



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Thaise Campos Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO SIMPLIFICADO À
BATERIA**

Joinville
2019

Thaise Campos Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO SIMPLIFICADO À
BATERIA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.
Orientador: Prof. Xisto Lucas Travassos Junior, Dr.

Joinville
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Alves, Thaise Campos Alves
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO
SIMPLIFICADO À BATERIA / Thaise Campos Alves Alves ;
orientador, Xisto Lucas Travassos Júnior , 2019.
89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Veículo elétrico.
3. Ciclo de Vida. 4. Impacto Ambiental. I. , Xisto Lucas
Travassos Júnior. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências
Mecânicas. III. Título.

Thaise Campos Alves

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE UM VEÍCULO ELÉTRICO SIMPLIFICADO À
BATERIA**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a. Cátia Regina Carvalho Pinto, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Cristiano Vasconcelos Ferreira, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maurício de Campos Porath, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo Soares Figueiredo, Dr.
Universidade Federal da Bahia

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Regis Kovac Scalice, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Xisto Lucas Travassos Junior, Dr.
Orientador

Joinville, 25 de setembro de 2019.

Este trabalho é dedicado à minha família e principalmente aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ser meu amigo, em todos os momentos.

À minha família, especialmente meu esposo Saulo Fernando Alves pela compreensão, apoio e parceria.

Aos meus pais Laudir Campos e Sandra Campos pelas diretrizes e exemplos de vida.

Ao professor e orientador Xisto Lucas Travassos Júnior, pelo suporte, sugestões e incentivo ao trabalho.

Aos professores, coordenação e secretária da pós-graduação que sempre estão dispostos a ajudar.

Ao Henrique R. Antunes de Souza Jr. e ao grupo de pesquisa CICLOG pela disponibilidade das ferramentas que nortearam este trabalho, além do suporte, dicas e orientações.

Ao Adriano Martins de Oliveira e ao Luiz Eduardo Rosa que contribuíram com participação e auxílio no desenvolvimento deste trabalho (até aos finais de semana).

*"Bem-aventurado o homem que acha
sabedoria, e o homem que adquire conhecimento."
(Provérbios 3:13)*

RESUMO

A preocupação ambiental tem se tornado um tema de pesquisa emergente por parte da indústria automotiva. Acredita-se que os impactos das atividades econômicas no meio ambiente devem ser reduzidos para preservar os recursos naturais do planeta. Veículos elétricos têm potencial para reduzir mudanças climáticas e melhorar a qualidade de vida nas metrópoles. No entanto, esta solução necessita de numerosos desenvolvimentos para que se torne tão atrativa quanto os veículos com base na combustão interna. Além disso, é preciso quantificar qual é o grau de melhoria no ponto de vista ambiental. Este trabalho tem por objetivo estudar os impactos da produção e uso de veículos elétricos e de seus principais componentes e compará-los com um veículo de combustão interna. Como estudo de caso, um veículo elétrico simplificado com dois tipos de baterias foi utilizado, a fim de comparar os impactos ocasionados pelas diferentes baterias e os impactos ocasionados pelo veículo de combustão interna. No veículo elétrico uma bateria de lítio e uma bateria de chumbo-ácido foram utilizadas. Baseado nos materiais e processos empregados na construção do veículo o inventário de ciclo de vida foi construído e o estudo de ciclo de vida foi realizado respeitando as limitações do modelo. Os resultados obtidos sugerem que a oferta de energia elétrica do Brasil, atualmente considerada predominante renovável, é favorável para adoção de veículos elétricos. Além disso, a falta de incentivos para adoção destes veículos, suas lacunas técnicas em relação à necessidade de desenvolvimentos futuros e o desenvolvimento dos fluxos de reciclagem de materiais como os ferrosos, que são os mais utilizados em veículos em geral, foram apresentados como oportunidades de melhoria.

Palavras-chave: Veículo elétrico 1. Ciclo de vida 2. Impacto ambiental 3.

ABSTRACT

Environmental concern has become an emerging research topic for the automotive industry. It is believed that the impacts of economic activities on the environment must be reduced to preserve the planet's natural resources. Electric vehicles have the potential to reduce climate change and improve the quality of life in metropolises. However, this solution needs numerous developments to make it as attractive as vehicles based on internal combustion. In addition, it is necessary to quantify the degree of improvement from an environmental point of view. The objective of this work is to study the impacts of the production and usage of electric vehicles and their main components and compare them with an internal combustion vehicle. As a case study, a simplified electric vehicle with two types of batteries were utilized in order to compare the impacts caused by the different batteries and the impacts caused by the internal combustion vehicle. In the electric vehicle a lithium battery and a lead acid battery were used. Based on the materials and processes applied in the construction of the vehicle, the life cycle inventory was built and the life cycle study was performed respecting the model limitations. The results suggest that the supply of electric energy in Brazil, currently considered predominantly renewable, is favorable for the adoption of electric vehicles. In addition, the lack of incentives to adopt these vehicles, their technical gaps in relation to the future developments, and the development of recycling streams of materials such as ferrous, which are most commonly used in vehicles in general, were presented as opportunities for improvement.

Keywords: Electric vehicle 1. life cycle 2. Environmental impact 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – VE licenciados no Brasil	17
Figura 2 – Grupos de veículos elétricos.	22
Figura 3 – Fases de ACV.	25
Figura 4 – Ciclo de vida de um automóvel.	26
Figura 5 – Sistema de produto.	28
Figura 6 – Fluxo simplificado para análise de inventário.	29
Figura 7 – Elementos obrigatórios na AICV.	31
Figura 8 – Kart - Sistema de estudo.	42
Figura 9 – Sistema de produto do estudo para o kart elétrico.	44
Figura 10 – Sistema de produto do estudo para o kart à combustão interna.	45
Figura 11 – Equipamentos utilizados: Kart elétrico, bateria de lítio e conjunto de baterias de chumbo ácido.	54
Figura 12 – Equipamentos utilizados: Kart à combustão interna, motor Honda.	58
Figura 13 – Participação do impacto na categoria depleção da camada de ozônio.	62
Figura 14 – Comparação das fases do ciclo de vida na categoria depleção da camada de ozônio.	63
Figura 15 – Participação do impacto na categoria mudanças climáticas.	64
Figura 16 – Comparação das fases do ciclo de vida na categoria mudanças climáticas.	65
Figura 17 – Participação do impacto na categoria potencial de toxicidade humana.	66
Figura 18 – Comparação das fases do ciclo de vida na categoria potencial de toxicidade humana.	67
Figura 19 – Comparação geral dos veículos simplificados por categoria.	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios de busca.	21
Quadro 2 – Principais diferenças entre veículos elétricos à bateria e híbrido. . .	23
Quadro 3 – Normatização de ACV Brasileira.	26
Quadro 4 – Exemplos de categorias de impacto mais utilizadas.	32
Quadro 5 – Diferença entre Métodos Clássicos e Métodos Orientados ao Dano de AICV.	33
Quadro 6 – Diferentes cenários analisados neste estudo.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplos de coleta de dados quantitativos e qualitativos	30
Tabela 2 – Ficha técnica do Kart	42
Tabela 3 – Indicadores predominantemente considerados no estudo.	47
Tabela 4 – Oferta de energia elétrica por fonte para 2017.	48
Tabela 5 – Dados da bateria utilizada no Kart.	49
Tabela 6 – Dados da célula de bateria utilizada no Kart	50
Tabela 7 – % dos materiais necessários para produzir uma bateria de chumbo.	51
Tabela 8 – Composição técnica dos pneus utilizados no kart.	52
Tabela 9 – Consumo de energia prevista na manufatura da estrutura.	53
Tabela 10 – Testes realizados utilizando a bateria de lítio.	56
Tabela 11 – Testes realizados utilizando a bateria de chumbo-ácido.	57
Tabela 12 – Testes realizados utilizando o motor de combustão interna.	59
Tabela 13 – Taxa de recuperação do material para análise de final de vida.	60
Tabela 14 – Resultados do impacto ambiental em depleção da camada de ozônio por fase de montagem, utilização de descarte.	63
Tabela 15 – Resultados do impacto ambiental em mudanças climáticas por fase de montagem, utilização de descarte.	65
Tabela 16 – Resultados do impacto ambiental em potencial de toxicidade humana por fase de montagem, utilização de descarte	67
Tabela 17 – Resultados gerais disponíveis na literatura de ACV de veículos elétricos, combustão interna e híbridos.	70
Tabela 18 – Continuação... Resultados gerais disponíveis na literatura de ACV de veículos elétricos, combustão interna e híbridos.	71
Tabela 19 – Relação de processos utilizados	81
Tabela 20 – Relação de processos utilizados 1	82
Tabela 21 – Relação de processos utilizados 2	83
Tabela 22 – Relação de processos utilizados 3	84
Tabela 23 – Relação de processos utilizados 4	85
Tabela 24 – Relação de processos utilizados 5	86
Tabela 25 – Relação de processos utilizados 6	87
Tabela 26 – Relação de processos utilizados 7	88
Tabela 27 – Relação de processos utilizados 8	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida
ANFEVA	Associação Nacional de Fabricantes de Automotores
BMS	<i>Battery Management System</i>
CFC	Clorofluorcarbono
DCO	Depleção da Camada de Ozônio
GEE	Gases de Efeito Estufa
ICV	Inventário de ciclo de vida
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LSE	Laboratório de Sistemas Embarcados
MC	Mudanças Climáticas
NBR	Norma técnica Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
PTH	Potencial de Toxicidade Humana
PVC	Policloreto de Vinila
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VCI	Veículo de Motor com Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
VEB	Veículo Elétrico à Bateria
VEH	Veículo Elétrico Híbrido

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂	Dióxido de carbono (Gás carbónico)
®	Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
2.2	ETAPAS DA ACV SEGUINDO AS NORMAS ABNT 14040 E 14044	24
2.2.1	Definição e Normatização	24
2.2.2	Definição de objetivo e escopo	27
2.2.3	Análise de inventário de ciclo de vida	28
2.2.4	Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV)	31
2.2.4.1	Métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida	33
2.2.5	Interpretação	36
2.3	ANÁLISES DE CICLO DE VIDA DE VE NO CONTEXTO GERAL	36
2.4	ANÁLISES DE CICLO DE VIDA DE VE NO CONTEXTO BRASILEIRO	37
3	MATERIAL E MÉTODO	41
3.1	DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO	41
3.1.1	Definição do sistema de produto	41
3.1.2	Definição da unidade funcional	43
3.1.3	Definição da fronteira de sistema	43
3.2	ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	46
3.3	ELABORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA	46
3.3.1	Avaliação de impacto	47
3.4	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
4	ESTUDO DE CASO	48
4.1	ELETRICIDADE	48
4.2	CARACTERÍSTICAS DO KART ELÉTRICO E DO KART À COMBUSTÃO INTERNA	48
4.2.1	Descrição das baterias	49
4.2.2	Descrição do motor elétrico	51
4.2.3	Descrição do motor à combustão interna	51
4.2.4	Descrição dos pneus	51
4.2.5	Descrição dos componentes da matriz ferrosa	52
4.3	FASE DE USO	53
4.3.1	Incerteza da medição de consumo	59
4.4	FINAL DE VIDA	59

5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
5.1	DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO	61
5.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	63
5.3	POTENCIAL DE TOXICIDADE HUMANA	65
5.4	COMPARAÇÃO GERAL ENTRE OS VEÍCULOS SIMPLIFICADOS .	67
6	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A – RELAÇÃO DE PROCESSOS <i>ECOINVENT</i>® UTILIZADOS	80

1 INTRODUÇÃO

O fator ambiental é uma das principais preocupações mundiais, acelerando o ritmo do desenvolvimento de Veículo Elétrico (VE). O transporte rodoviário, é responsável por uma parcela significativa e crescente das emissões globais de CO₂ (OFFER *et al.*, 2010). Dentre as inúmeras possibilidades de melhoria de mobilidade urbana, o desenvolvimento de VE tem sido apresentado como uma das soluções mais viáveis para redução dos impactos ambientais. Logo, a disseminação e a aceleração do desenvolvimento de VE é cada vez maior.

O VE, além de um sistema de transporte eficiente e inteligente, oferecem zero emissão de gases de efeito estufa durante seu funcionamento (KUMAR; REVANKAR, 2017); (BAUER *et al.*, 2015); (OFFER *et al.*, 2010). Esta tecnologia é anunciada como potencial solução de longo prazo para a mobilidade sustentável, já que possibilitam muitas vantagens em relação ao Veículo de Motor com Combustão Interna (VCI), como ausência de emissões, alta eficiência, independência do petróleo e operação silenciosa (EHSANI *et al.*, 2005); (MA *et al.*, 2012).

Existem diferentes tipos de veículos que utilizam motores elétricos na sua propulsão. Basicamente, os tipos de VE incluem Veículo Elétrico Híbrido (VEH) e à Veículo Elétrico à Bateria (VEB) (EHSANI *et al.*, 2005). Atualmente, estima-se que os VEB devem superar as vendas de VEH em longo prazo devido à complexidade de manutenção, alto custo e duplo sistema de propulsão do VEH (BNEF, 2017). As baterias usadas em VEH e VEB são referidas como baterias de tração. Os avanços na tecnologia de acumuladores tornaram a bateria de íon de lítio a preferida entre as opções (ELLINGSEN *et al.*, 2013).

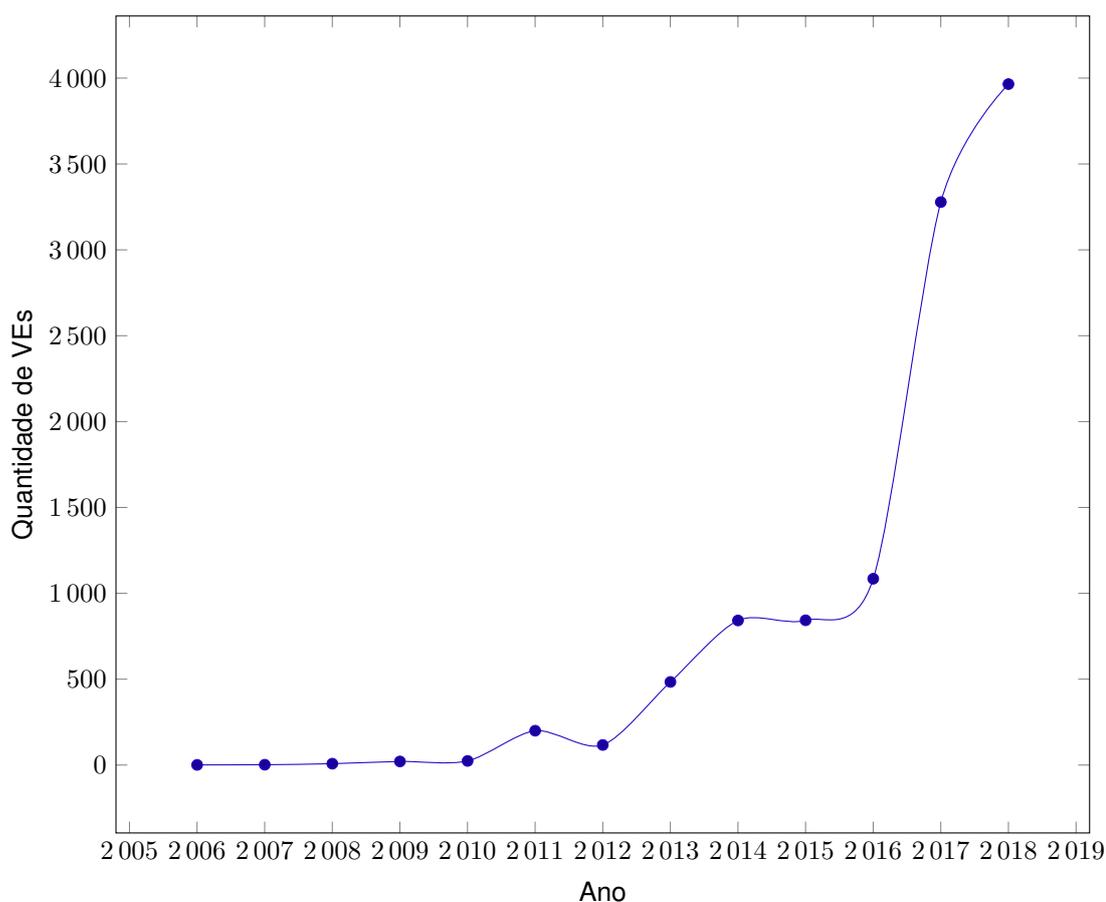
As desvantagens do VE estão, principalmente associadas ao custo dos veículos, a autonomia e ao maior uso de metais como o lítio, o manganês, o cobalto ou os metais de terras raras, como o neodímio (EGEDE *et al.*, 2015). Esses componentes especiais podem ter potencial maior de impacto ao meio ambiente do que os componentes utilizados na produção de um VCI (NORDELOF *et al.*, 2014).

No Brasil, a indústria automobilística está em constante crescimento. O Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro industrial, em 2018 fechou 0,6% maior que o ano de 2017, este é o segundo ano consecutivo de resultado positivo desde 2013. A maior influência para que este resultado fosse obtido foi do setor de veículos automotores, reboques e carrocerias com crescimento de mais de 17,2% (IBGE, 2019); (IBGE, 2018).

Segundo dados do Sindicato Independente de Fornecedores de Autopeças (SI-DIPECAS, 2019), a frota de automóveis está aumentando gradativamente ao longo dos anos. Da mesma forma, a frota global de veículos de passageiros cresceu anualmente cerca de 5%, atingindo cerca de 900 milhões de veículos em 2013. Espera-se que esta frota aumente para 1,7 bilhão de veículos em 2035 (IEA, 2017).

Quando se analisa a frota por combustível, os veículos *flex* (gasolina e álcool) detêm 67,1% da frota total, gasolina 22,2% seguido de diesel 10%. Os híbridos e elétricos já apresentam representatividade sendo atualmente 0,025% da frota total (SIDIPECAS, 2019). De acordo com dados da Associação Nacional de Fabricantes de Automotores (ANFEVA), o número de VE cresce a cada ano (Figura 1) evidenciando que as iniciativas adotadas no País, mesmo que mínimas, já refletem positivamente no cenário nacional.

Figura 1 – VE licenciados no Brasil



Fonte: ANFEVA (2019)

No cenário atual, a quantidade global de VE excedeu 5 milhões de unidades em circulação, isto é reflexo da alta aceitação desta tecnologia, superando as expectativas dos órgãos reguladores atuais (IEA, 2019). Além disso, existe uma forte tendência a um aumento significativo dos modelos de VE comercializados no mercado e é provável que até 2020 existam mais de 120 modelos diferentes para comercialização. Portanto, considera-se que a demanda de VE aumentará devido ao aumento das opções de compra (BNEF, 2017).

Contudo, o potencial dos VE, do ponto de vista ambiental, precisa ser demonstrado levando em conta o ciclo de vida completo, incluindo sua fabricação, uso e fim de vida, assim como, o fornecimento de energia. A matriz energética, os padrões de

uso e a composição dos materiais dos veículos são exemplos de importantes fatores que influenciam os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de veículos.

Para garantir um desenvolvimento sustentável são necessários métodos e ferramentas capazes de medir e comparar os impactos ambientais das atividades humanas. Os impactos ambientais são aqueles provenientes das emissões para o meio ambiente ou por meio do consumo de recursos (REBITZER *et al.*, 2004).

A ACV é uma ferramenta capaz de avaliar impactos ambientais e os recursos utilizados ao longo do ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a aquisição de matérias-primas até a gestão de resíduo (FINNVEDEN *et al.*, 2009). Realizar a avaliação de todo ciclo de vida é considerado importante para análise do impacto ambiental, já que nem sempre o impacto está ligado apenas à fase de uso, fazendo com que análises pontuais se tornem enganosas.

Cada produto tem uma "vida", começando pelo projeto e desenvolvimento do produto, seguido de extração de recursos, produção, uso/consumo e, finalmente, atividades referentes à gestão de resíduos. Todas as atividades ou processos, na vida de um produto, resultam em impactos ambientais devido ao consumo de recursos, emissões de substâncias no ambiente natural e outras trocas ambientais (REBITZER *et al.*, 2004).

Atualmente, a estrutura metodológica da ACV é descrita pela *International Organization for Standardization* (ISO), da série ISO 14000 e as suas similares brasileiras ABNT/ISO são a norma internacional ISO 14040 – Princípios e estrutura geral (ABNT, 2009a) e a norma internacional ISO 14044 – Requerimento e diretrizes (ABNT, 2009b), bases para este trabalho. O procedimento de ACV, baseado nas normas ISO, consiste em quatro etapas sucessivas: a definição de objetivo e escopo, a análise de inventário, a avaliação de impacto e a interpretação dos resultados.

Sendo assim, o constante crescimento da frota de veículos no Brasil e no mundo (IBGE, 2019); (IBGE, 2018) que contribui significativamente com emissões globais de CO₂ (OFFER *et al.*, 2010) em um mundo cada vez mais sustentável, colocam os VE como uma das alternativas mais promissoras para um setor de transporte mais limpo (BNEF, 2017) (IEA, 2019).

No Brasil, a indústria automobilística está em constante crescimento. O PIB brasileiro do setor industrial como um todo fechou em 2,5% maior que o ano de 2016, este é o primeiro resultado positivo desde 2013. A maior influência para que este resultado fosse obtido foi do setor de veículos automotores, reboques e carrocerias com crescimento de 17,2% (IBGE, 2018).

Diante deste crescimento, as indústrias automobilísticas buscam o uso de tecnologias alternativas com a finalidade de aumentar a eficiência energética dos veículos e diminuir as emissões de poluentes. Entretanto, veículos elétricos também promovem impactos ambientais. Embora possuam alta eficiência energética, com emissão de

CO₂ nula ou próximo a zero, durante a fase de utilização, em outras fases do ciclo de vida pode ser diferente.

Neste contexto e a partir da hipótese de que a energia disponível no Brasil é disponibilizada através de hidroelétricas, sendo considerada renovável, uma avaliação ambiental enquadrada nos padrões e diretivas utilizados pela indústria automotiva torna-se pertinente. Os aspectos abordados podem ser destacados: i) a delimitação da ACV; ii) a determinação dos parâmetros mais importantes e estágios do ciclo de vida; iii) teste funcionais no veículo com obtenção dos parâmetros relevantes; iv) estimativa do impacto ambiental.

Por fim, o principal objetivo deste estudo é realizar a avaliação do ciclo de vida de um veículo elétrico com dois tipos diferentes de bateria tripulado representado de modo simplificado por meio de um kart elétrico e compará-lo com a avaliação do ciclo de vida de um veículo à combustão interna tripulado representado de moto simplificado por meio de um kart à combustão interna.

Na literatura, existem diversos trabalhos publicados, porém, poucos apresentam a realidade brasileira (SOUZA *et al.*, 2018). Além disso, na maioria dos estudos, apenas a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) é utilizada como indicador ambiental (SAMARAS; MEISTERLING, 2008); (MA *et al.*, 2012); (FARIA *et al.*, 2013); (ONAT; KUCUKVAR; TATARI, 2015). Desta forma, este trabalho apresentará os resultados dos impactos ambientais, a partir da matriz elétrica brasileira e abordará os indicadores de impacto relevantes em estudos ambientais automobilísticos, como: depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas e potencial de toxicidade humana.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é avaliar e comparar os impactos ambientais de um kart tripulado à bateria de lítio, um kart tripulado à bateria de chumbo-ácido e um kart tripulado à combustão interna no contexto brasileiro.

Com isso, pretende-se apresentar sugestões que possam contribuir para o projeto de novos veículos elétricos buscando um impacto ambiental menor.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos, que complementam o alcance do objetivo geral, estão detalhados a seguir:

- 1) Identificar, com base na literatura, as condições atuais da avaliação do ciclo de vida de VE no Brasil;

- 2) Avaliar o gasto de energia através de teste funcional no kart acoplado com a bateria de lítio e teste funcional no kart acoplado com a bateria de chumbo-ácido;
- 3) Avaliar o consumo de combustível através de teste funcional no kart à combustão interna;
- 4) Identificar as fases no ciclo de vida que mais contribuem para o impacto ambiental através da avaliação dos indicadores ambientais: depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas e potencial de toxicidade humana.
- 5) Realizar a comparação do impacto ambiental realizado pelos três tipos diferentes de kart: kart acoplado com a bateria de lítio, kart acoplado com a bateria de chumbo-ácido e kart à combustão interna;
- 5) Comparar os resultados da ACV realizada neste estudo, com outras análises disponíveis na literatura.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este texto está organizado em seis capítulos, o Capítulo 1 retrata a introdução ao tema de dissertação, o Capítulo 2 menciona sobre os referenciais bibliográficos em relação às análises de ciclo de vida de VE com foco no contexto brasileiro e sobre os procedimentos para realizar uma ACV, o Capítulo 3 propõe a descrição e o passo a passo do método utilizado. No Capítulo 4 é demonstrado as especificidades do veículo avaliado neste estudo e que foi considerado para aplicação da ACV, o Capítulo 5, dispõe e comenta os resultados obtidos para cada indicador ambiental, e por fim o Capítulo 6 descreve a conclusão dos resultados obtidos na ACV realizada e identifica as fases no ciclo de vida que mais contribuem para o impacto ambiental.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para realização desta revisão sistemática da literatura foi utilizada a base de dados disponível no *Scopus* seguindo os critérios de buscas explanados Quadro 1. Foram encontrados 372 artigos no período de 2010 a 2019. Buscando encontrar as informações mais relevantes no tema, neste trabalho optou-se por priorizar e comentar os trabalhos, respeitando o escopo, com maior número de citações e maior fator de impacto.

Quadro 1 – Critérios de busca.

Palavras Chave	Campo de Busca	Exclusões
"life cycle assessment"OR "environmental asses- sment"AND "electric vehicle.	Title, abstract, keywords	Publicações de áreas dife- rentes de engenharia e ti- pos diferentes de artigo.

Fonte: Autora (2019).

Os assuntos encontrados acerca desta revisão bibliográfica serão explanados nos capítulos seguintes.

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

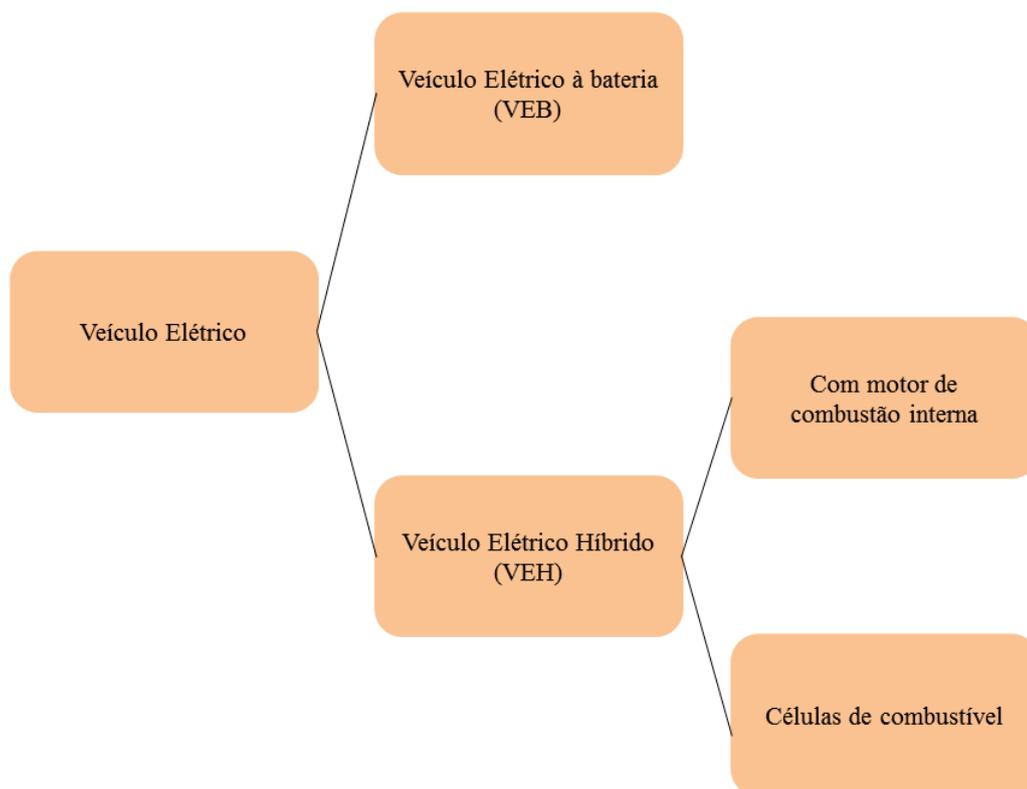
Os VE existem desde 1834, sendo o primeiro sucesso apresentado em 1891 por William Morrison na exposição Colombiana de 1893 em Chicago. Durante o século XIX, América, Grã-Bretanha e França iniciaram a produção e desenvolvimento de VE, porém devido a limitações associadas às baterias e ao rápido avanço dos VCI, em 1930, os VE quase desapareceram de cena. Por volta de 1970, a partir da preocupação mundial com o meio ambiente iniciou-se a retomada pelos VE nos Estados Unidos (CHAN, 2007); (SULZBERGER, 2004).

Barassa (2015) comenta que, além da preocupação mundial com o meio ambiente através da agenda ambiental, outros dois fatores podem ser considerados cruciais para retomada das pesquisas e produção de VE: o aumento no custo do petróleo que encareceu a utilização do VCI e a preocupação com a saúde mundial que está diretamente ligada com a emissão de poluentes ocasionada pelos motores de combustão interna.

Para Chan (2007) a engenharia de VE é o casamento da engenharia automotiva com a engenharia elétrica. Estas duas áreas tecnológicas devem ser capazes de conviver harmoniosamente para alcançar a capacidade de condução exigida com a máxima eficiência energética e emissão mínima. Diante disso, os VE estão ganhando popularidade devido à baixa emissão nociva de gases de efeito estufa e menor dependência do petróleo.

Segundo Ehsani *et al.* (2005), existem diferentes configurações de VEs, a Figura 2 exemplifica as possibilidades de classificações de VE.

Figura 2 – Grupos de veículos elétricos.



Fonte: Adaptado de Picorelli e Holanda (2003).

Um VEB é aquele que pode ser acionado por motor elétrico que é alimentado por meio de energia vinda de bateria. Existem VE disponíveis com mais de um motor elétrico e mais de uma bateria, um exemplo é o VE com motores acoplados às rodas. Além disso, alguns VE são providos do sistema de frenagem regenerativa que acontece quando o freio do veículo é acionado para reduzir a velocidade, então, esta energia cinética é restaurada para o VE que é novamente armazenada no veículo. A maioria das baterias de um VE tem a capacidade de receber essa energia regenerada (ABVE, 2017); (PICORELLI; HOLANDA, 2003); (EHSANI *et al.*, 2005).

O VEB pode alcançar a emissão zero de poluentes durante a fase de uso já que é alimentado basicamente através de baterias ou outras fontes de energia elétrica (CHAN; BOUSCAYROL; CHEN, 2010). Atualmente, os VEB são principalmente aplicáveis para condução nas cidades devido à baixa quilometragem, baixo peso e baixa velocidade (DAS; TAN; YATIM, 2017).

Os VEH são aqueles que combinam o conceito dos VEB outro sistema de

propulsão, assim utilizam de uma fonte de energia primária e uma fonte de energia secundária. Algumas das opções são: sistema de motor à gasolina ou diesel, sistema de motor elétrico de hidrogênio-combustível ou sistema de bateria elétrica-elétrica (PICORELLI; HOLANDA, 2003); (EHSANI *et al.*, 2005).

Existem duas principais configurações de VEH: em série e em paralelo (PICORELLI; HOLANDA, 2003); (CHAN, 2007). No híbrido em paralelo, assim como um veículo de combustão interna, o motor fornece energia mecanicamente às rodas com o motor elétrico acoplado a transmissão. Sendo assim, tanto o motor elétrico quanto o motor de combustão interna podem acionar mecanicamente as rodas melhorando a utilização das vantagens de cada motor e buscando maximizar o desempenho dos VEH (EHSANI *et al.*, 2005); (PICORELLI; HOLANDA, 2003).

Já no híbrido em série, o motor de combustão interna não tem ligação mecânica com a tração, ou seja, ele não alimenta diretamente o veículo. A saída mecânica do motor de combustão interna é convertida em eletricidade, e essa eletricidade pode recarregar as baterias ou realizar diretamente a propulsão das rodas (CHAN; BOUS-CAYROL; CHEN, 2010); (PICORELLI; HOLANDA, 2003).

Uma classificação sobre as diferenças básicas entre um VEB e VEH está disponível no Quadro 2.

Quadro 2 – Principais diferenças entre veículos elétricos à bateria e híbrido.

Tipos de VE	Bateria	Híbrido
Sistema de propulsão	Motor elétrico	Motor elétrico e Motor de combustão interna
Sistema de energia	Bateria, Ultracapacitor	Bateria, Ultracapacitor e Unidade geradora no motor a combustão interna
Fonte de energia e infraestrutura	Rede elétrica	Rede elétrica e Gasolina
Características	Emissão Zero, Alta eficiência energética, Independência dos combustíveis fósseis líquidos, Intervalo relativamente curto, Alto custo inicial, Diversos modelos em comercialização	Baixa emissão, Maior economia de combustível comparado com veículos de combustão interna, Dependência dos combustíveis fósseis líquidos, Maior custo quando comparado à veículos de combustão interna, Aumento da economia de combustível e redução das emissões de acordo com o nível de potência do motor e da bateria, bem como o ciclo de condução, Diversos modelos em comercialização.

Fonte: Adaptado de Chan (2007).

Existem outras configurações de VEH, como, por exemplo, o VEH plug-in que consiste em um sistema com uma bateria com maior capacidade e por este motivo, é capaz de ser carregado a partir da rede elétrica assim como o VEB.

2.2 ETAPAS DA ACV SEGUINDO AS NORMAS ABNT 14040 E 14044

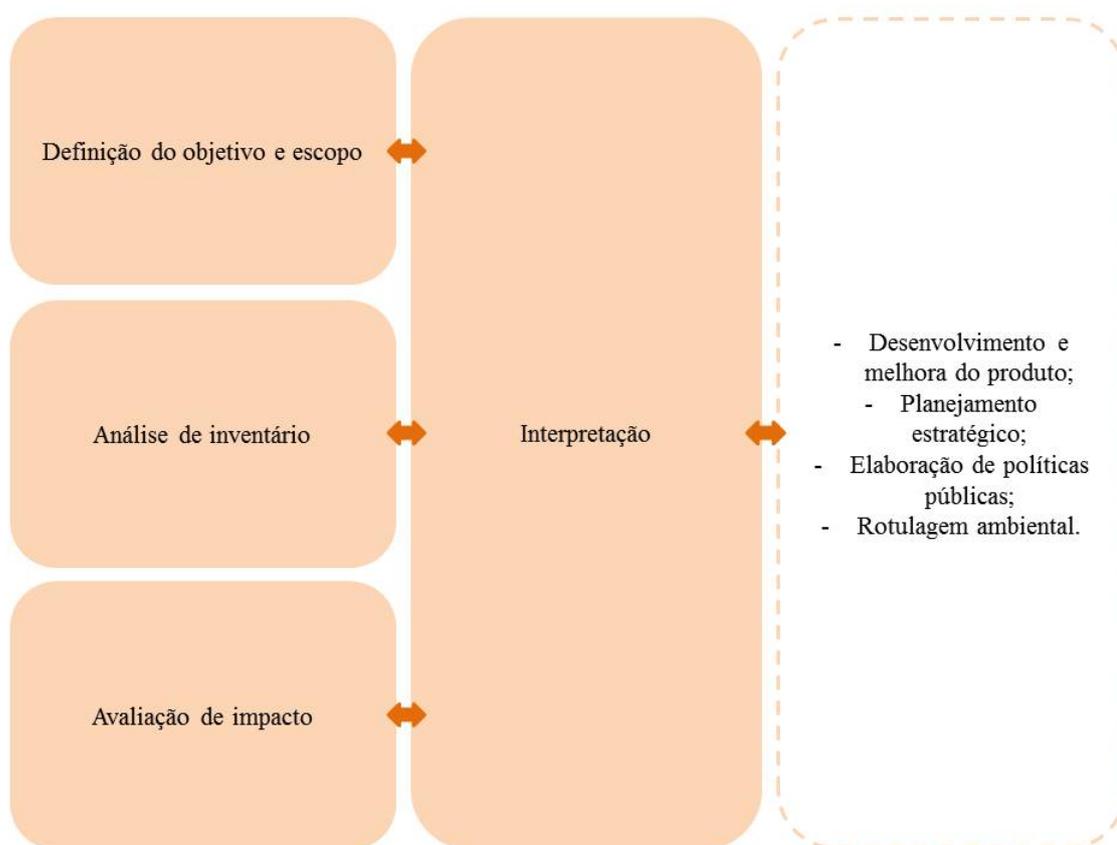
A constante utilização de recursos ambientais em função das atividades humanas gera uma preocupação ambiental cada vez maior no mundo. Atualmente inúmeras legislações estão voltadas para proteção do meio ambiente buscando garantir recursos para as gerações futuras.

No âmbito de produtos e serviços, tem-se a metodologia de ACV. Uma ACV tem como objetivo avaliar os impactos ambientais gerados nas fases relevantes da vida de um produto, incluindo a extração de matéria prima, necessidade de energia, produção, uso, reciclagem e disposição final (REBITZER *et al.*, 2004).

2.2.1 Definição e Normatização

A norma Norma técnica Brasileira (NBR) ISO 14044 define Ciclo de Vida como “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final”(ABNT, 2009b). Além disso, a ABNT (2009a) define uma estrutura metodológica para ACV, que consiste em quatro fases: objetivo e escopo, análise de inventário de ciclo de vida, avaliação de impacto de ciclo de vida e interpretação (Figura 3).

Figura 3 – Fases de ACV.



Fonte: ABNT (2009a).

Cada fase é explicada de forma estruturada nas normas internacionais ISO 14040 e 14044, além dos relatórios técnicos ISO 14047, 14048 e 14049 que tem como objetivo fornecer exemplos e requisitos necessários para execução de certas fases da ACV, como: avaliação de impacto e inventário do ciclo de vida. As normas equivalentes para o território nacional foram criadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O Quadro 3 detalha a norma internacional e a sua equivalente no Brasil.

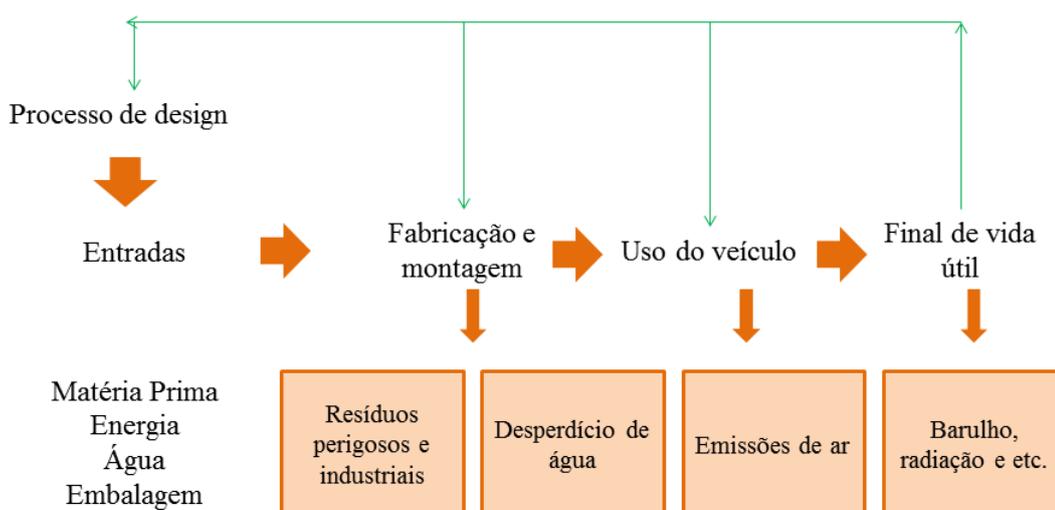
Quadro 3 – Normatização de ACV Brasileira.

NORMA ISO	DESCRIÇÃO	NORMA ABNT
ISO 14040:2006	Aborda os princípios e estrutura geral.	ABNT NBR ISO 14040:2009
ISO 14044:2006	Aborda requisitos e diretrizes para realização de um estudo.	ABNT NBR ISO 14044:2009
ISO TR 14047:2012	Fornecer exemplos sobre a etapa de avaliação de impacto do ciclo de vida.	ABNT ISO/TR 14047:2016
ISO TS 14048:2002	Fornecer requisitos e estrutura para apresentação de dados.	-
ISO TR 14049:2012	Fornecer exemplos de aplicação para realização de uma análise de inventário de ciclo de vida.	ABNT ISO/TR 14049:2014

Fonte: (ABNT, 2009b)

Para avaliação correta do ciclo de vida de um sistema de produto, deve-se adotar cada fase como um conjunto correlacionado (Figura 4), pois existem influências ao longo de toda metodologia, desde a definição do escopo até a interpretação dos resultados do ciclo de vida. Desta forma, nenhuma das fases pode ser considerada em analogia individual (REBITZER *et al.*, 2004).

Figura 4 – Ciclo de vida de um automóvel.



Fonte: Rebitzer *et al.* (2004).

2.2.2 Definição de objetivo e escopo

A definição de escopo e objetivo envolve definir a aplicação pretendida, os motivos para a realização do estudo, o público alvo e os requisitos da qualidade. Além disso, a norma NBR ISO 14040 estabelece que para um bom escopo de ACV é preciso saber onde iniciar e parar o estudo do ciclo de vida, quantos e quais subsistemas incluir e o nível de detalhe do estudo (ABNT, 2009a). Finnveden *et al.* (2009) comenta que esta é uma fase importantíssima já que a definição do método apropriado é dependente da finalidade do estudo individual.

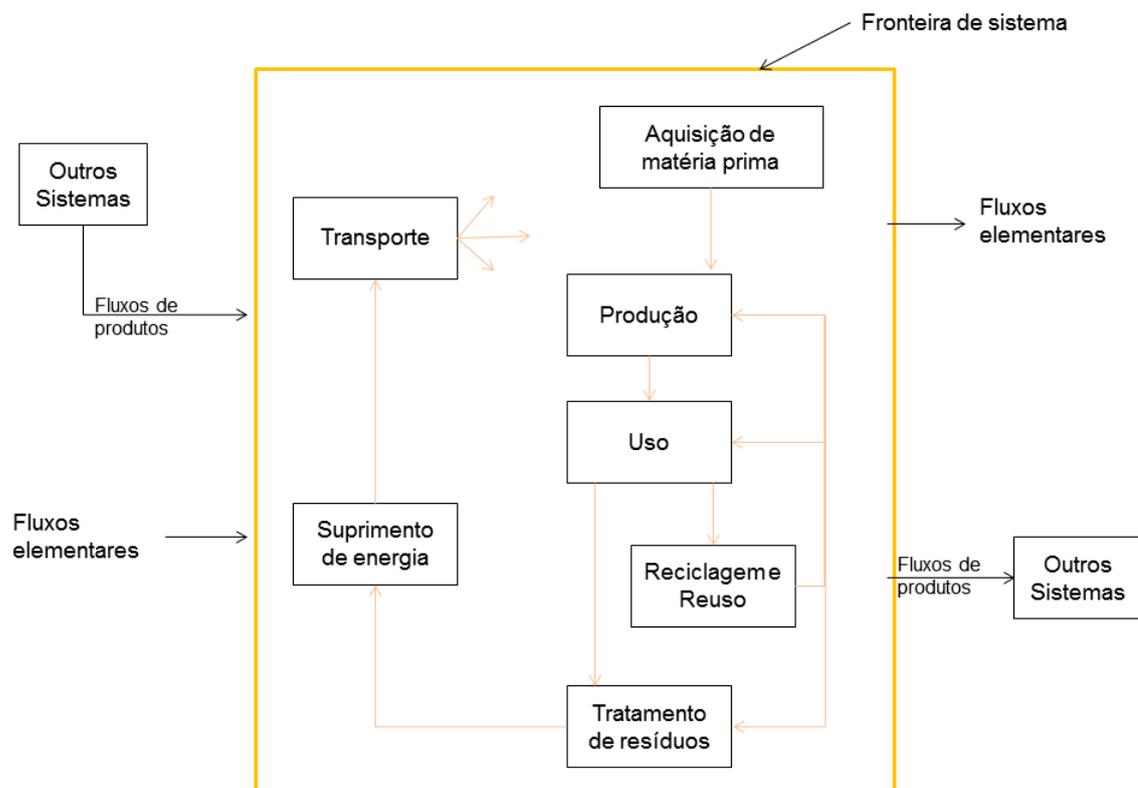
Todos os estágios do ciclo de vida são importantes, ou seja, desde a aquisição de matéria prima até o final de vida útil. Porém, para determinar se todas as fases são pertinentes ao estudo pretendido é necessário indentificar o objetivo do estudo e os recursos disponíveis. A NBR ISO 14040 ABNT (2009a) e NBR ISO 14044 ABNT (2009b) explicam que na definição do objetivo de um ACV é necessário conter: aplicação pretendida, razões para realização do estudo e público-alvo.

Já para definição do escopo a NBR ISO 14040 ABNT (2009a) e NBR ISO 14044 ABNT (2009b) explicam que é preciso abranger: sistema de produto, funções do sistema de produto e a unidade funcional, fronteiras do sistema, tipo de avaliação de impacto e a metodologia a ser utilizada, requisitos dos dados, limitações, e por fim, interpretação a ser utilizada.

Segundo Rebitzer *et al.* (2004) as escolhas efetuadas durante a modelagem do sistema, são decisivas para o resultado de um ACV. Portanto, esses dados devem ser sólidos em comparação com a aplicação pretendida a fim de desenvolver um estudo transparente e consistente.

O sistema de produto (Figura 5) é definido pela norma NBR ISO 14040 ABNT (2009a) como “conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto”. Já a unidade funcional define-se como “desempenho quantificado de um sistema de produto para a utilização como uma unidade de referência” (ABNT, 2009a). Já a fronteira do sistema é definida pela norma como “conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte de um sistema de produto” (ABNT, 2009a).

Figura 5 – Sistema de produto.



Fonte: ABNT (2009a).

Segundo NBR ISO 14040 ABNT (2009a) é importante que a fase do escopo seja tão bem definida quanto o objetivo, pois é a partir dela que teremos as dimensões da ACV (onde iniciar e parar o estudo), a largura da ACV (quantos e quais subsistemas incluir) e a profundidade (nível de detalhamento do estudo) buscando assegurar a compatibilidade entre o estudo e o objetivo declarado. É importante que o escopo seja delimitado através dos limites no sistema, esses limites funcionam como um “contorno” e separam o sistema estudado do meio ambiente e de outros sistemas de produto (LUZ2010).

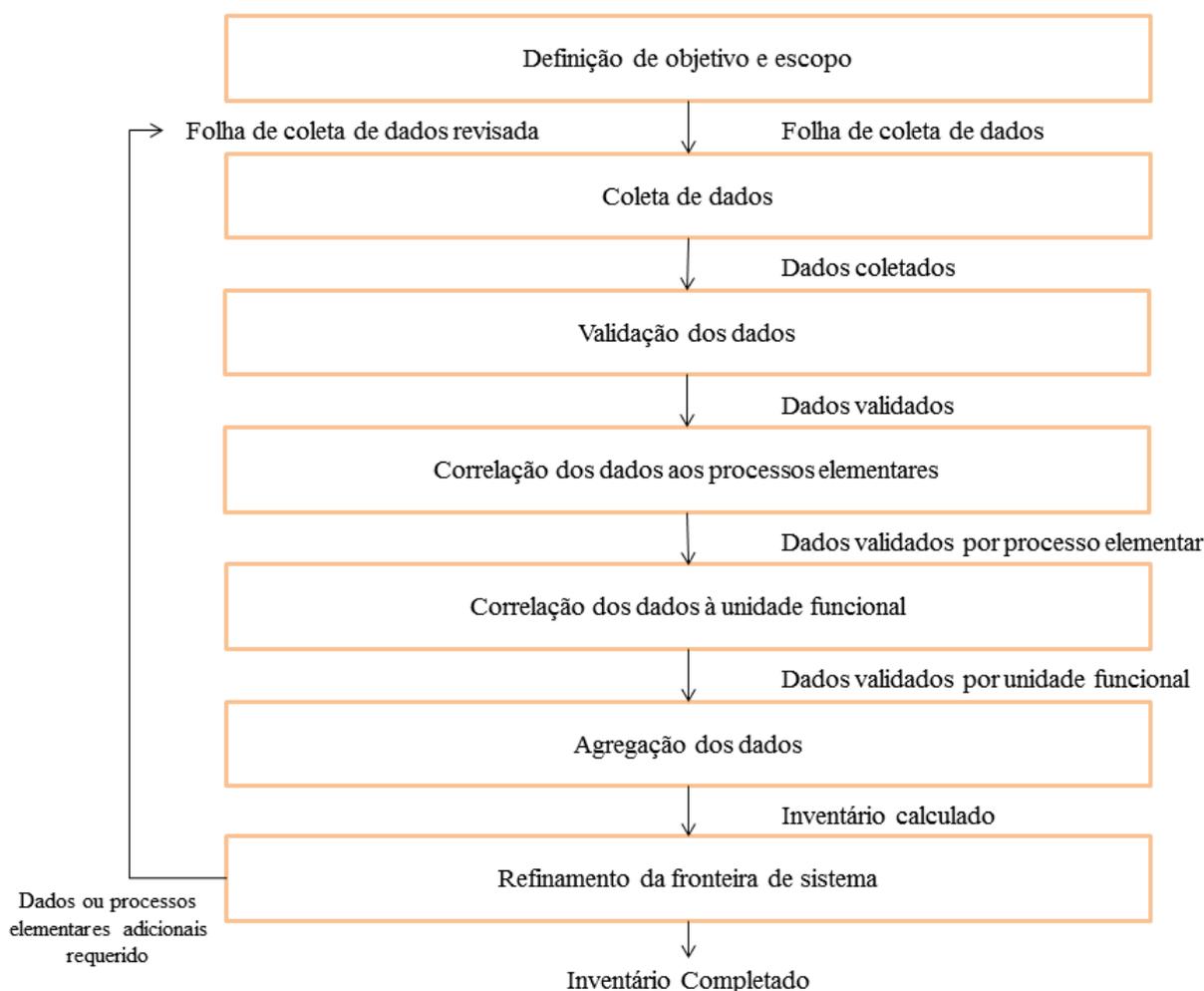
Após a definição dos objetivos e escopo da ACV em estudo e detalhado o sistema do produto a próxima fase da ACV consiste na análise do inventário do ciclo de vida.

2.2.3 Análise de inventário de ciclo de vida

A análise de Inventário de ciclo de vida (ICV) envolve procedimentos de coleta e cálculo de dados para quantificar entradas e saídas relevantes de um sistema de produto (Figura 6). Conforme os dados são coletados é aprendido mais sobre o sis-

tema e durante este processo, podem-se identificar novos requisitos ou limitações de dados que requerem uma alteração na definição de escopo ou objetivo (ABNT, 2009a). Entender quais são os elementos chaves é fundamental, pois nem sempre é viável, seja por custo ou tempo, estudar todas as relações entre todos os processos ou todas as relações entre um sistema de produto e o ambiente de sistema.

Figura 6 – Fluxo simplificado para análise de inventário.



Fonte: ABNT (2009a).

A análise de inventário inicia com a coleta de dados, nesta fase é importante incluir os dados qualitativos e quantitativos (Tabela 1) para cada processo elementar incluído na fronteira do sistema. Esses dados podem ser coletados por medição, cálculo ou ainda por estimativa (ABNT, 2009b).

Tabela 1 – Exemplos de coleta de dados quantitativos e qualitativos

Tipo específico de material	Dados quantitativos	Dados qualitativos
Aço	1,2 kg	Aço baixo carbono , em chapas, produzido pela CSN (Brasil) e transportado pro caminhão até a indústria.
Eletricidade	5,36 kW/h	Eletricidade da rede brasileira de distribuição (média voltagem)

Fonte: ABNT (2009b).

A norma NBR ISO 14044 ABNT (2009b) cita algumas medidas que devem ser consideradas para que os dados coletados sejam compreendidos de forma uniforme, íntegra e consistente. São elas: Utilização fluxogramas para organização dos processos elementares e de suas entradas e saídas, conforme escopo estabelecido no início do estudo; descrição detalhada de cada unidade de processo; elaboração de um glossário que classifique as unidades dos valores coletados; descrição da coleta e das técnicas de cálculo necessárias para o tratamento dos dados; disponibilização da documentação referente aos casos especiais, irregularidades ou outros itens associados aos dados fornecidos.

A próxima fase é o procedimento de cálculo, nesta fase, a norma NBR ISO 14044 ABNT (2009b) informa que toda forma de cálculo deve ser documentada de forma clara e explícita. Para dados calculados alguns passos operacionais são necessários:

- Validação dos dados: verificação da validade dos dados para confirmar que os requisitos de qualidade foram atendidos.
- Correlação dos dados: determinação de um fluxo para o processo elementar para realização dos cálculos necessários com relação à esse fluxo.
- Refinamento da fronteira do sistema: análise de sensibilidade para determinar a significância das decisões. Através desta análise de sensibilidade pode ocorrer algumas alterações no escopo do estudo, por exemplo: exclusão de estágios de ciclo de vida ou de processos elementares; exclusão de entradas e saídas não significativas para o resultado do estudo ou inclusão de novos processos elementares, entradas e saídas.

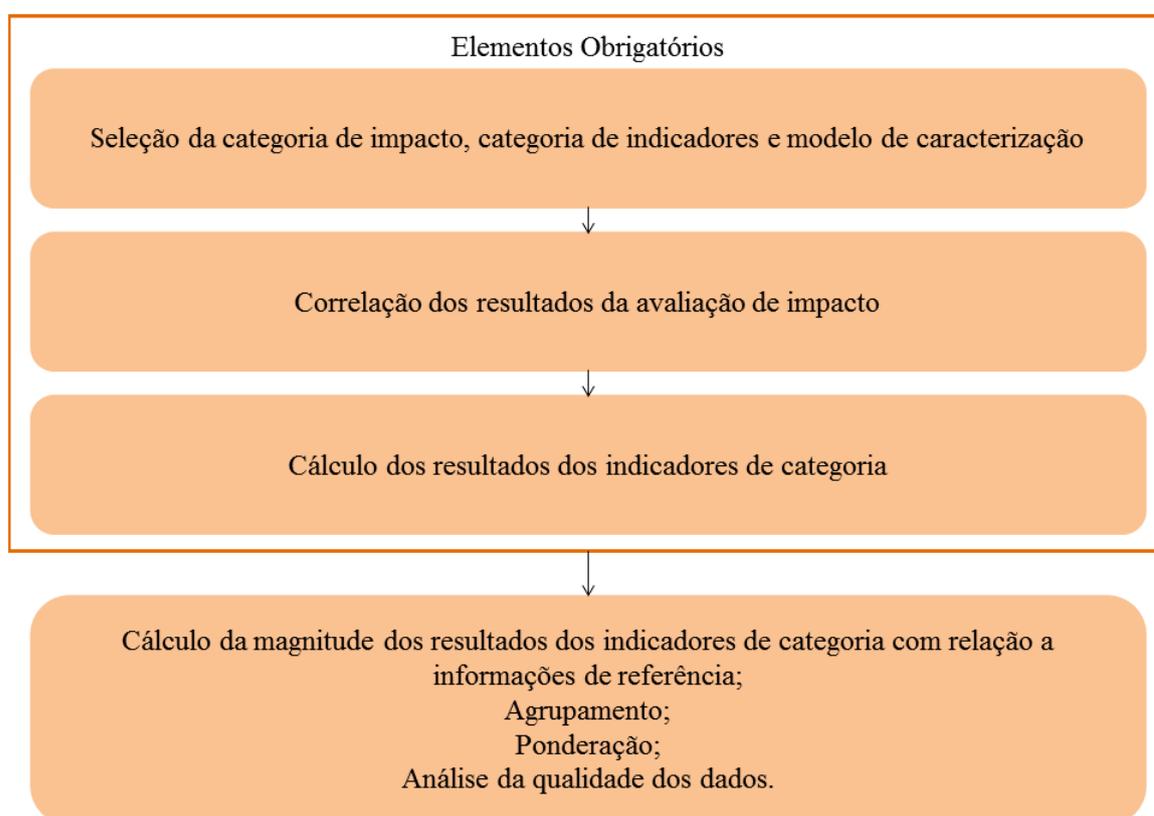
Após a realização do inventário da ACV a próxima fase da ACV consiste na avaliação de impacto de ciclo de vida.

2.2.4 Avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV)

A Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira fase da ACV, a sua finalidade é avaliar a significância ambiental dos resultados do inventário por meio de modelos e fatores de caracterização contidos nos métodos de AICV (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). É a etapa onde se procura entender e avaliar a intensidade e o significado das alterações potenciais sobre o meio ambiente associadas ao ciclo de vida do produto em estudo.

Por exemplo, é fato que 9.000 toneladas de dióxido de carbono e 5.000 toneladas de metano liberadas para a atmosfera são prejudiciais ao meio, porém esta fase da ACV pode determinar quais das duas podem ter um maior impacto potencial (SAIC, 2006). Conforme Pennington *et al.* (2004) e a NBR ISO 14044 ABNT (2009b) esta avaliação é feita em três etapas obrigatórias: classificação, caracterização e ponderação (Figura 7).

Figura 7 – Elementos obrigatórios na AICV.



Fonte: ABNT (2009b).

Cada uma das etapas esta descrita nos tópicos abaixo (PENNINGTON *et al.*, 2004);(ABNT, 2009b):

- Seleção das categorias de impacto e seleção dos indicadores para cada categoria de impacto. Alguns exemplos de categoria de impacto são: Esgotamento de recursos, saúde humana, aquecimento global e etc;
- Classificação: Atribuição dos dados de inventário às categorias de impacto escolhida;
- Caracterização: Cálculo dos indicadores;
- Ponderação: Agrupar e ponderar os resultados.

Em uma AICV, as informações encontradas no inventário são convertidas para as diversas categorias de impacto, que são classes que representam questões ambientais relevantes (SOUSA, 2010). Geralmente, a AICV contempla os impactos potenciais em três categorias principais: saúde humana, saúde ecológica e depleção de recursos (Quadro 4). Por exemplo, em um sistema de produto, os impactos são classificados conforme as conseqüências que suas entradas e saídas podem causar na saúde humana, plantas, animais, ou na disponibilidade futura de recursos naturais (SAIC, 2006).

Quadro 4 – Exemplos de categorias de impacto mais utilizadas.

Impactos globais	Aquecimento global (Derretimento polar, perda de umidade do solo, perda ou mudança florestal e mudança nos padrões de vento e oceano), Depleção de ozônio (Aumento da radiação ultravioleta; Perda de recursos: recursos necessários para futuras gerações), Depleção de ozônio (Aumento da radiação ultravioleta; Perda de recursos: recursos necessários para futuras gerações).
Impactos regionais	Poluição atmosférica (Diminuição da visibilidade, irritação ocular, irritação do trato respiratório e pulmão e danos à vegetação).
Impactos locais	Saúde humana (Aumento da morbidade e mortalidade), Toxicidade terrestre (Diminuição da produção e biodiversidade e diminuição da vida selvagem para caça ou visualização), Toxicidade aquática (diminuição da produção de plantas e insetos aquáticos e biodiversidade e diminuição da pesca comercial ou recreativa), Eutrofização (Nutrientes entram em corpos d'água, como lagos, estuários e córregos em movimento lento, causando crescimento excessivo de plantas e depleção de oxigênio), Uso da Terra (Perda de habitat terrestre para animais selvagens e diminuição do espaço de aterro sanitário), Uso de água (Perda de água disponível de água subterrânea e fontes de água de superfície), Acidificação (Corrosão da construção, acidificação do corpo da água, efeitos da vegetação e efeitos do solo),

Fonte: Adaptado de (SAIC, 2006).

Existe também os elementos opcionais de uma AICV, são eles: Normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade de dados. Além disso, a AICV é também um método de revisão do objetivo e escopo de ACV, buscando verificar se os objetivos foram alcançados ou se será necessário modificá-los caso a avaliação indicar a impossibilidade de alcançá-los (ABNT, 2009b). A transparência, segundo a Norma NBR ISO 14040 ABNT (2009a), é um fator crítico na avaliação de impacto para assegurar sua fidelidade e clareza.

2.2.4.1 Métodos de avaliação de impacto de ciclo de vida

Segundo Piekarski *et al.* (2012) os métodos AICV podem ser divididos e classificados em duas categorias: *midpoint* e *endpoint*.

Ao nível *midpoint* todas as substâncias referentes ao inventário do ciclo de vida são adequadamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum na cadeia de causa efeito do mecanismo ambiental. Enquanto modelos *endpoint* consistem basicamente em caracterizar a gravidade ou as consequências de categoria de impacto de ponto médio nas áreas de proteção a nível de ponto final (PIEKARSKI *et al.*, 2012).

Devido ao fato dos métodos *endpoint* serem direcionados ao dano, apresentam mais relevância nas tomadas de decisão, porém, apresentam alta subjetividade (BARE; HOFSTETTER; PENNINGTON, 2000).

Segundo Jolliet *et al.* (2013) e Sousa (2010), os métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida podem ser definidos em métodos clássicos e métodos orientados ao dano (Quadro 5).

Quadro 5 – Diferença entre Métodos Clássicos e Métodos Orientados ao Dano de AICV.

Métodos Clássicos	Métodos Orientados ao Dano
Restringem os modelos quantitativos aos estágios prévios do mecanismo ambiental para limitar incertezas e, classificar e e caracterizar os resultados do ICV em categorias <i>midpoint</i> .	Tentam modelar o mecanismo ambiental no efeito final, ou seja, no dano ou no <i>endpoint</i> . Como consequência, acaba muitas vezes inserindo um alto grau de incertezas.

Fonte: Adaptado de (JOLLIET *et al.*, 2013) e (SOUSA, 2010).

Conforme Mendes (2013), um levantamento feito sobre AICV indica quais são os métodos mais utilizados e citados em artigos científicos. Com isso, sete famílias de métodos de AICV foram apontados como os mais utilizados, são estes: *Eco-indicator*, *CML*, *EPS*, *LIME*, *EDIP*, *Impact* e *ReCiPe*. Tomando como base estas famílias, os tópicos a baixo trazem um breve explicação destes modelos de AICV, além de outros modelos disponíveis na literatura, segundo Mendes, Bueno e Ometto (2016):

- CML 2002: Desenvolvido na Holanda, no Centro de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden. Abordagem de *Midpoint*. Este método fornece fatores de caracterização para mais de 1500 resultados diferentes de inventário do ciclo de vida. O método apresenta um escopo de aplicação global e apresenta algumas características particulares, que são: fundamentos científicos que apoiam todas as escolhas importantes; fatores de AICV alternativos fornecidos para análise de sensibilidade para cada categoria de impacto e grande parte das categorias de impacto já foram descritas em artigos científicos.
- *Eco- indicador 99*: Criado na Holanda pelo Ministério Holandês de Moradia, Planejamento Espacial e Ambiental. É um método *endpoint*, com o foco de simplificar a interpretação e a ponderação dos resultados da ACV por meio do cálculo de pontuações únicas (eco indicadores). São abordadas três áreas de dano: qualidade do ecossistema, saúde humana e utilização de recursos.
- *Ecological Scarcity*: Gerado na Suíça pela SEU – services, tem como abordagem o princípio “distância ao alvo”, portanto, permite ponderação e agregação comparativa de várias intervenções ambientais pelo uso dos chamados ecofatores, expressos como ecopontos por unidade de emissão de poluentes ou extração de recursos. São particularidades do método a medição de escassez ecológica com a ajuda de fluxos reais de poluentes e recursos de fluxos máximos permitidos, chamados críticos, derivação direta das metas políticas e a possibilidade de uma avaliação compreensível e transparente sobre uma base coerente.
- EDIP 1997 – EDIP 2003: Produzido na Dinamarca pela Universidade Técnica da Dinamarca, indústrias dinamarquesas e a Agência de Proteção Ambiental dinamarquesa. É um método com abordagem *midpoint* desenvolvido para apoiar análises ambientais durante o desenvolvimento de produtos industriais e fornecer fatores de caracterização especialmente diferenciados. Tem escopo de aplicação global para aquecimento global e depleção ozônio, sendo direcionado para a Europa para as demais categorias.
- EPS 2000: Criado na Universidade de Tecnologia Chalmers, Suécia. Um método *endpoint* criado para ajudar designers e desenvolvedores de produtos durante a escolha entre dois conceitos de produto e os indicadores de categoria são escolhidos para esse fim, sendo adequados para atribuir valores de categorias de impacto. Esse método abrange em torno de 200 substâncias e todos os efeitos são calculados por substância, dando maior precisão ao método. Apresenta escopo de aplicação global.
- LIME: Inventado no Japão, pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Industrial Avançada, visando quantificar os impactos ambientais associados às cargas

ambientais associados no Japão com a maior precisão possível e com grau elevado de transparência. As descrições do método são escritas em sua maioria em japonês, tornando isso um ponto negativo do método. É um método com escopo de aplicação global para aquecimento global e destruição da camada de ozônio, sendo específico para o Japão nas demais categorias.

- LUCAS: Realizado no Canadá na Escola Politécnica de Montreal, com uma abordagem *midpoint*, o método, eventualmente, poderá ser desenvolvido para o nível *endpoint*. O escopo de aplicação é global para as categorias de impacto mudança climática e depleção de ozônio e específica para o Canadá para as demais categorias.
- ReCiPe: Esse método é uma continuação do CML 2000 e Eco – indicador 99 que agrega e concilia as abordagens *midpoint* e *endpoint* em uma estrutura comum e consistente. O método tem um escopo de aplicação global para as categorias de impacto mudança climática, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos, sendo válido para a Europa para as demais categorias.
- TRACI: Desenvolvido no Estados Unidos na Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Trata-se de um método *midpoint* que considera as condições ambientais dos Estados Unidos, como um todo ou por estados. Tem escopo de aplicação global para as categorias depleção de ozônio e aquecimento global, escopo de aplicação válido para a América do Norte para acidificação, eutrofização e formação de fumaça e, ainda, escopo de aplicação válido para os Estados Unidos para as categorias relacionadas a saúde humana e ecotoxicidade.
- USEtox: Inventado pelo Programa Iniciativa do Ciclo de Vida da UNEP – SETAC. Usa abordagem *midpoint*, feito para descrever destino, exposição e efeitos de produtos químicos. Foi criado um banco de dados de propriedades químicas, a fim de dispor de um conjunto de dados consistente. Esse banco de dados inclui propriedades físico-químicas, dados toxicológicos de animais obtidos em laboratórios e dados ecotoxicológicos para organismos de água doce.
- IMPACT World+: Desenvolvido por diversos países como Canadá, Estados Unidos, Suíça, Dinamarca e França. Criado por CIRAI, da Politécnica de Montreal (Canadá), Universidade de Michigan (Estados Unidos), Universidade de Ann Arbor (Estados Unidos), Quantis (Suíça), Universidade Técnica da Dinamarca – DTU (Dinamarca), Escola Politécnica de Lausanne – EPFL (Suíça) e Cycleco (França). Surgiu pela necessidade de uma avaliação de impacto regionalizada cobrindo todas as regiões do mundo. São abordadas as seguintes categorias de impacto: toxicidade humana, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozô-

nio, aquecimento global, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da água, uso da terra e uso de recursos.

2.2.5 Interpretação

Por fim, chega-se a fase final da ACV, a interpretação, que é a análise e discussão dos resultados obtidos durante todo estudo. O principal objetivo desta fase, é chegar a conclusões, recomendações e tomada de decisão para todo público interessado (ABNT, 2009a);(ABNT, 2009b).

Esta fase é constituída pelos seguintes elementos (ABNT, 2009b): Identificação de questões significativas; conclusões, limitações e recomendações. Cada passo é explicado nos tópicos abaixo conforme SAIC (2006):

- **Identificação:** Busca revisar as informações obtidas nas três primeiras fases da ACV, devido a grande quantidade de dados obtidos, é viável verificar se todos eles contribuem para o resultado final;
- **Avaliação do estudo:** Busca avaliar a integridade e confiabilidade dos resultados, neste passo é preciso avaliar o quão completo é o estudo, o quanto os elementos de dados significativos influenciam no resultado e qual a consistência utilizada para definir os limites do sistema, a coleta de dados, as suposições e a alocação de dados conforme as categorias de impactos;
- **Conclusões, limitações e recomendações:** Busca interpretar os resultados da AICV para determinar qual é o impacto global para a saúde humana e para o meio ambiente em relação ao objetivo e ao alcance do estudo vigente. Além disso, é importante disponibilizar as recomendações e estas devem ser definidas exclusivamente em fatos disponíveis no estudo.

Por fim, deve-se reportar os resultados à todas as pessoas interessadas no estudo, de forma clara e organizada. O relatório deve apresentar de forma detalhada, os resultados, dados, métodos e limitações para que o leitor tenha total capacidade de compreensão de toda ACV ((SAIC, 2006);(ABNT, 2009b).

2.3 ANÁLISES DE CICLO DE VIDA DE VE NO CONTEXTO GERAL

Através da revisão da literatura realizada, em síntese, é possível afirmar acerca dos principais dados que:

- 1) A geração de eletricidade para abastecimento dos VEs é fator altamente influenciador nos resultados ambientais (SAMARAS; MEISTERLING, 2008); (FARIA *et al.*, 2012); (HELMERS; MARX, 2012); (MA *et al.*, 2012); (FARIA *et al.*, 2013);

(NORDELOF *et al.*, 2014); (BAUER *et al.*, 2015); (EGEDE *et al.*, 2015); (HUO *et al.*, 2015); (ONAT; KUCUKVAR; TATARI, 2015); (KE, 2017);

- 2) A fase de produção dos VEs e principalmente da bateria tem atualmente um forte impacto ambiental, porém, apresenta tendência de desenvolvimento tecnológico prevendo melhorias futuras (NOTTER *et al.*, 2010); (HAWKINS *et al.*, 2013); (MA *et al.*, 2012); (ELLINGSEN *et al.*, 2013); (FARIA *et al.*, 2013); (BAUER *et al.*, 2015); (TAGLIAFERRI *et al.*, 2016);
- 3) A reciclagem dos materiais utilizados nas baterias ainda é um assunto em desenvolvimento, mas se faz necessário para o fechamento do ciclo de vida completo de um VE (ZACKRISSON; AVELLAN; ORLENIUS, 2010); (MAJEAU-BETTEZ; HAWKINS; STROMMAN, 2011); (ELLINGSEN *et al.*, 2013); (TAGLIAFERRI *et al.*, 2016);
- 4) Quando se identifica os aspectos mais críticos em emissões, é possível definir onde ações podem ser tomadas para reduzi-las (ZACKRISSON; AVELLAN; ORLENIUS, 2010); (NORDELOF *et al.*, 2014);
- 5) O ambiente e forma de condução do VE pode influenciar significativamente os potenciais impactos ambientais (SAMARAS; MEISTERLING, 2008); (MA *et al.*, 2012); (FARIA *et al.*, 2013); (NORDELOF *et al.*, 2014); (EGEDE *et al.*, 2015); (ONAT; KUCUKVAR; TATARI, 2015).

Apesar da quantidade de trabalhos internacionais disponíveis, poucos deles enfocam em um contexto nacional brasileiro particular que está relacionado à alta utilização de recursos renováveis em sua matriz energética e à utilização do etanol, combustível produzido a partir da cana de açúcar cultivada no país. Foram encontrados apenas quatro trabalhos que abordam o uso da ACV para o setor automotivo nas condições brasileiras que serão discutidos no tópico seguinte.

2.4 ANÁLISES DE CICLO DE VIDA DE VE NO CONTEXTO BRASILEIRO

Dentre os estudos sobre a avaliação ambiental da indústria automotiva no contexto brasileiro, destacam-se os trabalhos de Souza *et al.* (2018), Choma e Ugaya (2017), Vargas (2016) e Lazzari (2010).

No estudo de Souza *et al.* (2018) são analisados e comparados cinco cenários diferentes utilizando o método de ACV: um VCI movido à gasolina, um VCI movido a etanol, um VCI flex, um VEH e, por fim, um VEB. O principal objetivo foi avaliar o uso atual de combustível com a nova fonte alternativa de fornecimento de energia (eletricidade) para veículos no Brasil buscando reduzir a poluição do ar e as emissões de gases com efeito de estufa.

Os resultados mostraram que os veículos que usam baterias de íons de lítio têm os maiores impactos para a toxicidade humana, porém, de maneira geral, o VEB tem os menores impactos ambientais, seguidos pelos veículos que usam etanol. Desta forma, os autores orientam que o governo brasileiro deveria investir e desenvolver o uso de VEs, uma vez que a matriz de energia do país é considerada renovável. Além disso, os autores sugerem que as políticas governamentais deveriam incentivar ainda mais o uso do etanol, uma vez que gera menos impactos ambientais do que a gasolina.

O estudo de Choma e Ugaya (2017) teve como principal objetivo analisar o potencial do VEB na redução dos impactos ambientais da frota brasileira considerando o período de 2013 até 2022. Neste estudo, a realidade brasileira é exposta por meio da matriz de eletricidade e do etanol, combustível utilizado nos VCIs.

Os resultados mostraram que o VEB foi a melhor opção para depleção abiótica, ou seja, os impactos negativos na disponibilidade de recursos minerais foram mais baixos que os demais veículos estudados. Além disso, foi melhor para aquecimento global e depleção da camada de ozônio devido ao uso de combustível fóssil pelos VCIs na fase de uso ou na fase de produção do combustível. Quando comparado ao VCI alimentado por etanol, Choma e Ugaya (2017) explicam que o VEB apresentou melhor desempenho ambiental para eutrofização e ecotoxicidade terrestre, porém, pior que o VCI e que o VCI flex. O VEB também foi pior que o VCI para toxicidade humana, ecotoxicidade aquática marinha e oxidação fotoquímica devido ao alto índice de utilização de placas e circuitos elétricos em sua tecnologia.

Os autores concluem que os avanços da tecnologia exigirão materiais alternativos e redução de placas de circuitos impressos e integrados utilizados nos VEs. Desta forma, influenciar medidas nesse sentido pode contribuir para melhorar o VEB em todos os aspectos. Além disso, enfatizam que dificilmente o avanço nos VCI acompanhará o nível tecnológico do VEB, já que para melhorar o desempenho ambiental desta categoria é preciso relacionar ao aumento na eficiência na produtividade dos insumos para seu combustível.

Vargas (2016) analisou a comparação dos potenciais impactos ambientais do transporte de passageiros por meio de VE's e VCI flex no contexto brasileiro considerando as condições de cinco anos atrás (2014) e condições futuras (2030). Neste estudo, o autor serviu-se dos processos disponíveis no *Ecoinvent*® utilizando as médias globais como parâmetro de entrada no software, assim como os estudos de Souza *et al.* (2018) e Choma e Ugaya (2017).

Como resultado, os autores explicam que a maior parte dos impactos potenciais ao meio ambiente está associada à produção do VE. Para oxidação fotoquímica, a manutenção do veículo contribui com mais de 80% para o impacto devido às emissões de etileno, e somente para aquecimento global a contribuição relacionada à geração de energia elétrica responde por mais da metade dos impactos. Diferente dos estudos

anteriores, Vargas (2016), encontrou maior impacto do VE em cinco das nove categorias analisadas e justifica que este fato se deve principalmente pela combinação de três fatores: a produção da bateria, o maior peso do VE e sua menor vida útil.

O autor explica que uma das principais justificativas para a introdução de VEBs é a redução de impactos em categorias de perturbações climáticas como aquecimento global e depleção da camada de ozônio. Nesse sentido o VEB é uma alternativa válida em comparação ao carro flex abastecido com gasolina. Para 2030 os resultados indicam uma redução de todos os impactos potenciais tanto para o cenário de baixas emissões na geração de eletricidade quanto para o cenário de maiores emissões, ou seja, quando o percentual de hidroelétrica for diminuído.

Em seu estudo, Lazzari (2010) trouxe a ACV de um VE movido a puxão para transporte e coleta de resíduos sólidos urbanos e recicláveis. O objetivo principal era identificar os impactos ambientais que ocorrem durante o ciclo de vida deste veículo e que poderiam ser considerados e melhorados durante a fase de projeto do produto. A partir disso, os autores, avaliaram, por meio de um estudo de caso, os impactos ambientais baseados em critérios usualmente utilizados pela indústria automotiva internacional.

Assim como os outros estudos brasileiros, Lazzari (2010) utilizou como base as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 ABNT (ABNT, 2009b) além do lançamento dos dados no software *SimaPro 7.1*®), onde foram obtidas informações que contribuem para o projeto de um novo VE com impactos menos agressivos.

A toxicidade humana nos meios aquático, terrestre e aéreo foi o impacto mais significativo nas três fases do ciclo de vida. Nas fases de montagem e utilização, o uso de energia não renovável, o aquecimento global, os respiratórios inorgânicos e a ecotoxicidade terrestre também indicaram grandes proporções. É possível perceber que os impactos mais significativos provêm dos sistemas elétricos e de armazenamento, pois existe uma alta composição de cobre, chumbo, ácido sulfúrico e material metálico ferroso.

Lazzari (2010) apontou quais mecanismos mais contribuem para o impacto ambiental, sendo eles: o sistema de armazenamento de energia e o sistema elétrico, seguidos do sistema de rolagem, chassi, mecanismo de tração, carenagem e mecanismo de acionamento.

Por fim, foi constatado que os maiores impactos ambientais são provenientes do consumo de materiais de origem mineral e nos processos que envolvem a utilização de combustíveis fósseis durante a fabricação do VEB. Assim, de acordo com o autor, a utilização de eletricidade, proveniente da matriz elétrica brasileira (majoritariamente constituída de hidroelétricas), durante a fase de uso, causou menor impacto do que a fabricação dos componentes.

Durante a pesquisa, poucos estudos que abordam o uso da ACV para o setor

automotivo nas condições brasileiras foram encontrados, essa carência dos quais as particularidades brasileiras são consideradas motivou o desenvolvimento deste trabalho.

Além disso, nenhum deles tratou do aspecto do impacto provocado por diferentes tipos de baterias. Assim, esta abertura de conhecimento é a principal motivação para este trabalho que apresenta resultados da ACV realizada para um kart acoplado com tipos diferentes de bateria (lítio e chumbo-ácido) e para um kart à combustão interna.

Este trabalho considera a geração de eletricidade, produção de veículo, fase de uso e o final de vida que inclui a reciclagem do veículo e bateria.

3 MATERIAL E MÉTODO

A ACV nesta pesquisa será aplicada com orientação das normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b) aliado às bases de dados internacionais e de um software específico com o objetivo de mensurar os principais impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida do kart respeitando os limites do sistema escolhido.

A aplicação da ACV no kart tem como objetivo encontrar resultados que possam ser disponibilizados para o entendimento de qual fase do ciclo de vida se encontram os maiores impactos ambientais. Buscando que, na concepção de um novo veículo, tenha-se identificado quais tipos de materiais e processos podem ser alterados ou aplicadas alternativas.

A avaliação ambiental deste trabalho, para o kart elétrico concentra-se nos quatro principais componentes: estrutura, pneu, motor elétrico e bateria. Quanto à bateria, foi utilizada uma bateria de lítio e uma bateria de chumbo-ácido, com intuito de analisar e comparar os impactos ambientais de ambas quando acopladas ao kart. Para o kart à combustão interna concentra-se nos três principais componentes: estrutura, pneu e motor à combustão interna.

Segundo as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b), para construção da ACV é necessário seguir as etapas abaixo:

- 1) Definição do objetivo e escopo;
- 2) Inventário de ciclo de vida;
- 3) Avaliação do impacto do ciclo de vida;
- 4) Interpretação e discussão dos resultados da ACV;

Estas etapas e as informações utilizadas neste trabalho serão explicadas nos tópicos seguintes.

3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

Nesta etapa é definida a função do sistema de produto, a unidade funcional, o fluxo de referência e, por fim, as fronteiras do sistema.

3.1.1 Definição do sistema de produto

O sistema de produto foi definido com base no projeto realizado no Laboratório de Sistemas Embarcados (LSE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Considerou-se um VE e um VCI simplificado em forma de kart como sistema de produto

e os seus processos elementares de aquisição de matérias-primas, uso e disposição final (Figura 8).

Figura 8 – Kart - Sistema de estudo.



Fonte: Autora (2019)

Este veículo quando acoplado ao motor elétrico e bateria é classificado como VEB para transporte de 1 passageiro. Quando acoplado ao motor de combustão interna é classificado como VCI para transporte de 1 passageiro. Demais especificações técnicas estão listadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Ficha técnica do Kart

Descrição	Características do Kart Elétrico
Capacidade de carga (kg)	1 pessoa até 90kgs
Chassis	Aço Cromo-Molibdênio
Rodas (mm)	127 mm
Pneus	Inflável (composto duro)
Carenagem	PEAD (Polietileno de Alta Densidade)
Motor Combustão interna	Motor estacionário - GX390 Mega Honda
Motor Elétrico	ME0708 da Motenergy Inc - 48Vx100A
Bateria Lítio	117 células tipo Samsung ICR18650 - 54,6Vx30A
Bateria chumbo-ácido	-
Tração	Rodas traseiras
Freios	Mecânico, nas rodas dianteiras
Local de utilização	Utilizado em pista preparadas para corrida ou teste.

Fonte: Autora (2019)

3.1.2 Definição da unidade funcional

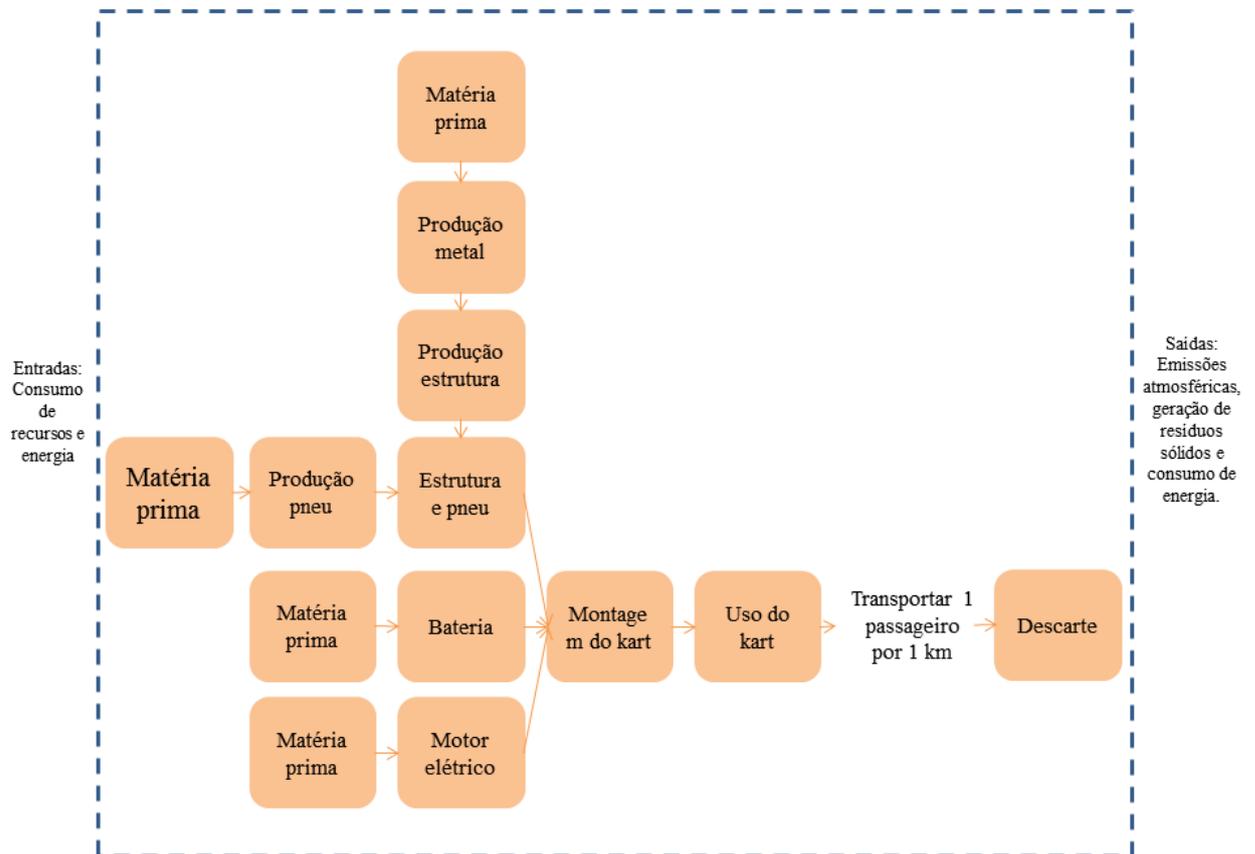
A função selecionada para este estudo foi: “utilização do kart para produzir um deslocamento de um passageiro por km (quilômetro)”. A definição da Unidade Funcional está relacionada com a escolha de uma função de um Produto ou Serviço.

Portanto, a unidade funcional estabelecida para o estudo é de 1km, ou seja, o deslocamento de um passageiro no kart por 1km. A principal motivação para esta escolha é a facilidade para a comparação entre os diferentes estudos de ACV automotivo, independente da vida útil do automóvel.

3.1.3 Definição da fronteira de sistema

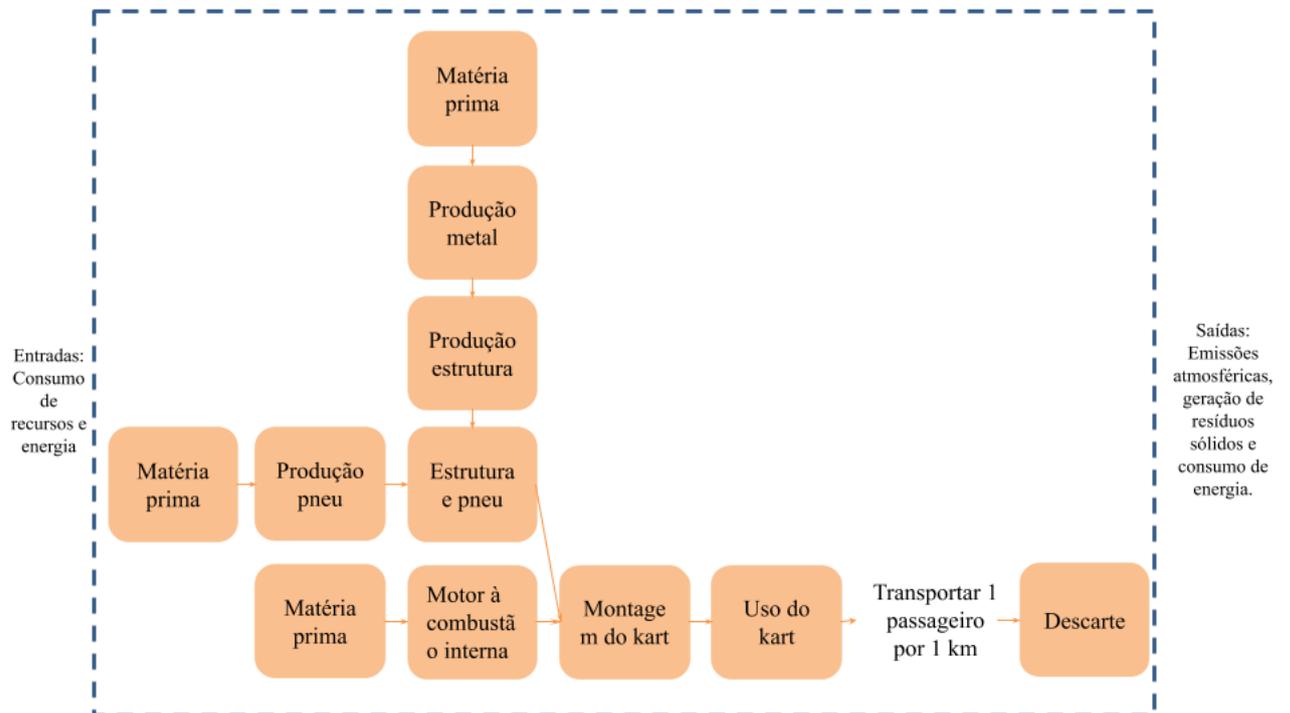
Conforme a NBR ISO 14040 ABNT (2009a) e NBR ISO 14044 ABNT (2009b), as fronteiras do sistema determinam quais unidades do processo devem ser incluídas na ACV. A partir deste fundamento, a Figura 9 apresenta o sistema de produto para o kart elétrico classificado como VEB e a Figura 10 apresenta o sistema de produto para o kart à combustão interna classificado como VCI.

Figura 9 – Sistema de produto do estudo para o kart elétrico.



Fonte: Autora (2019)

Figura 10 – Sistema de produto do estudo para o kart à combustão interna.



Fonte: Autora (2019)

3.2 ELABORAÇÃO DO INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

No Inventário do Ciclo de Vida (ICV), os dados obtidos do kart, foram divididos em dados primários e dados secundários.

Os dados primários foram coletados através dos fabricantes de cada componente, recebidas por correio eletrônico ou obtidas em catálogos técnicos.

Já os dados secundários foram coletados a partir da literatura ou de acordo com a base de dados *Ecoinvent*®.

A base de dados do *Ecoinvent*® é uma das maiores e mais consistente base de inventário mundial acerca do ciclo de vida de produtos.

Portanto, o inventário tem como base o levantamento primário, com o objetivo de identificar e mensurar quanto material de um determinado componente é necessário para completar a unidade funcional estabelecida no estudo. E, o levantamento secundário, com o objetivo de realizar o complemento das informações de aquisição do material através do banco de dados do *Ecoinvent*®.

Este processo é fundamental e amplamente utilizado, por isso, na *Ecoinvent*® são disponibilizadas ACV de diversos produtos e serviços que já foram realizadas com a finalidade de viabilizar estudos em todo mundo.

Esta situação acontece devido à falta de laboratórios disponíveis para realização e captação das emissões e impactos gerados no meio ambiente. Além disso, segundo Egede *et al.* (2015), questões de confidencialidade, cadeias de fornecimento complexas, uma variedade de possíveis padrões de uso e desenvolvimentos futuros desconhecidos aumentam o desafio de reunir os dados necessários para executar uma ACV de um VE. Portanto, bases de dados, como *Ecoinvent*®, são essenciais dentro de estudos de ACV.

3.3 ELABORAÇÃO DA AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DO CICLO DE VIDA

A Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV) foi realizada através do software *SimaPro*® versão 7.3.2, um programa da empresa holandesa *Pré-Consultants* especializado em ciclo de vida que é líder de mercado, de licença adquirida pelo Grupo de Pesquisa em Avaliação do Ciclo de Vida (CICLOG) do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

Este *software* permite que o usuário modele o objeto em estudo envolvendo todas as etapas do ciclo de vida do produto. Desta forma, foram lançadas as informações pertinentes aos dados do produto analisado no *software* e, a partir disto, foram gerados os gráficos de impactos ambientais.

3.3.1 Avaliação de impacto

O método *ReCiPe*® V1.12 utilizado neste estudo foi escolhido devido a combinação das metodologias *midpoint* e *endpoint* de uma forma consistente. Os indicadores de *midpoint* são indicadores que convertem as emissões em impactos ambientais de substâncias e extrações de recursos naturais, já os indicadores de *endpoint* convertem as emissões em impactos ambientais referentes aos danos à saúde humana e aos danos à qualidade dos ecossistemas. Este método é constituído de aplicação global para as categorias de impacto de mudança climática, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos. Para as demais categorias segue o escopo de aplicação da Europa (GOEDKOOOP *et al.*, 2013); (MENDES, 2013).

O método *ReCiPe*® V1.12 aborda categorias de impacto como: mudança climática, depleção de ozônio, toxicidade humana, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, radiação ionizante, ocupação de terras agrícolas, ocupação de terra urbana, transformação de terras naturais, depleção de água, depleção de metal e depleção de fósseis (GOEDKOOOP *et al.*, 2013). Este estudo enfoca especificamente três categorias de impacto que são consideradas as mais significativas para o propósito deste trabalho (Tabela 3).

Tabela 3 – Indicadores predominantemente considerados no estudo.

Indicador	Método	Unidade
Depleção da camada de ozônio	<i>ReCiPe</i> ®	kg CFC-11-eq
Mudanças Climáticas	<i>ReCiPe</i> ®	kg CO ₂ -eq
Potencial de Toxicidade Humana	<i>ReCiPe</i> ®	kg 1,4-DB-eq

Fonte: Autora (2019)

3.4 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos na ACV foram analisados os principais impactos ambientais identificados, associados aos limites do sistema e às fases do ciclo de vida definidos para o kart elétrico. Com a interpretação destes resultados, serão discutidas a orientação da aplicação das alternativas de mudanças, principalmente sob os aspectos ambientais.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 ELETRICIDADE

O Balanço Energético Nacional 2018, elaborado pela Empresa de pesquisa Energética - EPE (2018), foi consultado para definir o perfil médio de geração elétrica do Brasil no ano de 2017.

Segundo EPE (2018), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável representando 80,4% da oferta interna de eletricidade (Tabela 4. Este é um grande benefício para adoção de VEs, pois regiões onde a eletricidade é dependente do carvão ou de fontes não renováveis se tornam inviáveis para adoção de VEs. Neste caso, os veículos são livres de emissões na fase de uso, porém aumentam as emissões durante a geração de eletricidade (HAWKINS; GAUSEN; STOMMAN, 2012); (HELMERS; MARX, 2012).

Tabela 4 – Oferta de energia elétrica por fonte para 2017.

Fonte de energia	Perfil médio
Bagaço de cana	8,20%
Carvão	4,10%
Eólica	6,80%
Gás natural (ciclo combinado)	10,50%
Hidrelétrica	65,20%
Nuclear	2,50%
Óleo combustível	2,50%
Solar	0,13%
Outros (não renováveis)	0,07%

Fonte: (EPE, 2018)

Comparando as eficiências dos dados do *Ecoinvent*® v3.2 com as eficiências apresentadas na Tabela 4, não se constatou diferença significativa capaz de influenciar no resultado final. Por isso, na construção do inventário se optou por utilizar o perfil proposto pelo inventário da *Ecoinvent*® para o Brasil “*Electricity, high voltage BR /Market for /Alloc Def U*”.

4.2 CARACTERÍSTICAS DO KART ELÉTRICO E DO KART À COMBUSTÃO INTERNA

Este capítulo descreve os componentes do kart, que foram considerados na ACV, de forma detalhada.

4.2.1 Descrição das baterias

A bateria de lítio é composta por 117 células do tipo Samsung ICR18650-30A, possui uma massa total de 6,372 kg, com tensão de 54,6 V e corrente de 30 A (Tabela 5). Foi construída na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo Laboratório de Sistemas Embarcados (LSE) e conta com um sistema *Battery Management System* (BMS) que controla os dados da bateria. Além disso, possui cabos que conectam as células para ligação do circuito e embalagem composta por termo retrátil de Policloreto de Vinila (PVC).

Tabela 5 – Dados da bateria utilizada no Kart.

Descrição	Unidade	Dados
Tensão	V	54,6
Corrente	A	30
Corrente*Tempo	Ah	30
Energia (potência*tempo)	kWh	1,638
Massa	Kg	6,372
Largura	mm	184
Comprimento	mm	265
Altura	mm	70 -

Fonte: Autora (2018)

Especificamente cada célula que compõe a bateria contém 43 gramas distribuídos por diversos componentes. A Samsung disponibiliza as quantidades exatas de material utilizado (Tabela 6).

Tabela 6 – Dados da célula de bateria utilizada no Kart

Componente	Componente químico	Quantidade (g)
Sal eletrolítico	Hexafluorofosfato de lítio	0,05
Solvente eletrolítico	Inclui um ou mais dos seguintes procedimentos: Carbonato de propileno, Éster dietílico de ácido carbônico, Carbonato de etileno	5
PVDF	Fluoreto de polivinilideno	<1
Cobre	Cobre	3
Alumínio	Alumínio	2
Cátodo	Óxido de lítio cobalto (CoLiO ₂)	20
Anodo	Grafite	10
Níquel	Níquel	<1

Fonte: (SAMSUNG, 2015)

Para a bateria de lítio, optou-se por adotar o inventário disponibilizado pela *Ecoinvent*® para células de bateria de lítio “*Battery cell, Li-ion RoW| production | Alloc Def, U**” e para controladora, optou-se por adotar o inventário na base de dados *Ecoinvent*® o material mais próximos do material original utilizado no kart “*Printed board I/IDEMAT 2001*”.

A bateria de chumbo possui uma massa total de 50,4 kgs, tensão de 54,6 V e corrente de 30 A. Segundo Sullivan e Gaines (2012), uma bateria de chumbo é composta por um cátodo e um ânodo feito de materiais provenientes do chumbo; um eletrólito de água e ácido sulfúrico; separadores de fibra de vidro; e um estojo de contenção de polipropileno. Os autores também abordam a necessidade de energia de 9,2 MJ/kg para a etapa de fabricação da bateria, que inclui os processos necessários para fabricar componentes a partir de materiais constituintes e montá-los em baterias (Tabela 7).

Na aplicação, para as baterias de chumbo-ácido, os componentes foram classificados separadamente, em função de somente terem sido encontradas baterias como as de lítio-polimérico, lítio-íons, níquel metal hidreto e outras.

Quanto ao processo de reciclagem das baterias de chumbo, Sullivan e Gaines (2012) explicam que o chumbo metálico, o peróxido de chumbo, as caixas de bateria e o eletrólito são quebrados e separados. A caixa da bateria retorna aos fabricantes de baterias para utilização nas novas baterias e o chumbo é tratado em forno de fusão. O aumento da reciclagem de baterias é benéfico para o meio ambiente devido à recuperação de metais, entretanto o custo financeiro é ainda significativo quando

Tabela 7 – % dos materiais necessários para produzir uma bateria de chumbo.

Material	% utilizado
Chumbo	60%
Polipropileno	10%
Ácido Sulfúrico	10%
Água	16%
Vidro	2%
Antimônio	1%
Energia para fabricação	9,2 MJ/kg

Fonte: Adaptado de Sullivan e Gaines (2012)

comparado com a eliminação (SOUZA *et al.*, 2018).

4.2.2 Descrição do motor elétrico

O motor elétrico é da marca *Motenergy*, modelo ME0708, de imã permanente e corrente contínua, com corrente de 100 A, com torque de 160 Ncm e massa de 12,7 Kg. O motor possui uma tensão de 48 V e uma potência de 6060 W. É composto basicamente de uma carcaça, eixo, rolamentos e parafusos de metal ferroso (ferrite), enrolamento e fiação de cobre e PVC na capa para cobertura dos fios.

Para o motor elétrico, optou-se por adotar os inventários da *Ecoinvent*® “*Electric motor, electric passenger car GLO| electric motor production, vehicle (electric power-train) | Alloc Def, U*” e “*Permanent magnet, for electric motor GLO| market for permanent magnet, electric passenger car motor | Alloc Def, U*”.

4.2.3 Descrição do motor à combustão interna

O motor à combustão interna é da marca *Honda*, modelo GX390 Mega, 4 tempos, monocilíndrico, com capacidade de tanque de combustível de 6,1 litros e massa de 31,7 Kg. O motor possui uma potência 9,8 kW/4.000 rpm.

Para o motor à combustão interna, optou-se por adotar os inventários da *Ecoinvent*® “*Internal combustion engine, for passenger car GLO| internal combustion engine production, passenger car | Alloc Def, U*”.

4.2.4 Descrição dos pneus

Os pneus são da marca MG Tires modelo IR. São pneus infláveis, indicados para utilização em kart amador de aluguel. De acordo com o fabricante, possuem alta resistência e durabilidade.

O pneu dianteiro tem peso de 1,245 kg e o pneu traseiro tem peso de 1,550 kg. São compostos basicamente de elastômeros (borracha), fios de aço e poliamida (nylon). A Tabela 8 apresenta a especificação técnica dos pneus.

Tabela 8 – Composição técnica dos pneus utilizados no kart.

Modelo	Unidade	Dianteiros	Traseiros
Velocidade Máxima	Km/h	160	160
Velocidade Máxima	Mph	100	100
Peso	KG	1,245	1,550

Fonte: Adaptado de MG Tires (2018)

Para os pneus do kart, os componentes foram classificados separadamente, em função de somente terem sido encontradas pneus específicos para carros ou caminhões.

Quanto ao final de vida dos pneus, o processo de co-processamento é o tipo de reciclagem mais utilizado no Brasil e foi o processo de reutilização considerado neste estudo (IBAMA, 2017). Este processo consiste na geração da energia pela incineração do pneu, inteiro ou triturado, em fornos controlados que têm licença ambiental para operação reduzindo o consumo de combustíveis fósseis (MOTTA, 2008); (TORRETTA *et al.*, 2015). Neste processo, são necessários 19,2 kWh de energia para triturar 1000 kg de resíduos de pneus (RAFIQUE, 2012).

4.2.5 Descrição dos componentes da matriz ferrosa

Os materiais metálicos ferrosos são aplicados em toda estrutura do kart, estes metais são compostos basicamente de aços (liga Fe-C) 1020; 4340; aço cromo-molibdênio. Para formar a estrutura do kart estes materiais passam por processos de fabricação de corte, furação, proteção de superfícies (pintura) e união por soldagem e parafusos.

Além dos materiais, o uso de energia para a manufatura do kart (Tabela 9) foi previsto de acordo com informações disponibilizadas pelo fabricante.

Tabela 9 – Consumo de energia prevista na manufatura da estrutura.

Etapa de fabricação	Equipamento	Equipamento Potência (W)	Tempo de uso (h)	Consumo (kWh)
Corte de chapas, cantoneiras e tubos metálicos	Serra mecânica	250	0,75	0,1875
Furação	Serra fita	250	0,5	0,125
Furação	Furadeira de bancada	250	0,75	0,1875
Furação	Furadeira manual	600	0,5	0,3
Soldagem	Solda mig	9200	3	27,6
Proteção de superfície	Motor de exaustão e compressor de ar	500	2	1
Consumo total				29,4

Fonte: Metalmoro (2019)

4.3 FASE DE USO

Para o VE simplificado, e para as condições atuais, o consumo utilizado no estudo deriva da análise dos registros de monitoramento realizados durante o período de novembro à dezembro do ano de 2018.

Na realização dos testes, foi utilizado quatro baterias de chumbo com 45Ah ligadas em série gerando aproximadamente 51V de tensão, e uma bateria de lítio de aproximadamente 30Ah e 54V de tensão (Figura 11).

Figura 11 – Equipamentos utilizados: Kart elétrico, bateria de lítio e conjunto de baterias de chumbo ácido.



Fonte: Autora (2019)

No estudo de Bingham, Walsh e Carroll (2012) a taxa de (%) de uso da carga da bateria não é afetada significativamente pela carga inicial da bateria. Além disso, alguns cuidados devem ser tomados ao considerar ciclos de condução padrão, uma vez que eles são frequentemente sustentados por longos períodos de operação de velocidade constante, não representando a situação real. Espera-se que ciclos padrões sejam muito mais conservadores de energia em comparação com as condições reais de condução, além de, trazer oportunidades de direcionamento (YUAN *et al.*, 2017); (BINGHAM; WALSH; CARROLL, 2012).

Desta forma, neste trabalho será fornecido o consumo de energia baseado em testes experimentais com 100% de carga na bateria para avaliar o consumo geral de energia do Kart. Os testes foram realizados em condições reais de condução, ou seja, sem influenciar o condutor a respeito de quais métodos deveriam ser empregados para reduzir o consumo de eletricidade, porém respeitando velocidade média, padrão de

condutor (1 pessoa de 80kg) e padrão de pista de teste.

Seguindo como base o estudo de Alves *et al.* (2016) foram realizadas dez voltas de 10 km sempre recarregando as baterias em cada teste (Tabela 10 e Tabela 11).

Foi percebido que a queda carga da bateria é mais acentuada na bateria de lítio, tendo um consumo médio de tensão de 3,265 V e chegando a 6% de consumo médio da bateria, em contrapartida tem-se o consumo da bateria de chumbo chegando ao consumo médio de tensão de 2,221 V e 4,4% do consumo total da bateria. O consumo de energia em kWh é mais acentuado na bateria de chumbo.

A faixa de consumo é de 0,257 a 0,345 kWh/10 km para bateria de lítio e de 0,293 a 0,415 kWh/10 km para a bateria de chumbo. Os valores médios 0,314 kWh/10 km para bateria de lítio e 0,343 kWh/10 km para a bateria de chumbo foram os valores utilizados no inventário da fase de uso desta ACV, ou seja, foram os valores médios de consumo que foram adicionados no *software* para análise de impactos relacionados à fase de uso.

Tabela 10 – Testes realizados utilizando a bateria de lítio.

Teste	Consumo médio de energia [Wh]	Tensão Inicial[V]	Tensão Final[V]	Varição de tensão (V)	Estado de carga ao final da viagem (%)	Tempo [s]	Distância [km]	Velocidade média [km/h]
1	0,317	54,29	50,67	3,62	0,933	2034	10	17,7
2	0,302	54,26	50,74	3,52	0,935	1900	10	18,95
3	0,307	54,12	50,54	3,58	0,934	1600	10	22,5
4	0,324	54,11	50,42	3,69	0,932	1264	10	28,48
5	0,279	54,16	51,03	3,13	0,942	1423	10	25,3
6	0,345	54,2	50,4	3,8	0,93	1542	10	23,35
7	0,257	54,08	51,1	2,98	0,945	1090	10	33,03
8	0,335	54,06	51,49	2,57	0,952	1870	10	19,25
9	0,326	54,1	51,15	2,95	0,945	1940	10	18,56
10	0,322	54,05	51,24	2,81	0,948	1820	10	19,78

Fonte: Autora (2019)

Tabela 11 – Testes realizados utilizando a bateria de chumbo-ácido.

Teste	Consumo médio de energia [Wh]	Tensão Inicial[V]	Tensão Final[V]	Varição de tensão (V)	Estado de carga ao final da viagem (%)	Tempo [s]	Distância [km]	Velocidade média [km/h]
1	0,348	51,15	48,7	2,45	0,952	2128	10	16,917
2	0,347	51,03	48,67	2,36	0,954	2119	10	16,989
3	0,312	50,56	48,36	2,2	0,956	1827	10	19,704
4	0,293	50,82	48,8	2,02	0,96	1250	10	28,8
5	0,415	50,4	48,2	2,2	0,956	2027	10	17,76
6	0,352	51	48,4	2,6	0,949	1418	10	25,388
7	0,352	50,37	48,03	2,34	0,954	1559	10	23,092
8	0,342	50,65	48,67	1,98	0,961	1510	10	23,841
9	0,331	50,62	48,66	1,96	0,961	2192	10	16,423
10	0,339	50,63	48,53	2,1	0,959	2040	10	17,647

Fonte: Autora (2019)

Para o VCI simplificado, e para as condições atuais, o consumo utilizado no estudo deriva da análise dos registros de monitoramento realizados durante o período de outubro do ano de 2019.

Na realização dos testes, foi utilizado o kart acoplado à um motor de combustão interna (Figura 12).

Figura 12 – Equipamentos utilizados: Kart à combustão interna, motor Honda.



Fonte: Autora (2019)

Assim como os testes para VE simplificado, os testes para o VCI simplificado foram realizados em condições reais de condução, ou seja, sem influenciar o condutor a respeito de quais métodos deveriam ser empregados para reduzir o consumo de combustível, porém respeitando velocidade média, padrão de condutor (1 pessoa de 80kg) e padrão de pista de teste.

Na Tabela 12 pode-se verificar que a faixa de consumo do VCI simplificado é de 0,096 à 0,120 l/km. Sendo assim, o valor médio de 0,105 l/km foi o valor utilizado no inventário da fase de uso desta ACV.

Tabela 12 – Testes realizados utilizando o motor de combustão interna.

Teste	Consumo médio combustível [L]	Tempo [s]	Distância [km]	Velocidade média [km/h]
1	0,120	153	1	23,53
2	0,110	162	1	22,22
3	0,097	164	1	21,95
4	0,119	155	1	23,23
5	0,096	171	1	21,05
6	0,097	169	1	21,30
7	0,096	182	1	19,78
8	0,098	165	1	21,82
9	0,105	159	1	22,64
10	0,115	157	1	22,93

Fonte: Autora (2019)

4.3.1 Incerteza da medição de consumo

Foi estimada também a incerteza atrelada à medição de consumo, pois é fundamental estudar o comportamento desse fator. Desta forma, considerando um intervalo de confiança de 95% foi encontrado os seguintes resultados:

- 1) Para o kart acoplado à bateria de lítio, o desvio-padrão observado foi de 0,0025 kWh. Assume-se, portanto, o intervalo de confiança de $\pm 0,00056$ kWh para uma distribuição *t de Student* com 9 graus de liberdade.
- 2) Para o kart acoplado à bateria de chumbo-ácido, o desvio-padrão observado foi de 0,0030 kWh. Assume-se, portanto, o intervalo de confiança de $\pm 0,00067$ kWh para uma distribuição *t de Student* com 9 graus de liberdade.
- 3) Para o kart à combustão interna, o desvio-padrão observado foi de 0,0094 l/km. Assume-se, portanto, o intervalo de confiança de $\pm 0,0021$ kWh para uma distribuição *t de Student* com 9 graus de liberdade.

4.4 FINAL DE VIDA

A fase final de vida do veículo tem um potencial pequeno em termos de impactos ambientais (BARTOLOZZI; RIZZI; FREY, 2013). Entretanto, neste estudo foi considerada a reciclagem dos pneus, dos componentes da matriz ferrosa, dos componentes do motor elétrico e da bateria chumbo-ácido. A taxa de reciclagem (Tabela 13) foi assumida para todo sistema de produto e a necessidade de energia no processo de reciclagem adotada como média global, pois não foram encontrados dados específicos do Brasil.

Tabela 13 – Taxa de recuperação do material para análise de final de vida.

Material	Taxa de recuperação (%)
Ferro	99,82
Alumínio	93,2
Zinco	93,49
Chumbo	91,43
Cobre	88,53
Polipropileno	54,47
Poliétileno	54,47
Estireno de acrilonitrilo-butadieno (ABS)	54,21
Tereftalato de polietileno (PET)	36,26
Poli (metacrilato de metila) (PMMA)	32,49
Borracha de polipropileno-etileno propileno-dieno classe M (PP-EPDM)	8,02
Poliuretano	6,61
Polipropileno Expandido (EPP)	2,94
Têxtil	8,29

Fonte: (SOUZA *et al.*, 2018)

É importante evidenciar que na reutilização, reciclagem e recuperação de energia, as emissões evitadas causam um impacto positivo no meio ambiente. A reciclagem de materiais como ferro, alumínio, lítio, níquel, cobre, chumbo, plásticos, borrachas e outros quando considerada pode oferecer benefícios econômicos e ambientais. Desta forma, na apresentação dos resultados os valores na categoria de impacto são negativos.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com os modelos de avaliação de impactos ambientais, a análise dos resultados da ACV foi realizada a partir dos gráficos que são gerados através do software. Após o lançamento dos dados de cada componente, é realizada a simulação a partir do método de avaliação e da solicitação de processamento.

As principais categorias de impacto de ponto médio que foram utilizadas para realizar a avaliação dos impactos ambientais são: potencial de depleção da camada de ozônio, potencial de mudança climática e potencial de toxicidade humana. A justificativa para esta seleção é que essas categorias representam os principais impactos ambientais do setor automotivo. Vários autores que realizaram estudos de ACV de automóveis, como Souza *et al.* (2018), Hawkins *et al.* (2013) e Faria *et al.* (2013), optaram por estas categorias.

Neste estudo foram analisadas 3 (três) configurações diferentes de kart: o kart acoplado de uma bateria de lítio e kart acoplado de uma de uma bateria de chumbo-ácido denominados VE simplificados e, por fim, o kart à combustão interna denominado VCI simplificado (Quadro 6).

Quadro 6 – Diferentes cenários analisados neste estudo.

Cenário	Kart
1	Kart com bateria lítio
2	Kart com bateria chumbo-ácido
3	Kart à combustão interna

Fonte: Autora (2019)

5.1 DEPLEÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO

A Depleção da Camada de Ozônio (DCO) refere-se à diminuição da camada de ozônio na atmosfera (Zanghelini, 2010) e é medida através da emissão de Cloro-fluorcarbono (CFC) que são substâncias artificiais disseminadas no meio ambiente. Cada substância de CFC possui o seu fator de potencial de destruição da camada de ozônio que multiplicado pela quantidade de toneladas permite a obtenção do valor de consumo do país em CFC-11 eq. (MMA, 2008).

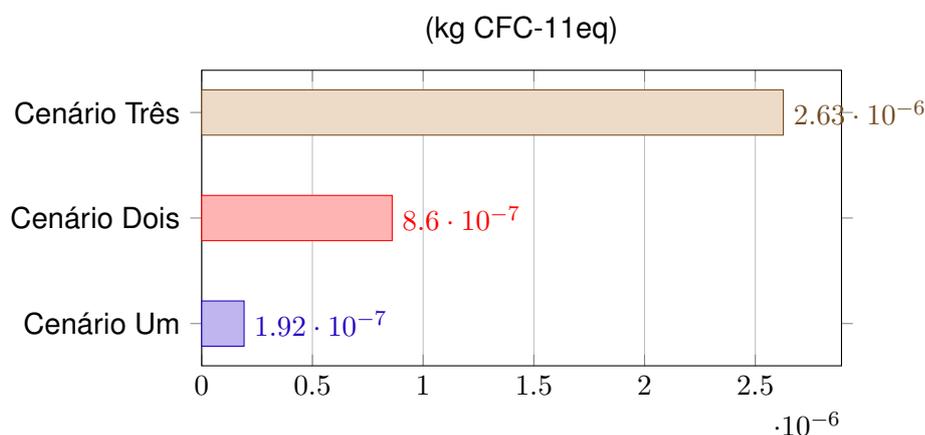
Segundo Souza *et al.* (2018), os impactos deste indicador na produção de veículos são causados pelas emissões de compostos halogenados utilizados e liberados durante a produção de materiais como aço, chumbo, alumínio, zinco, cobre, platina, lítio, níquel, plásticos, borrachas e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS).

O cenário 3 representou o maior impacto para DCO com 71% dos impactos totais, seguido do cenário 2 com 23% e do cenário 1 com apenas 5%. (Figura 13).

Estes resultados estão alinhados com o estudo de Choma e Ugaya (2017) que, para este indicador, o VE apresentou menores impactos que o VCI.

O uso de combustível fóssil no VCI simplificado, durante a fase de uso, foi responsável pelos maiores impactos.

Figura 13 – Participação do impacto na categoria depleção da camada de ozônio.



Fonte: Autora (2019)

Quando comparamos os Cenários 1 e 2 que representam os VE simplificados, em ambos os cenários, a bateria é o componente com maior contribuição ao impacto ambiental, sendo responsável por 80,8% no cenário 2 e 34,3% no cenário 1. Para que fosse possível o funcionamento do kart com a bateria de chumbo-ácido, foi necessário uma proporção maior de material de bateria. Se comparamos em peso, as baterias de lítio pesam cerca de 7kgs e a bateria de chumbo-ácido pesa cerca de 13kgs cada, sendo necessário utilizar 4 baterias de chumbo para a locomoção de 1 VE simplificado.

Para as baterias, a maior porcentagem dessas emissões é resultado do uso do cobre como componente do anodo utilizado na bateria. Sua produção é responsável mais de 15% das emissões de CFC-11– eq./km. Além disso, a extração e o processamento do material policloreto de vinila (usado na embalagem das baterias) também foi impulsionador dos impactos em DCO.

Por fim, quando são comparadas isoladamente as fases de manufatura, utilização e final de vida do kart (Tabela 14) são apresentados os benefícios ambientais trazidos pela reciclagem, que são provenientes principalmente da economia de recursos e energia na produção. O grande benefício da reciclagem para a categoria DCO é apresentado pelo Cenário 1 seguido pelo Cenário 3. O Cenário 2 não apresenta benefícios nesta categoria, porém vale ressaltar que obteve em outras categorias, como no potencial de mudanças climáticas.

O valor negativo na (Tabela 14) para a fase de final de vida, se deve ao fato da reciclagem do veículo contribuir com produtos evitados, ou seja, produtos que não devem ser extraídos da natureza novamente.

Tabela 14 – Resultados do impacto ambiental em depleção da camada de ozônio por fase de montagem, utilização de descarte.

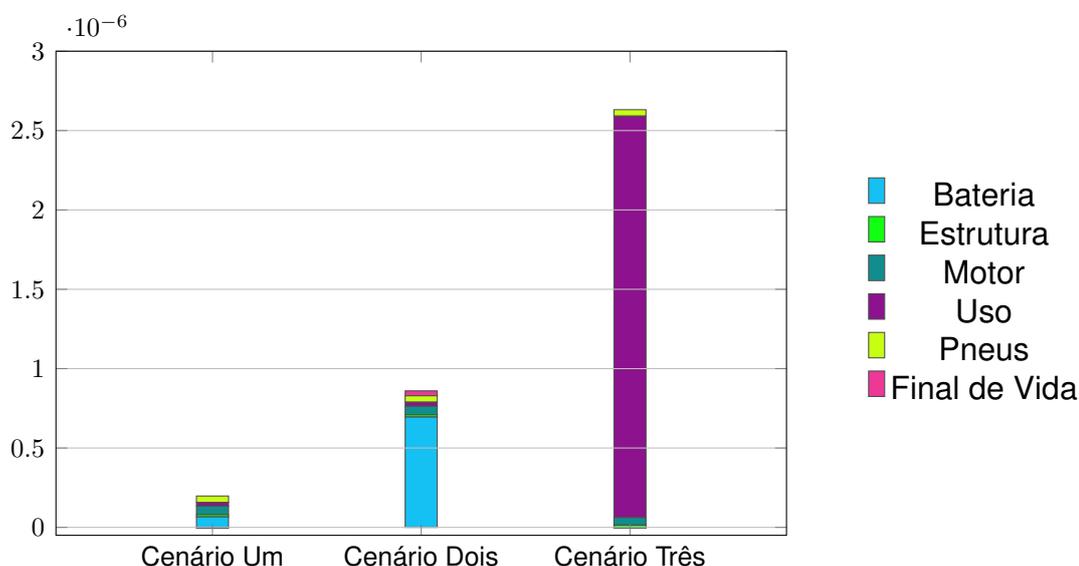
Cenário	Unidade	Total	Bateria	Estrutura	Motor	Uso	Pneus	Final de vida
1	kg CFC-11-eq	1,9E-07	6,6E-08	1,4E-08	5,4E-08	2,3E-08	4,0E-08	-6,0E-09
2	kg CFC-11-eq	8,6E-07	7,0E-07	1,4E-08	5,4E-08	2,5E-08	4,0E-08	3,1E-08
3	kg CFC-11-eq	2,6E-06	0	1,4E-08	4,7E-08	2,5E-06	4,0E-08	-5,2E-09

Fonte: Autora (2019)

Na Figura 14, pode-se identificar facilmente que a maior contribuição para o VCI simplificado está na fase de uso e para o VE simplificado, a maior contribuição está na produção da bateria. Sendo que, para o VE simplificado, o maior impacto total foi do Kart elétrico acoplado a bateria de chumbo-ácido.

pgfcalendar

Figura 14 – Comparação das fases do ciclo de vida na categoria depleção da camada de ozônio.



Fonte: Autora (2019)

5.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

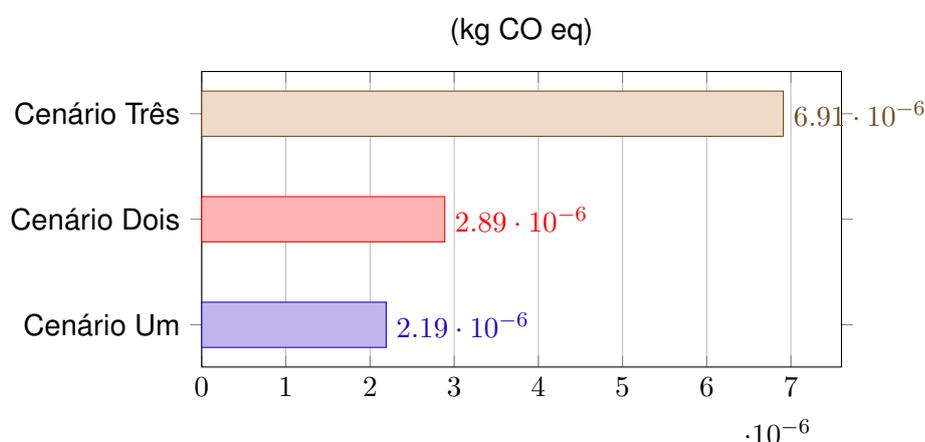
A categoria de Mudanças Climáticas (MC) mostra os impactos potenciais do objeto de estudo sobre as mudanças climáticas em termos de kg de CO₂ eq que é uma

medida utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa (MMA, 2008).

O cenário 3 representou o maior impacto para MC com 58% dos impactos, seguido do cenário 2 com 24% e do cenário 1 com 18% (Figura 15). Estes resultados estão alinhados com o estudo de Choma e Ugaya (2017) e Souza *et al.* (2018) que, para este indicador, o VE apresentou menores impactos que o VCI.

O maior impacto para o VCI simplificado pode ser justificado devido a quantidade de CO₂ lançados na atmosfera a partir da combustão da gasolina.

Figura 15 – Participação do impacto na categoria mudanças climáticas.



Fonte: Autora (2019)

Os resultados de impacto da produção do VE simplificado pode ser comparado ao estudo de Hawkins *et al.* (2013), já que nesta mesma categoria, a produção de baterias contribuiu com 35% a 41% da fase de produção de EV, enquanto o motor elétrico contribuiu com 7% a 8%. Estes números são bastante próximos do que foi encontrado neste estudo, visto que os impactos da bateria variaram de 29,4% a 41,2% e do motor de 13,9% a 10,5%.

Utilizando a matriz brasileira de eletricidade que é baseada principalmente em fontes renováveis, o impacto da fase de utilização do cenário 1 e 2 são baixos quando comparados com o impacto total, isso se deve à característica de emissões de escape zero. Sendo assim, fase de uso do kart causa menor impacto do que a fabricação dos componentes.

A produção da bateria causa maior impacto tanto para o cenário 1 com 6,43953E-07 quando para o cenário 2 com 1,18998E-06 de kg de CO₂-eq/km emitido (Tabela 15).

Quanto à reciclagem do automóvel, o maior benefício da reciclagem para a categoria MC é apresentado pelo Cenário 1, seguido do Cenário 3 e 2. Importante ressaltar que as baterias de chumbo-ácido são altamente passíveis de reciclagem.

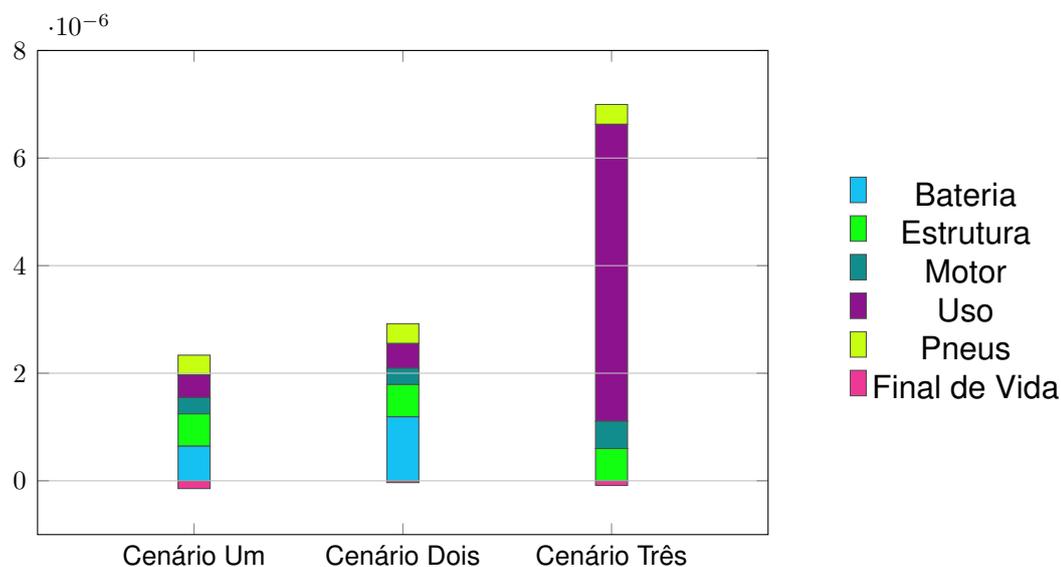
Tabela 15 – Resultados do impacto ambiental em mudanças climáticas por fase de montagem, utilização e descarte.

Cenário	Unidade	Total	Bateria	Estrutura	Motor	Uso	Pneus	Final de vida
1	kg CO ₂ -eq/km	2,19E-06	6,44E-07	6,00E-07	3,04E-07	4,19E-07	3,69E-07	-1,45E-07
2	kg CO ₂ -eq/km	2,89E-06	1,19E-06	6,00E-07	3,04E-07	4,58E-07	3,69E-07	-3,32E-08
3	kg CO ₂ -eq/km	6,91E-06	0	6,00E-07	5,08E-07	5,52E-06	3,69E-07	-8,67E-08

Fonte: Autora (2019)

A Figura 16 contabiliza os impactos ambientais por fase. A composição da energia utilizada para o abastecimento do VEB é um fato relevante e que pode influenciar negativamente os resultados. A utilização de dados proveniente da matriz elétrica brasileira que é considerada praticamente mais de 70% renovável foi um ponto determinante para estes resultados.

Figura 16 – Comparação das fases do ciclo de vida na categoria mudanças climáticas.



Fonte: Autora (2019)

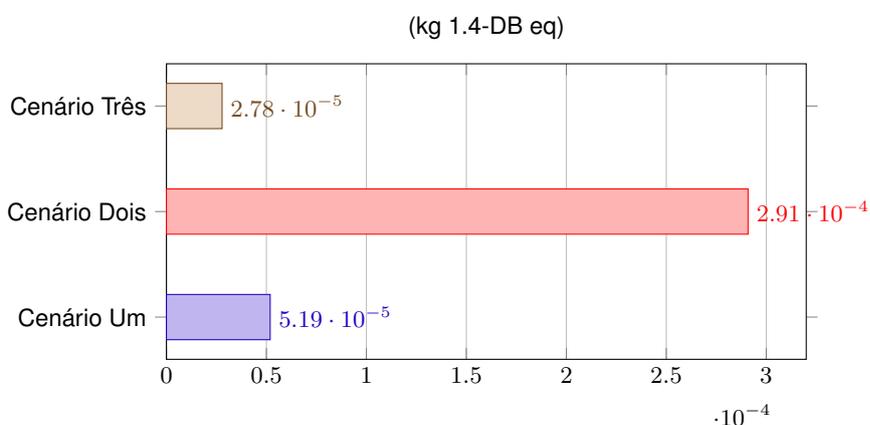
5.3 POTENCIAL DE TOXICIDADE HUMANA

O Potencial de Toxicidade Humana (PTH) representa possíveis impactos na saúde humana devido às emissões tóxicas para a atmosfera de benzeno, etileno, butadieno, fenóis, dioxinas, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, metais pesados e outros (TAGLIAFERRI *et al.*, 2016). Para cada substância tóxica, os PTHs são expressos como equivalentes de 1,4-diclorobenzeno/kg de emissão (kg 1,4 DB-eq).

O cenário 2 representou o maior impacto para PTH com 78% dos impactos, seguido do cenário 1 com 14% e do cenário 3 com 8% (Figura 15). Estes resultados estão alinhados com o estudo de Choma e Ugaya (2017), Souza *et al.* (2018) e Hawkins *et al.* (2013) que, para este indicador, o VCI apresentou menores impactos que o VE.

O maior impacto para os VE simplificados pode ser justificado devido aos elevados encargos das substâncias tóxicas que são liberadas por atividades de mineração de metais durante a produção das baterias (como por exemplo, de níquel, cobre, platina e alumínio). Conforme Hawkins *et al.* (2013), os impactos na fase de produção dos VEs derivam principalmente da utilização cobre, o que justifica o maior impacto para o cenário 2.

Figura 17 – Participação do impacto na categoria potencial de toxicidade humana.



Fonte: Autora (2019)

Tanto no cenário 1 quanto no cenário 2, pode-se verificar que os impactos maiores são causados pela produção da bateria e do motor elétrico. Estes componentes possuem cobre, chumbo e ácido sulfúrico em sua composição e as emissões tóxicas da cadeia de produção desses metais ocorrem principalmente na disposição dos resíduos de minas sulfídricas (Tabela 16).

No futuro, espera-se que com a evolução da tecnologia, a energia e materiais economizados pela reciclagem reduzirão significativamente as emissões de substâncias nocivas à saúde humana, contribuindo para reduzir em média 10% do total dos impactos ambientais (SOUZA *et al.*, 2018). Neste contexto, os valores de energia específica projetados por Gerssen-Gondelach e Faaij (2012) para 2025 considerando baterias de lítio é de 110% maiores que os atuais.

Vargas (2016) adiciona que os piores resultados para toxicidade humana são apresentados devido aos processos de decomissionamento e obtenção de metais pesados presentes na produção de baterias.

Tabela 16 – Resultados do impacto ambiental em potencial de toxicidade humana por fase de montagem, utilização e descarte

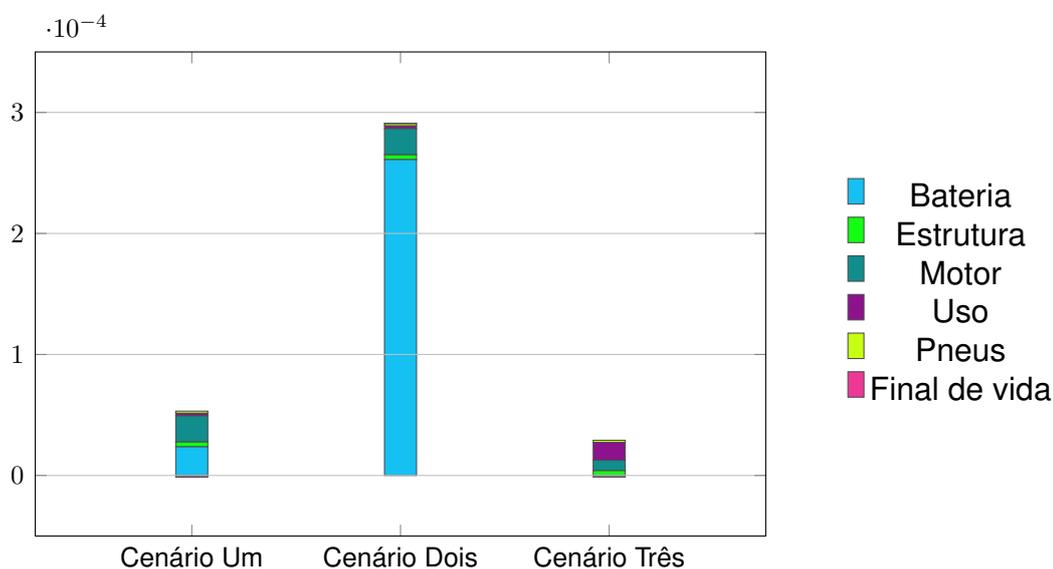
Cenário	Unidade	Total	Bateria	Estrutura	Motor	Uso	Pneus	Final de vida
1	kg 1,4 DB-eq./km	5,19E-05	2,37E-05	3,981E-06	2,16E-05	2,12E-06	1,80E-06	-1,36E-06
2	kg 1,4 DB-eq./km	2,91E-04	2,61E-04	3,98E-06	2,16E-05	2,32E-06	1,80E-06	3,93E-07
3	kg 1,4 DB-eq./km	2,78E-05	0	3,98E-06	8,62E-06	1,47E-05	1,80E-06	-1,29E-06

Fonte: Autora (2019)

Para o VCI simplificado a fase de uso representa 52,9% das emissões, esse resultado é decorrente principalmente de substâncias tóxicas utilizadas ou emitidas no refino do petróleo.

A reciclagem dos veículos simplificados tem benefícios para esta categoria para o cenário 3 com -4,6% e para o cenário 2 com -2,6% de redução em emissão de 1,4-diclorobenzeno/kg.

Figura 18 – Comparação das fases do ciclo de vida na categoria potencial de toxicidade humana.



Fonte: Autora (2019)

5.4 COMPARAÇÃO GERAL ENTRE OS VEÍCULOS SIMPLIFICADOS

De maneira geral, não existe uma tecnologia com um melhor desempenho em todas as categorias de impacto. No entanto, de acordo com a Figura 19, o kart elétrico

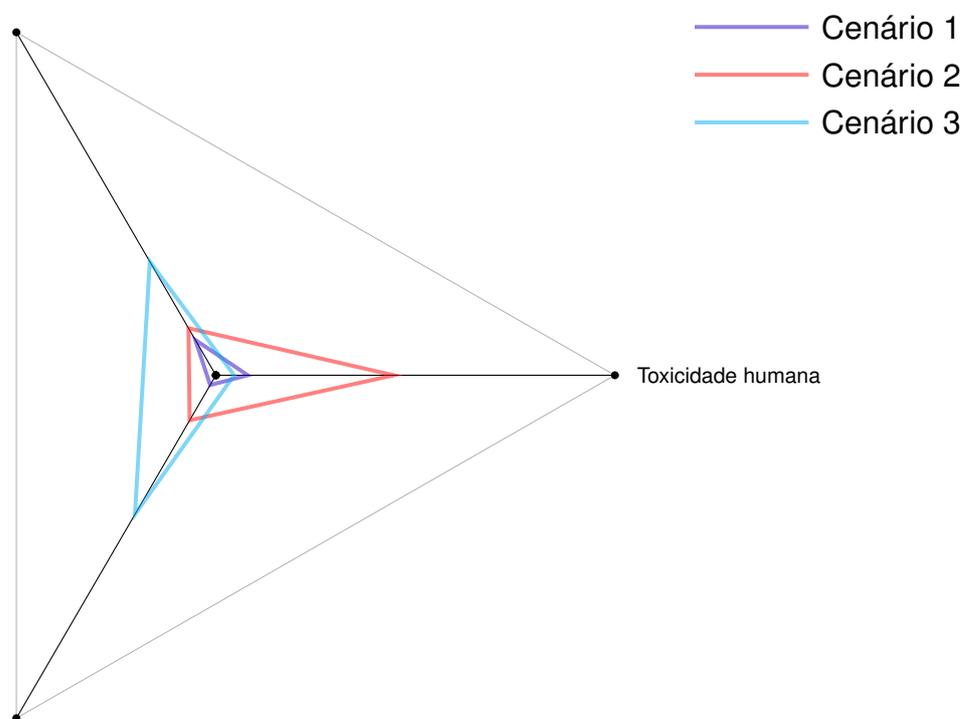
à bateria de lítio apresentou melhor desempenho, seguido pelo kart elétrico à bateria de chumbo ácido e por fim o kart à combustão interna.

Para os pontos que apresentam as categorias DCO e MC, os maiores valores são para o kart que utiliza a gasolina como parte integrante de seu combustível. Para o ponto que apresenta a categoria de PTH, os maiores valores são para os kart que possui a bateria chumbo-ácido, seguido pelo kart que possui a bateria de lítio.

Em todas as categorias, quando comparado apenas os VE, a bateria de lítio obteve melhor desempenho do que a bateria de chumbo ácido. Mostrando que é necessário a introdução de VEs acoplados à baterias mais eficientes energeticamente.

Figura 19 – Comparação geral dos veículos simplificados por categoria.

Mudanças climáticas



Depleção da camada de ozônio

Fonte: Autora (2019)

Nas tabelas Tabela 17 e Tabela 18 os resultados de estudos disponíveis na literatura estão explanados, com o objetivo de comparar com os resultados encontrados neste trabalho. De maneira geral, em todos os estudos citados, o veículo com maior impacto para MC é o veículo de combustão interna. Para PTH, o VE trouxe maior impacto. Ambos as categorias estão alinhados com os resultados encontrados na ACV deste trabalho.

Não foram encontrados estudos que comparavam bateria de chumbo-ácido. Desta forma, este trabalho pode ser considerado como um estudo de referência da ACV para veículos em relação a comparação de bateria de chumbo-ácido e bateria de lítio.

Tabela 17 – Resultados gerais disponíveis na literatura de ACV de veículos elétricos, combustão interna e híbridos.

Autor	Unidade funcional	Escopo do estudo	Matriz de Eletricidade	Método de caracterização	Tipo de indicador	Veículo com maior impacto para DCO	Veículo com maior impacto para MC	Veículo com maior impacto para PTH	Observações
(HAWKINS; GAUSEN; STOMMAN, 2012)	1 km	Produção, uso, fim de vida e todas as cadeias de suprimentos relevantes.	Europa	ReCiPe	MidPoint	-	VCI	VE	Em MC, a fase de uso foi a que mais contribuiu para o resultado. Em PTH, a produção da bateria foi a que mais contribuiu. DCO, não foi avaliado.
(FARIA <i>et al.</i> , 2012)	15.000 km	Well-to-Wheel (WTW)	Europa	-	GREET	GREET	VCI	-	MC: Maior impacto observado durante a fase de uso do veículo. DCO e PTH não foram avaliados.
(KE, 2017)	-	Well-to-Wheel (WTW)	China	GREET	GREET	-	VCI	-	MC: Maior impacto observado durante a fase de uso do veículo. DCO e PTH não foram avaliados.
(SAMARAS; MEISTER-LING, 2008)	1km	Extração de recursos, produção e fase de uso	Estados Unidos	EIO-LCA model	-	-	VCI	-	MC: Maior impacto observado durante a fase de uso do veículo. DCO e PTH não foram avaliados.

Fonte: Autora (2019)

Tabela 18 – Continuação... Resultados gerais disponíveis na literatura de ACV de veículos elétricos, combustão interna e híbridos.

Autor	Unidade funcional	Escopo do estudo	Matriz de Eletricidade	Método de caracterização	Tipo de indicador	Veículo com maior impacto para DCO	Veículo com maior impacto para MC	Veículo com maior impacto para PTH	Observações
(ONAT; KU-CUKVAR; TATARI, 2015)	1km	Produção do veículo/bateria e fase de uso (incluindo manutenção)	Estados Unidos	GREET	GREET	-	VCI	-	MC: Maior impacto observado durante a fase de uso do veículo. DCO e PTH não foram avaliados.
(BAUER <i>et al.</i> , 2015)	1km	Produção, fabricação, uso, manutenção e o fim da vida útil.	Europa	ReCiPe	MidPoint	-	VCI	VE	MC: Maior impacto observado durante a fase de uso do veículo tanto para VCI quanto para o VE devido a matriz de eletricidade PHT: Maior impacto observado durante a fabricação da bateria e fase de uso devido a matriz de eletricidade. DCO: Não foi avaliado.
(MA <i>et al.</i> , 2012)	12.000 km/ano	Produção, fabricação, uso, manutenção e o fim da vida útil.	Europa e EUA	-	-	-	VCI	-	MC: Maior impacto observado durante a fase de uso do veículo. DCO e PTH não foram avaliados.

Fonte: Autora (2019)

6 CONCLUSÃO

Em um momento onde a conscientização ambiental se fortalece, torna-se importante entender qual é o impacto ambiental das novas soluções para mobilidade urbana. Dentre tantas possibilidades, os veículos elétricos tem recebido grandes investimentos.

No entanto, somente a utilização de VE não garante a diminuição dos impactos ambientais. É necessária a realização de uma ACV buscando avaliar se os benefícios esperados seriam observados somente na fase de uso e entender se os impactos evitados nesta fase não seriam transferidos para outra fase do ciclo de vida. Além disso, é importante realizar a comparação com a ACV de um VCI buscando entender e comprovar qual tecnologia desempenharia melhor para as categorias estudadas.

Sendo assim, neste trabalho foram identificadas as condições atuais da ACV de veículos elétricos no Brasil com objetivo de encontrar a lacuna de oportunidade para este estudo. A partir disso, foi definido realizar a ACV para três cenários diferentes de veículos: veículo elétrico simplificado acoplado à dois tipos diferentes de bateria (chumbo-ácido e lítio) e veículo simplificado à combustão interna.

Foi construído o inventário de ciclo de vida, coletado os dados necessários, relacionado com os processos do *Ecoinvent*® e obtido os impactos mais significativos para os 3 cenários.

Testes funcionais foram realizados em todos os veículos com o objetivo de avaliar o consumo energético e consumo de combustível apresentando a realidade dos veículos simplificados.

Os impactos ambientais quantificados a partir da aplicação da ACV para este estudo foram: potencial de depleção da camada de ozônio, mudanças climáticas e potencial de toxicidade humana, e estes podem ser utilizados como uma ferramenta auxiliar em tomadas de decisão visando a busca pela sustentabilidade.

De maneira geral, na categoria de depleção da camada de ozônio e mudanças climáticas o kart elétrico à bateria de lítio teve o melhor desempenho, o pior desempenho em ambas categorias ficou para o kart à combustão interna devido às emissões principalmente durante a fase de utilização do veículo. Na categoria de potencial de toxicidade humana, o kart à combustão interna teve o melhor desempenho e o kart acoplado a bateria de chumbo ácido teve o pior desempenho devido à produção da bateria e do motor elétrico. Além disso, é importante salientar, que em todas as categorias, o kart elétrico acoplado à bateria de lítio teve melhor desempenho ambiental do que o kart elétrico acoplado à bateria de chumbo-ácido.

Quando comparados os resultados encontrados neste estudo com outros estudos disponíveis na literatura, foi possível perceber que os resultados estão alinhados para os impactos causados pelo VE simplificado acoplado à bateria de lítio e o VCI simplificado. Para o VE simplificado acoplado à bateria de chumbo-ácido não foram

encontrados estudos que tivessem realizado esta comparação.

A estrutura do kart é essencialmente composta de metais ferrosos, seguida por metais pesados, polímeros, metais não ferrosos e elastômeros, desta forma, apresentou-se um cenário de oportunidade para incentivar a reciclagem de todos estes materiais. Nesta ACV, a fase de final de vida do veículo, onde a reciclagem foi considerada, trouxe os benefícios para diminuir os impactos totais.

As possíveis medidas e avanços tecnológicos que podem tornar o VEB melhor para todas as categorias de impacto incluem as melhorias no gerenciamento de resíduos sulfídricos e a redução de materiais específicos para bateria e motor elétrico já foram às fases mais contribuintes. Estas medidas associadas a geração de energia elétrica em Santa Catarina e na maior parte do Brasil tornam a opção VEB interessante do ponto de vista ambiental.

O perfil de geração elétrica do país contribuiu fortemente para os resultados da ACV, pois atualmente é considerada em sua maior parte como renovável. Este ponto é específico do Brasil e difere na maioria dos estudos discutidos na revisão da literatura.

Entre os fatores que podem causar um aumento nos impactos para os VEs é o aumento destes veículos sem o devido planejamento do governo. Isto causaria aumento do consumo de energia e poderia aumentar o percentual de geração de energia não renovável na matriz Brasileira.

Quanto ao ICEV, grandes melhorias nas categorias para as quais têm impactos maiores (depleção da camada de ozônio e mudanças climáticas) dependeriam da melhoria na eficiência do veículo ou dos ganhos na produção do combustível.

Este trabalho mostrou que existem diferentes impactos ambientais durante o ciclo de vida de veículos e não se pode considerar que uma tecnologia é melhor que outra sem antes avaliar todas estas fases.

Estudos específicos, como este, podem ser utilizados para contribuir no desenvolvimento do projeto de produto de um novo veículo. Sendo assim, os materiais ou fases de maior impacto poderão ser aperfeiçoados com novas tecnologias buscando enriquecimento e tornando-o cada vez mais amigável do ponto de vista ambiental.

Haja visto os resultados encontrados neste estudo, a orientação para estes veículos simplificados é buscar em um próximo projeto a utilização de materiais mais eficientes ambientalmente tanto para a bateria quanto para o motor elétrico no VE. Para o VCI buscar o aumento da eficiência do veículo diminuindo o consumo de combustível.

Por fim, como limitação, o uso de dados não específicos do Brasil, para produção de veículos, processos de *background* e os parâmetros médios de uso de veículos, contribuem para as incertezas deste trabalho e podem ser tratados em estudos futuros. Além disso, a diferença entre o veículo simplificado utilizado como base para este estudo dos VEBs em circulação atualmente e no futuro é também uma limitação importante.

REFERÊNCIAS

ABVE. **O que um veículo elétrico?** São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.abve.org.br/perguntas>.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global EV Outlook 2019**. <https://www.iea.org/gevo2019/>, 2019.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Tracking clean energy progress 2017**. [S.l.], 2017.

ALVES, J *et al.* Indirect methodologies to estimate energy use in vehicles: Application to battery electric vehicles. **Energy Conversion And Management**, v. 124, p. 116–129, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. [S.l.], 2009. p. 22.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. [S.l.], 2009. p. 51.

BARASSA, Edgar. **Trajectoria tecnologica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil**. 2015. Diss. (Mestrado) – Dissertação) (Mestrado) - Curso de Política Científica e Tecnológica, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BARE, J. C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D. W. Life cycle impact assessment midpoints vs. endpoints: the sacrifices and the benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, n. 5, 2000.

BARTOLOZZI, I.; RIZZI, F.; FREY, M. Comparison between hydrogen and electric vehicles by life cycle assessment: A case study in Tuscany, Italy. **Applied Energy**, v. 101, p. 116–129, 2013.

BAUER, Christian *et al.* The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. **Applied Energy**, v. 157, [s.l.], p. 871–883, 2015.

BINGHAM, C.; WALSH, C.; CARROLL, S. Impact of driving characteristics on electric vehicle energy consumption and range. *Int Intelligent Transport Systems*. **Institution of Engineering and Technology (IET)**, v. 6, n. 1, p. 29–35, 2012.

BNEF. **Long-Range EV market is set to get more crowded by 2020**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/long-range-ev-market-set-get-crowded-2020>.

- CHAN, C. C. The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. **Proceedings Of The Ieee - Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007.
- CHAN, C. C.; BOUSCAYROL, A.; CHEN, K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. **Ieee Transactions On Vehicular Technology**, v. 59, n. 2, p. 589–598, 2010.
- CHOMA, Ernani Francisco.; UGAYA, Cássia Maria Lie. Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet. **Journal Of Cleaner Production**, v. 152, p. 497–507, 2017.
- DAS, Himadry. Shekhar.; TAN, Chee. Wei.; YATIM, A. H. M. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 268–291, 2017.
- EGEDE, Patricia *et al.* Life Cycle Assessment of Electric Vehicles: A Framework to Consider Influencing Factors. **Procedia Cirp**, v. 29, [s.l.], p. 233–238, 2015.
- EHSANI, Mehrdad *et al.* **Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. Estados Unidos, USA: Crc Press Llc, 2005.
- ELLINGSEN, Linda Ager-wick *et al.* Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. **Journal Of Industrial Ecology**, v. 18, n. 1, p. 113–124, 2013.
- EPE. **Balço Energético Nacional 2018. Relatório Síntese: Ano base 2017**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivo%20s/publicacao-303/topico-419/BEN2018Int.pdf>.
- FARIA, Ricardo *et al.* A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. **Energy Conversion And Management**, v. 61, [s.l.], p. 19–30, 2012.
- FARIA, Ricardo *et al.* Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 24, [s.l.], p. 271–287, 2013.
- FINNVEDEN, Goran *et al.* Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.
- GERSSSEN-GONDELACH, Sarah J.; FAAIJ, André. Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term. **Journal Of Power Sources**, v. 212, p. 111–129, 2012.
- GOEDKOOOP *et al.* ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First

edition. Report I: Characterisation. **Ruimte en Milieu Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.**, 2013.

HAWKINS, Troy R. *et al.* Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. **Journal Of Industrial Ecology**, v. 17, n. 1, p. 53–64, 2013.

HAWKINS, Troy R.; GAUSEN, Ola Moa.; STOMMAN, Anders Hammer. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles: a review. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 8, p. 997–1014, 2012.

HELMERS, Eckard.; MARX, Patrick. Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. **Environmental Sciences Europe**, v. 24, n. 1, p. 1–15, 2012.

HUO, H. *et al.* life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between china and the u.s. **Atmospheric Environment**, v. 108, [s.l.], p. 107–116, 2015.

IBAMA. **Resolução Conama no 416/09: 9: 2017 (ano base 2016)**. [S.l.], 2017.

IBGE. **Após três anos de queda, indústria cresce puxada por setor automotivo**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/19856-apos-tres-anos-de-queda-industria-cresce-puxada-por-setor-automotivo.html>.

IBGE. **PIB cresce 1,1% em 2018 e fecha ano em R\$ 6,8 trilhões**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/23886-pib-cresce-1-1-em-2018-e-fecha-ano-em-r-6-8-trilhoes>.

JOLLIET, Olivier *et al.* IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, v. 6, n. 8, p. 324–330, 2013.

KE, Wenwei and others. Well-to-wheels energy consumption and emissions of electric vehicles: Mid-term implications from real-world features and air pollution control progress. **Applied Energy**, v. 188, p. 367–377, 2017.

KUMAR, M. S.; REVANKAR, S. T. Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. **Elsevier BV**, v. 70, p. 1266–1285, 2017.

LAZZARI, Marcio Alessandro de. **Avaliação ambiental de um veículo elétrico coletor de resíduos sólidos urbanos recicláveis**. 2010. Diss. (Mestrado) – Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

MA, Hongrui *et al.* A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles. **Energy Policy**, v. 44, [s.l.], p. 160–173, 2012.

MAJEAU-BETTEZ, Guillaume.; HAWKINS, Troy R.; STROMMAN, Anders Hammer. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. **Environmental Science Technology**, v. 45, n. 10, p. 4548–4554, 2011.

MENDES, Natalia Crespo. **Métodos e Modelos de Caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. 2013. Diss. (Mestrado) – Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

MENDES, Natalia. Crespo.; BUENO, Cristiane.; OMETTO, Aldo. Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production, FapUNIFESP (SciELO)**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016.

MMA. [S.l.], 2008. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>.

MOTTA, Flavia Gutierrez. A Cadeia de Destinação dos Pneus Inservíveis - O Papel da Regulação e do Desenvolvimento Tecnológica: Ambiente e Sociedade. **Campinas**, v. 11, p. 167–184, 2008.

NORDELOF, Anders *et al.* Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles-what can we learn from life cycle assessment?. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 11, p. 1866–1890, 2014.

NOTTER, Dominic A. *et al.* Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. **Environmental Science Technology**, v. 44, n. 17, p. 6550–6556, 2010.

OFFER, G.j. *et al.* Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 24–29, 2010.

ONAT, Nuri Cihat.; KUCUKVAR, Murat.; TATARI, Omer. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. **Applied Energy**, v. 150, [s.l.], p. 36–49, 2015.

PENNINGTON, D. W. *et al.* Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 721–739, 2004.

PICORELLI, Luiz. A.; HOLANDA, Jayme. B. Análise das possibilidades da utilização de veículos elétricos híbridos na geração distribuída móvel. **Encontro regional latino-americano da Cigré**, n. 10, p. 1–6, 2003.

PIEKARSKI, Cassiano Moro *et al.* Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: Uma discussão para adoção de métodos na especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 3, n. 8, p. 222–240, 2012.

RAFIQUE, Raja Muhammad Usman. **Life Cycle Assessment of Waste Car Tyres at Scandinavian Enviro Systems**. 2012. Diss. (Mestrado) – Dissertação (Mestrado) - Curso de Innovative, Sustainable Chemical Engineering, Department Of Chemical e Biological Engineering, Chalmers University Of Technology., Goteborg, Sweden.

REBITZER, G *et al.* Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004.

SAIC. **Life Cycle Assessment: Principles And Practice**. Ohio, 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov>.

SAMARAS, Constantine.; MEISTERLING, Kyle. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. **Environmental Science Technology**, v. 42, n. 9, p. 3170–3176, 2008.

SAMSUNG, Sdi Co. Ltd. Safety data sheet: Model ICR18650-30A. **SAMSUNG**, v. 1, 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Relatório da Frota Circulante 2019**. São Paulo, Maio 2019. p. 5.

SOUSA, Sabrina. Rodrigues. **Normalização de Critérios Ambientais Aplicados á Avaliação do Ciclo de Vida**. 2010. Diss. (Mestrado) – Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SOUZA, Lidiane La Picirelli de *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. **Journal Of Cleaner Production**, v. 203, [s.l.], p. 444–468, 2018.

SULZBERGER, C. An early road warrior: Electric vehicles in the early years of the automobile. **IEEE Power Energy Mag**, v. 2, n. 3, p. 66–71, 2004.

TAGLIAFERRI, Carla. *et al.* 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, 2016.

TORRETTA, Vincenzo *et al.* Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. **Waste Management**, v. 45, p. 152–160, 2015.

VARGAS, Jorge Enrique Velandia. **Análise da competitividade ambiental de veículos elétricos no Brasil no cenário atual e futuro**. 2016. Diss. (Mestrado) – Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

YUAN, Xinmei *et al.* Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles. **Energy**, v. 141, n. 1, p. 1955–1968, 2017.

ZACKRISSON, Mats.; AVELLAN, Lars.; ORLENIUS, Jessica. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles e Critical issues. **Journal of Cleaner Production**, n. 18, p. 1519–1529, 2010.

APÊNDICE A – RELAÇÃO DE PROCESSOS *ECOINVENT*® UTILIZADOS

Tabela 19 – Relação de processos utilizados

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
Uso	Uso	Transporte, VE	0,0314	UM	Transport, passenger car, electric GLO processing Alloc Def, U*	Bateria de lítio
Uso	Uso	Transporte, VE	0,0343	kwh	Transport, passenger car, electric GLO processing Alloc Def, U*	Bateria de chumbo ácido
Uso	Uso	Manutenção	6,66E-06	Uni	Maintenance, passenger car, electric, without battery GLO processing Alloc Def, U	O Ecoinvent assinala que o veículo elétrico precisa de 6,66E-6 unidades manutenção por km.
Produção	Estrutura	Quadro - Aço SAE 4130 (cromo-molibdênio)	32	Kg	Steel converter, low-alloyed, at plant/Brazil	
Produção	Estrutura	Quadro - Aço SAE 4130 (cromo-molibdênio)	32	Kg	Steel, chromium steel 18/8 RoW steel production, converter, chromium steel 18/8 Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	CARENAGEM MOD. TRADICIONAL (gravata/frontal/laterais) > Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	5,4	Kg	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	
Produção	Estrutura	Volante > Aço e Borracha vulcanizada	1,85	Kg	Steel converter, low-alloyed, at plant/Brazil	
Produção	Estrutura	Volante > Aço e Borracha vulcanizada	1,85	Kg	Synthetic rubber at plant/RER U	

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 20 – Relação de processos utilizados 1

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
Produção	Estrutura	Rodas e Cubo de rodas > Alumínio	4,94	Kg	Aluminium, production mix, at plant/RER U	
Produção	Estrutura	Manga de eixo > Aço SAE 4340 (cromo-níquel-molibdênio)	1,01	Kg	Steel, chromium steel 18/8 RoW steel production, converter, chromium steel 18/8 Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Pedal > Aço SAE 1020	1,73	Kg	Steel, low-alloyed RoW steel production, converter, low-alloyed Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Banco > Fibra	3,3	Kg	Glass fibre reinforced plastic, polyamide, injection moulded RoW production Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Reforço para – choque envolvente diant. Plástico > Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	13,7	Kg	polyethylene, HDPE, granulate, at plant	
Produção	Estrutura	Furação	0,4875	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Corte de chapas	0,3125	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Pintura	1	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Processo de solda	27,6	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 21 – Relação de processos utilizados 2

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
Produção	Estrutura	Energia TOTAL	29,4	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Revestimento da estrutura com Esmalte sintético	-	Kg	Epoxy resin, liquid, at plant/RER U	Apenas para constar, não considerado no software.
Produção	Estrutura	Eletrodo	2,7	m	Welding, arc, steel/RER U	
Produção	Pneu	Pneu dianteiro	2,49	Kg	Synthetic rubber ROW production Alloc Def, U	
Produção	Pneu	Pneu traseiro	3,1	Kg	Synthetic rubber ROW production Alloc Def, U	
Produção	Pneu	Energia para produção dianteiro	0,2739	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Pneu	Energia para produção traseiro	0,341	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Estrutura	Revestimento das rodas com esmalte sintético	-	Kg	Epoxy resin, liquid, at plant/RER U	Apenas para constar, não considerado no software.
Produção	Motor	Motor elétrico	12,496	Kg	Electric motor, electric passenger car GLO electric motor production, vehicle (electric powertrain) Alloc Def, U	Proporção realizada a partir do estudo de Hernandez (2015).

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 22 – Relação de processos utilizados 3

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
Produção	Motor	Ímãs permanentes	0,21	Kg	Permanent magnet, for electric motor GLO market for permanent magnet, electric passenger car motor Alloc Def, U	Proporção realizada a partir do estudo de Hernandez (2015).
Produção	Bateria Lítio	Bateria (lítio); células	5,616	Kg	Battery cell, Li-ion RoW production Alloc Def, U*	Contém informações de energia dentro do proxy
Produção	Bateria Chumbo	Bateria Chumbo-ácido	50,4	Kg		
Produção	Bateria Chumbo	Lead	30,24	Kg	Lead GLO primary lead production from concentrate Alloc Def, U	
Produção	Bateria Chumbo	PP	5,04	Kg	Polypropylene, granulate RoW production Alloc Def, U	
Produção	Bateria Chumbo	Sulfuric acid	5,04	Kg	Sulfuric acid RoW production Alloc Def, U	
Produção	Bateria Chumbo	Water	0,01	M	Water, well, in ground, BR	
Produção	Bateria Chumbo	Glass	1,01	Kg	Glass fibre RoW production Alloc Def, U	
Produção	Bateria Chumbo	Energia	128,8	MJ/kg	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	
Produção	Bateria Lítio	BMS	0,762	kg	Printed board I/IDEMAT 2001	
Produção	Bateria Lítio	Cobre	0,3189	kg	Copper RoW production, primary Alloc Def, U	Fios do sistema elétrico da Bateria de lítio

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 23 – Relação de processos utilizados 4

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
Produção	Bateria Lítio	PVC	0,3189	kg	Polyvinylidenchloride, granulate RoW production Alloc Def, U	Fios do sistema elétrico da Bateria de lítio
Produção	Motor	Cobre	0,6353	-	-	
Produção	Motor	PVC	0,6353	-	-	
Produção	Bateria Chumbo	Cobre	2,52	kg	Cooper, at regional storage/RER U	Fios do sistema elétrico da Bateria de chumbo ácido
Produção	Bateria Chumbo	PVC	2,52	kg	Polyvinylidenchloride, granulate RoW production Alloc Def, U	Fios do sistema elétrico da Bateria de chumbo ácido
EOL	EOL	Reciclagem de alumínio	4,60408	kg	Aluminium (waste treatment) GLO recycling of aluminium Alloc Def, U	Estrutura
EOL	EOL	Aterro (alumínio)	0,33592	kg	Waste aluminium RoW treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Estrutura
EOL	EOL	Reciclagem de cobre	0,844488	kg	Copper, secondary, from cable treatment, at plant/GLO U	Bateria de lítio
EOL	EOL	Aterro (cobre)	0,109412	kg	Scrap copper RoW treatment of, municipal incineration Alloc Def, U	Bateria de lítio

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 24 – Relação de processos utilizados 5

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
EOL	EOL	Reciclagem de cobre	2,793387	kg	Copper, secondary, from cable treatment, at plant/GLO U	Bateria de chumbo ácido
EOL	EOL	Aterro (cobre)	0,361913	kg	Scrap copper RoW treatment of, municipal incineration Alloc Def, U	Bateria de chumbo ácido
EOL	EOL	Reciclagem de aço	34,67747	kg	Steel and iron (waste treatment) GLO recycling of steel and iron Alloc Def, U	Estrutura
EOL	EOL	Aterro (aço)	0,062532	kg	Scrap steel RoW treatment of, inert material landfill Alloc Rec, U	Estrutura
EOL	EOL	Reciclagem de plástico	0,519589	kg	Mixed plastics (waste treatment) GLO recycling of mixed plastics Alloc Rec, U	Bateria de lítio
EOL	EOL	Incineração de plástico (mix)	0,434311	kg	Waste plastic, mixture CH treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Bateria de lítio
EOL	EOL	Reciclagem de plástico	1,718692	kg	Mixed plastics (waste treatment) GLO recycling of mixed plastics Alloc Rec, U	Bateria de chumbo ácido
EOL	EOL	Incineração de plástico (mix)	1,436608	kg	Waste plastic, mixture CH treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Bateria de chumbo ácido
EOL	EOL	Reciclagem de plástico	10,35475	kg	Mixed plastics (waste treatment) GLO recycling of mixed plastics Alloc Rec, U	Estrutura

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 25 – Relação de processos utilizados 6

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
EOL	EOL	Incineração de plástico (mix)	8,655253	kg	Waste plastic, mixture CH treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Estrutura
EOL	EOL	Incineração de fibra	3,3	kg	Waste plastic, mixture CH treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Estrutura
EOL	EOL	Reciclagem da borracha	1,790477	kg	Recycling rubber and leather/RER U	Pneus
EOL	EOL	Incineração de borracha	3,799523	kg	Waste rubber, unspecified RoW treatment of, municipal incineration Alloc Def, U	Pneus
EOL	EOL	Reciclagem da borracha	0,592555	kg	Recycling rubber and leather/RER U	Estrutura
EOL	EOL	Incineração de borracha	1,257445	kg	Waste rubber, unspecified RoW treatment of, municipal incineration Alloc Def, U	Estrutura
EOL	EOL	Reciclagem de aço	9,88864	Kg	Steel and iron (waste treatment) GLO recycling of steel and iron Alloc Def, U	Motor elétrico
EOL	EOL	Aterro (aço)	0,01783	Kg	Scrap steel RoW treatment of, inert material landfill Alloc Rec, U	Motor elétrico

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 26 – Relação de processos utilizados 7

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
EOL	EOL	Reciclagem de alumínio	1,262609	Kg	Aluminium (waste treatment) GLO recycling of aluminium Alloc Def, U	Motor elétrico
EOL	EOL	Aterro (alumínio)	0,092122	Kg	Waste aluminium RoW treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Motor elétrico
EOL	EOL	Reciclagem de cobre	0,749589	Kg	Copper, secondary, from cable treatment, at plant/GLO U	Motor elétrico
EOL	EOL	Aterro (cobre)	0,097117	Kg	Scrap copper RoW treatment of, municipal incineration Alloc Def, U	Motor elétrico
EOL	EOL	Reciclagem de plástico	0,04612	Kg	Mixed plastics (waste treatment) GLO recycling of mixed plastics Alloc Rec, U	Motor elétrico
EOL	EOL	Incineração de plástico (mix)	0,03855	Kg	Waste plastic, mixture CH treatment of, sanitary landfill Alloc Rec, U	Motor elétrico
EOL	EOL	Ímãs permanentes	0,21	Kg	Não encontrado processo para reciclagem	Motor elétrico
EOL	EOL	Bateria (lítio); células	5,616	Kg	Disposal, Li-ions batteries, pyrometallurgical/GLO U	Bateria de lítio
EOL	EOL	Bateria de chumbo ácido	50,4	Kg	Scrap lead acid battery GLO market for Alloc Def, U	Bateria de chumbo ácido
EOL	EOL	BMS	0,756	kg	Não encontrado processo para reciclagem	Bateria de lítio

Fonte: Ecoinvent®.

Tabela 27 – Relação de processos utilizados 8

Fase	Componente	Item	QTD	UN	Processo utilizado	Observação
EOL	EOL	Energia para triturar resíduos de pneus (coprocessamento)	0,10733	kwh	Verificar qual processo deve ser utilizado	Pneus
EOL	EOL	Energia para dividir o motor	0,83824	kwh	Electricity, high voltage BR production mix Alloc Def, U	Motor elétrico
Transporte	Transporte	Transporte estrada Pneus	0,41	tkm	Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	Bateria de lítio
Transporte	Transporte	Transporte estrada Kart Elétrico	42,89	tkm	Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	Bateria de chumbo ácido
Transporte	Transporte	Transporte estrada Motor Elétrico	6,57891	tkm	Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	
Transporte	Transporte	Transporte estrada Bateria lítio	3,3007	tkm	Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	
Transporte	Transporte	Transporte estrada Chumbo	34,3952	tkm	Transport, lorry > 16t, fleet average/RER U	
Produção	Motor	Motor combustão interna	31,7	Kg	Internal combustion engine, for passenger car GLO internal combustion engine production, passenger car Alloc Def, U*	
Uso	Uso	Transporte, VCI	0,105		Petrol, unleaded RoW market for Alloc Def, U	
Uso	Uso	Transporte, VCI	0,105		Transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 RoW transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 Alloc Def, U*	

Fonte: Ecoinvent®.