente do uso de caminhões, há uma oportunidade significativa de avaliar as contribuições quanto a redução de consumo de energia e de emissões de GEE pela introdução de novas tecnologias e novas fontes de energia neste segmento de atividade econômica. Uma dessas opções é a eletrificação de caminhões utilizados na coleta e distribuição de carga em área urbana, que representam quase metade da frota nacional e operam em regime de anda-e-para, situação que permite otimizar a regeneração de energia cinética e retornam diariamente ao ponto de partida (rota urbana) o que possibilita que sejam recarregados diariamente ou a cada dois dias.

A introdução de caminhões elétricos na mobilidade urbana de carga no Brasil contribui não apenas para a redução das emissões de GEE, como também para a redução de emissões de poluentes atmosféricos e ruído nas cidades, onde se concentra a maior parte da população do Brasil (mais de 70%), contribuindo para benefícios sociais significativos pela melhoria da qualidade de vida. Além disso, pelo uso de uma fonte de energia alternativa ao diesel de petróleo, colabora-se também para o aumento da segurança energética desta atividade econômica. Cerca de 40% de toda a energia utilizada em transportes é óleo diesel, que não possui um substituto imediato para a realidade brasileira, cujo valor de mercado aumentou mais de 80% em 2021, representando de 35% a 25% dos custos operacionais do transporte rodoviário de carga (atividade que tem forte correlação como PIB nacional).

Diante do aumento da preocupação com as consequências e impactos ambientais ao meio ambiente associados ao setor de transporte, faz-se necessário adotar metodologias que permitam a identificação e quantificação desses potenciais impactos ambientais que possam ir além do cálculo das emissões atmosféricas relacionadas apenas ao uso final da energia. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), portanto, é considerada a metodologia mais adequada para se avaliar globalmente todas as fontes e tipos de impacto.

A ACV é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão que permite avaliar o desempenho ambiental de produtos e serviços ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração dos recursos naturais até a disposição final do produto na forma de resíduo, considerada, portanto, como uma abordagem do berço ao túmulo (*from cradle to grave*). Em sistemas de transporte, a ACV pode englobar, além da extração dos recursos naturais para produção das matérias primas, a construção da infraestrutura, a manufatura do veículo, a produção do combustível, a operação (uso) do veículo, manutenção do veículo e da infraestrutura e o fim de vida (EoL) associado (Figura 1).



Figura 1. Etapas do Ciclo de Vida de sistemas de transportes

Fonte: ACV de A a Z, módulo Transportes.

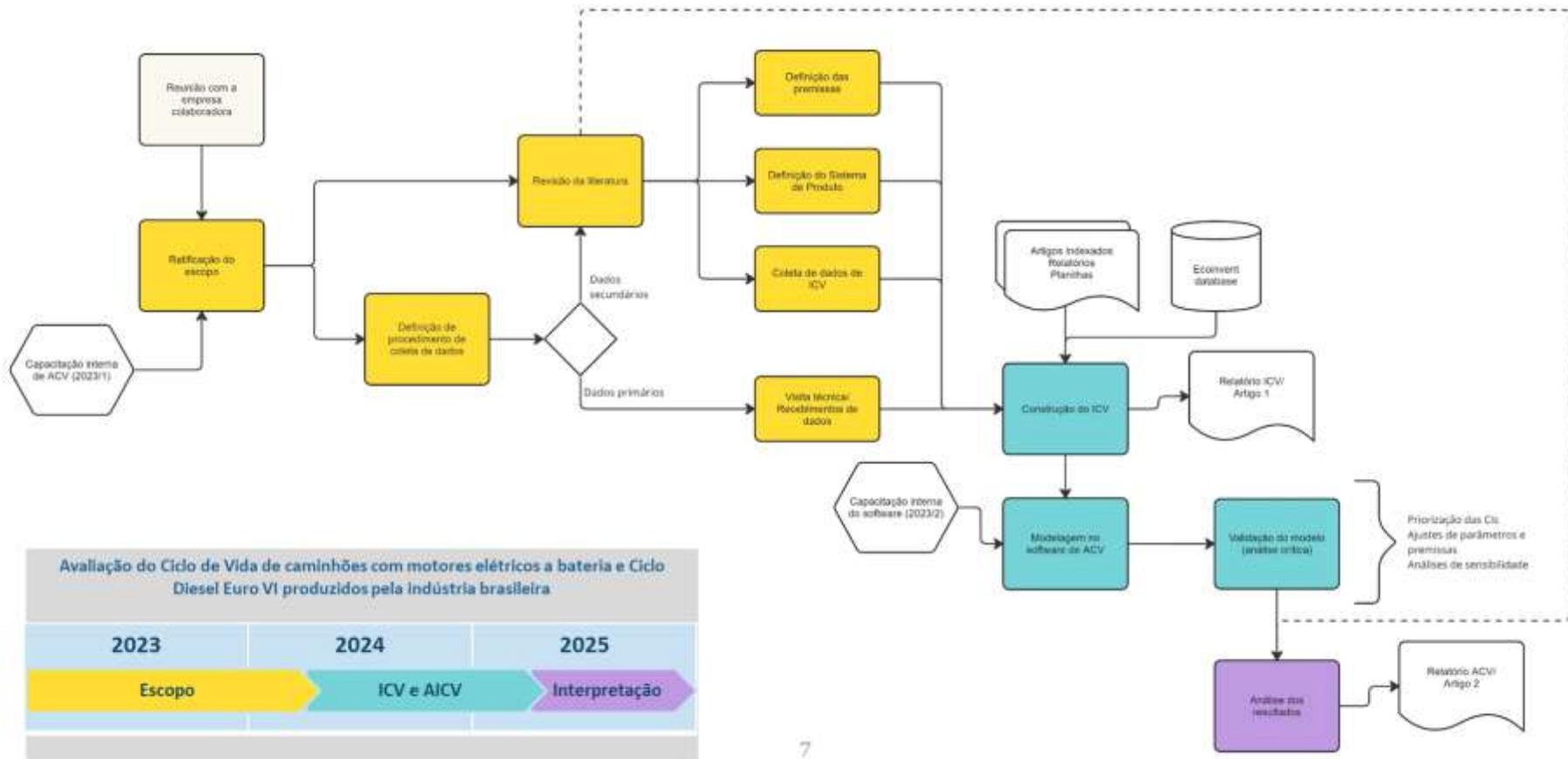
Uma ACV completa de veículo considera tipicamente dois ciclos: o ciclo de vida do veículo, do berço ao túmulo, e o ciclo de vida do combustível do poço à roda (*well to wheel*, *WtW*). O ciclo de vida do veículo envolve os processos de manufatura do veículo, incluindo a extração e processamento de materiais, manufatura dos componentes, montagem do veículo e estratégias de EoL. O ciclo *WtW* considera a energia usada para propulsão do veículo, dividida em dois estágios: do poço ao tanque (*well to tank*, *WtT*) e do tanque à roda (*tank to wheel*, *TtW*). O estágio *WtT* inclui todos os processos de extração dos recursos naturais da energia primária, até a conversão da energia, distribuição e armazenagem. O estágio *TtW* contempla o consumo da energia (ex. queima do combustível) durante a operação do veículo (Nordelöf et al., 2014).

O presente relatório apresenta a aplicação da ACV completa comparativa do caminhão elétrico à bateria *plug-in* e do caminhão do ciclo Diesel Euro VI desenvolvidos e produzidos no Brasil **até a fase do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)**.

1.2. Apresentação do projeto

A execução do projeto pode ser observada a seguir.

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE CAMINHÕES COM MOTORES ELÉTRICO À BATERIA E CICLO DIESEL EURO VI PRODUZIDOS PELA INDÚSTRIA BRASILEIRA



7

1.3. Breve revisão da literatura

Uma busca de artigos indexados nas principais bases científicas (Scopus e Web of Science), utilizando-se os termos (LCA OR “life cycle analysis” OR “life cycle assessment”) AND automotive AND Battery, (LCA OR “life cycle analysis” OR “life cycle assessment”) AND truck AND battery, (LCA OR “life cycle analysis” OR “life cycle assessment”) AND freight AND battery, resultou em 290 documentos que, após remoção de duplicatas, totalizou 156 documentos, os quais estão concentrados a partir de 2013 (Figura 2).

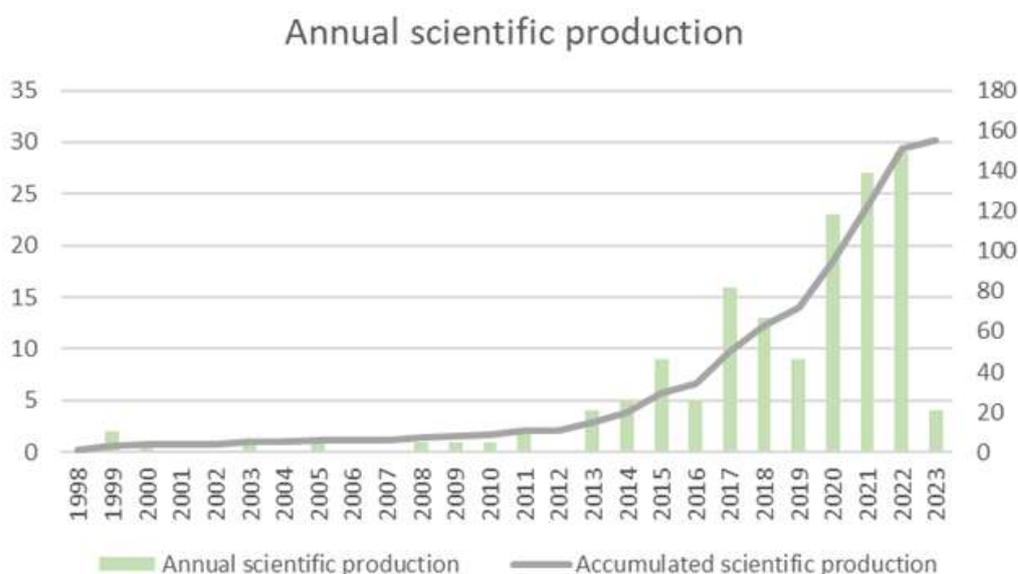


Figura 2. Produção científica anual relacionada ao tema

Fonte: Elaboração própria com base em Biblioshiny.

Dentre os países com maior publicação de artigos sobre o tema destacam-se: Estados Unidos com 48 artigos, Grã-Bretanha com 20, Alemanha com 15, China com 13 e Itália com 11 artigos. Esses cinco países concentram cerca de 69% da produção científica mundial sobre o tema (Figura 3). O Brasil encontra-se na décima posição do ranking, com 5 artigos.

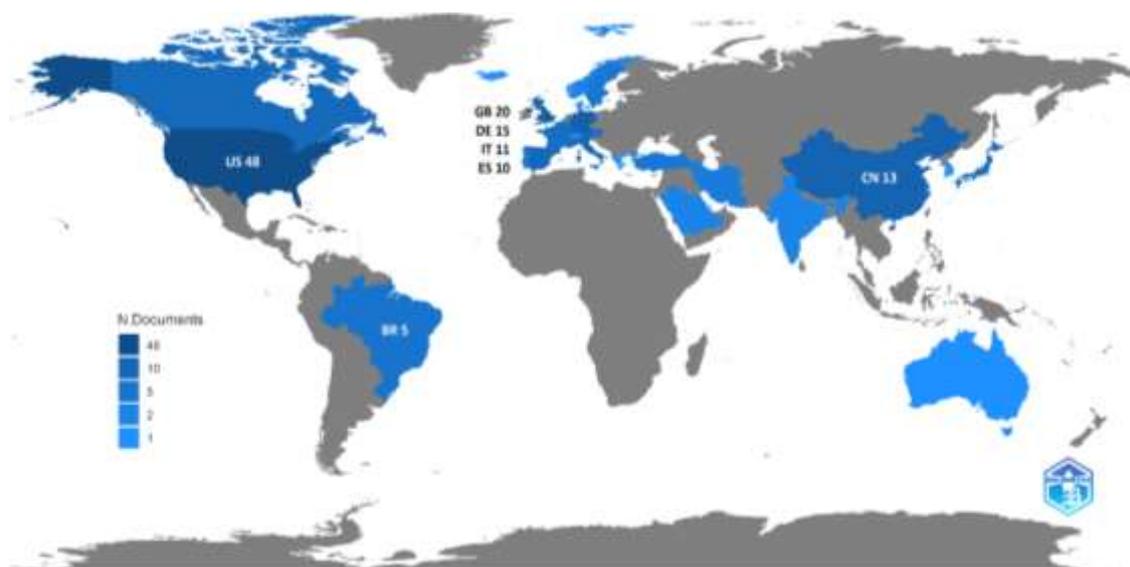


Figura 3. Produção científica no mundo

Fonte: Elaboração própria com base em Biblioshiny.

Ao analisar a nuvem de palavras gerada pelas palavras-chave¹ (Figura 4), observa-se que o termo Gases de Efeito Estufa (*greenhouse gases*) possui destaque, depois, naturalmente, dos termos *Life Cycle* e *Life Cycle Analysis*. Isso evidencia que o foco dos estudos de ACV de veículos elétricos é a categoria de impacto Mudanças Climáticas. Termos associados às baterias, como íon-lítio, baterias secundárias e reciclagem também possuem evidência na produção científica.

¹ Usadas as *Key-word Plus*, que são palavras chaves geradas automaticamente por algoritmo considerando os títulos das referências citadas e cada artigo analisado (Garfield and Sher, 1993).

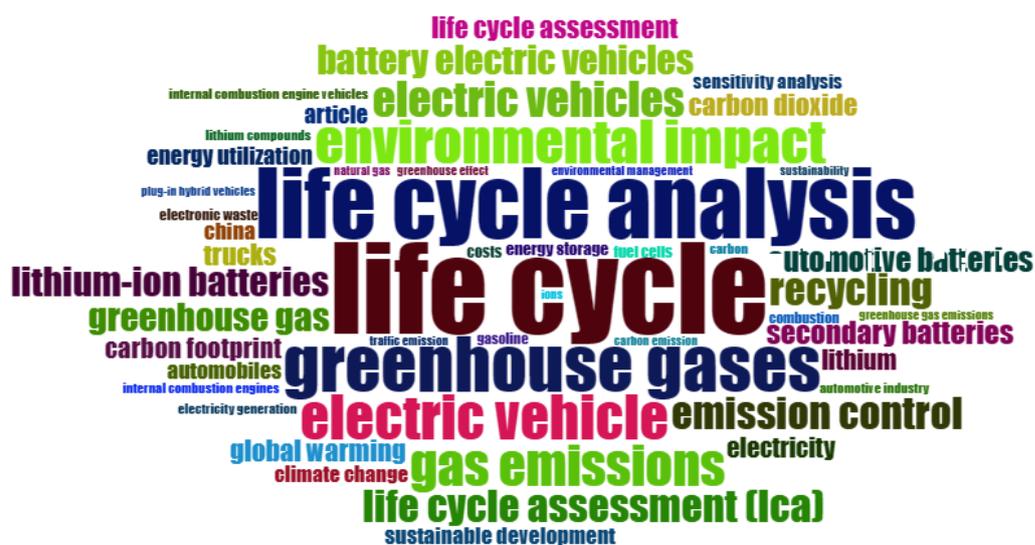


Figura 4. Nuvem de palavras

Fonte: Elaboração própria com base em Biblioshiny.

Considerando apenas artigos que aplicaram ACV em caminhões elétricos à bateria, 17 estudos foram analisados, dos quais a grande maioria foca apenas na categoria Mudanças Climáticas, com os potenciais impactos ambientais expressos em CO₂Eq. Apesar da importância das Mudanças Climáticas, evidenciado pela Agenda Climática dos governos mundo afora, estudos de ACV com foco em apenas uma categoria de impacto ou poucas categorias de impacto podem gerar um risco de exclusão de aspectos relevantes para a avaliação e, conseqüentemente, tomada de decisão (Angelo et al., 2017).

Com relação à Unidade Funcional (UF) adotada nos estudos, foi observada a ocorrência da UF *v.kt* (veículo quilômetro viajado, em inglês *vehicle kilometer travelled*) além da tradicional *t.km*, usada para sistemas de transporte de carga. A maioria dos estudos considerou a Fronteira do Sistema do berço ao túmulo (*cradle to grave*), principalmente em função do EoL das baterias. É importante ressaltar, todavia, que apesar dos veículos elétricos serem uma das principais estratégias para a descarbonização do setor de transportes, análises que expandem a Fronteira do Sistema do uso para a produção, por exemplo, indicam que os potenciais impactos ambientais associados à manufatura dos veículos elétricos são maiores que os dos motores à combustão (Cox et al., 2018; Koroma et al., 2020) em função da produção da bateria (Peters et al., 2017).

A manutenção foi observada em alguns estudos, com destaque para Booto et al. (2021) que consideraram atividades de manutenção e para Lee et al. (2013) que utilizaram dados do experimento de caminhões de entrega da FedEx para estimar os custos com manutenção de caminhões a diesel (0,139 \$/km ou 0,223 \$/milha). Os autores observaram que os caminhões elétricos têm um custo total de manutenção 35% menor do que os caminhões a diesel devido à ausência de manutenção relacionada ao motor e à transmissão (por exemplo, correia dentada, bomba d'água, filtro de combustível, troca de óleo, filtro de ar do motor e substituição do líquido de arrefecimento).

Além disso, também verificaram que as pastilhas de freio para veículos elétricos podem durar o dobro do tempo que as dos caminhões a diesel, devido à frenagem regenerativa, podendo reduzir os custos de manutenção em 20 a 30%. O custo de manutenção do SEV Newton foi relatado como sendo apenas cerca de 10% do seu equivalente em caminhões a diesel. Apesar disso, os autores assumiram que a manutenção do caminhão elétrico custa de 25 a 50% do caminhão a diesel, porque algumas das peças do trem de força elétrico podem ter problemas de confiabilidade devido à maturidade tecnológica ainda não comprovada (0,035 a 0,069 \$/km), sendo o custo anual de manutenção distribuído uniformemente ao longo da vida útil do veículo, exceto para a bateria e o EVSE. A substituição da bateria de íons de lítio e do EVSE não está incluída no custo de manutenção, sendo tratada separadamente no estudo de Lee.

A infraestrutura foi observada no sistema de produto dos estudos de Sen et al. (2019), no que diz respeito às necessidades adicionais de infraestrutura dos HDTs de GNC e BE (por exemplo, construção de infraestruturas de reabastecimento de gás natural e recarga de baterias); de Zhao et al. (2017), em que é apresentado ICV da infraestrutura de carregamento e infraestrutura de reabastecimento; de Sen et al. (2017), que consideraram os dados referentes à infraestrutura de recarga de caminhões elétricos como sendo os mesmos de ônibus elétricos.

A Tabela 1 apresenta os principais estudos de ACV de caminhões elétricos à bateria.

Tabela 1. Classificação dos artigos de aplicação de ACV em caminhões

Referência	País/ Região	Veículo(s) analisado(s)	Unidade Funcional	Categoria(s) de impacto	Etapas do Ciclo de Vida analisadas							
					Infraestrutura	Veículo					Combustível	
						Extração	Manufatura dos componentes	Manufatura do veículo	Manutenção	EoL	WtT	TtW
XUE et al 2022	China		v.kt	Mudanças Climáticas, Consumo de energia							X	X
MIDDELA et al 2022	Índia		1 km	Mudanças Climáticas		X	X	X	X	X	X	X
REN et al 2022	China		1 km	Mudanças Climáticas, Consumo de energia (energia primária)							X	X
YEOW et al 2022	Cingapura		t.km	Mudanças Climáticas		X	X	X		X	X	X
BOOTO et al 2021	Noruega		1 km	Mudanças Climáticas, Depleção de Recursos Abióticos, Acidificação, Toxicidade Humana, Eutrofização, Formação de Oxidante Fotoquímico, Depleção da Camada de Ozônio		X	X	X	X	X	X	X
SACCHI et al 2021	Europa		t.km	Mudanças Climáticas		X	X	X	X	X	X	X
HE et al 2021	EUA		v.km, t.km	Mudanças Climáticas		X	X	X		X	X	X
WOLFF et al 2021	Alemanha		t.km	Mudanças Climáticas, Acidificação, Ecotoxicidade, Eutrofização de água doce, Eutrofização marinha, Eutrofização terrestre, Toxicidade carcinogênica, Toxicidade não carcinogênica, Depleção da camada		X	X	X		X	X	X

				de ozônio, Formação de Material Particulado, Criação de Ozônio Fotoquímico, Depleção hídrica, Depleção mineral, Depleção fóssil								
SEN et al 2019	EUA		v.mt	Mudanças Climáticas, custos do ciclo de vida, custos da poluição atmosférica	X	X	X	X	X			X
RUPP et al 2018	Alemanha		t.km	Mudanças Climáticas, Depleção de Recursos Abióticos		X	X	X			X	X
YANG et al 2018	China		Kg.km	Mudanças Climáticas		X	X	X		X	X	X
ZHAO et al 2017	EUA		1 t	Mudanças Climáticas	X	X	X	X	X		X	X
SEN et al 2017	EUA		t.km	Mudanças Climáticas, Poluentes Atmosféricos, Depleção de combustível fóssil, Depleção de Recursos Abióticos	X	X	X	X	X		X	X
LEE and Thomas 2017	EUA		t.km	Consumo de energia primária, Consumo de água doce, Mudanças Climáticas, Acidificação, Eutrofização, Formação de Smog fotoquímico, Custos da poluição		X	X	X	X		X	X
ZHAO et al 2016	EUA		v.mt	Mudanças Climáticas			X	X	X		X	X
LEE et al 2013	EUA		t.km	Mudanças Climáticas, Economia de Energia, Custo-efetivo				X	X	X	X	X

Onde: v.kt = Vehicle kilometer travelled (veículo quilômetro viajado), t.km = tonelada quilômetro, kg.km = quilograma quilômetro, v.mt = Vehicle miles of travel (veículo milhas viajadas).

Fonte: Elaboração própria.

1.4. Estrutura do Estudo de ACV

O estudo foi realizado com base nas normas ABNT ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2008), dividido em quatro fases: (i) definição do objetivo e escopo do estudo, (ii) inventário do ciclo de vida, (iii) avaliação do impacto de ciclo de vida e (iv) interpretação dos resultados. A Figura 5 apresenta a estrutura deste relatório.

Obs.: Como se trata de um relatório parcial, são contidos os capítulos até o Inventário do Ciclo de Vida.

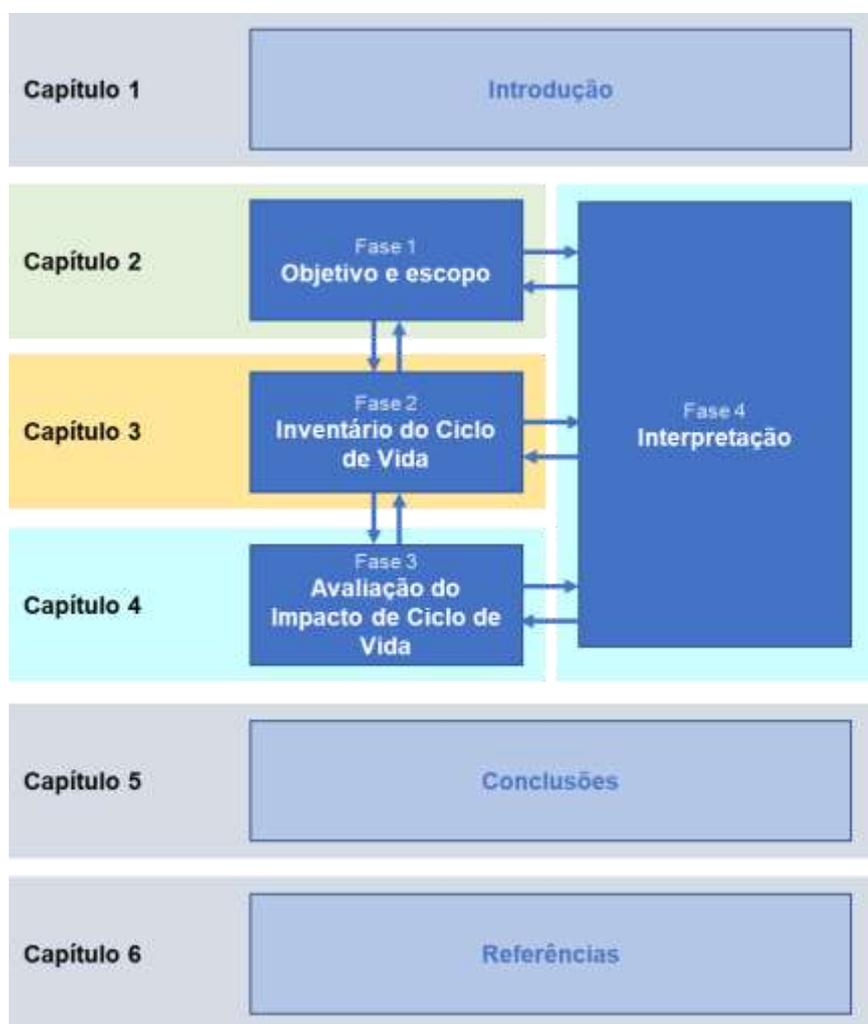


Figura 5. Estrutura do Relatório

2. Objetivo e escopo do Estudo

2.1. Objetivo e aplicação pretendida

O escopo de interesse deste estudo é definido pela avaliação comparativa do desempenho ambiental entre caminhão elétrico à bateria *plug-in* e caminhão do ciclo Diesel Euro VI desenvolvidos e produzidos no Brasil, através da execução da ACV completa com modelagem atribucional, considerando o ciclo de vida dos veículos e do combustível (WtW). Mais especificamente, os objetivos do estudo são os seguintes:

- i. Identificar e compreender os potenciais impactos ambientais do ciclo de vida (*hot spots*) do caminhão elétrico à bateria *plug-in* no contexto brasileiro;
- ii. Identificar e compreender os potenciais impactos ambientais do ciclo de vida (*hot spots*) do caminhão do ciclo Diesel Euro VI no contexto brasileiro;
- iii. Comparar o desempenho ambiental dos dois veículos (caminhão elétrico à bateria *plug-in* e caminhão do ciclo Diesel Euro VI);
- iv. Avaliar a influência da capacidade de carga no desempenho ambiental do veículo elétrico à bateria;
- v. Identificar as categorias de impacto ambiental mais relevantes para a indústria automobilística brasileira.

2.2. Descrição dos veículos analisados

Este estudo avalia o primeiro caminhão 100% elétrico desenvolvido e fabricado no Brasil, sendo o veículo convencional de base comparativa, um veículo do ciclo Diesel Euro VI (Fase do Proconve P8). O modelo do caminhão elétrico à bateria *plug-in* adotado é o e-Delivery 11 com pack de 3 baterias e o modelo do caminhão a diesel é o correspondente – Delivery 11.180 (Figura 6).



Figura 6. Modelo VW e-Delivery 14

FONTE: FONTE: VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS, 2023. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://WWW.VWCO.COM.BR/CAMINHOES/E-DELIVERY?ID=27](https://www.vwco.com.br/caminhoes/e-delivery?id=27)

2.3. Função, Unidade Funcional e Fluxo de Referência

AACV é estruturada em torno de uma Unidade Funcional (UF), a qual é a quantificação da função identificada para comparação sobre a base de uma função equivalente, definindo o que está sendo estudado (ABNT, 2008). A UF adotada neste estudo é definida como **v.km**, e o Fluxo de Referência, que consiste na determinação da quantidade de produto necessária para cumprir a UF (ABNT, 2008), considera todo o ciclo de vida do caminhão (1 veículo), assumindo operações urbanas de alimentos e bebidas e vida útil do veículo de 10 anos.

2.4. Limites do Sistema

Os limites do sistema englobam a Fronteira do Sistema e o Sistema de Produto analisado. A Fronteira do Sistema representa quais estágios do ciclo de vida são incluídos na ACV. A perspectiva de ciclo de vida da ACV significa que se deve considerar todo o ciclo de vida do produto ou partes dele (ABNT,2008). Apesar de ser comum a Fronteira do Sistema do poço à roda (WtW) em sistemas de transporte, quando se trata de veículos elétricos à bateria, a Fronteira de Sistema mais adequada é a do berço ao

túmulo (*cradle to grave*), em função, principalmente, da produção e do EoL da bateria. Isto foi evidenciado na revisão da literatura apresentada na seção 1.2. Isto posto, este estudo considera a Fronteira do Sistema de uma ACV completa de veículo (Nordelöf et al., 2014), refletindo, portanto, os estágios do ciclo de vida do berço ao túmulo tanto do veículo quanto do combustível. É importante ressaltar que o EoL do combustível é o estágio de operação, em que a energia é consumida através da queima do combustível fóssil, por exemplo, ou pela conversão da energia elétrica em mecânica como no caso dos veículos elétricos.

Independente do produto ou processo analisado, o objetivo da ACV com modelagem atribucional é refletir a realidade física concreta em uma cadeia de abastecimento existente ou a realidade física prevista em uma cadeia de abastecimento futura. Nesse sentido, os modelos precisam refletir o que efetivamente ocorre ou que se pode esperar que aconteça em cenário futuro (IBICT-ILCD, 2016). Deste modo, o Sistema de Produto adotado considera o conjunto de processos conectados material e energeticamente dentro dos limites da Fronteira do Sistema para cada veículo analisado conforme apresentado na Figura 6.

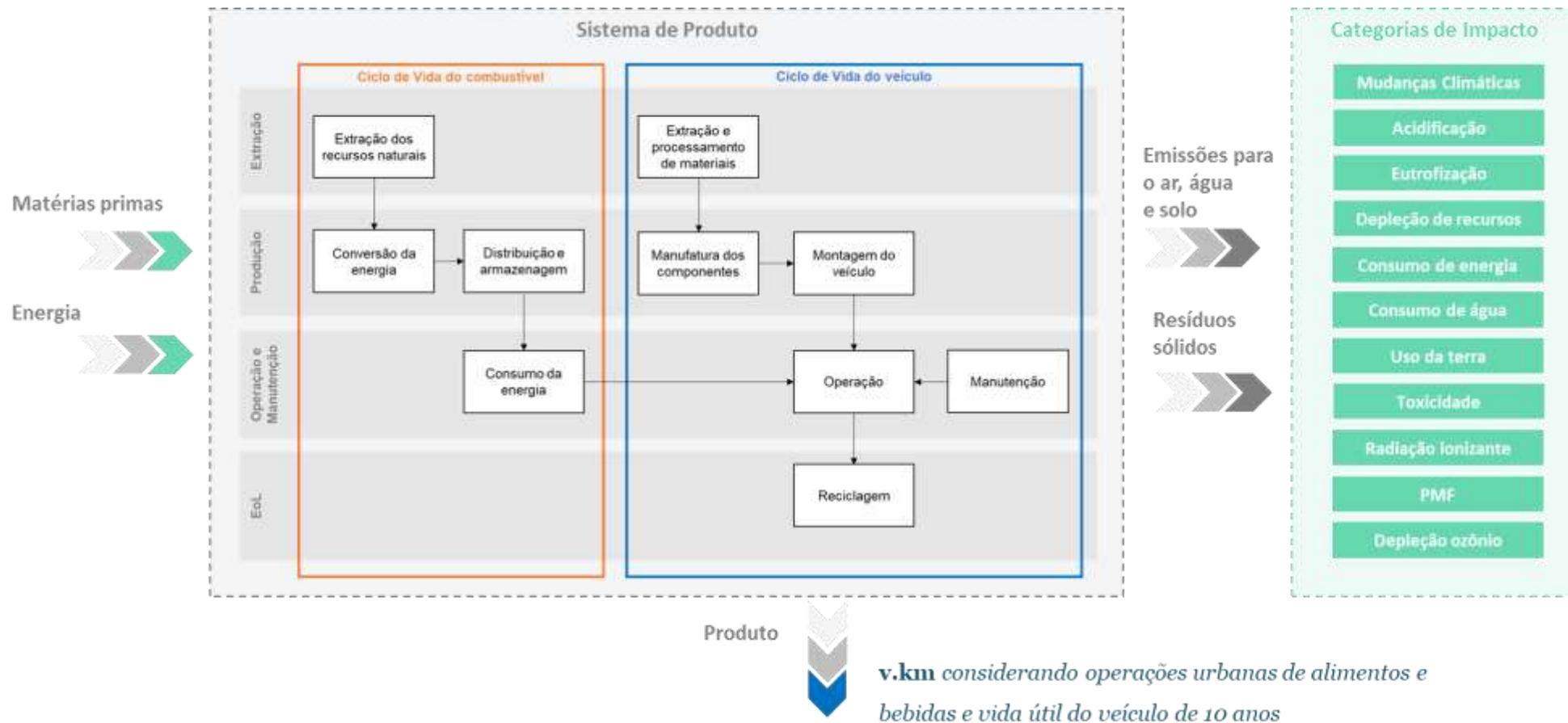


Figura 7. Sistema de produto do berço ao túmulo

O sistema de primeiro plano abarca os processos específicos aos produtos analisados, englobando, portanto, todos os processos internos do produtor ou operador do serviço. No sistema de segundo plano, encontram-se aqueles processos que são operados como parte do sistema, fora do controle direto ou influência do produtor do bem ou operador do serviço no sistema analisado, cujos dados, portanto, podem ser assumidos como média (IBICT ILCD, 2016). No presente estudo, o sistema de primeiro plano abarca os processos operados nas instalações da montadora (*gate to gate*). A identificação dos processos de primeiro e segundo plano é essencial para determinação da estratégia de coleta e uso de dados de ICV.

2.4.1. Premissas do estudo

As premissas do estudo são apresentadas por etapa do ciclo de vida considerada no estudo.

- Manufatura dos componentes
 - Considerada a cadeia de suprimentos da Volkswagen Caminhões e Ônibus (VW CO), situada em Resende, estado do Rio de Janeiro;
- Montagem do veículo
 - O inventário de materiais foi feito com base no inventário dos principais componentes dos veículos;
- Operação
 - Considerada vida útil de 10 anos para o veículo;
 - Considerada vida útil de 10 anos para a bateria, com redução de 20% na capacidade de carga após esse período;
 - Consideradas operações urbanas em metrópole no segmento de alimentos e bebidas;
- Manutenção
 - Considerada troca de pneus de acordo com documento de garantia e manutenção da VW CO;
- EoL
 - Considerada reciclagem do veículo em shredder;
 - Extensão da vida útil da bateria com aplicação secundária em sistema estacionário;
 - Reciclagem da bateria;

- Disposição final em aterro sanitário dos rejeitos.

2.5. Requisitos, qualidade e coleta de dados

A qualidade dos dados é um aspecto importante uma vez que pode prevenir a interpretação enganosa dos resultados da ACV. Os dados podem ser primários, a partir de fontes primárias de dados ou coleta direta nos locais de produção; secundários, aqueles provenientes da literatura científica, dados médios de mercado e banco de dados nacional ou internacional, como o SICV Brasil e o Ecoinvent. Para os processos do sistema de primeiro plano, foram usados dados primários fornecidos diretamente pela montadora (organização parceira). Para os processos de segundo plano, foram usados dados extraídos da literatura científica, relatórios do setor e Banco de Dados Ecoinvent.

- Dados primários para os processos relacionado à manufatura, operação, manutenção e reciclagem do veículo;
- Dados operacionais serão extraídos da plataforma RIO da VW CO com dados reais dos veículos analisados e alinhados às premissas do SBTi da VW.
- Dados secundários para os demais processos seguindo a hierarquia:
 - Dados da literatura científica;
 - Dados de banco de dados Ecoinvent segundo priorização presente na Resolução ANP N.º 758/2018: BR → GLO → RoW

A priorização das fontes de dados utilizadas neste estudo baseou-se na priorização presente na Resolução ANP N.º 758/2018 referente à Legislação do Renovabio. Priorizou-se, portanto, a utilização de processos com escopo nacional, representando o ICV brasileiro (BR). Quando não disponíveis, foram utilizados processos do Ecoinvent 3.8 com escopo global (GLO) ou referente ao “resto do mundo” (RoW). Os processos globais refletem um conjunto de dados global abrangendo a produção global média, que pode refletir com precisão as condições globais médias com base em dados internacionais. Nos casos em que os dados sobre a produção global média não estão disponíveis, o conjunto de dados global é criado como a média ponderada (por volume de produção) de vários conjuntos de dados locais ou é extrapolado como uma cópia de

um conjunto de dados local. Já os processos RoW representam o mundo menos todas as geografias locais para as quais existe um processo no banco de dados.

A coleta de dados seguiu o roteiro apresentado na Figura 8.

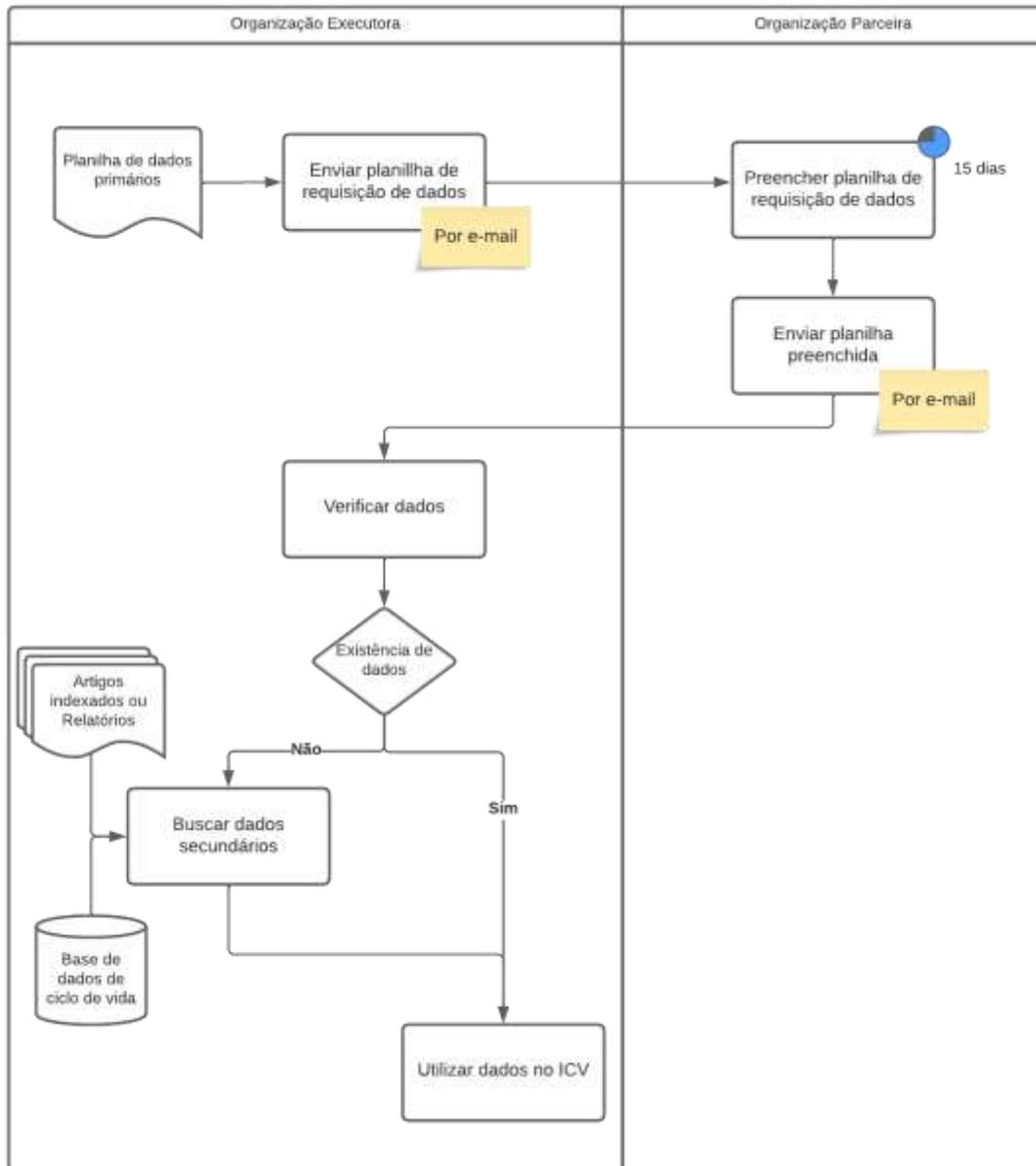


Figura 8. Procedimento para coleta de dados primários

2.6. Coberturas temporal, geográfica e de impacto

O estudo reflete dados de operação da montadora VW CO situada na cidade de Resende, estado do Rio de Janeiro, durante o ano de 2023, cuja cobertura geográfica reflete a Cadeia de Valor da montadora, apresentada na Figura 9. Cabe ressaltar que a cadeia de valor para o caminhão a diesel é a mesma do veículo elétrico, com exclusão apenas da logística associada à bateria, que vem da China.

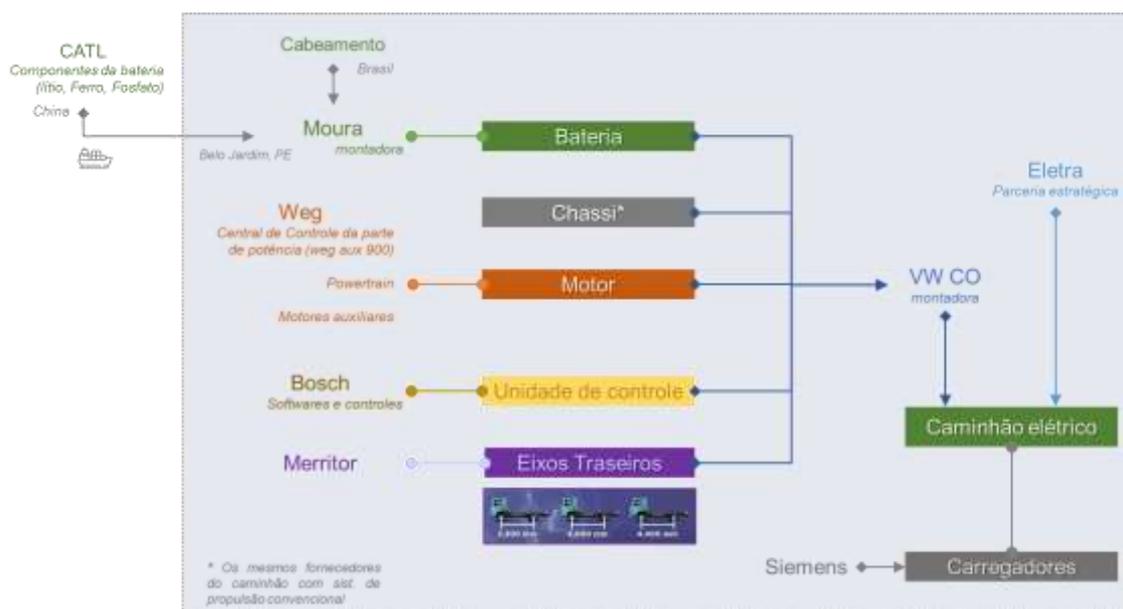


Figura 9. Cadeia de valor do veículo elétrico

A cobertura de impacto considera as categorias de meio termo do método de avaliação do ciclo de vida ReCiPe Hierarchy midpoint.

Tabela 2. Categorias de impacto analisadas no estudo

Categoria de impacto	Fator de caracterização	Unidade
Mudanças Climáticas (<i>climate change</i>)	Potencial de aquecimento global (GWP)	t CO2-Eq
Depleção da camada de ozônio (<i>ozone depletion</i>)	Potencial de depleção de ozônio (ODP)	t CFC-11
Radiação ionizante (<i>ionising radiation</i>)	Potencial de radiação ionizante (IRP)	t U235-Eq
Formação de material particulado (<i>particulate matter formation</i>)	Potencial de formação de material particulado (PMFP)	t PM10-Eq
Acidificação terrestre (<i>terrestrial acidification</i>)	Potencial de acidificação terrestre (TAP)	t SO2 -Eq
Toxicidade humana (<i>human toxicity</i>)	Potencial de toxicidade humana (HTP)	t 1,4-DCB
Ecotoxicidade terrestre (<i>terrestrial ecotoxicity</i>)	Potencial de ecotoxicidade terrestre (TETP)	t 1,4-DCB
Ecotoxicidade de água doce (<i>freshwater ecotoxicity</i>)	Potencial de ecotoxicidade de água doce (FETP)	t 1,4-DCB

Ecotoxicidade marinha (<i>marine ecotoxicity</i>)	Potencial de ecotoxicidade marinha (METP)	t 1,4-DCB
Consumo de água (<i>water depletion</i>)	Potencial de consumo de água (WCP)	mil m ³
Consumo de metais (<i>metal depletion</i>)	Potencial de excesso de minério (SOP)	tt Fe-Eq
Depleção fóssil (<i>fossil depletion</i>)	Potencial de combustível fóssil (FFP)	t Oil
Formação de oxidante fotoquímico (<i>photochemical oxidant formation</i>)	Potencial de formação de ozônio fotoquímico (POF)	t NOx
Eutrofização de água doce (<i>freshwater eutrophication</i>)	Potencial de eutrofização de água doce (FEP)	t P-Eq
Eutrofização marinha (<i>marine eutrophication</i>)	Potencial de eutrofização marinha (MEP)	t N-Eq
Ocupação de terra agrícola (<i>agricultural land occupation</i>)	Potencial de ocupação de terra agrícola (ALOP)	mil m ² a
Ocupação de terra urbana (<i>urban land occupation</i>)	Potencial de ocupação de terra urbana (ULOP)	mil m ² a
Transformação natural da terra (<i>natural land transformation</i>)	Potencial de transformação natural de terra (NLTP)	mil m ² a

Fonte: ReCiPe, disponível em <https://www.pre-sustainability.com/recipe>.

2.7. Procedimento de alocação

A alocação dos impactos ambientais seguiu a lógica da Análise do Fluxo de Materiais (MFA em inglês) para construção do ICV. Obedeceu-se a hierarquia do *Bill of Materials* (BOM). O veículo foi dividido em sistemas, os quais se dividiram em componentes, até chegar na composição de materiais (Figura 10). Foram considerados no estudo aqueles materiais que compõem mais de 90% do total do componente, sendo o restante adicionado no material de maior participação.



Figura 10. Hierarquização para alocação dos impactos

3. Inventário do Ciclo de Vida

O ICV foi construído pela decomposição dos veículos em sistemas, componentes e principais materiais. Tanto o caminhão a diesel quanto seu substituto a diesel podem ser divididos em quatro sistemas: chassi, cabine, sistema de componentes elétricos e sistema de *powertrain* e transmissão. O caminhão elétrico tem um sistema adicional, chamado de e-Mob, no qual concentram-se os componentes relacionados ao sistema de baterias, além dos próprios packs de baterias. O caminhão elétrico à bateria estudado possui massa total de 4.380 toneladas, sendo 46% referentes ao chassi, 19% ao sistema e-Mob, 14% à cabine, 12% aos componentes elétricos e 9% ao sistema de *powertrain* e transmissão.

O chassi é composto pelos seguintes componentes: chassi, eixos, rodas e pneus. O chassi representa 63% da massa total deste sistema, seguido pelos eixos, com 19%. A cabine compreende a cabine externa e os componentes externos, com 58% e 42% de participação respectivamente. Dentre os componentes elétricos, os suportes para a bateria totalizam 59%, seguidos pelo chicote e unidade de controle. No sistema do *powertrain* encontra-se o motor do caminhão. No sistema e-Mob do caminhão elétrico, encontram-se o pack de baterias, representando mais de 80% da massa total deste sistema. A Tabela 3 apresenta a composição mássica do caminhão elétrico analisado. As figuras a seguir apresentam a representatividade de cada componente dos sistemas.

Tabela 3. Composição mássica do caminhão elétrico

Sistema	Massa (kg)	Componentes	Massa (kg)
Chassi	2.010	Chassi	1.274
		Eixos	385
		Rodas	124
		Pneus	227
Cabine	600	Cabine interna	251
		Cabine externa	349
Sistema elétrico	544	Unidade de comando	30
		Chicotes	195
		Suporte bateria alta voltagem	319
Powertrain e transmissão	380	Motor	380
e-Mob	846	Conversor	61
		Inversor	49
		Módulos	10
		Pack de baterias	699
		Suporte	26

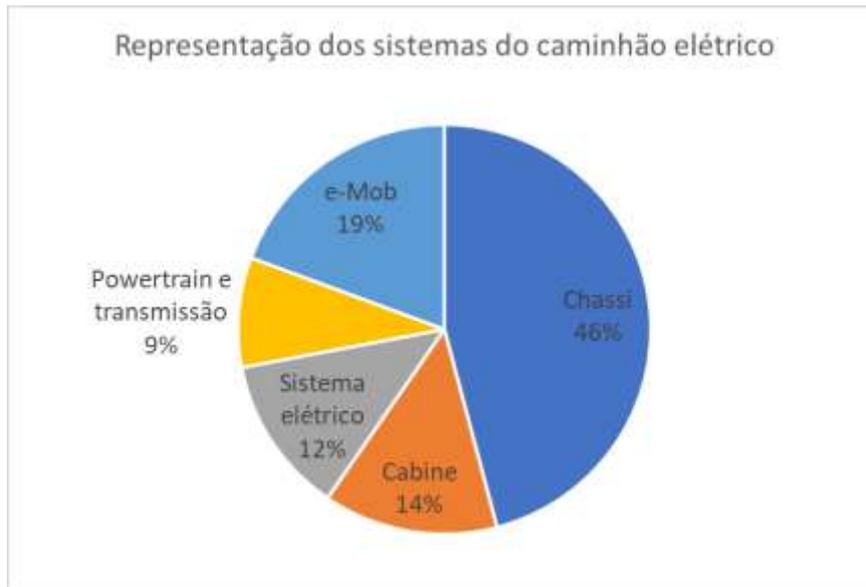


Figura 11. Representação dos sistemas do caminhão elétrico

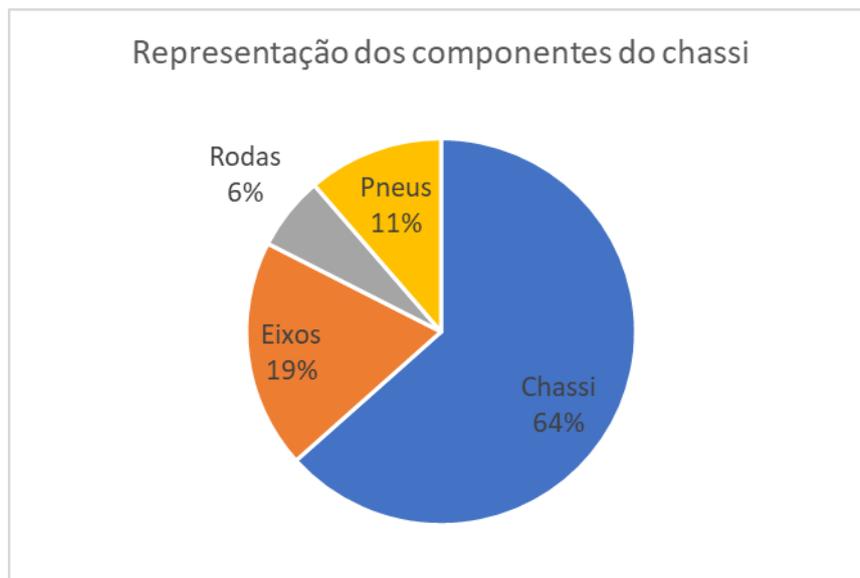


Figura 12. Representação dos componentes do sistema chassi do caminhão elétrico

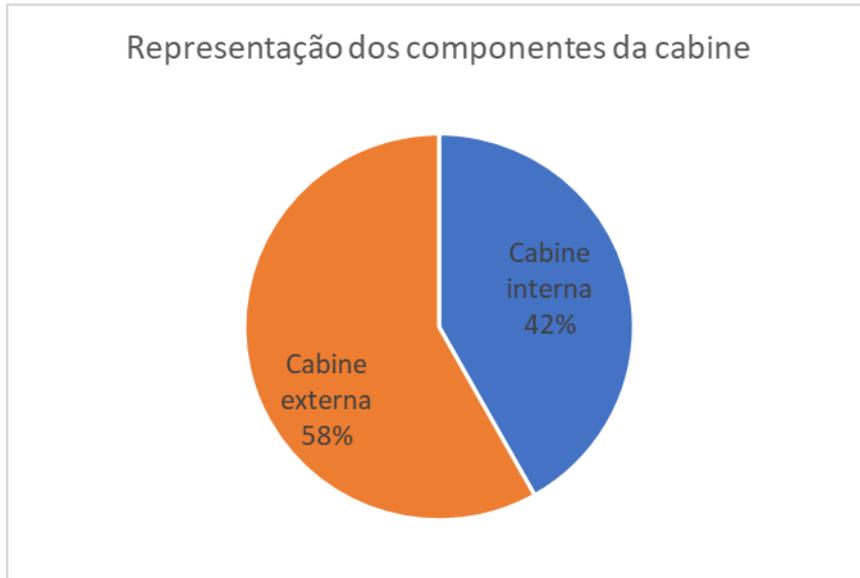


Figura 13. Representação dos componentes do sistema cabine do caminhão elétrico

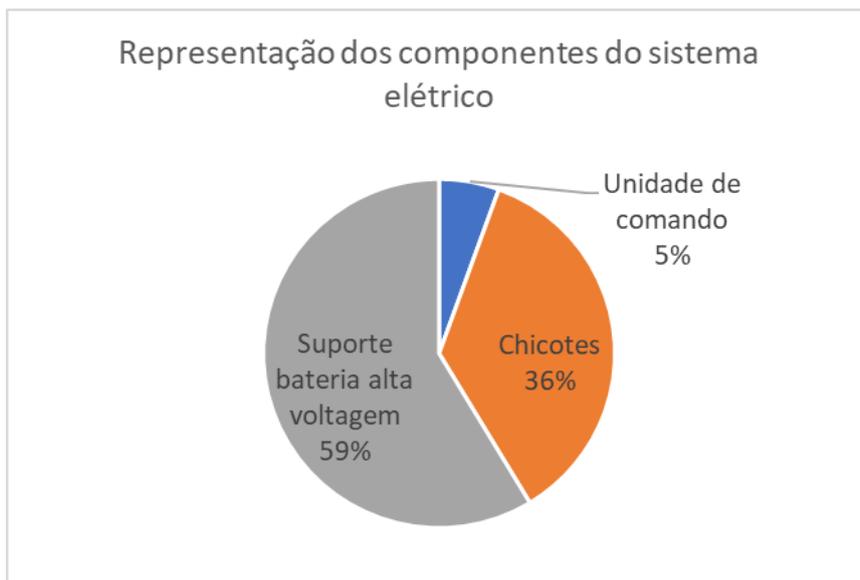


Figura 14. Representação dos componentes do sistema elétrico do caminhão elétrico

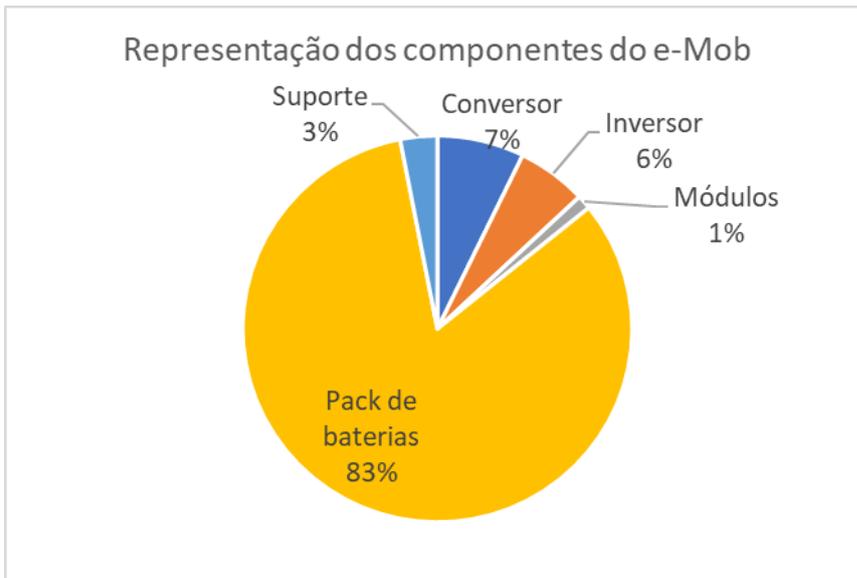


Figura 15. Representação dos componentes do sistema e-Mob

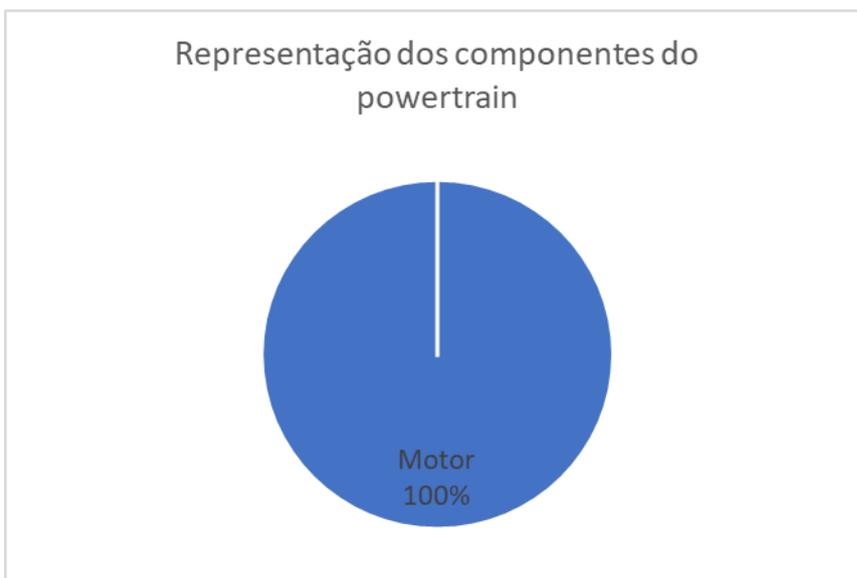


Figura 16. Representação dos componentes do sistema powertrain do caminhão elétrico

Com relação à composição de materiais, observou-se que a cabine externa, também conhecida como carroceria, é feita principalmente de aço carbono e ferro, formando a estrutura metálica que sustenta a cabine, incluindo os painéis laterais, dianteiros, traseiros e componentes de vidro, como janelas e para-brisas. A cabine interna inclui materiais usados para painéis de acabamento, assentos, estofamento, painel de instrumentos, sistema de som, controle climático, sistemas de segurança e volante e coluna de direção. Os principais materiais da cabine são ferro (46%), aço

(24%), polímeros (8%) como polipropileno (PP) e poliuretano (PU), aço galvanizado (6%) e vidro (4%) (Figura 17).

O sistema de chassi, que representa 46% do peso total do caminhão, inclui as rodas, eixos dianteiro e traseiro, pneus e o próprio chassi. Os principais materiais usados neste sistema são aço e ferro, respondendo por 47% e 46%, respectivamente (Figura 18). O powertrain corresponde a 9% do peso do caminhão e é basicamente composto pelo motor e seus suportes, que têm ferro (77%) e alumínio (16%) como principais materiais, seguidos por zinco (3%) e silício (1%). Apesar de sua massa irrelevante, o motor contém Elementos de Terras Raras (REEs), como Neodímio, Praseodímio e Disprósio.

Esses elementos não são apenas recursos estratégicos críticos em todo o mundo, mas também têm impactos ambientais significativos ao longo de seu ciclo de vida. O processo de produção envolve várias etapas, incluindo mineração, beneficiamento, torrefação ácida, lixiviação e extração por solvente, sendo a extração por solvente a etapa de maior impacto ambiental (Bailey et al., 2020). Os impactos ambientais mais significativos associados ao ciclo de vida dos REEs são as mudanças climáticas e depleção dos combustíveis fósseis (Lima et al., 2017). A pegada de carbono da produção de 1 kg de terras raras de óxidos mistos é de aproximadamente 24,3 kg CO₂eq (Wan et al., 2022), o que é consideravelmente maior do que as emissões da produção de aço, que são em torno de 1,2 kg CO₂eq por kg de aço.

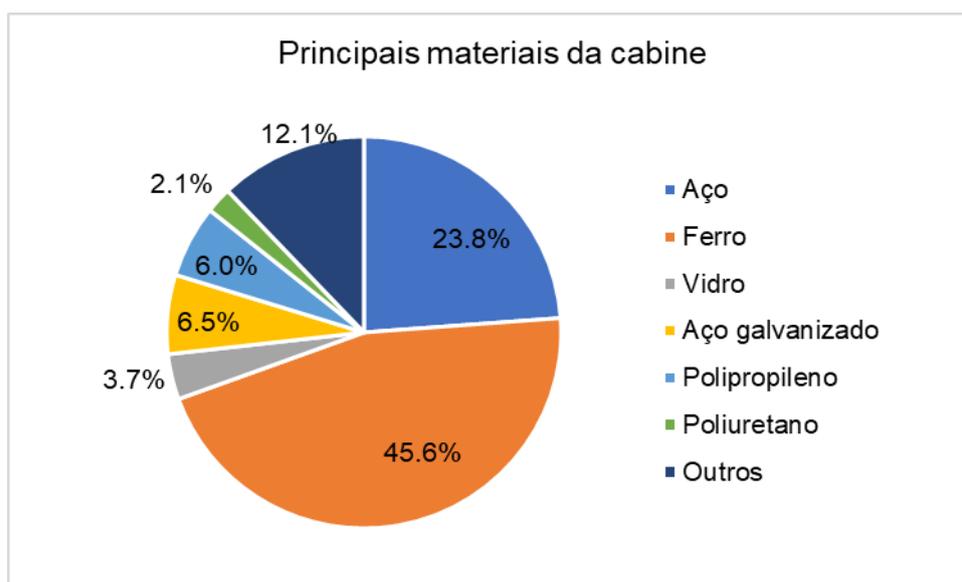


Figura 17. Principais materiais da cabine

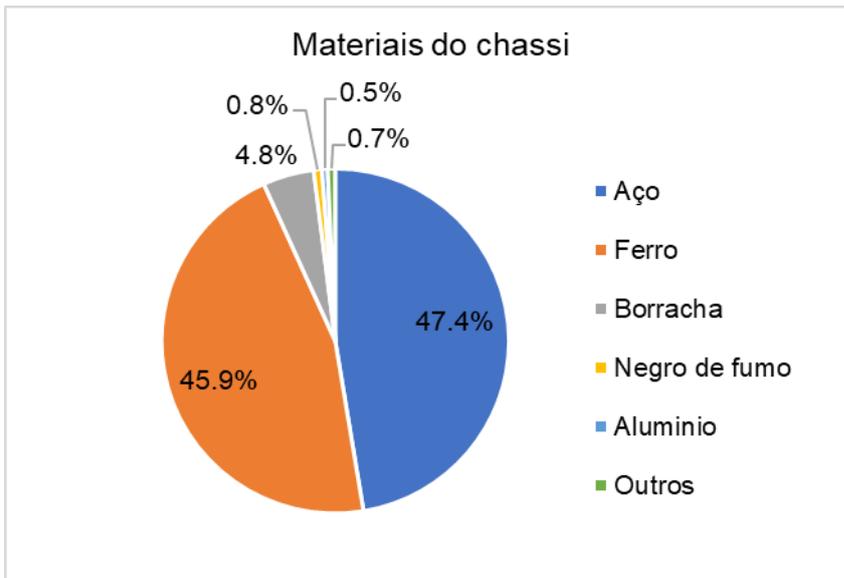


Figura 18. Principais materiais do chassi

Os principais materiais que compõem o sistema elétrico são o ferro (85%), seguido pelo cobre (3%) e manganês (2%). O ferro apresenta elevada representatividade em função do suporte da bateria de alta voltagem estar presente neste sistema. Dentre os principais materiais que compõem o sistema e-Mob, sem considerar o pack de baterias, estão o ferro (60%), alumínio (19%), cobre (11%) e zinco (3%). O alumínio é o material com maior predominância no pack de baterias, com 49%, seguido do cobre (13%), carbono (10%), aço (7%), eletrólitos para a bateria íon-lítio (6%) e ferro (3%). Cabe ressaltar que para o caminhão a diesel, não há o sistema e-Mob, seus componentes e materiais.

Referências

- Cox, B., Mutel, C.L., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., Van Vuuren, D.P., 2018. Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles. *Environ. Sci. Technol.* 52, 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00261>.
- Koroma, M.S., Brown, N., Cardellini, G., Messagie, M., 2020. Prospective environmental impacts of passenger cars under different energy and steel production scenarios. *Energies* 13, 6236. <https://doi.org/10.3390/en13236236>.
- Peters, J.F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., Weil, M., 2017. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – a review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 67, 419–506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>
- XUE X;LI J;SUN X;ABDUL-MANAN A;DU S;LIU H;XU S;ZHAO M 2022. ASSESSING DECARBONIZATION PATHWAYS OF CHINAS HEAVYDUTY TRUCKS IN A WELLTOWHEELS PERSPECTIVE. 10.1007/s11367-022-02124-y

- MIDDELA M;MAHESH S;KANCHARLA S;RAMADURAI G;PERME R;SRIPADA S;DEVI G 2022. COMPLETE LCA OF BATTERY ELECTRIC AND CONVENTIONAL FUEL VEHICLES FOR FREIGHT TRIPS. 10.1016/j.trd.2022.103398
- REN L;ZHOU S;PENG T;OU X 2022. GREENHOUSE GAS LIFE CYCLE ANALYSIS OF CHINAS FUEL CELL MEDIUM AND HEAVYDUTY TRUCKS UNDER SEGMENTED USAGE SCENARIOS AND VEHICLE TYPES. 10.1016/j.energy.2022.123628
- YEOW L;YAN Y;CHEAH L 2022. LIFE CYCLE GREENHOUSE GAS EMISSIONS OF ALTERNATIVE FUELS AND POWERTRAINS FOR MEDIUMDUTY TRUCKS A SINGAPORE CASE STUDY. 10.1016/j.trd.2022.103258
- BOOTO G;AAMODT E K;HANCKE R 2021. COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF HEAVYDUTY DRIVETRAINS A NORWEGIAN STUDY CASE. 10.1016/j.trd.2021.102836
- SACCHI R;BAUER C;COX B 2021. DOES SIZE MATTER THE INFLUENCE OF SIZE LOAD FACTOR RANGE AUTONOMY AND APPLICATION TYPE ON THE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF CURRENT AND FUTURE MEDIUM THE HEAVYDUTY VEHICLES. 10.1021/acs.est.0c07773
- HE X;WALLINGTON T;ANDERSON J;KEOLEIAN G;SHEN W;DE K R;KIM H;WINKLER S 2021. LIFECYCLE GREENHOUSE GAS EMISSION BENEFITS OF NATURAL GAS VEHICLES. 10.1021/acssuschemeng.1c01324
- WOLFF S;SEIDENFUS M;BRÖNNER M;LIENKAMP M 2021. MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION OF LIFE CYCLE ECOEFFICIENCY FOR HEAVYDUTY VEHICLES USING A GENETIC ALGORITHM. 10.1016/j.jclepro.2021.128505
- SEN B;ERCAN T;TATARI O;ZHENG Q 2019. ROBUST PARETO OPTIMAL APPROACH TO SUSTAINABLE HEAVYDUTY TRUCK FLEET COMPOSITION. 10.1016/j.resconrec.2019.03.042
- RUPP M;SCHULZE S;KUPERJANS I 2018. COMPARATIVE LIFE CYCLE ANALYSIS OF CONVENTIONAL AND HYBRID HEAVYDUTY TRUCKS. 10.3390/wevj9020033
- YANG L;HAO C;CHAI Y 2018. LIFE CYCLE ASSESSMENT OF COMMERCIAL DELIVERY TRUCKS DIESEL PLUGIN ELECTRIC AND BATTERY SWAP ELECTRIC. 10.3390/su10124547
- ZHAO Y;TATARI O 2017. CARBON AND ENERGY FOOTPRINTS OF REFUSE COLLECTION TRUCKS A HYBRID LIFE CYCLE EVALUATION. 10.1016/j.spc.2017.07.005
- SEN B;ERCAN T;TATARI O 2017. DOES A BATTERY ELECTRIC TRUCK MAKE A DIFFERENCE LIFE CYCLE EMISSIONS COSTS AND EXTERNALITY ANALYSIS OF ALTERNATIVE FUEL POWERED CLASS 8 HEAVYDUTY TRUCKS IN THE UNITED STATES. 10.1016/j.jclepro.2016.09.046
- LEE D;THOMAS V 2017. PARAMETRIC MODELING APPROACH FOR ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF MEDIUMDUTY TRUCK ELECTRIFICATION. 10.1016/j.jclepro.2016.10.139
- ZHAO Y;ONAT N;KUCUKVAR M;TATARI O 2016. CARBON AND ENERGY FOOTPRINTS OF ELECTRIC DELIVERY TRUCKS A HYBRID MULTIREGIONAL INPUT OUTPUT LIFE CYCLE ASSESSMENT. 10.1016/j.trd.2016.05.014
- LEE D;THOMAS V;BROWN M 2013. ELECTRIC URBAN DELIVERY TRUCKS ENERGY USE GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND COST EFFECTIVENESS. 10.1021/es400179w