



**Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos  
veículos elétricos**

**Felipe Tomaz Freitas**

*Universidade Federal do ABC (UFABC)*

*e-mail: [felipe.f@aluno.ufabc.edu.br](mailto:felipe.f@aluno.ufabc.edu.br)*

**Márcia Maria Penteadó Marchesini**

*Universidade Federal do ABC (UFABC)*

*e-mail: [mmarchesini@yahoo.com.br](mailto:mmarchesini@yahoo.com.br)*

## Resumo

Uma das maiores adversidades do nosso tempo são as mudanças climáticas e o setor de transportes responde por cerca de 25% das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE). O veículo elétrico é considerado como menos poluente durante seu uso e, para fins de estudo, focou-se na ACV da sua bateria, cuja importância é refletida por representar cerca de 1/3 do valor monetário do veículo e ter alta eficiência de conversão de energia elétrica em potência em comparação aos motores a combustão. No entanto, para reduzir a quantidade de recursos naturais utilizados e os resíduos gerados, é necessário conhecer os aspectos e impactos ambientais em cada etapa do ciclo de vida do produto. O objetivo deste artigo é identificar e caracterizar as etapas do ciclo de vida das baterias utilizadas nos veículos elétricos, mapeando os impactos ambientais inerentes a cada etapa, através da realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do produto, com a coleta de dados secundários. Para uma unidade da bateria de estudo, a etapa de extração e produção de matérias-primas/recursos naturais é a que apresentou o maior impacto nas categorias relativas ao potencial de aquecimento global, geração de resíduos sólidos, potencial de acidificação e potencial de eutrofização. Na etapa de uso, foi visto o maior consumo de energia elétrica e, na etapa de reciclagem, maior consumo de água doce e produção de resíduos sólidos. Não é possível dizer que os veículos elétricos são uma alternativa sustentável sem compará-los com o ACV dos veículos que usam combustíveis fósseis.

**Palavras-chave:** Ciclo de vida do produto; Mudanças climáticas; Carros elétricos; Baterias; Avaliação do Ciclo de vida (ACV).

## Abstract

*One of the greatest adversities of our time is climate change and the transport sector accounts for about 25% of global greenhouse gas emissions. The electric vehicle is considered to be less polluting during its use and, for study purposes, it focused on the LCA of its battery, whose importance is reflected by representing about 1/3 of the vehicle's monetary value and having high efficiency of converting electric energy into power compared to combustion engines. However, to reduce the amount of natural resources used and the waste generated, it is necessary to know the environmental impacts at each stage of the product's life cycle. The purpose of this article is to identify and characterize the stages of the life cycle of the batteries used in electric vehicles, mapping the environmental impacts inherent to each stage, by conducting a Life Cycle Assessment (LCA) of the product, with the collection of secondary data. For a study battery unit, the step of extracting natural resources and processing is the one that had the greatest impact on the categories of global warming potential, solid waste generation, acidification potential and eutrophication potential. In the use stage, the highest consumption of electric energy was seen and in the recycling stage, the highest consumption of fresh water and the production of solid waste. It is not possible to say that electric vehicles are a sustainable alternative without comparing them with the LCA of vehicles that use fossil fuels.*

**Keywords:** *Product life cycle; Climate changes; Electric cars; Batteries; Life Cycle Assessment (LCA).*

## 1. Introdução.

---

Dado que a cadeia de suprimentos passou por muitas transformações ao longo do tempo para se adaptar às transformações vividas na sociedade, a cadeia de suprimentos atual é denominada de sustentável para combinar a preocupação com o meio ambiente, as necessidades sociais e os interesses econômicos. A cadeia de suprimentos tradicional com foco só econômico envolve as etapas direta ou indiretamente envolvidas no atendimento ao cliente, desde os fornecedores até o próprio cliente, passando pelas etapas intermediárias, como fabricantes e distribuidores (BARBIERI *et al.*, 2014; ALMEIDA *et al.*, 2022).

Segundo *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP, 2022), Supply Chain Management (SCM) envolve a gestão de todas as atividades relacionadas ao abastecimento e todas as

atividades logísticas, transformação, mas também coordenação e colaboração com parceiros do canal, que podem ser fornecedores, intermediários, operadores logísticos e clientes, para integrar as gestões de suprimento e demanda dentro e entre as empresas.

Gao *et al.* (2021) e Barbieri *et al.* (2014) ressaltam que houve a incorporação, de forma sistemática, das preocupações de sustentabilidade ambiental ao conceito de SCM, visando o aperfeiçoamento do desempenho ambiental das empresas e da cadeia de suprimentos, conceituando como cadeia de suprimentos verde, integrando os trabalhos individuais de seus participantes e modificando estratégias de negócio orientadas somente para o lucro de forma insustentável. Nesse sentido, para Gao *et al.* (2021), a Gestão Verde da Cadeia de Suprimentos (GSCM) consiste na gestão de recursos naturais, materiais, componentes, processos, para minimizar os impactos ambientais sobre os *stakeholders* de toda a cadeia de suprimentos, de modo a ajudar as empresas para atender às exigências dos governos, reduzir os riscos e impactos negativos sobre o meio ambiente ao longo da cadeia de suprimentos e melhorar a reputação social e a imagem corporativa diante de *stakeholders* e sociedade em geral.

A cadeia de suprimentos verde tem sua orientação para o ciclo de vida do produto. Segundo *The Life Cycle Initiative* (2022), sendo esta uma parceria público-privada organizada pela UNEP (*United Nations Environment Programme* ou Programa Ambiental da ONU) e envolvendo vários *stakeholders*, o ciclo de vida de um produto envolve várias etapas de transformação dos recursos naturais em produtos e pode começar com a extração de matérias-primas de recursos naturais do solo e a geração de energia, os quais passam pelas etapas de produção do produto, embalagem, distribuição, uso, manutenção e, eventualmente, reciclagem, reutilização, recuperação ou disposição final. A visão do ciclo de vida do produto está enquadrada na abordagem Estratégica da Gestão Ambiental Empresarial.

Para Barbieri (2016) e Martins, Escrivão Filho e Nagano (2015), a gestão ambiental em âmbito empresarial apresenta estudos que classificam os diversos níveis de gestão na área ambiental nas organizações, a fim de se observar a evolução dessa temática dentro destas. A depender da forma como atua, segundo Barbieri (2016), a gestão ambiental empresarial pode desenvolver três abordagens distintas. A primeira, denominada Controle da Poluição, é uma postura reativa, em que a empresa age sobre os subprodutos de suas atividades, quando a poluição já foi gerada, a fim de se atender uma legislação estabelecida e a pressão da comunidade, impedindo que o poluente seja lançado sem tratamento no ambiente. Uma segunda abordagem é a Prevenção da Poluição, em que se busca agir sobre o processo produtivo e o produto em si, com o intuito de prevenir a geração da poluição, através de melhorias e mudanças no processo produtivo. Tal abordagem visa eliminar ou mesmo reduzir rejeitos antes que sejam gerados e lançados no ambiente. A terceira e última abordagem é a Estratégica, em que as questões ambientais são incorporadas na estratégia da organização e, portanto, relacionados à busca por vantagens competitivas advindas da gestão ambiental, como melhoria da imagem institucional, por exemplo.

As abordagens da gestão ambiental empresarial visam tanto solucionar como minimizar os problemas ambientais. Uma das maiores adversidades de nosso tempo é a mudança climática, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU). O Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC) (2016) diz que a comunidade científica internacional indica que são provavelmente as emissões antropogênicas a razão predominante do crescimento da temperatura global desde o século XX. Para Vital (2018), a maior parte dos países signatários do acordo de Paris aparenta estar em consonância sobre o aquecimento global e seus impactos. Impactos estes que podem trazer prejuízos irreversíveis à biodiversidade, comprometendo também a infraestrutura, agricultura e indústria, afetando o desenvolvimento da economia.

O setor dos transportes, segundo a PBMC (2016), representa uma grande fatia das emissões de gases, muito devido ao excesso do uso de automóveis particulares. Tal, segundo Fujimori (2020), responde por cerca de 25% das emissões globais de GEE (Gases de efeito estufa). Destas, o transporte rodoviário é responsável por mais da metade. Vonbun (2020) diz que existem tecnologias disponíveis com pouca ou nenhuma emissão de GEE. Dentre elas, os carros elétricos, onde o CO<sub>2</sub> não é um subproduto, o que corrobora com Fujimori (2020), que diz ainda que os veículos movidos por eletricidade representam uma alternativa aos veículos movidos a combustíveis fósseis, e são propostos como uma forma significativa de reduzir estas emissões. Segundo Delgado (2017), a expansão da eletrificação dos carros pode ajudar na diminuição das emissões de GEE no setor de transportes, uma

vez que os automóveis elétricos emitem nada ou muito menos gases de escape quando comparado aos veículos a combustão.

Segundo Delgado (2017), os veículos mais antigos utilizam baterias de ácido de chumbo (NiMH) enquanto os mais novos, de íons de lítio (li-íon). Assim, a fim de se estudar seus impactos, foi realizado um estudo do ciclo de vida de baterias de carros elétricos, importante componente para o seu funcionamento e, segundo Delgado (2017), responsável por 1/3 do valor dos veículos elétricos, cujas vantagens são a maior liberdade de abastecimento, estar incluído no grupo de veículos denominados como zero emissões, uma vez que não emitem poluentes durante o seu uso, além de seus motores terem a capacidade de trabalhar com uma eficiência de conversão de energia elétrica em potência de 80%, bem acima dos motores a combustão, cuja eficiência está entre 12 e 18%. Para tal, será utilizada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

A fim de se minimizar o uso de recursos e a quantidade de resíduos gerados, segundo Barbieri, Cajazeira e Branchini (2009), é necessário conhecer quais são os impactos de cada etapa da cadeia estendida. Neste sentido, a ACV é um método para mensurar, analisar e atribuir as matérias-primas, diferentes tipos de emissões e a energia consumida de um determinado produto específico, do ponto de vista ambiental, ao longo de todo o seu ciclo de vida. A ACV está estruturada em quatro pilares: Definição de objetivos e escopo, Análise de inventário, Avaliação de impactos e Interpretação dos resultados. De acordo com o objetivo e escopo estabelecidos, a ACV, segundo a Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009a) avalia sistematicamente os aspectos e impactos ambientais de sistema de produto, ao longo do ciclo de vida do produto em estudo. Tal ferramenta, porém, será melhor abordada nas próximas seções.

Para o estudo cujo tema é avaliação do ciclo de vida das baterias de carros elétricos, será utilizada a ACV para responder à pergunta: quais os impactos ambientais causados pelas baterias automotivas de íon-lítio NMC (óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto) ao longo do seu ciclo de vida, desde a extração da matéria-prima até sua destinação final, passando por sua produção, distribuição e uso? Assim, este artigo tem o objetivo de identificar e caracterizar as etapas do ciclo de vida das baterias utilizadas nos carros elétricos, mapeando os aspectos e impactos ambientais inerentes a cada etapa, através da realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do produto. Para isso, primeiro será feita uma revisão bibliográfica. Após isso, a metodologia será apresentada. Após, serão levantadas as etapas da cadeia de suprimentos estendida das baterias, e será realizado o estudo de Avaliação do Ciclo de Vida. Por fim, são feitas as devidas considerações finais.

## **2. Revisão de literatura.**

---

A presente revisão bibliográfica está dividida em quatro subseções. A primeira trata das questões ambientais e o tratado de Paris. Conhecendo melhor a problemática ambiental, segue-se com a definição do conceito de cadeia de suprimentos verde ou estendida, onde o conceito de ciclo de vida do produto é apresentado. Logo a seguir é apresentada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Depois é feita uma breve introdução sobre os carros elétricos e suas baterias.

### **2.1 Meio ambiente e acordo de Paris.**

---

A preocupação com as condições do meio ambiente não é algo novo, contudo, de acordo com Barbieri (2016), o tema entrou de forma definitiva na agenda de vários segmentos da sociedade civil e de governos de muitos países nas últimas três décadas do século XX. Os problemas ambientais, por mais diversos que sejam, derivam do uso dos recursos extraídos do meio ambiente para a produção de bens e serviços e dos resíduos, como materiais e energia, não aproveitados, gerados e descartados no ambiente. As novas técnicas de produção intensas em energia e materiais, introduzidas na era indústria para suprir a demanda de grandes mercados, intensificou a escala de exploração dos recursos e os despejos de resíduos. A forma como é realizada a produção e o consumo exige quantidades vultosas de recursos, gerando resíduos na mesma intensidade, o que ameaça a capacidade de suporte do planeta. Como sinais de que a Terra já está no limite de sua capacidade, estão os problemas ambientais

advindos das atividades humanas, muitos em dimensão global, como a redução da camada de ozônio, contaminação das águas, perda da biodiversidade, mudanças climáticas, entre outros.

A composição da atmosfera vem sendo alterada em ritmo acelerado pela atividade humana. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera foi de 390,5 PPM (partículas por milhão) em 2011, ante concentração de 276,7 PPM em 1775, período anterior à revolução industrial. O CO<sub>2</sub>, Metano e óxido nitroso, dentre outros, têm como característica reter calor, tornando a temperatura global mais elevada, o que pode acarretar sérios efeitos sobre a população humana, os ecossistemas e a atividade econômica mundial.

De acordo com Vital (2018), o acordo de Paris, tratado assinado em 2015, na 21ª Conferência das partes Signatárias da UNFCCC, conduz a medidas de diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> a partir de 2020. De acordo com a ONU (2015), o acordo tem como objetivos, entre outros, a promoção de fluxos financeiros estáveis, com um desenvolvimento resiliente ao clima e com direção a baixas emissões de GEE. O acordo, apesar do objetivo de se limitar o aumento da temperatura global abaixo dos 2° C em relação aos níveis pré-industriais, enfatiza que uma ambição reforçada antes de 2020 pode introduzir uma maior ambição após 2020. A fim de se alcançar os objetivos do Acordo de Paris, cada país, de acordo com Vital (2018), apresentou documentos nacionais de contribuição denominados NDCs, com metas de redução de emissões até 2030. Tais metas de contribuição de redução de emissões de GEE foram apresentadas por cada nação, com base no cenário social e econômico local, além do que cada governo considerou viável. As NDCs então foram registradas e, quinquenalmente, serão revisadas.

## **2.2 Cadeia de suprimentos estendida ou verde.**

---

Para uma avaliação mais consistente dos impactos ambientais, tem-se a visão de cadeia de suprimentos verde, em que se insere o ciclo de vida do produto. Barbieri, Cajazeira e Branchini (2009) conceituam que, um modelo de gestão da cadeia de suprimentos baseado no conceito de ciclo de vida tem como foco o cuidado com o ambiente. Tal cadeia pode ser denominada como cadeia de suprimentos verde ou sustentável. Com a inclusão das preocupações ambientais de maneira sistêmica no SCM, segundo Barbieri (2014), tem-se a denominada Gestão da Cadeia de Suprimento Ambiental ou Gestão verde da Cadeia de suprimentos (*Green Supply Chain Management – GSCM*).

De acordo com FIESP e PNUMA (2015) apud SEBRAE e ONU (2017), o ciclo de vida de um produto representa quaisquer etapas essenciais para que ele exista, passando pela extração e beneficiamento dos recursos naturais, processos produtivos, sua distribuição e utilização, até sua disposição final, lembrando da possível incorporação dos resíduos gerados em um novo ciclo de produção. É necessário conhecer os impactos ambientais de cada uma das etapas da cadeia produtiva, a fim de se reduzir o uso de recursos naturais e lançamentos de dejetos. Como os problemas ambientais não podem ser resolvidos de forma satisfatória unilateralmente por um elo isolado da cadeia, pois eles são transferidos de elo para elo, a visualização do ciclo de vida permite agir de forma eficaz não somente nos impactos ambientais de produtos e serviços, como também na sua concepção e implementação de inovações com o objetivo de mitigar os rejeitos antes de gerados, facilitando, desta forma, a recuperação pós-consumo de materiais. Dentre os instrumentos disponíveis de gestão ambiental com base no ciclo de vida do produto, está a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), revisada a seguir, que possibilita ter conhecimento acerca dos fatos e quantificar os impactos ambientais ao longo da respectiva cadeia do produto ou serviço (BARBIERI; CAJAZEIRA; BRANCHINI, 2009).

## **2.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).**

---

A fim de possibilitar as empresas avaliarem os impactos ambientais frutos de seus processos e produtos, foi desenvolvida a ferramenta de ACV. Esta avalia os sistemas de produção com a abordagem do berço ao túmulo, descrita no tópico anterior, em que a avaliação começa com a extração dos recursos naturais e termina quando os resíduos e materiais resultantes têm sua disposição final.

A ABNT dispõe de duas normas sobre a ferramenta ACV. A International Organization for Standardization (ISO) 14040 trata dos princípios e estrutura da ACV enquanto a ISO 14044 dispõe sobre os requisitos e diretrizes. As duas são melhor detalhadas abaixo.

De acordo com a Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009a), a ACV tem como foco aspectos ambientais e impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto ou serviço, isto é, desde a extração das matérias-primas, fabricação, uso, tratamento após o uso, reciclagem, até a sua disposição final, ou seja, do berço ao túmulo. Um estudo de ACV é composto por quatro etapas, descritas a seguir.

- 1) Definição de objetivo e escopo: O escopo contém a fronteira do sistema e o nível de detalhamento e depende do objeto e do uso do estudo. Já conforme o objetivo, variam tanto a profundidade como a abrangência da ACV;
- 2) Análise de inventário do ciclo de vida (ICV): Envolve a coleta dos dados. Trata-se de um inventário dos dados de entrada e saída do sistema alvo do estudo;
- 3) Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV): tem como objetivo prover informações complementares para auxiliar na avaliação dos resultados, buscando bom entendimento da sua significância ambiental;
- 4) Interpretação: Fase final, na qual os resultados são sumarizados e discutidos para retirar conclusões, recomendações e tomar decisões, com base nos objetivos e escopo definidos.

SEBRAE e ONU (2017) afirmam que, através da ACV, uma companhia consegue quantificar os poluentes que emite, bem como quaisquer recursos que consuma em cada etapa do ciclo de vida dos seus produtos, serviços ou processos.

## **2.4 Carros elétricos.**

---

O foco deste artigo são os veículos elétricos e suas baterias. Para Rocco (2010), os veículos elétricos são os que têm, como fonte de energia, um banco de baterias, através da conexão de um conversor eletrônico e um motor elétrico. Por questões mercadológicas, os carros movidos a combustão interna (combustíveis fósseis), tornaram-se os modelos mais comercializados em todo o mundo, dominando o mercado até a década de 1970. Após a primeira grande crise do petróleo, o interesse por tecnologias alternativas aos combustíveis fósseis, dentre eles os biocombustíveis e os carros elétricos, ressurgiu. Vonbun (2015) diz que os veículos elétricos podem ser divididos entre os elétricos puros, que têm energia armazenada em baterias – sendo oriunda da rede de abastecimento de eletricidade – e os híbridos, que possuem tanto motores elétricos como de combustão interna. De acordo com Delgado (2017), a maioria dos veículos elétricos dispõe de baterias químicas para o armazenamento da eletricidade que necessita para o acionamento do motor e movimento do veículo. Enquanto os mais antigos utilizavam baterias de ácido de chumbo (NiMH), os veículos elétricos mais modernos dispõem de baterias de íons de lítio (li-ion).

Segundo Delgado (2017), os veículos elétricos estão incluídos no grupo de veículos denominados “zero emissões”, pois praticamente não emitem poluentes (atmosféricos e sonoros) durante seu uso. A capacidade de seus motores de trabalhar, ou eficiência de seus motores, tem possibilidade de alcançar os 80% de conversão da energia elétrica da rede em potência, muito mais eficientes do que os motores à combustão interna, cuja eficiência situa-se entre 12% e 18%. Além disso, sua maior utilização reduz a dependência dos combustíveis fósseis, principalmente do petróleo.

### **2.4.1 Baterias.**

---

De acordo com Rodriguez e Consoni (2020), as baterias ocupam papel central nos veículos elétricos, sendo o elemento de maior importância e representando o principal custo na sua cadeia de valor. Segundo Ehsani (2004), baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia potencial química durante o carregamento, e energia química em energia elétrica durante o descarregamento. Uma bateria é composta por várias células empilhadas juntas. Cada célula é formada por uma unidade independente e completa que possui todas as propriedades eletroquímicas, consistindo em três elementos primários: dois eletrodos (positivo ou cátodo e negativo ou ânodo) imersos em um eletrólito. Rocco (2010) complementa, dizendo que os eletrólitos promovem o transporte de íons entre os eletrodos. Ao se conectar externamente os eletrodos, as reações químicas de

oxidação e redução, respectivamente, no ânodo e no cátodo, resultam na geração de um fluxo de elétrons e corrente a ser utilizada.

Segundo Delgado (2017), as baterias, que compõem os veículos elétricos, são recarregadas conectando uma fonte externa de eletricidade ao veículo. A depender do tipo de veículo, baterias distintas podem ser consideradas, como as de Íons de lítio, utilizadas em modelos elétricos puros e híbridos, sendo, graças a seu melhor desempenho e custo reduzido, as mais adotadas pelos fabricantes de veículos elétricos.

Segundo Romare e Dahllöf (2017), uma bateria de íon-lítio pode ser produzida a partir de diversas combinações diferentes de cátodo e ânodo à base de lítio. Para veículos, certas demandas são colocadas na química da bateria com relação à potência e energia por kg. Por esse motivo, alguns materiais são mais comuns em veículos, como misturar óxidos de cobalto, níquel e manganês junto com o lítio como cátodo, sendo também possível usar um fosfato de ferro. Para o ânodo, há menos opções, sendo o mais comum utilizar um ânodo de grafite. Além da célula, o material que embala a célula é comumente feito de aço ou alumínio e representa uma fração considerável no peso da bateria, em torno de 30%. O peso da bateria aproximado no restante é o seguinte: o material ativo no cátodo representa cerca de 20% e no ânodo 10%, o separador entre 1% e 3%, o substrato de alumínio no cátodo entre 2% e 3%, o substrato de cobre no ânodo entre 8% e 13%, o eletrólito entre 9% e 12%, o sistema de gerenciamento da bateria 3% e o resfriamento 4%

Romare e Dahllöf (2017) revelaram que, dentre os dez principais veículos elétricos de 2016, a bateria de lítio mais comum é a de óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto, ou NMC. Zubi et. al. (2018) dizem que as baterias NMC são compostas de cátodo  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  e ânodo de grafite. Sua densidade energética varia de 140 a 200 Wh (Watt hora) /kg com um ciclo de vida de 1000 a 2000 recargas.

### **3. Metodologia.**

---

Na área de Engenharia de Produção, segundo Miguel (2007), as pesquisas mais comuns são: Desenvolvimento teórico-conceitual; Modelamento e Simulação; Pesquisa ação; Levantamentos tipo survey; Estudo de caso; Pesquisa bibliográfica/revisão da literatura e Pesquisas experimentais. Como o presente estudo visa realizar um estudo de caso com dados secundários, detalha-se mais este método de pesquisa. O Estudo de caso consiste em estudo de natureza empírica, investigando um determinado fenômeno contemporâneo, em geral, em um contexto real, onde as fronteiras entre o fenômeno e o contexto na qual o fenômeno se insere não são definidos claramente (Miguel, 2007). Neste artigo, realizou-se um estudo de caso, a fim de se estudar a cadeia de suprimentos estendida das baterias dos carros elétricos, levantar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo do produto e realizar uma Avaliação do Ciclo de vida. Através da coleta de dados qualitativos (tipos de impactos) e quantitativos (dimensão dos impactos) de forma secundária, serão levantados tanto os inputs produtivos (materiais, água e energia) do objeto de estudo como seus outputs (resíduos gerados) ao longo das fases de seu ciclo de vida (extração das matérias-primas, fabricação, distribuição, uso e pós-uso). Os dados foram levantados através de pesquisa bibliográfica em artigos, publicações, estudos científicos e acadêmicos nacionais e internacionais. Após o levantamento dos dados sobre os inputs e de outputs de poluições diversas ao longo das fases do ciclo de vida, foram realizados os devidos cálculos dos inputs e outputs de poluições e tratamentos ao longo do ciclo de vida das baterias, a fim de deixá-los numa mesma base, por tipos de dados, a fim de se construir a ACV.

A figura 1 representa as etapas desta pesquisa:

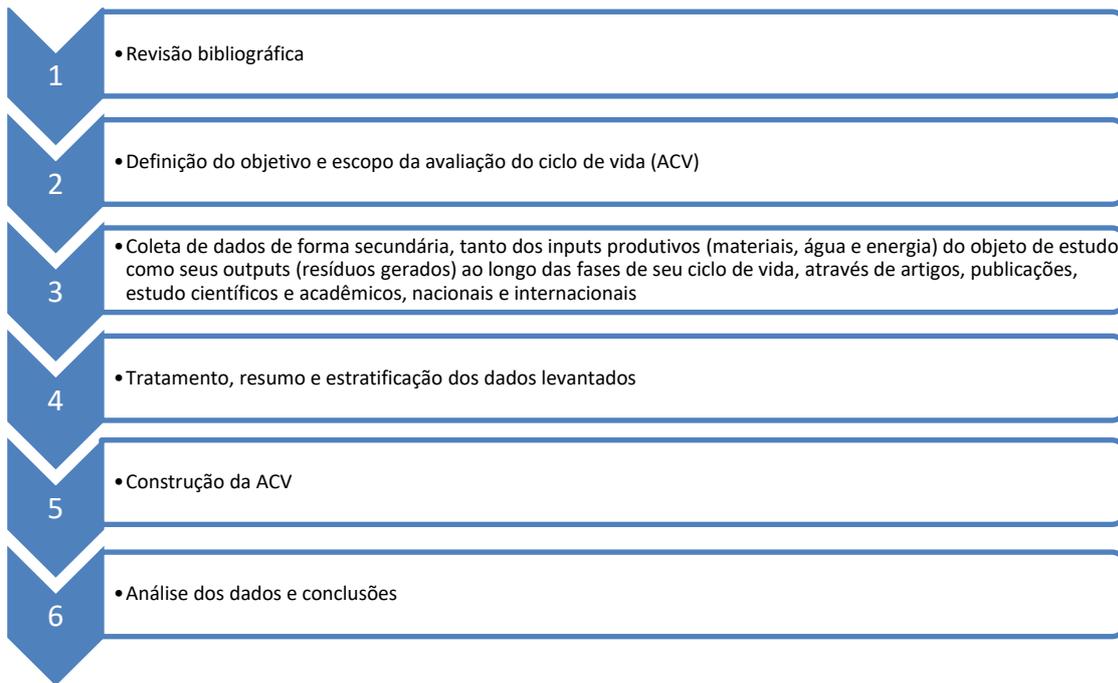


Figura 1 – Metodologia seguida no estudo de caso.

Fonte: Elaborado pelos autores.

#### **4. Desenvolvimento - aplicação das etapas 1 e 2 da ACV das baterias de carros elétricos referentes à Definição de objetivos e escopo e à Análise de inventário do ciclo de vida (ICV).**

É apresentada a seguir a aplicação da ACV em suas quatro etapas no caso das baterias de veículos elétricos. Primeiro foram definidos o objetivo e escopo do estudo. Logo em seguida, foi realizado o inventário do ciclo de vida. Na seção 5 de Resultados, serão completadas as etapas da ACV com a avaliação do ciclo de vida e interpretações acerca dos resultados obtidos.

##### **4.1. Objetivo e Escopo da ACV.**

O objetivo do estudo é identificar e caracterizar as etapas do ciclo de vida das baterias utilizadas nos carros elétricos, seu uso e destinação final, mapeando os aspectos e impactos ambientais inerentes a cada etapa. A aplicação do estudo é apenas acadêmica e se destina para todos que queiram entender como funciona a ferramenta, entender um pouco melhor sobre as etapas do ciclo de vidas das baterias de íon lítio utilizadas nos carros elétricos e seus impactos em cada etapa de seu ciclo de vida, não se pretendendo, num primeiro momento, realizar comparações com outras baterias ou tecnologias automotivas.

Sobre o Escopo da ACV, como a bateria de íon lítio mais utilizada atualmente é a NMC, ela será o foco do presente estudo. A mesma tem como composição do cátodo  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  e grafite como ânodo. A fim de se definir o ciclo de vida da bateria (ou quantidade de recargas), optou por considerar a média de recargas possível da bateria, que é de 1.500 recargas além de uma densidade energética de 170 Wh/kg. Com relação ao peso e à capacidade da bateria, de acordo com Miljøbil Grenland (2012) Apud Ellingsen et. al. (2013), produtor de baterias NMC, uma bateria de 253 kg apresenta uma capacidade de energia de 26,6 kWh e eficiência, em uso normal, de 95 a 96%. A bateria considerada possui 12 módulos de bateria, cada um composto por 30 células de bateria, para um total de 360 células de bateria. Na tabela 1, abaixo, é possível verificar o peso atribuído a cada uma das estruturas em uma célula de bateria e na bateria como um todo.

Tabela 1 – Composição dos componentes de uma célula de bateria NMC íon lítio, em percentual e peso total da bateria, considerando 360 células e peso total de 253 kg (equivalente a 1 unidade de bateria).

<b>Componente da célula da bateria</b>	<b>Percentual do peso</b>	<b>Peso por célula (Kg)</b>	<b>Peso total (kg)</b>
Material ativo no cátodo	22%	0,15	55,66
Material ativo no ânodo	11%	0,08	27,83
Separador	2%	0,01	5,06
Substrato de alumínio (cátodo)	3%	0,02	7,59
substrato de cobre (ânodo)	11%	0,08	27,83
Eletrólito (sal de lítio)	11%	0,08	27,83
Sistema de gerenciamento da bateria	3%	0,02	7,59
Sistema de resfriamento	4%	0,03	10,12
Embalagem (alumínio)	32%	0,22	80,96

Fonte: Adaptado de Romare e Dahllof (2017).

\*Para os componentes que apresentavam um intervalo, foi considerado a média do valor. Como a soma é menor do que 100%, os valores foram extrapolados para 100%.

A definição de sistema de produto, função do produto, unidade funcional, fronteiras do sistema, procedimentos de alocações e limitações estão apresentas a seguir:

- a) Sistema produto: devido à falta de informações disponíveis sobre todos os inputs e outputs do ciclo de vida analisado e para simplificação, foi feito um recorte. Assim, o sistema do produto considerado foi: extração das matérias-primas, produção e montagem das baterias, uso, com base no consumo de energia e padrão de emissões da matriz elétrica brasileira e destinação final, com foco na reciclagem e no método hidrometalúrgica.
- b) Função do produto: a bateria escolhida para o estudo é a mais utilizada atualmente para os carros elétricos, que se utilizam de baterias para o seu funcionamento.
- c) Unidade funcional: o estudo considera a emissão de GEE, consumo de água e geração de resíduos para uma bateria de 253 kg, com a composição de cada componente descrita na tabela 1.
- d) Fronteira do sistema: devido à difícil mensuração através de estudo de fontes secundárias e a fim de simplificar o estudo, definiu-se que serão consideradas as etapas de extração de matéria-prima, produção e montagem da bateria, uso e destinação final, sem considerar as movimentações entre cada etapa, além da distribuição do produto final até o consumidor e seu retorno para destinação final, que consistem em limitações da pesquisa.
- e) Procedimentos de alocação: no estudo serão considerados três variáveis de impactos: potencial de aquecimento global (CO<sub>2</sub>e) para todas as emissões atmosféricas, consumo de água em metros cúbicos e geração de resíduos sólidos em toneladas.
- f) Limitações: o estudo não considera os impactos ambientais causados durante a etapa de distribuição, seja ela do setor de transportes ou da comercialização das baterias, bem como alguns impactos indiretos, como tratamento e disposição dos resíduos sólidos e esgoto gerado, e a limitação da etapa de destinação final considerando apenas a reciclagem. Além disso, para algumas etapas, não foram obtidos dados de consumo de água, potencial de acidificação e eutrofização. Assim, serão apresentados dados parciais desses. Além disso, para o grafite, não foram encontradas fontes secundárias de dados com informações sobre emissões de GEE/ consumo de energia, consumo de água ou emissão de resíduos sólidos na extração do minério.

## 4.2. Análise do inventário do ciclo de vida.

Durante a etapa da análise do inventário do ciclo de vida foram levantados os dados de emissão de GEE ou consumo de energia (que posteriormente foram convertidos para CO<sub>2</sub>e, com base nas emissões de GEE da matriz elétrica brasileira), consumo de água por metro cúbico e geração de resíduos sólidos. Primeiro a extração de matérias-primas e produção do alumínio. Em seguida a etapa de produção e montagem das baterias, seu uso e sua destinação final.

### 4.2.1. Etapa de Extração/produção de Matérias-primas.

Segundo a AEA (Agência Ambiental Europeia) (2018), a produção de veículos elétricos e suas respectivas baterias requerem uma grande variedade de matérias-primas. As baterias contêm substanciais quantidades de metais básicos, além de matérias-primas críticas. No caso das baterias de íon lítio, têm-se as seguintes matérias-primas: para o ânodo, grafite; para o cátodo, lítio, manganês, cobalto, níquel, alumínio; para o eletrólito, cobre; e para o sistema de revestimento e refrigeração, o alumínio. Tais materiais geram uma série de impactos ambientais, como emissão de GEE e poluentes atmosféricos de processos de mineração e refino com uso intensivo de energia, poluição do ar por processos metalúrgicos, contaminação da água e do solo e impactos nos ecossistemas do uso da terra. Primeiro são discutidos os impactos da extração do lítio e produção de carbonato de lítio. Posteriormente são discutidas a extração dos minerais Bauxita, cobre, cobalto, manganês e níquel e, por fim, a produção do alumínio.

#### a) Lítio.

Para Garret (2004), Messerli et. al. (1997) e Stern (2006) apud Wanger (2011), os locais com a maior produção de lítio no mundo estão na América do Sul, em grandes lagos salgados, onde é produzido o carbonato de lítio por evaporação. Segundo os autores, para a produção de uma tonelada de carbonato de lítio, são necessários 400m<sup>3</sup> de água salgada evaporada, 27,5m<sup>3</sup> de água doce (com base na média informada pelos autores, de 5 a 50m<sup>3</sup>), e são produzidos 115,041 kg de resíduos. Enquanto isso, Jiang et. al. (2020) realizaram um estudo de avaliação do ciclo de vida da produção de carbonato de lítio refinado, considerando a mineração, transporte e processos produtivos relacionados com a calcinação. Para a produção de 1 tonelada de carbonato de lítio, os autores chegaram aos valores mostrados na tabela 2. Nela também podem ser vistos os dados consolidados para o lítio e para a produção do carbonato de lítio.

Tabela 2 – Uso de recursos/emissões de poluentes por tonelada de carbonato de lítio.

<b>Categoria</b>	<b>Valor</b>
<b>Processos – calcinação - Jiang et. al. (2020)</b>	
Eletricidade (kwh)	3,83
Potencial de acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq/kg)	0,136
Potencial de eutrofização (kg P eq/kg)	0,0194
<b>Mineração - Flexer, Baspineiro e Galli (2018)</b>	
Consumo de água salgada (m <sup>3</sup> )	400
Consumo de água doce (m <sup>3</sup> )	27,5
Resíduos gerados (kg)	115,041

Fonte: Adaptado de Jiang, et. al. (2020) e Flexer, Baspineiro e Galli (2018).

Com base em Brasil (2018), utilizando a matriz elétrica brasileira como base para calcular a emissão de GEE por unidade de energia produzida, temos que para cada Giga Watt hora (GWh) de energia produzida, é gerada 94,0738 ton (toneladas) de CO<sub>2</sub>e (potencial de aquecimento global, ou dióxido de carbono equivalente), o que é exposto com mais detalhes em Matriz elétrica. Assim, como são consumidos 3,83kWh de eletricidade para a produção de uma tonelada de carbonato de lítio, convertendo a quantidade de CO<sub>2</sub>e gerada, temos que são produzidos 0,36 kg de CO<sub>2</sub>e/ton de carbonato de lítio produzido.

**b) Bauxita, cobre, cobalto, manganês e níquel.**

O Instituto Brasileiro de Mineração (2014) definiu como fontes típicas de emissão de GEE no II inventário de emissões de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral: a geração própria e aquisição de energia, combustão em equipamentos estacionários e em equipamentos móveis, emissões fugitivas, decorrentes do processo produtivo e provenientes de resíduos sólidos e efluentes, uso de explosivos, decapeamento e correção de solo. Tal padronização não pressupõe, porém, que todos os bens minerais apresentem emissões em todas as fontes citadas. Tais fontes de emissões de GEE estão limitadas às operações extrativas e dos processos físicos preliminares nas minas, como: Abertura de frente de lavra e decapeamento, extração propriamente dita, Beneficiamento, Movimentação de transporte interno, equipamentos e máquinas, Recuperação das áreas abertas e o encerramento de tais áreas. O Instituto Brasileiro de Mineração calculou as emissões de GEE com base em um percentual da produção nacional a qual teve acesso a dados (sendo mais de 80% do total da produção nacional) e extrapolou os mesmos para a produção total de determinado minério. Na tabela 3 abaixo é possível verificar a quantidade de CO<sub>2</sub>e gerado por tonelada de minério extraído. Vale ressaltar que, uma vez que o cobalto é produzido tipicamente como um subproduto das extrações de cobre e níquel, de acordo com o Cobalt Institute, a fim de simplificação do estudo, as emissões de GEE serão consideradas como parte das emissões totais de níquel e cobre.

Tabela 3 – Emissão de CO<sub>2</sub> em toneladas por tonelada de minério extraído.

<b>Mineral</b>	<b>tCO<sub>2</sub>e/t minério</b>
Bauxita	0,00136
Cobre	0,00048
Manganês	0,00064
Níquel	0,00281

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com Silva, Viana e Cavalcante (2012), a atividade de mineração gera grandes massas e volumes de materiais extraídos e movimentados, cuja quantidade depende da concentração do substrato mineral na rocha matriz, do processo utilizado na mineração e do local, em relação à superfície, que a jazida se encontra. Na tabela 10 é possível verificar a quantidade de minérios extraídos e a quantidade de rejeitos produzidos para a Bauxita, cobre, manganês e níquel no Brasil, no ano de 2005.

Tabela 4 – Quantidade de minério produzido e rejeitos gerados por 1.000 toneladas para bauxita, cobre, manganês e níquel, no ano de 2005.

<b>Material</b>	<b>Produção bruta - 2005 (1.000 ton.)</b>	<b>Produção de rejeitos - 2005 (1.000 ton.)</b>
Bauxita	31.194	10.887
Cobre	18.190	17.750
Manganês	6.429	2.567
Níquel	4.850	4.762

Fonte: Adaptado de Silva, Viana e Cavalcante (2012).

**c) Produção do alumínio.**

Segundo o Ministério da Ciência e Tecnologia (2010), a produção do alumínio primário passa por três etapas: mineração da bauxita, refinaria e redução. Nessas etapas, são gerados poluentes, sendo os principais: CO<sub>2</sub> - dióxido de carbono, CF<sub>4</sub> – Perfluorometano e C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> – perfluoretano. Na tabela 5, é possível verificar as quantidades de emissões por substância, no ano de 2005.

Tabela 5 – Quantidade de CO<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub> e C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> produzidas por 1.000 toneladas de alumínio primário produzido.

Poluente	Emissões (1.000 ton.) 2005	Emissões (1.000 ton CO <sub>2</sub> e)
CO <sub>2</sub>	2.472,39	2.472,39
CF <sub>4</sub>	123,90	805.350,00
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10,35	95.220,00
Total		903.042,39
Produção (1.000 ton) (2005)	1.497,76	

Fonte: Adaptado de MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (2010).

De acordo com Wang, Ang e Tadé (2008), para cada tonelada de alumina produzida, são gerados de 0,3 a 2,5 toneladas de lama vermelha, um resíduo sólido formado após a digestão caustica dos minérios de bauxita, a depender do teor do minério. Para o estudo, será adotada a média do intervalo de produção de resíduo, ou 1,4 tonelada de resíduo por tonelada de alumina produzida.

#### 4.2.2. Etapa de Produção da Bateria.

Segundo Ellingsen *et al.* (2013), os componentes de uma bateria NMC podem ser agrupados em quatro subsistemas: célula de bateria, embalagem, sistema de gerenciamento e sistema de refrigeração, sendo as células constituídas de cinco subcomponentes: ânodo, cátodo, separador, eletrólito e recipiente da célula.

De acordo com Romare e Dahllöf (2017), como as baterias de íon-lítio para veículos estão aumentando em quantidade, torna-se cada vez mais importante saber o impacto ambiental de sua produção. Segundo o estudo de Amarakoon *et al.* (2013) apud Romare e Dahllöf (2017), a produção de uma bateria elétrica requer 1.960 MJ / kWh de sua capacidade, ou, convertendo joules por kWh, o consumo de 544,44kWh/kWh de capacidade da bateria. Já com relação às emissões de CO<sub>2</sub>, a partir de diversos estudos analisados, os autores estimam que as emissões se situam entre 150 e 200 Kg de CO<sub>2</sub>e/kWh. Para este estudo, optou por utilizar a média desse intervalo mais provável indicado pelos autores, ou 175 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente / kWh. Após a produção, a montagem, segundo Miljøbil Grenland (2012) apud Ellingsen *et al.* (2013) requer o uso de 0,014 MJ de energia /kWh de capacidade da bateria.

#### 4.2.3. Etapa de Uso da Bateria.

Após a etapa de produção das baterias, é discutida a etapa de uso das baterias. Para o ciclo de vida útil determinado para o estudo, de 1.500 ciclos, e uma bateria com capacidade de 26,6 kWh, o consumo total de energia esperado para a bateria escolhida durante sua vida útil é de 0,0399 GWh.

De acordo com Brasil (2018), a matriz elétrica brasileira é composta por 80,4% de fontes de energia renovável, contra 24,9% no mundo, 26,1% dos países integrantes da organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e 21,3% de outros países. Além disso, comparando a matriz elétrica brasileira e a do mundo, é possível notar que o Brasil tem uma grande diferença em relação à energia hidrelétrica, com 65,2% de participação na matriz contra 12,9 na OCDE, 16,5% nos demais países do mundo e 16,1% na matriz mundial. Na tabela 6 abaixo, é possível observar e comparar, com maiores detalhes, a participação em percentuais por fonte da matriz elétrica brasileira, mundial, dos países que compõem a OCDE e os demais países.

Tabela 6 – Participação (%) por fonte de energia na matriz elétrica brasileira, dos países que compõem a OCDE, os demais países do mundo e matriz mundial em 2017.

<b>Fonte</b>	<b>Brasil</b>	<b>OCDE</b>	<b>Outros</b>	<b>Mundo</b>
Petróleo e Derivados	2,00%	1,60%	5,60%	3,80%
Gás natural	10,50%	29,00%	21,50%	24,50%
Carvão Mineral	2,60%	25,00%	46,50%	36,00%
Urânio	2,50%	17,90%	5,00%	10,60%
Hidroelétrica	65,20%	12,90%	16,50%	16,10%
Outras não renováveis	2,00%	0,40%	0,10%	0,20%
Outras Renováveis:	15,10%	13,20%	4,80%	8,80%
Biomassa	8,20%	3,00%	0,90%	2,00%
Eólica	6,80%	7,50%	2,80%	4,90%
Solar	0,13%	2,40%	0,90%	1,50%
Geotérmica	0,00%	0,40%	0,20%	0,30%
Total (%)	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
dos quais renováveis	80,40%	26,10%	21,30%	24,90%

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

Vale ressaltar que, embora seja uma fonte renovável de energia elétrica e a maior representante da matriz elétrica brasileira, para Fearnside (2014), a construção das barragens das hidrelétricas traz uma série de impactos socioambientais, tais como impactos nos povos indígenas a depender da região onde são construídas, reassentamento de moradores locais, perda de vegetação, não somente devida a área inundada de forma direta, como de forma indireta, através do desmatamento por moradores reassentados, imigrantes atraídos para a região e atividades agropecuárias. Além disso, as barragens emitem gases causadores do efeito estufa, como CO<sub>2</sub> pela decomposição de matéria orgânica, entre muitos outros.

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (2020), Monitor elétrico, o setor energético, especificamente o setor elétrico, cuja produção considerada foi de 546,78TWh, emitiu 51,44 Mt (mega toneladas) CO<sub>2</sub>e ou 94,07 tCO<sub>2</sub>e/GWh produzido. Na tabela 7, é possível verificar a emissão de GEE total por tipo de gás e por GWh produzido. Nela é possível notar que a maior contribuição das emissões advém das emissões de CO<sub>2</sub>, que representam 99% do total de emissões, ou o CO<sub>2</sub>e.

Tabela 7 – Emissões totais de GEE em toneladas e emissão em toneladas/GWh de energia por tipo de gás com base na matriz elétrica brasileira de 2017.

<b>Fonte</b>	<b>Emissão total (tonelada)</b>	<b>Emissão (toneladas)/GWh</b>
CO <sub>2</sub>	51.062.109	93,3882
CO	164.097	0,3001
CH <sub>4</sub>	4.309	0,0079
NO <sub>x</sub>	265.095	0,4848
N <sub>2</sub> O	917	0,0017
COVNM	5.178	0,0095
CO <sub>2</sub> e	51.436.945	94,0738

Fonte: Adaptado de Brasil (2018).

Vale ressaltar, porém, que o dado apenas diz sobre a geração da eletricidade e não etapas posteriores, ou mesmo o ciclo de vida do tipo de energia, que poderia considerar emissões anteriores à geração, como a construção de uma usina hidrelétrica ou a construção de uma turbina eólica.

#### 4.2.4. Etapa de Disposição final.

---

De acordo com Chen et. al. (2019), Huang et. al. (2019), Harper et. al.(2019), é esperado que as baterias de íon lítio utilizadas nos veículos elétricos funcionem por cerca de 8 a 10 anos, tendo que ser substituídas quando atingirem um índice de perda de capacidade de 20%. Baterias aposentadas ainda permanecem com 70 a 80% da capacidade inicial e apresentam potencial para serem utilizadas em aplicações menos estressantes e seu tratamento de fim de vida deve ser efetuado com cuidado, pois a utilização efetiva das baterias aposentadas pode estender sua vida útil, conservando recursos e protegendo o meio ambiente. As abordagens tradicionais podem ser divididas em descarte, reciclagem e reutilização.

Neste artigo, será avaliado o processo de Reciclagem. Para Georgi-Maschler *et al.* (2012), o crescente e generalizado uso de baterias de íon-lítio leva a um acréscimo da geração de sucata de bateria, tanto em sua produção como no final de sua vida útil, que, de acordo com a sustentabilidade econômica e ambiental, deve ser reciclada, permitindo o retorno dos componentes reciclados para o início do ciclo e produção de novas baterias. As baterias de íon-lítio têm em sua composição grandes quantidades de metais valiosos, como alumínio, ferro, cobre, lítio, cobalto, níquel e manganês. De acordo com o *International Congress for Battery Recycling* (2006) apud Georgi-Maschler *et. al.* (2012), ao menos um terço dos custos de se produzir uma célula de bateria de íon-lítio está relacionado aos seus materiais, uma vez elas contêm grandes quantidades de metais valiosos, presentes tanto na forma metálica como na forma de compostos metálicos inorgânicos. Os dados de inputs e outputs considerados para este estudo foram retirados de Fisher et. al. (2016), que utilizou dados secundários, obtidos na Recupyl (França), uma empresa de processos de desenvolvimento, que não recicla comercialmente, e representam atividades de reciclagem durante 2004, utilizando o processo de Hidrometalúrgica, que pode ser visto na tabela 8 abaixo. No total, é gerado 888 kg de resíduo para cada 1.000 kg de bateria reciclada, sendo 337 kg de esgoto e 541 kg de resíduos para o aterro.

Tabela 8 – Consumo de eletricidade e água consumidos para a Reciclagem de 1.000 Kg de baterias de íon lítio pelo método de hidrometalúrgica e geração de outputs: SO<sub>2</sub>, VOCs, esgoto e resíduos.

<b>Fatores</b>	<b>Quantidade</b>
Consumo de eletricidade (kWh)	140
Consumo de água (m <sup>3</sup> )	0,72
Dióxido de enxofre - SO <sub>2</sub> (kg)	0,0045
Composto orgânico volátil - VOC (KG)	0,0025
Esgoto (Kg)	337
Resíduo para aterro (kg)	202
Gesso para aterro (kg)	339

Fonte: Adaptado de Fisher et. al. (2016).

## 5. Resultados - aplicação das etapas 3 e 4 da ACV das baterias de carros elétricos referentes à Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) e Interpretação

---

A seguir, serão apresentadas as etapas da ACV relativas à Avaliação de impactos e à Interpretação, consolidando os resultados principais da ferramenta.

### 5.1 Avaliação de impactos do ciclo de vida.

---

Após a coleta dos dados e análise de inventário para cada etapa do ciclo de vida da bateria considerada (extração das matérias-primas e processo de fabricação do alumínio), produção da bateria, uso e destinação final, é apresentado a avaliação do ciclo de vida, adotando como padrão GWh como

unidade energética e, assim, convertendo todos os dados de consumo de energia para esta unidade, a fim de se considerar as emissões de CO<sub>2</sub>e com base na composição da matriz elétrica brasileira. Após isso, os dados obtidos foram agrupados e somados para se chegar à avaliação do ciclo de vida de uma bateria NMC utilizada em veículos elétricos, mostrado na tabela 9, tendo-se como base a bateria de estudo. Assim, tanto os inputs (consumo de energia, água doce e água salgada) como os outputs (potencial de aquecimento global, geração de resíduos sólidos, potenciais de acidificação e eutrofização e geração de esgoto) considerados foram transformados com base na proporção e peso mostrados na tabela 1. Vale ressaltar que as linhas com NA (não se aplica) significam que o input ou output não se aplicam à etapa do ciclo de vida ou são fatores limitantes do estudo, conforme descrito no escopo. Ao realizar uma análise na tabela, é possível notar que boa parte do potencial de aquecimento global encontrado está relacionada à atividade de extração das matérias-primas, além de mais da metade de todo o resíduo gerado.

Tabela 9 – Consolidação dos inputs e outputs considerados na avaliação do ciclo de vida da bateria em estudo, com base no peso total de uma unidade da bateria (253 kg).

Etapa	Energia (GWh)	Água doce (m3)	Água salgada (m3)	CO <sub>2</sub> e (ton)	Resíduos sólidos (ton)	Potencial de acidificação (ton)	Potencial de eutrofização (ton)	Esgoto (ton)
Extração	NA	11,10	0,765	80,0000	0,229	0,00378	0,00054	NA
Produção	0,0145000	NA	NA	1,36	NA	NA	NA	NA
Uso	0,0399000	NA	NA	3,75	NA	NA	NA	NA
Reciclagem	0,0000354	0,182	NA	0,00333	0,222	0,00114	NA	0,0853
Total	0,0544000	11,30	0,765	85,1000	0,451	0,00492	0,00054	0,0853

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na figura 2, é possível ver os mesmos dados, divididos por etapa do ciclo de vida (centro da imagem), inputs (esquerda) e outputs (direita).

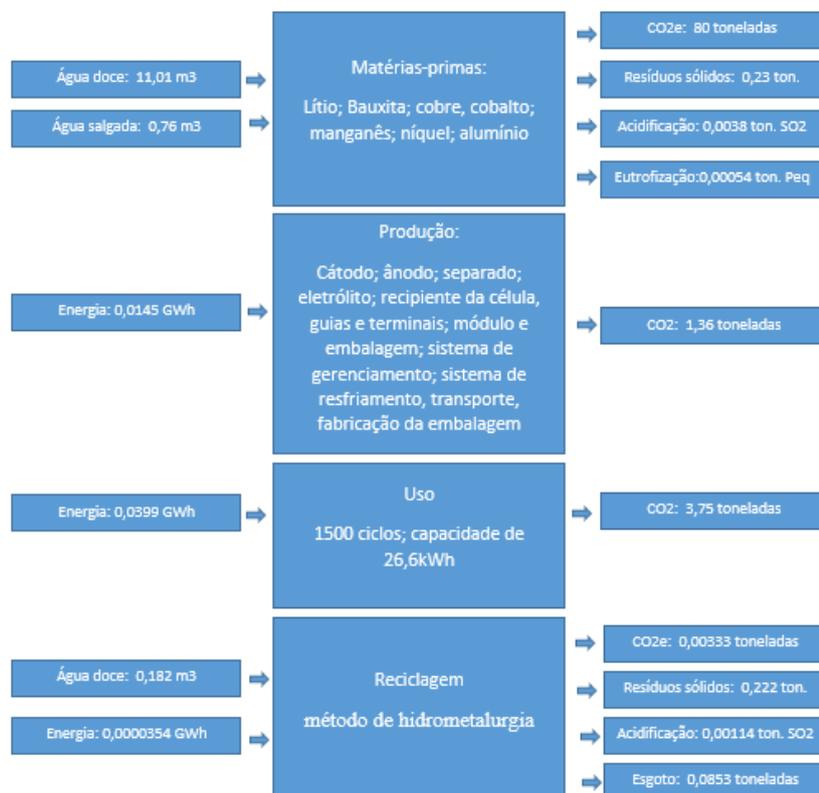


Figura 2 – Inputs e outputs considerados na avaliação do ciclo de vida da bateria em estudo com base no peso total de uma unidade da bateria (253kg).

Fonte: Elaborado pelos autores.

## **5.2 Interpretação do ciclo de vida.**

---

A partir da avaliação do ciclo de vida, cujos resultados estão consolidados na tabela 9, chegou-se aos seguintes resultados de inputs para uma unidade da bateria em estudo: consumo de energia de 0,0544GWh, considerando que, na etapa de extração, todo o consumo de energia já foi considerado pela fonte dos dados como emissão de GEE e consumos de 11,3 m<sup>3</sup> de água doce e 0,77m<sup>3</sup> de água salgada. Já com relação aos outputs, chegou-se ao seguinte resultado: emissão de 85,01 ton CO<sub>2</sub>e; geração de 0,451 ton de resíduos sólidos; potencial de acidificação de 0,00492 ton de SO<sub>2</sub>e; Potencial de eutrofização de 0,00054 ton de Pe e produção de 0,0853 ton de esgoto. Analisando os dados da tabela 9, é possível concluir que a etapa de extração apresenta o maior impacto nas categorias potencial de aquecimento global, geração de resíduos sólidos, potencial de acidificação e potencial de eutrofização. A etapa de uso é a que apresenta o maior consumo de energia, lembrando das limitações do estudo.

Ao analisar a etapa de reciclagem, vê-se que ela apresenta o maior consumo de água doce, tem a segunda maior geração de resíduos sólidos e é a única que apresenta geração de resíduos líquidos (esgoto) mapeados pelo estudo.

## **6. Conclusões.**

---

Após a definição do objetivo e escopo da ACV, foi realizada a análise do inventário do ciclo de vida. Durante a etapa da análise do inventário do ciclo de vida, foram levantados os dados de emissão de GEE ou consumo de energia (que posteriormente foram convertidos para CO<sub>2</sub>e, com base nas emissões de GEE da matriz elétrica brasileira), consumo de água por metro cúbico e geração de resíduos sólidos e líquidos quando possível. Primeiro a extração de matérias-primas e produção do alumínio. Em seguida a etapa de produção e montagem das baterias, seu uso e sua destinação final. Após a coleta dos dados e análise de inventário para cada etapa do ciclo de vida presente no escopo definido, os dados obtidos foram agrupados por etapa e somados para se chegar à avaliação do ciclo de vida de uma bateria NMC utilizada em veículos elétricos.

Com base na realização da ACV, é possível concluir que, embora boa parte da energia consumida no decorrer de seu ciclo de vida ocorra na etapa de uso, apenas 4,41% da emissão de CO<sub>2</sub>e ocorre nesta etapa. Assim, embora os veículos elétricos sejam vistos como uma alternativa sustentável, por não emitir CO<sub>2</sub>e diretamente durante seu uso, a ACV mostra a importância do estudo de todos os impactos ambientais ao longo de todo o seu ciclo de vida, uma vez que, além da emissão de CO<sub>2</sub>e indireta pela produção da eletricidade, há impactos significativos no decorrer de todo o seu ciclo de vida, com a etapa de extração das matérias-primas concentrando 94% de todas as emissões de GEE, ou 80 ton. de CO<sub>2</sub>e. Além disso, as etapas de extração de matérias-primas e reciclagem consomem 11,3 m<sup>3</sup> de água doce, 0,77m<sup>3</sup> de água salgada, geram 0,451 toneladas de resíduos sólidos e 0,0853 ton. de esgoto.

Os dados levantados no estudo não permitem concluir que os veículos elétricos são de fato uma alternativa para a redução da emissão de GEE. Para tal, são necessários estudos adicionais considerando os aspectos não contidos no escopo, bem como baterias com tecnologias e composições diferentes. Além disso, são necessários estudos comparativos do ciclo de vida de veículos elétricos, a combustão e demais tecnologias disponíveis presentes nos veículos automotores.

Como limitações do estudo, podem ser identificados o uso de dados secundários, a não consideração das movimentações entre cada etapa, distribuição do produto final até o consumidor e seu retorno para destinação final, bem como alguns impactos indiretos, como tratamento e disposição dos resíduos sólidos e esgoto gerado, e a limitação da etapa de destinação final apenas a reciclagem. Para algumas etapas contidas no escopo não foram obtidos dados de consumo de água, potencial de acidificação e eutrofização. Desta forma, foram apresentados dados parciais desses. Para o grafite, não foram encontradas fontes secundárias de dados com informações sobre emissões de GEE/ consumo de energia, consumo de água ou emissão de resíduos sólidos na extração do minério. Além disso, embora não seja foco do trabalho, um estudo mais aprofundado é indicado para pesquisas futuras sobre a ligação do Ecodesign com o ciclo de vida das baterias e a ACV, uma vez que está intimamente relacionado com a concepção, desenho e projeto das baterias.

## Referências.

---

ALMEIDA, I. M.; TELES, G. M. G.; TAVARES, T. DE B. G.; MUNIZ JUNIOR, J. Cadeia de suprimentos sustentável, economia circular, indústria 4.0 e gestão do conhecimento: uma visão integrada de funcionamento. Revista Exacta, maio de 2022. <https://doi.org/10.5585/exactaep.2022.21293>

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro. 2009a.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro. 2009b.

BARBIERI, J.C; CAJAZEIRA, J. E. R; BRANCHINI, O. Cadeia de suprimento e avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação. O Papel, v. 70, n. 9, p. 52-72 – setembro, 2009.

BARBIERI, J. C. Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. 4ª edição. São Paulo: Saraiva, 2016, 312p.

BARBIERI, J. C.; SOUZA FILHO, J. M. DE; BRANDÃO, C. N.; SERIO, L. C. D.; REYES JUNIOR, E. Gestão Verde da Cadeia de Suprimentos: análise da produção acadêmica brasileira. Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v. 14, n. 3, p. 1104-1128, jul./set, 2014.

BLOOMBERGNEF; EATON; STATKRAFT. Sector Coupling in Europe: Powering Decarbonization: potential and policy Implications of Electrifying the Economy. 2020. Disponível em: <<https://www.eaton.com/content/dam/eaton/company/news-insights/energy-transition/documents/bnef-sector-coupling-report-feb-2020.pdf>> Acesso em 07/03/2020.

BORNIA, A. C.; LORANDI, J.A. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (SCM). Uma estrutura conceitual. Conceptual Framework Of Supply Chain Management (SCM). Rev. FAE, Curitiba/PR, v. 14, n. 1, p. 92-109, 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. Departamento de Informações e Estudos Energéticos. Resenha Energética Brasileira: ano base 2017. Brasília, 2018.

CHEN, M.; MA, X.; CHEN, B.; ARSENAULT, R.; KARLSON, P.; SIMON, N.; WANG, Y. Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. Joule 3, p.2622-2646, 2019a.

COBALT INSTITUTE, 2020. Disponível em <<https://www.cobaltinstitute.org/production-and-supply.html>> Acesso em 25 de Outubro de 2020.

CSCMP (Council of Supply Chain Management Professionals) CSCMP Supply Chain Management Definitions. Disponível em: <[https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921)>, acesso em: 06/10/2022.

DELGADO, F. et al. Carros elétricos. Cadernos FGV energia. Rio de Janeiro, Ano 4, n°7, 2017.

EHSANI, M.; GAO, Y.; GAY, S. E.; EMADI, A. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. CRC Press LLC, 2004.

ELLINGSEN, L. A.W., SINGH, G. M. B. B, SRIVASTAVA, A. K, VALOEN, L. O; STROMMAN, A. H. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack. *Journal of Industrial Ecology*, v. 18, n. 1, 2013.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA) – Agência Ambiental Européia (AEA). Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report. EEA Report, n. 13, 2018.

FISHER, K., WALLÉN, E., LAENEN, P. P., Collins, M. Battery Waste Management Life Cycle Assessment. *Environmental Resources Management*, 2016.

FLEXER, V.; BASPINEIRO, C.F., GALLI, C. I. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, v. 639, pp. 1188–1204, 2018.

FUJIMORI, S; & ZHANG, R. The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios. *Environ. Res. Lett.* 15, 2020.

GAO, S.; QIAO, R.; LIM, M. K.; LI, C.; QU, Y.; XIA, L. Integrating corporate website information into qualitative assessment for benchmarking green supply chain management practices for the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 311, 2021.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127590>.

GEORGI-MASCHLER, T.; FRIEDRICH, B.; WEYHE, R.; HEEGN, H.; RUTZ, M. Development of a recycling process for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources* 207, p. 173– 182, 2012.  
Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, p. 75–86, 2019.

HUANG, Z.; XIE, Z.; ZHANG, C.; CHAN, S. H.; Milewski, J.; Xie, Y.; Yang, Y.; Hu, X. Modeling and multi-objective optimization of a stand-alone PV-hydrogenretired EV battery hybrid energy system. *Energy Conversion and Management* 181, p. 80–92, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral. Brasília, 2014.

IPCC – INTERNATIONAL PANEL FOR CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Synthesis Report. Geneva, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 05 de Maio 2020.

JIANG, S.; ZHANG, L.; LI, F.; HUA, H.; LIU, X.; YUAN, Z.; WU, H. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, n. 262, 2020.

LAMBERT, D. M.; COOPER, M. C.; PAGH, J. D. Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. *The International Journal of Logistics Management*. V. 9, n. 2, 1998.

MARTINS, P. S; ESCRIVÃO FILHO, E.; NAGANO, M. S. Gestão ambiental e estratégia empresarial em pequenas e médias empresas: um estudo comparativo de casos. *Eng Sanit Ambient*, v.20, n.2, abr/jun 2015.

MENTZER, J. T; DEWITT, W.; KEEBLER, J. S.; MIN, S.; NIX, N. W.; SMITH, C. D.; ZACHARIA, Z. G. DEFINING SUPPLYCHAIN MANAGEMENT. *JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS*, v. 22, n. 2, 2001.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. SEGUNDO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA. EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS – Produção de Metais. Alumínio, 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Convenção-Quadro das Nações Unidas para mudanças climáticas: Acordo de Paris 2015, 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>>. Acesso em: 05 de Maio 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU) BRASIL. A ONU e a mudança climática. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/acao/mudanca-climatica/>> Acesso em 09/03/2020.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC) (2016). Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [Ribeiro, S.K., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS (IPCC). Alterações climáticas 2013. A Base Científica. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5\\_wg1\\_spmportuguese.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wg1_spmportuguese.pdf)> Acesso em 04 de Maio de 2020.

ROCCO, A. M. Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil: CARROS ELÉTRICOS E AS BATERIAS DE ÍON LÍTIO: ESTADO ATUAL DE DESENVOLVIMENTO E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS. Instituto Nacional de Altos Estudos, INAE. Rio de Janeiro, 2010.

RODRIGUEZ, T. B; CONSONI, F. L. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. Rev. Bras. Inov., Campinas (SP), v. 19, e0200014, p. 1-33, 2020.

ROMARE, M.; DAHLLOF, L. The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A study with focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles. IVL Swedish Environmental Research Institute, C 243, 2017.

SEBRAE; ONU. PENSAMENTO DO CICLO DE VIDA: negócios conscientes à caminho da sustentabilidade. Cuiabá, MT, 2017.

SILVA, A. P. M. DA; VIANA, J. P., CAVALCANTE, A. L. B. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Relatório de pesquisa. Instituto de pesquisa econômica aplicada (IPEA). Brasília, 2012.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Monitor elétrico. 2020. Disponível em <<http://monitoreletrico.seeg.eco.br/>> Acesso em 07 de novembro 2020.

The Life Cycle Initiative. What is Life Cycle Thinking?. Disponível em: <https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/what-is-life-cycle-thinking/>. Acesso em: 10/10/2022.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2018). Special Report: Global Warming of 1.5C. Chapter 3, p. 238. Disponível em <<https://www.ipcc.ch/sr15/>> Acesso em 05/05/2020

TSOUFAS, G.T.; & PAPPIS, C.P. Environmental principles applicable to supply chains design and operation. Journal of Cleaner Production, n. 14, p. 1593-1602, 2006.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAM. Life cycle management: a business guide to sustainability. Genebra, 2007.

VILELA JUNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. Modelos e Ferramentas de Gestão Ambiental: desafios e perspectivas para as organizações. 2. ed. São Paulo – editora Senac. São Paulo, 2006.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO<sub>2</sub> e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. BNDES. Rio de Janeiro, v. 24, n. 48, p. 167-244, 2018.

VONBUN, C. Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: uma revisão da literatura. Texto para discussão. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, 2015.

WILLERS, C.D.; RODRIGUES, L.B.; SILVA, C. A. da. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. Produção, v. 23, n. 2, p. 436-447, abr./jun, 2013.

WANG, S., ANG, H. M., TADÉ, M.O. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. Chemosphere, n. 72, p. 1621–1635, 2008.

WANGER, T. C. The Lithium future—resources, recycling, and the environment. Conservation Letters 4, 202–206, 2011.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Global Risks. Report 2019. 14th Edition. Genebra, 2019. Disponível em < [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Global\\_Risks\\_Report\\_2019.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2019.pdf)> Acesso em 02 de Maio 2020.

ZUBI, G.; DUFO-LÓPEZ, R.; CARVALHO, M., PASAOGLU, G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 89, p. 292–308, 2018.