

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E NEGÓCIOS NÍVEL
MESTRADO**

RODRIGO DE OLIVEIRA MENDES

**A INFLUÊNCIA DA MATRIZ DE OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL
NAS EMISSÕES DE GEE NA FABRICAÇÃO E RECICLAGEM DE BATERIAS DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Porto Alegre

2024

RODRIGO DE OLIVEIRA MENDES

A INFLUÊNCIA DA MATRIZ DE OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL
NAS EMISSÕES DE GEE NA FABRICAÇÃO E RECICLAGEM DE BATERIAS DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Negócios, pelo Programa de Pós-Graduação em Gestão e Negócios da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador: Prof. Dr. Ivan Lapuente Garrido

Porto Alegre

2024

M538i

Mendes, Rodrigo de Oliveira.

A influência da matriz de oferta de energia elétrica do Brasil nas emissões de GEE na fabricação e reciclagem de baterias de veículos elétricos / por Rodrigo de Oliveira Mendes. – 2024.

[127] f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Gestão e Negócios, Porto Alegre, RS, 2024.

“Orientador: Dr. Ivan Lapuente Garrido”.

1. Economia circular. 2. Reciclagem de baterias.
3. Veículos elétricos. 4. Emissões de gases de efeito estufa.
5. Escassez de recursos. 6. Baterias de íon de lítio.
7. Tecnologia de reciclagem. I. Título.

CDU: 65:621.337

RODRIGO DE OLIVEIRA MENDES

A INFLUÊNCIA DA MATRIZ DE OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL
NAS EMISSÕES DE GEE NA FABRICAÇÃO E RECICLAGEM DE BATERIAS DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Negócios, pelo Programa de Pós-Graduação em Gestão e Negócios da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ivan Lapuente Garrido – UNISINOS

Prof. Dr. Gabriel Sperandio Milan – UNISINOS

Prof. Dr. Sílvio Luís de Vasconcellos – ESPM

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste mestrado é, para mim, uma das maiores conquistas que já pude realizar. Este é um projeto que eu vinha desejando por longos anos desde a minha formação como engenheiro eletricista. Contudo, os compromissos profissionais juntamente com os pessoais, com muitas viagens e pouco tempo de dedicação, foram se apresentando ano após ano como uma barreira para transformar este projeto em realidade. Este período de procrastinação teve seu término com o fundamental apoio e incentivo da minha esposa, Florence Colombet, da compreensão dos meus preciosos filhos e dos meus familiares. Esta sustentação familiar, teve uma força que me levou a poder priorizar o mestrado e ao trabalho, pelo menos no primeiro ano do curso. Uma vez iniciado e sendo possível capitalizar os benefícios obtidos com os conhecimentos adquiridos, então o trajeto passou a se transformar em uma harmoniosa jornada, conciliando o desejo de estar na academia com a contribuição prática destes novos recursos intelectuais na vida profissional. Esta conjunção de fatores me fez perceber que o importante investimento em dedicação para seguir o curso se tornava recompensado com os benefícios acumulados ao longo da trajetória de aprendizado.

A escolha deste curso foi motivada por múltiplos fatores. Além do desejo de obter mais robustez acadêmica e experiência profissional, busquei ampliar meus conhecimentos na área técnica com uma visão mais aprofundada na gestão de negócios. A multidisciplinaridade dos temas, aliada ao alto nível das referências de autores em suas respectivas áreas apresentadas no curso, proporcionou um ganho significativo de capital intelectual. Foi igualmente proveitoso ter acesso à conteúdos de alto nível de impacto acadêmico quando nos eram apresentados por um excelente corpo docente que, que como regentes, faziam com que aquela multitude de conhecimento, das diversas disciplinas, convergisse para uma concisa ampliação da compreensão da gestão de negócios e suas diversas interações junto aos mais diversos atores. Estou certo de que esse conhecimento me ajudará a enfrentar aos novos desafios profissionais e a contribuir de forma positiva para a sociedade.

Contribuiu também para esta minha escolha, a dupla diplomação. Não apenas por ampliar o alcance do título em outros horizontes, mas por ter parte da

sua formação constituída em uma universidade da França. País cujo destino me agraciou com um vínculo vitalício. Sendo este país berço de muitos estudiosos que contribuíram para evolução do conhecimento mundial, mas também o “pago” de minha amada esposa e meus queridos filhos. Sim importo, como paulista e filho de uma gaúcha, o termo gaúcho pago que designa origem. Aliás, assim como o enriquecimento obtido pela multidisciplinaridade do curso com um conteúdo rico e abrangente, não posso mais me imaginar como indivíduo sem me compor por um mosaico onde o Sul e suas tradições ganharam forte espaço em minha vida e na de minha família francesa.

Agradeço a Universidade do Vale do Rio dos Sinos e ao meu orientador Prof. Dr. Ivan Lapuente Garrido por me proverem os subsídios técnicos e científicos que me permitiram construir esta dissertação. Espero que, assim como tive o privilégio de fazer parte de um seleto grupo de pessoas neste país que goza da oportunidade de concluir um curso de mestrado, de poder, também, deixar um legado de contribuição científica que possa inspirar os profissionais e acadêmicos para seguirem investindo tempo e recursos neste tema. Isso, por julgar de extrema relevância para alcançarmos o progresso que os novos modelos de negócios considerem os recursos naturais como ativos centrais que possam cada vez mais trazer retornos sociais e financeiros para empresas e demais entidades. Assim espero que, pouco a pouco, a sociedade em sua acepção ampla, com indivíduos, governos, corporações e demais atores, possam desacelerar a pressão sobre os recursos naturais a fim de não se atingir limites que comprometam a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas necessidades.

RESUMO

Essa pesquisa aborda a crescente preocupação com a escassez de recursos e a degradação ambiental devido à crescente demanda por recursos naturais e à geração de resíduos. Destaca a necessidade urgente de transição do modelo linear para uma economia circular para mitigar os impactos adversos da produção industrial. O foco do estudo é na indústria de veículos elétricos (VE), que está crescendo rapidamente e contribuindo para as emissões de gases de efeito estufa. Essa pesquisa enfatiza a importância da reciclagem das baterias de VE dentro de um modelo circular para reduzir as emissões, preservar materiais valiosos e atender à crescente demanda por baterias. Ele também explora a influência matriz de geração de eletricidade no Brasil em comparação com a da China nas emissões de reciclagem. O estudo utiliza o modelo Everbatt para analisar os aspectos ambientais e de custo na reciclagem de baterias de íon de lítio para VE de passageiros, fornecendo informações valiosas para tomadores de decisão e potenciais investidores na indústria de reciclagem de baterias. Além disso, são identificadas oportunidades de melhoria na reciclagem de baterias com base em modelos circulares e suas implicações gerenciais.

Palavras-chave: Economia circular, Reciclagem de baterias, Veículos elétricos, Emissões de gases de efeito estufa, Escassez de recursos, Baterias de íon de lítio, Tecnologia de reciclagem

ABSTRACT

This research addresses the growing concern of resource scarcity and environmental degradation due to escalating natural resource demand and waste generation. It highlights the urgent need to transition from the linear model to a circular economy to mitigate the adverse impacts of industrial production. The focus of the study is on the electric vehicle (EV) industry, which is rapidly growing and its contributing to greenhouse gas emissions. The research emphasizes the importance of recycling EV batteries within a circular model to reduce emissions, preserve valuable materials, and meet the growing demand for batteries. It also explores the influence of the electricity generation mix in Brazil compared to China on recycling emissions. The study utilizes the Everbatt model to analyze the environmental and cost aspects of recycling lithium-ion batteries for passenger EVs, providing valuable insights for decision-makers and potential investors in the battery recycling industry. Additionally, this work identifies opportunities for improvement in battery recycling based on circular models and their managerial implications.

Keywords: Circular economy, Battery recycling, Electric vehicles, Greenhouse gas emissions, Resource scarcity, Lithium-ion batteries, Recycling technology

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sobrevivência e extinção de espécie no modelo <i>Gordon-Schaefer-Clark</i>	15
Figura 2 – Riscos Globais.....	17
Figura 3 – Da economia linear para a circular.....	37
Figura 4 – Modelo Circular EMF.....	40
Figura 5 – Quadro dos 9Rs.....	42
Figura 6 – Modelo circular.....	43
Figura 7 – Esquemático do modelo <i>Everbatt</i>	47
Figura 8 – Esquemático <i>Everbatt</i>	49
Figura 9 – Matriz global de energia.....	54
Figura 10 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.....	56
Figura 11 – Diagrama esquemático de funcionamento da bateria íon-lítio.....	59
Figura 12 – Diferentes formatos de célula de bateria (cilíndrico, prismático e bolsa).	61
Figura 13 – Ciclo de uso estendido da bateria elétrica veicular.....	61
Figura 14 – Modo de avaliação ambiental e econômico.....	62
Figura 15 – Evolução do preço (USD / Kg) do níquel pelo período de um ano.....	66
Figura 16 – Evolução do preço (USD / Kg) do cobalto pelo período de um ano.....	66
Figura 17 – Evolução do preço do lítio (USD / Kg) – Jul 2017 a Nov 2022.....	67
Figura 18 – Contribuição do consumo de energia durante o ciclo de remanufatura..	70
Figura 19 – Fluxo de pesquisa.....	71
Figura 20 – Módulos de reciclagem do modelo <i>Everbatt</i>	74
Figura 21 – Modelo conceitual da pesquisa.....	76
Figura 22 – Diagrama do processo de reciclagem direto.....	79
Figura 23 – Diagrama do processo de reciclagem por hidrometalurgia.....	80
Figura 24 – Diagrama do processo de reciclagem por pirometalurgia.....	81
Figura 25 – Comparativo de emissões de GEE (matriz da China).....	90
Figura 26 – Comparativo de emissões de GEE (matriz do Brasil).....	91
Figura 27 – Emissões com as matrizes do Brasil e da China.....	93
Figura 28 – Desagregação de emissões de GEE no processo de pirometalurgia.....	94
Figura 29 – Desagregação de emissões de GEE no processo de hidrometalurgia...	95
Figura 30– Custo por processo de fabricação para a China por kWh (NMC811).....	99
Figura 31– Custo por processo de fabricação para o Brasil por kWh (NMC811).....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes contribuições sobre economia circular.....	35
Tabela 2– Oferta interna de energia elétrica por fonte na China.....	57
Tabela 3 – Composição da célula por material (peso %)......	77
Tabela 4 – Materiais recuperados por processo de reciclagem.....	81
Tabela 5 – Principais parâmetros e seus valores adotados.....	86
Tabela 6 – Parâmetros de saída.....	88
Tabela 7 – Tabela de parâmetros comparativos.....	88
Tabela 8 – Parâmetro da influência da matriz de energia elétrica.....	89
Tabela 9 – Valores de emissões GEE por tipo de processo de fabricação.....	92
Tabela 10 – Comparativo entre emissões de manufatura com material virgem e reciclado.....	92
Tabela 11 – Influência da matriz de oferta de energia elétrica.....	96
Tabela 12 – GEE (gCO _{2e} /kWh) por matriz isoladamente.....	97
Tabela 13 – Custo desagregado por origem dos materiais (NMC 811).....	98
Tabela 14 – Tabela comparativa de resultados entre Brasil e China.....	100
Tabela 15 – Impacto gerencial e três dimensões.....	103

LISTA DE SIGLAS

ABETRE	Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos
ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASG	Ambiental, Social e Governança
BatPac	<i>Battery Performance and Cost Model</i>
BEV	<i>Battery Electrical Vehicle</i>
BNEF	<i>BloombergNET</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
DFR	<i>Design for Recycling</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
EU27	<i>The 27 European Union Countries</i>
EC	Economia Circular
EMF	Ellen MacArthur Foundation
ETS	<i>Economic Transition Scenario</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
REET	<i>Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KOTRA	<i>Korea Trade Investment Promotion Agency</i>
LCA	<i>Life cycle assessments</i>
NDA	<i>Non-Disclosure Agreement</i>
NDCs	<i>Nationally Determined Contributions</i>
NZS	<i>Net-Zero Scenario</i>
PLE	<i>Product Life Extension</i>
RPO	<i>Retain Product Ownership</i>
SaaS	<i>Sales as a Service</i>
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i>
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL

VE	Veículo Elétrico
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>
WEF	<i>World Economic Forum</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Definição do problema de pesquisa.....	23
1.2 Justificativa e relevância da pesquisa.....	26
1.3 Objetivos do trabalho.....	30
1.3.1 Objetivo geral.....	30
1.3.2 Objetivos específicos.....	31
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
2.1 Economia circular.....	33
2.2 Modelo circular.....	40
2.3 Modelo <i>Everbatt</i>	44
2.3.1 Escopo e objetivo.....	45
3 DESCRIÇÃO DO CONTEXTO.....	50
3.1 Descarbonizando o transporte.....	50
3.2 Matriz de oferta de energia elétrica.....	52
3.3 Baterias de íon-lítio.....	57
3.4 Reciclagem de bateria para veículos elétricos.....	64
3.5 Emissões na reciclagem de bateria íon-lítio.....	68
4 MÉTODO DE PESQUISA.....	71
4.1 Modelo <i>everbatt</i>	72
4.1.1 Modelo conceitual.....	74
4.1.2 Definições ligadas a bateria.....	76
4.1.3 Definições ligadas a reciclagem.....	78
4.1.4 Análise do ciclo de vida.....	82
4.1.5 Variação geográfica.....	83
4.2 Pesquisa exploratória.....	84
4.3 Validação dos dados coletados.....	85
4.4 Ajustes dos dados aos parâmetros de pesquisa.....	85
4.5 Aplicação dos parâmetros no modelo adotado.....	87
4.6 Adaptação do modelo.....	87
4.7 Extração dos parâmetros de saída do modelo.....	87
4.8 Análise comparativa das emissões.....	88
4.9. Comparativo das emissões com as matrizes de energia.....	88
5 RESULTADOS.....	90
5.1 Comparativo das emissões de GEE entre a manufatura de uma bateria nova e a reciclagem.....	90
5.2 Análise da influência da matriz de oferta de energia elétrica no Brasil nas emissões.....	96
5.3 Análise de custo para manufatura e reciclagem.....	98
5.4 Oportunidades de melhoria para redução de emissões.....	100
5.5 Implicações gerenciais.....	103
5.6 Considerações finais e demais implicações.....	104
6 REFERÊNCIAS.....	109

1 INTRODUÇÃO

A intensificação do consumo tem conduzido a um intenso debate sobre como mitigar os efeitos nocivos de uma maior demanda por recursos naturais extraídos do meio ambiente, sendo, muitos deles, finitos. Junta-se a essa preocupação, a geração de resíduos não reaproveitados. Essa situação expõe as empresas a uma possível inviabilidade econômica a longo prazo, colocando em questionamento a viabilidade da preservação das condições para a vida humana em nosso planeta, além de intensificar o debate sobre possíveis formas de mitigar os efeitos danosos da produção industrial ao meio ambiente, juntamente a uma exploração economicamente viável.

Modelos que extraem mais recursos do que são capazes de regenerar, somado ao aumento da população mundial, tendem a elevar a demanda por recursos naturais, muitas vezes, já escassos e com um conseqüente aumento da degradação ambiental (ALMEIDA *et al.*, 2016). Neste contexto, emprega-se, também, o termo capacidade de carga que, em ecologia, pode ser usado para ajudar a definir o limite de indivíduos de uma determinada espécie que podem ser comportados por um ecossistema específico, sem que ocorra um colapso ambiental ou diminuição significativa da qualidade do habitat e dos recursos disponíveis. No artigo de Chapman *et al.*, 2020, sobre a flexibilização do uso do termo capacidade de carga em ecologia. É possível ver o emprego do termo em diferentes campos de ecossistema, sendo um dos campos o que versa sobre conservação biológica, o mais aderente a esta pesquisa. Por Chapman, a maior parte dos autores e pesquisados correlacionam a capacidade de carga que um ambiente pode suportar, com o número de indivíduos numa determinada área.

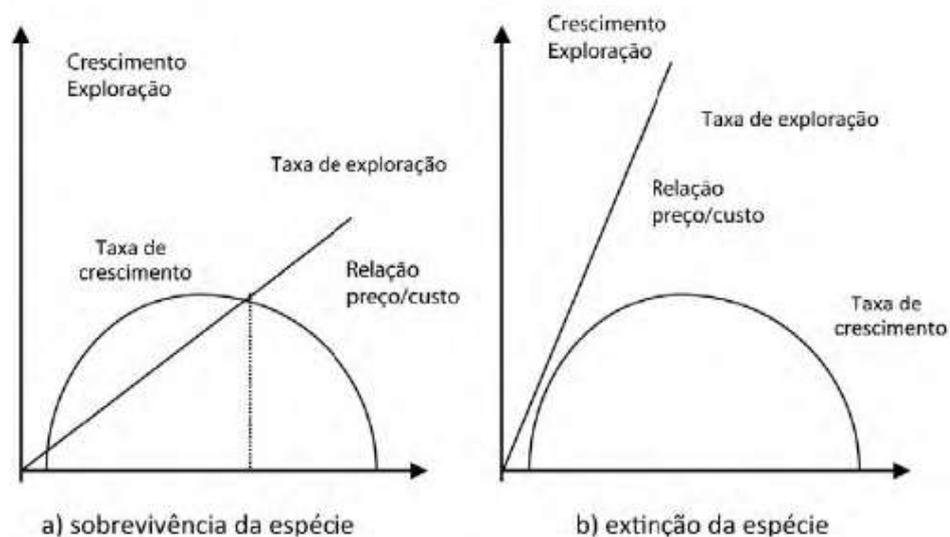
A Revolução Industrial ampliou a capacidade da ação antrópica de interferir na natureza. Desde então, esta intervenção no ambiente natural só se intensifica. Uma maior exploração de grandes reservas fósseis proporcionou uma inédita escala de expansão das atividades humanas, que por sua vez, coloca mais pressão sobre a base de recursos naturais disponíveis.

A capacidade de carga se correlaciona com a dinâmica do crescimento dos recursos da biodiversidade onde uma taxa de crescimento da espécie está representada na Figura 1 usando o modelo de *Gordo-Shaefer-Clark*, a fim de ajudar

a ilustrar de forma gráfica como o nível de exploração pode levar a extinção de espécies.

Se as atividades produtivas da humanidade tivessem por princípio não desrespeitar os princípios ecológicos básicos (diversidade biológica, reciclagem de nutrientes etc.), a sua expansão poderia não ultrapassar a “capacidade de carga” (*carrying capacity*) do planeta (ROMEIRO, 2010).

Figura 1 – Sobrevivência e extinção de espécie no modelo *Gordon-Schaefer-Clark*



Fonte: MAY, 2010

A “capacidade de carga” do planeta não pode ser ultrapassada sem a repercussão de desastres naturais. Contudo, como não é fácil saber, de forma precisa, qual é esta capacidade de carga, então é importante adotar uma postura de antecipação, sem esperar para ver onde está este limite. Sendo assim, é salutar criar, o quanto antes, as novas condições que preconizam tanto a evolução tecnológica que ajudem a poupar os recursos naturais, bem como rever o consumo, a fim de não estar mais baseado na ideia de um crescimento contínuo e de uso ilimitado dos recursos naturais. Sendo este um conceito mais alinhado com a economia ecológica, que é fundamentada na ideia de como a prática interfere no meio ambiente (ROMEIRO, 2010).

Enquanto a economia dos recursos naturais e a economia ambiental tratam da eficiência da alocação de recursos, incluindo trabalho e capital na indústria

extrativista no primeiro caso, e a eficiência alocativa relacionada às externalidades da poluição no segundo, a economia ecológica se conecta a essas duas áreas integrando depleção e poluição (MAY, 2010).

A crescente intensidade global das atividades humanas levanta a questão dos limites da capacidade de suporte de nosso planeta. Torna-se, portanto, crucial buscar uma maior eficiência na utilização dos recursos naturais, reduzindo ou necessário buscar uma melhor eficiência na utilização dos recursos naturais, eliminando a poluição e estabilizando os níveis de consumo *per capita* dentro dos limites da capacidade de suporte do planeta (ROMEIRO, 2010).

O relatório *The Circularity Gap* (WIT *et al.*, 2019) apresenta como deverá ser a demanda por recursos naturais. De acordo com o relatório, tem havido um aumento significativo de recursos extraídos do planeta. Saindo de um patamar de 28,6 Gt, no início da década de 1970, para uma previsão entre 170Gt e 184Gt, em 2050.

Estudos e relatórios convergem para sinalizar que vivemos em um mundo mais perigoso, com mais gente, mais consumo, mais desperdício e mais pobreza, mas, também, com menos biodiversidade, menos água potável e menos recursos naturais (HÉRIZ, 2018, p.19).

Com base nestes diagnósticos, é possível acertar que, para responder à evolução na demanda de consumo, há necessidade de migrar do modelo linear, que extrai-processa-usa-descarta, para outro modelo que satisfaça a condição de reduzir a pressão sobre os recursos naturais e seu esgotamento.

Além do aspecto da extração mais intensa de recursos naturais do planeta, o modelo linear também gera um volume maior de resíduos. Esta pressão sobre os recursos do planeta vem do modelo de consumo que preconiza, muitas vezes, valores estéticos, como o caso das embalagens, em detrimento das consequências ambientais no momento de seu descarte, e sofre pressão para que seja revisto. Há uma falha no modelo linear, que não prevê durante toda a vida do produto, do seu desenvolvimento ao seu descarte, formas de mitigar a geração de resíduos, que serão descartados no meio ambiente, ou de como proporcionar sua reciclagem.

Os efeitos negativos, causados pelo modelo linear de extração, produção e descarte, ameaçam a estabilidade da economia e a integridade dos ecossistemas naturais (GHISELLINI *et al.*, 2016; RITZÉN *et al.*, 2017).

Interessante e relevante para as empresas, é o trabalho do Fórum Econômico Mundial, que anualmente publica o relatório de Riscos Globais. Este relatório é gerado a partir de uma pesquisa global, na qual, aproximadamente, 1000 tomadores de decisões, dos setores público e privado, academia e sociedade civil avaliam os riscos que o mundo está defrontando. No relatório de 2022, em sua 17ª edição, nota-se que, assim como nas edições a partir de 2017, o item *Extreme Weather*, extremos climáticos em tradução livre, figura como o principal risco por probabilidade, antecedido, no relatório de 2022 por *Climate action failure*, falhas na gestão dos fatores ambientais em tradução livre, e seguido por perda da biodiversidade, erosão da coesão social, crises de subsistência, doenças contagiosas, danos ambientais antrópicos e crises de recursos naturais para citar os 8 principais riscos da Figura 2.

Figura 2 – Riscos Globais



Fonte: *World Economic Forum, Global Risk Report 2022*

Vale a ressalva que o risco com doenças contagiosas, que apareceu no relatório de 2021 e permanece no relatório de 2022, entre os principais riscos, não figurava nestas posições em relatórios anteriores. Isso, provavelmente pode ter ocorrido em função do risco que a pandemia de Covid19 impôs sobre as organizações. A pandemia também contribuiu, segundo o mesmo relatório, para o aparecimento da crise da dívida, dada a deterioração do ambiente macroeconômico vista no período. Ainda, o aumento das tensões entre Europa e Rússia podem ter conduzido o aparecimento do confronto geoeconômico, como um dos 10 maiores riscos globais no relatório de 2022. Com base na análise dos relatórios de 2017 a

2022, os riscos ambientais representam 68% dos riscos apontados pelos tomadores de decisões que responderam à pesquisa.

Por tudo isso, vem se intensificando a busca de alternativas ao modelo linear, onde é empregada a lógica da coleta de recursos, produção, consumo e descarte de resíduos (*Cradle to Grave*), ou em tradução livre, do berço ao túmulo. É desta emergente necessidade que surge o modelo circular (*Cradle to Cradle*), ou do berço ao berço. A Economia Circular (EC) tem sido considerada como uma alternativa de modelo circular que possa promover o desenvolvimento e ainda, a atender às demandas baseadas em recuperação e regeneração do meio ambiente. (GHISELLINI *et al.*, 2016).

A economia circular é vista como um novo modelo de negócio esperado para conduzir a um desenvolvimento mais sustentável e uma sociedade mais harmoniosa (FENG *et al.*, 2007; GENG *et al.*, 2008; NESS, 2008; MATHEWS *et al.*, 2011; NAUSTDALSLID, 2014) e ainda como um modelo que permite fazer negócios atendendo ao crescimento econômico.

As empresas tendem a adotar revisões em seus modelos de negócios, para que estejam mais alinhadas às práticas sustentáveis, seja por motivos externos, como atender a legislação, as pressões vindas dos clientes e stakeholders, mas, também, por fatores econômicos, tais como: melhor aproveitamento dos recursos, maior participação do mercado, redução de custos e, ainda, uso de inovações. (MAY, LUSTOSA, VINHA, 2010).

Este modelo circular permite mitigar a geração de resíduos, assim como reaproveitar bens, cuja viabilidade de seu reuso exista. A migração do modelo linear para o circular requer uma mudança de paradigma, partindo da visão do aumento do custo, com a implementação de medidas ambientalmente sustentáveis, para uma visão de oportunidades de sustentabilidade corporativa.

Para além dos equilíbrios ambientais decorrentes desta maior capacidade de intervenção, a Revolução Industrial, baseada no uso intensivo de grandes reservas naturais, muitas não renováveis, abriu caminho para uma expansão inédita de escala das atividades humanas, que pressiona fortemente a base de recursos naturais do planeta. Ou seja, mesmo se todas as atividades produtivas humanas respeitassem princípios ecológicos básicos, sua expansão não poderia ultrapassar os limites termodinâmicos que definem a “capacidade de carga” do planeta (ROMEIRO, 2010, p 6).

O modelo linear não consegue endereçar as maiores prioridades de hoje, incluindo escassez de recursos, poluição, mudanças climáticas, perda de

biodiversidade, alteração no uso da terra e perda de alimentos e desperdícios. A economia circular permite lidar melhor com estes desafios. (WBCSD, 2021).

Economia circular é fundamental para atingir a visão da WBCSD de um mundo com mais de 9 bilhões de pessoas em 2050. Neste sentido, a economia circular requer desassociar consumo de recursos de desempenho da economia, por meio do compartilhamento de informações, novos modelos de negócios, apoio de políticas públicas, objetivos baseados na ciência e uma colaboração na cadeia de valor (WBCSD, 2021).

Uma nova atenção, que deve demandar aplicação dos modelos circulares advindos da EC, está no setor de transporte. Com a busca pelo cumprimento das metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e evitar o aquecimento global, muitas medidas vêm sendo adotadas. Entre uma das apostas, está a migração do transporte de passageiros dos veículos de combustão interna, *internal combustion engine* (ICE), para veículos elétricos (VE), com sua respectiva contribuição na redução das emissões.

De acordo com o relatório EV *outlook* 2022, houve um aumento do estoque de VEs ao longo da década passada. Embora o crescimento tenha sido menos acelerado que em 2021, ainda assim, apresentou um aumento contínuo nas vendas de veículos elétricos (VE), veículos que são movidos a energia de baterias, tipicamente carregadas pela rede elétrica. Uma característica em evidência nos VEs é o seu esperado impacto ambiental, inferior ao veículo convencional de combustão interna, uma vez que eles possuem emissões de GEE/CO₂ reduzidas ou zero, no caso dos BEVs. (MANJUNATH *et al.*, 2017).

O setor de transporte já é objeto de estudos por ações que busquem mitigar as emissões de GEE. Isso, por ser um setor que contribui com o segundo maior volume de emissões (EPE, 2021). A academia vem ampliando seu olhar para o setor e analisando formas de aplicá-lo como modelos de circularidade. As projeções apontam não só para aumento expressivo dos VEs, como alternativa aos carros de combustão interna, mas, também, para a consequente repercussão deste aumento no volume de baterias em fim de vida útil, que deverão surgir nos próximos anos (CASTRO *et al.*, 2021). Se não houver um olhar que consiga mitigar os efeitos nocivos ao meio ambiente e evitar o despejo destas baterias em aterros, não será possível cumprir a agenda preconizada pelos modelos circulares, nem endereçar o

aproveitamento dos materiais valiosos e escassos, que podem ser reutilizados na fabricação de baterias novas.

Assumindo que a vida útil de uma bateria de VEs seja de 10 anos e uma média de peso de 300 Kg por BEVs (*Battery Electric Vehicle*) e 200 Kg para PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*), o volume de baterias usadas foi de 0,8 milhões de toneladas em 2017 (DAI Q. *et al.*, 2018).

Muitos dos estudos existentes relacionados as baterias de íon-lítio, tipo de bateria mais empregada nos veículos elétricos, focam nos métodos de reciclagem, no impacto ambiental em relação a produção e uso (*Cradle-to-Gate*). Contudo, há o que se discutir sobre o aspecto do descarte de baterias de íon-lítio. (WINSLOW *et al.*, 2018).

Há um esforço significativo empregado pela academia, na elaboração de trabalhos voltados à reciclagem e recuperação de metais das baterias de íon-lítio. Contudo, o foco tem sido mais nas tecnologias empregadas para recuperar os materiais destas baterias, do que no aspecto ambiental e econômico. Isto está refletido no número de trabalhos publicados entre 2015 e 2020, onde (YANG *et al.*, 2021) identifica 516 artigos de pesquisa e 28 artigos de revisão sobre tecnologias de reciclagem, 94 artigos sobre análise de ciclo de vida na produção de baterias de íon-lítio e 10 artigos também baseados no ciclo de vida na reciclagem.

O maior desafio enfrentado para poder aplicar um modelo circular, no que concerne às baterias de íon-lítio, trata-se do fato de que as atuais baterias não são concebidas para reciclagem, tornando difícil evitar desmantelá-las para se conseguir extrair seus materiais brutos (TAN *et al.*, 2020).

Então, a implementação de um modelo circular, não só tem um papel na reciclagem das baterias já fabricadas dentro da lógica do modelo linear, mas pode ser importante, por propor uma abordagem circular DFR (*Design for Recycling*) ou concebido para reciclagem. Desta forma, as baterias que já tiverem, em sua concepção no processo de fabricação, um olhar voltado à reciclagem após sua vida útil, poderiam reduzir o custo de reciclagem, as emissões, o consumo de energia e aumentar o aproveitamento no processo de reciclagem das baterias (TAN *et al.*, 2020).

Segundo o relatório *Electric Vehicle* da *BloombergNEF* (2022), para que haja possibilidade de atender ao aumento da demanda por baterias na indústria de veículos elétricos, a reciclagem se torna crucial, uma vez que, com as reservas

conhecidas, num cenário de neutralidade nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), haveria escassez de lítio já em 2045. Contudo, com o aumento da reciclagem, que injetaria novamente este elemento químico na indústria de manufatura de baterias, a demanda poderia ser atendida pela oferta de lítio para além de 2050.

Baterias já utilizadas em VEs poderiam ser destinadas tanto para remanufatura ou reutilização, como ter seu uso readaptado em outras aplicações, como as de armazenamento estacionário de energia, novos produtos de mobilidade elétrica ou aplicações de menor potência. Com o grande aumento previsto na quantidade de baterias já utilizadas no mundo, ressalta-se a necessidade de infraestrutura e tecnologias, que serão capazes, de maneira sustentável e responsável, lidar com o descarte das baterias em final de vida útil, mesmo se elas forem usadas múltiplas vezes. Reciclagem é uma das mais promissoras formas de gestão para produtos em seu fim de vida útil (ARGONNE, 2019).

Um estudo de Kumar *et al.*, 2020, sobre a adoção de veículos elétricos, apontou o impacto ambiental como uma das variáveis mais presentes nos estudos analisados, e que influencia na decisão pela escolha do VE. Contudo, os estudos divergem sobre a certeza de redução de emissão GEE, quando se opta pelo uso do veículo elétrico. Os autores analisados no estudo, que apontaram o benefício da redução de GEE na adoção de VE, basearam seus estudos em países com matrizes de oferta de energia elétrica mais limpas.

O estudo do Quak *et al.*, 2016 apontou o desempenho ambiental como um importante motivador para adoção de VE. Já Nichols *et al.*, 2015 apontou que a matriz de energia elétrica também é um ponto relevante, e que a adoção de VE possa ser um obstáculo, quando a geração de eletricidade é essencialmente oriunda de carvão. Choi *et al.*, 2018 estudou as emissões de BEV em países que importam petróleo, como a Coreia do Sul. O comparativo entre BEVs e ICEs, naquele país, mostrou uma redução de 90-110 gCO₂eq/km em emissão em favor dos BEVs. Isso foi possível, porque, na Coreia do Sul, a geração de energia é principalmente de fonte nuclear, que, embora não seja uma fonte renovável, praticamente não emite GEE. Neste mesmo sentido, o desenvolvimento de VEs é de alta prioridade na China, e deve ajudar a reduzir o alto volume de emissões de GEE, a partir da queima de combustíveis fósseis. (QIAO *et al.*, 2018).

Com isto, este trabalho apresenta as emissões de GEE com a reciclagem de bateria, identificando se a reciclagem de baterias pode reduzir as emissões de GEE, quando comparada à fabricação de uma nova, buscando entender a influência da matriz energética brasileira nestas emissões. Para mensurar as emissões ambientais, na reciclagem das baterias íon-lítio, para veículos elétricos de passageiros, a fim de reduzir o nível de complexidade, usaremos o modelo Everbatt do laboratório Argonne, que é o primeiro modelo de realimentação fechado público disponível, para custo de reciclagem de bateria e modelo de impacto ambiental. O principal objetivo desse modelo é ajudar nas decisões de reciclagem e acelerar o desenvolvimento de uma cadeia de valor mais sustentável para baterias. Esse modelo será melhor compreendido nas seções 2 e 3. Para avaliar a influência da matriz, foi feito um comparativo entre as emissões no processo de fabricação e reciclagem de baterias, usando a matriz brasileira e a chinesa.

A escolha da China, como país de comparação ao Brasil, justifica-se pelo fato de que a China é a maior produtora de baterias de EV, com algo em torno de 77% (*BloombergNEF*). Segundo Sandoval *et al.*, 2021, o país asiático possui o maior volume de fabricação de baterias para VEs no mundo, com 72% de participação na produção global. Apesar disso, a China tem uma matriz de oferta de energia elétrica com uma composição de geração majoritariamente de fonte considerada não limpa. A matriz de oferta de energia elétrica da China possui as seguintes principais fontes: carvão, energia hidrelétrica, energia nuclear e energias renováveis, incluindo a energia eólica, solar, geotérmica e biomassa. O carvão é a principal fonte de energia elétrica na China, correspondendo a aproximadamente 60% da matriz de oferta em 2020 (NBSC, 2021, IEA, 2021). A fonte oriunda de energia hidrelétrica é a segunda maior fonte geradora de energia elétrica do país asiático, representando a aproximadamente 18% da oferta. Já, a oferta de energia elétrica advindas de fontes renováveis e nuclear representam 19% e 5% respectivamente (IEA, 2021).

O foco, como se viu, será em relação as baterias utilizadas nos referidos veículos elétricos. Segundo Qiao, a maior parte dos componentes de um VE é similar àqueles de combustão interna, sendo a bateria a maior diferença entre eles (QIAO *et al.*, 2019). Assim, é apresentado um comparativo do volume de emissões, entre um processo de reciclagem e o de fabricação de uma nova, usando modelo *Everbatt*. Adicionalmente, foi analisada a influência da matriz de oferta de energia elétrica brasileira nos resultados obtidos pelas emissões nos processos de

reciclagem e fabricação de uma bateria nova. Foi feita uma análise comparativa dos resultados obtidos pelo modelo *Everbatt*, com dados da matriz brasileira, com os resultados dados pelo mesmo modelo na oferta da matriz chinesa. Esse comparativo visa subsidiar os tomadores de decisões com informações sobre o impacto ambiental ligado às emissões na fabricação e reciclagem de baterias. Assim, o estudo poderá ajudá-los na escolha do país que irão escolher para instalar uma nova fábrica. Dessa forma, torna-se possível entender como a definição do Brasil, como destino da fábrica, poderá influenciar na escolha de eventuais investidores conectados a uma agenda ambiental.

1.1 Definição do problema de pesquisa

O segmento de transporte, como já visto, é o segundo maior responsável por emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo que os veículos de passageiros representaram, aproximadamente, 80% do total das vendas de veículos no mundo, com 61,4 milhões de unidades vendidas em 2020 (ACEA, 2022).

Dada a relevância do segmento de transporte nas emissões de GEE, a representatividade de veículos de passageiros no total de veículos motorizados, e, ainda, a importância da eletrificação, como um processo que visa reduzir as emissões de GEE, é o que esta pesquisa se concentra: na análise das emissões das baterias de íon-lítio usadas em veículos elétricos de passageiros.

A implementação de veículos elétricos (VEs) como um meio de transporte, tanto privado como público, é um fato eminente, que pode ser observado nas grandes áreas urbanas. Esta implementação se dá, segundo Sanfélix *et al.*, 2016, por trazer dois principais benefícios para a sociedade: redução de emissões, quando comparado com os veículos ICE e segurança energética. VEs têm condições de reduzir, de forma significativa, a dependência de combustível estrangeiro em nações dependentes da importação de petróleo e outros tipos de combustíveis, passando, assim, a depender apenas da produção doméstica de eletricidade.

A escolha da bateria de íon-lítio de VEs como componente central desta pesquisa, justifica-se por ser o componente do VE de maior importância, seja pela sua representatividade em termos de valor, de peso e por ser objeto de forte atenção da academia e de pesquisadores na busca de novas tecnologias, que, quando aplicadas, poderão aumentar sua densidade de carga, que é chave para

viabilizar uma maior autonomia do veículo e o sucesso da eletrificação da frota mundial. Dúvidas surgem, quando se procura descobrir se a eletrificação destes veículos irá, de fato, contribuir com as desejadas reduções das emissões. Mas, especificamente essa pesquisa busca mostrar se a reciclagem das baterias dos VEs deve reduzir as emissões de GEE, quando comparada às emissões no processo fabricação de uma nova. Adicionalmente, esse estudo também se propõe a esclarecer a questão que se levanta sobre como deve ser o desempenho do saldo de emissões no cenário da matriz energética brasileira.

A migração de veículos à combustão interna para elétricos tem sido visto como um movimento que objetiva trazer forte contribuição nas metas globais de redução de GEE. Uma análise do impacto positivo de redução nas emissões, olhando apenas para a fase em que o veículo já fora industrializado, seria bastante restritiva. Comparar unicamente o volume de emissões de um veículo elétrico em relação ao de combustão interna, a partir da mensuração das emissões do GEE, vindas diretamente do veículo somente durante o período de seu uso, certamente não corresponde a uma visão realista da situação.

Fica evidente, portanto, que esta análise precisa se estender para uma visão mais completa. Primeiro, identificando qual é a matriz de geração de energia elétrica do país ou região em que o veículo terá suas recargas realizadas. Este questionamento se justifica, porque um país com geração de eletricidade baseada em fontes que utilizam combustíveis fósseis, terá uma contribuição forte no segmento de transporte de passageiros nas emissões de GEE. O impacto ambiental ocorrerá, dependendo da matriz e a necessidade de geração elétrica para atender a demanda no consumo das recargas das baterias dos veículos elétricos.

Além disto, alguns estudos já compararam a emissão de GEE durante toda a vida do veículo elétrico com os de combustão interna. Hawkins *et al.*, 2013, por exemplo, realizou um estudo em diferentes veículos na Europa e revelou que o ciclo inteiro de vida de um veículo elétrico era, aproximadamente, de 200g CO₂eq/Km, sendo de 10-20% menor que de um veículo a combustão. Mas, isso se usado um processo de produção de baterias, que se preocupa com as emissões, e, ainda, uma geração de energia elétrica de baixo carbono. Um estudo de Mayyas *et al.*, 2017 apontou que, nos Estados Unidos, um veículo elétrico emitiu, mais ou menos, 60t de CO₂ durante sua vida útil, 30% inferior a um de combustão interna. Por outro lado, Bauer *et al.*, 2015, prestou atenção em diferentes fases do ciclo de vida dos VEs,

indicando que o desenvolvimento do VE deveria ser acompanhado por melhorias no processo produtivo, assim como políticas voltadas à energia. Outros acadêmicos dividiram o ciclo de vida do veículo em diferentes fases. Qiao *et al.*, 2018, prestou atenção para o desempenho, *Cradle-to-Gate*, do berço à porta, do VEs. Os estudos de Qiao e outros autores, como, Bicer *et al.*, 2017 e Huo *et al.*, 2015, apontaram que, comparado ao veículo de combustão interna, o veículo elétrico emite mais GEE na etapa de produção e, menos, na fase de uso. Portanto, reduzir as emissões de GEE durante a produção será um dos maiores desafios para o veículo elétrico capturar ainda mais benefícios, do ponto de vista ambiental.

Diante deste cenário, usar materiais reciclados e recuperados pode ser um importante método. O uso de reciclagem em VE pode reduzir até 35% da energia consumida, e, também, redução de GEE na fase de produção (QIAO *et al.*, 2018).

Desta forma, não está clara a contribuição positiva da implementação do veículo elétrico como fator de redução de emissões de GEE, ficando o nível de contribuição para redução das emissões dependente de quão limpa é a matriz do país ou região onde se busca estudar.

O foco desta pesquisa está nas baterias dos veículos elétricos e visa contribuir para um melhor entendimento da viabilidade de reciclagem de baterias, do ponto de vista das emissões em comparação à fabricação de uma nova com materiais virgens. Isso, visa ajudar a elucidar se a reciclagem, como alternativa de modelo circular, trará benefícios na redução de emissões de GEE. Por fim, essa pesquisa busca ampliar a compreensão de como a matriz energética influencia no saldo de emissões. Desta busca por esclarecimento, surge a pergunta: Como a matriz de oferta de energia elétrica brasileira influencia nas emissões, na fabricação e na reciclagem de baterias para veículos elétricos? A fim de estabelecer essa influência, adotou-se o critério comparativo com a China, que é o país onde se fabrica mais baterias de VE na atualidade. Com essa comparação, objetiva-se entender qual seria a diferença em termos de emissões de GEE na fabricação e reciclagem, caso um fabricante opte por se instalar no Brasil.

Os custos dos minerais utilizados nas baterias de veículos elétricos têm aumentado drasticamente. Já, os custos de reciclagem estão numa fase incipiente de investigação. Desta forma, esta tendência torna esta pesquisa ainda mais relevante, já que estamos diante de um cenário, cuja tendência é tornar a reciclagem de baterias de íon-lítio mais difundida, e na busca de torná-la mais viável

economicamente. Assim, o uso desse estudo pode ser uma referência para os tomadores de decisão na hora de definirem o local para instalarem suas novas plantas de fabricação e reciclagem de baterias de VEs.

1.2 Justificativa e relevância da pesquisa

As vendas de carros elétricos alcançaram 3,2 milhões de unidades mundialmente em 2020 e, 6,6 milhões, em 2021; um crescimento superior a 100% em 2021 em relação ao ano anterior, que já tinha sido um ano com vendas recordes, aumentando o estoque para 16,5 milhões de carros elétricos vendidos. Os carros elétricos agora representam 9% de todas as vendas globais de carros (IEA, 2022).

Segundo projeção, a demanda global por veículos elétricos deve atingir, em 2040, uma frota global de mais de 600 milhões veículos de passageiros movidos por baterias (BNEF, 2021).

Embora o aumento da frota de veículos elétricos no mundo possa ser visto como benéfico e fundamental para redução das emissões de gases de GEE, não são todos os estudos que convergem neste sentido. Há estudos que enfatizam a importância da matriz de oferta de energia, no caso do estudo de Canals *et al.*, 2016, onde fora calculado o potencial de aquecimento global com a adoção de VEs em países europeus, e encontrou que, a maioria dos países da Europa, estão aptos em acomodar maior penetração de veículos elétricos. Contudo, em países como Reino Unido e Alemanha, por exemplo, onde as emissões na geração de energia são bastante elevadas, a adoção de VEs poderia não apresentar um potencial de redução do aquecimento global.

No Brasil, o número de novos carros elétricos registrados por ano está aumentando, especialmente depois da promulgação do programa ROTA 2030, mais recentemente substituído pelo novo programa do Mover do governo federal, que tem o objetivo de suportar o desenvolvimento tecnológico, competitividade, inovação, segurança dos veículos, proteção do meio ambiente, eficiência energética, e qualidade dos carros, caminhões, ônibus, chassis com motores e peças. A taxa de coleta e os critérios de gestão para baterias de íon-lítio em fim de vida útil, ainda não estão definidos no país. Contudo, segundo estudo de Castro, a previsão é de que, em 2030, o número de baterias em fim de vida útil, só no Brasil, seja de 340 mil unidades. (CASTRO *et al.*, 2021).

Adicionalmente, um crescente debate relacionado à disponibilidade de metais críticos, como lítio, cobalto e níquel levanta questões sobre a viabilidade de se produzir baterias em escala (KARA, 2010). Grande quantidade de lítio será necessária para fabricar baterias de automóveis, suficiente para atender as demandas impostas pela descarbonização até 2050 (WEF, 2022), e, ainda, permanecem dúvidas sobre a capacidade do setor de mineração em satisfazer a esta demanda (TAHIL 2008; YAKSIC, 2009). Múltiplos estudos apontam para o risco da falta de fornecimento de materiais necessários para fabricação, devido à expansão global de veículos elétricos. (ALVES DIAS *et al.*, 2018; HARVEY *et al.*, 2018; JONES *et al.*, 2020).

Dado o volume de baterias que chegarão ao final da vida útil, a possível escassez de materiais virgens para atender a demanda, o impacto nas emissões na fabricação e reciclagem das baterias dos veículos elétricos, e, ainda, a importância de entender a influência da matriz da geração de energia elétrica, também nas emissões, é o que este trabalho trata de comparar as emissões na produção e reciclagem de baterias de VEs e, ainda, a influência da matriz de energia elétrica brasileira, comparando-a com a da China, nestes processos.

A escolha de veículos de passageiros se justifica, já que 80% dos registros de veículos leves registrados no Brasil são veículos de passageiros (ANFAVEA, 2021).

Adicionalmente, os governos de alguns países, incluindo China, França, Alemanha, Índia, Japão, Noruega, Coreia do Sul, Espanha, Suécia, Reino Unido e Estados Unidos vem estabelecendo políticas para fomentar a venda de veículos elétricos, que terá forte participação no aumento da quota de mercado das baterias de íon-lítio (MERSKY; ZHOU, 2015; YANG, 2021).

Embora se possa ver uma expansão dos carros elétricos a nível global, o Brasil ainda engatinha neste mercado, com a eletrificação de apenas 200 mil veículos leves em circulação em dezembro de 2023, segundo a ABVE (Associação Brasileira do Veículo Elétrico). Este é um número muito pequeno, quando comparado à frota mundial de, aproximadamente, 10 milhões veículos elétricos. Isso se torna ainda mais dispar, quando se sabe que o Brasil figura entre os 6 maiores mercados de veículos (ICE) (STATISTA, 2021). Isto evidencia que o Brasil ainda precisa, seja via iniciativas privadas e públicas, ou ainda, de mudança de consumo, acelerar a adoção deste tipo de veículo no país.

Veículos Elétricos são considerados como uma transição tecnológica que pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa e o consumo de combustíveis fósseis. Contudo, com a finitude dos recursos naturais, essenciais na fabricação de baterias, utilizados neste tipo de veículo, coloca-se a questão de como essa revolução, na forma de transporte, poderá ocorrer, sem que seja freada por limitações de um rápido esgotamento destes recursos finitos.

Em 2017, as vendas de veículos elétricos excederam a marca de 1 milhão de veículos mundialmente pela primeira vez. Fazendo uma suposição conservadora e levando em consideração que, em média, um pacote de bateria pesa 250 kg e volume de meio metro cúbico, o resíduo resultante atingiria 250 mil toneladas e meio milhão de metros cúbicos, quando estes veículos atingirem o fim de vida útil. Adicionalmente, há a estimativa de 23 milhões de veículos vendidos mundialmente em 2030, o que poderia gerar 5.750.000 toneladas de baterias em fim de vida útil em 2040, assumindo 10 anos de vida útil, para a bateria e 250 Kg por bateria (IAE, 2019). Embora parte deste montante de resíduo possa ser revertido em reuso, em outras aplicações, uma carga acumulativa de resíduos de veículos elétricos e suas baterias será substancial, dada a trajetória de crescimento do mercado de veículos elétricos. Estes resíduos apresentam uma série de desafios em escala (HARPER *et al.*, 2019).

Neste sentido, a reciclagem se torna uma importante ferramenta para reduzir a pressão sobre o ritmo acelerado de extração dos recursos naturais finitos; permitir que o mercado de veículos elétricos siga sua trajetória de crescimento com sua respectiva contribuição na redução dos GEE. Responder à pergunta se a reciclagem das baterias contidas nos VEs contribui para a redução da geração de GEE, e entender como a matriz de oferta de energia influencia neste processo, é uma das contribuições desta pesquisa.

Estes questionamentos ganham ainda mais relevância, quando se aliam a estas dúvidas de pesquisa, com os possíveis benefícios da reciclagem de bateria de íon-lítio para VE para a sociedade, tais como:

- Disponibilizar, para um novo ciclo produtivo, os materiais valiosos contidos nas baterias, tais como: níquel, cobalto, lítio, manganês, cobre alumínio, entre outros, que são, em sua maioria, escassos na natureza;

- Reduzir os resíduos gerados pelas baterias em fim de vida útil, com repercussão na mitigação do impacto ambiental dado pelo depósito destes materiais em aterros sanitários;
- Estender o tempo de aproveitamento dos minerais extraídos do meio ambiente, com conseqüente redução na pressão para a extração de novos minerais em estado virgem;
- Reduzir a possibilidade de escassez dos materiais usados na fabricação das baterias e, assim, frear o processo de eletrificação dos veículos;
- Reduzir a tendência de aumento acelerado dos preços dos minerais usados nas baterias, principalmente: lítio, cobalto e níquel.

Embora alguns estudos sejam encontrados em contextos voltados à análise de materiais, processos, tecnologias de reciclagem, pouco se encontra sobre uma investigação quantitativa dos potenciais impactos econômicos e ambientais, quando se submete este estudo das emissões, sob a análise da matriz de oferta de energia elétrica brasileira. Ainda se sabe pouco sobre a identificação de oportunidades no emprego de modelos circulares na reciclagem de baterias de íon-lítio.

Quando este estudo se propõe a comparar as emissões entre os processos de reciclagem e na manufatura de baterias novas, é porque não está claro qual dos dois processos é mais favorável para redução das emissões. Esta dúvida se posta diante da demanda adicional de energia necessária para realizar todo o processo de reciclagem que, por sua vez, não resulta na recuperação completa de todos os materiais existentes na bateria.

Enquanto a importância da reciclagem é subjetivamente reconhecida, mais esforços são requeridos em análises quantitativas, para confirmar a viabilidade no uso de materiais reciclados em substituição aos materiais virgens para produção de bateria. Estudos prévios tentaram estimar o impacto ambiental causado pela recuperação de baterias. Do ponto de vista econômico, o estudo de Foster *et al.* (2014) encontrou remanufatura, podendo salvar 40% em relação a produção de uma bateria nova. Já Kampker *et al.* (2016), calculou que a remanufatura de baterias de íon-lítio pode reduzir o custo em até €60 KWh-1. Qiao *et al.* (2019), indicou que a receita bruta na reciclagem de bateria é de, aproximadamente, \$ 0,74 kg-1. Entretanto, o estudo de Song *et al.* (2017) identificou que empresas de reciclagem

de baterias podem ter perdas econômicas, quando somente as baterias recicladas são usadas como entrada de material em fabricação de baterias, devido à baixa taxa de utilização dos materiais após reciclagem. Necessitando, segundo o estudo de Song *et al.*, utilizar materiais virgens para complementar os materiais faltantes, após a recuperação parcial. Vale informar, que parte destes estudos versam sobre remanufatura, que, embora faça parte do modelo circular, ele pode divergir dos resultados a serem encontrados para reciclagem.

É observado um grande desvio nos resultados apresentados pelos estudos, tanto na análise econômica, quando ambiental. As razões podem ser principalmente atribuídas por três pontos: diferentes técnicas de reciclagem, fontes de dados não muito claras ou baixa qualidade dos dados e a disparidade regional. Diferentes abordagens de reciclagem, incluindo mecanismos físicos, tratamentos pirometalúrgicos, tratamentos hidrometalúrgicos são usados em diferentes estudos. Além disso, os reagentes utilizados, a taxa de eficiência de recuperação de materiais, e material que é desejado reciclar, variam muito na literatura. Para somar aos desvios dos resultados, há, também, a variação da intensidade de emissão de GEE dada pelas diferentes matrizes de oferta de energia elétrica, nos diferentes países (XIONG *et al.*, 2020).

Visando ajudar a indústria e os pesquisadores a terem uma visão mais concreta desta comparação, foi que o laboratório Argonne desenvolveu o modelo *Everbatt*. Este modelo visa ajudar, por meio da redução de milhares de variáveis necessárias, para realizar este tipo de estudo, visando uma quantidade menor. Desta forma, além de comparar a reciclagem com a fabricação de uma bateria nova, busca-se, nesse estudo, entender qual a intensidade da influência nas emissões de ambos os processos, quando se considera a matriz de oferta de energia elétrica brasileira. Assim, será possível identificar quão promissor serão as implementações de futuros processos de reciclagem no país, além da identificação de oportunidade de aplicação de modelos circulares para aperfeiçoar o processo de reciclagem.

1.3 Objetivos do trabalho

1.3.1 Objetivo geral

Analisar como a matriz de oferta de energia elétrica brasileira influencia nas emissões, na fabricação e na reciclagem de baterias para veículos elétricos comprando-a com as emissões dadas pela oferta da matriz de energia elétrica da China.

1.3.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, foram definidos:

- a) Comparar as emissões de gases de efeito estufa entre a manufatura de uma bateria nova e a reciclagem de baterias em fim de vida útil;
- b) Analisar a influência da matriz de oferta de energia elétrica no Brasil nas emissões durante o processo de reciclagem e fabricação de novas baterias comparando com a China;
- c) Identificar oportunidades de melhoria na reciclagem das baterias de veículos elétricos de passageiros com base em modelos circulares a serem aplicados na indústria.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Estudos trazidos da literatura e analisados criticamente, junto a fontes pesquisas, são apresentados em seções, que ajudam a balizar a fundamentação teórica desta pesquisa.

As duas primeiras seções dedicadas à economia circular e modelos circulares, respectivamente, são fundamentais para entender o porquê dos movimentos, motivados por adoções de medidas mais sustentáveis, têm ganhado, cada vez mais, palco nos encontros dos líderes de diversas nações, com acordos globais sendo assinados, voltados a mitigar o impacto da ação humana no clima.

Ademais, das múltiplas formas de atuar, a fim de reduzir o impacto antrópico no Planeta Terra, a economia circular vem se apresentando como uma alternativa ao modelo linear. A reciclagem se apresenta como um dos modelos circulares, tanto por reduzir a extração de recursos virgens do meio ambiente, como por permitir uma utilização mais prolongada dos materiais já extraídos.

Como o recorte de pesquisa, já devidamente justificado, dá-se na reciclagem de baterias de veículos elétricos, cuja a adoção tem como um dos principais motivadores a redução da emissão de gases de GEE, então, passa a ser fundamental compreender qual a relevância do segmento de transporte nas emissões. Sendo, portanto, dedicada uma seção sobre a descarbonização do transporte.

O veículo elétrico, pertencente ao segmento do transporte, tem a expectativa de reduzir emissões, por deixar de queimar combustíveis fósseis. Contudo, surge a necessidade de recarregar suas baterias com energia elétrica. Fica a necessidade de entender como são distribuídas as fontes de energia elétrica e quão limpas, no sentido de emissões, são as suas fontes. Da necessidade desta compreensão que se dedicará uma seção sobre matriz de oferta de energia elétrica.

Não se teria uma compreensão ampla desta pesquisa, sem que se pudesse aprofundar no funcionamento das baterias utilizadas e como se dão os processos de reciclagem deste importante componente dos veículos elétricos. Para ampliar esta compreensão, duas seções estão presentes, sendo elas: baterias de íon-lítio e reciclagem de baterias íon-lítio, respectivamente. Um entendimento prévio das emissões na reciclagem se apresenta, mesmo antes dos resultados da pesquisa; assim, dedicou-se uma seção às emissões na reciclagem.

Na sequência, é apresentado o modelo usado para tentar simplificar a miríade de definições e parâmetros, tanto de entrada, quanto de saída, e que se fazem necessários para realizar uma pesquisa como esta. Por fim, apresenta-se o modelo conceitual adotado, que ajuda a compreender como as variáveis do modelo adotado se correlacionam com as demais variáveis necessárias para se conseguir extrair os resultados esperados por esta pesquisa.

2.1 Economia circular

A sociedade está atravessando um longo processo de transição da imagem natural, que o homem tem dele mesmo e de seu ambiente. Os homens primitivos, e ampliando para os homens das primeiras civilizações, imaginavam-se vivendo em um mundo plano infinito. Desta forma, pensava-se que sempre haveria algum outro lugar para habitar, caso algo não desse certo onde estavam instalados, seja pela degradação das relações sociais, quanto pelos danos ao ambiente natural. Gradualmente, contudo, o homem foi se acostumando com a noção de terra esférica, e uma esfera fechada da atividade humana (BOULDING, 1966). Mesmo com o passar de vários anos, o homem ainda não conseguiu empregar por completo uma visão integrada em relação à extração de recursos naturais e o seu aproveitamento.

Com o aumento do desenvolvimento e do consumo industrial, intensificou-se o debate sobre a maior demanda por recursos naturais extraídos do meio ambiente. Junta-se à preocupação do uso intenso de recursos, a produção de resíduos e poluição. Esta realidade impõe riscos, não só para a viabilidade das empresas a longo termo, mas, também, para a conservação do planeta e a preservação das condições, que tornam viável a vida humana. Modelos que extraem mais recursos do que é capaz de regenerar, junto ao aumento da população mundial, tendem a elevar a demanda por recursos naturais já escassos e a um conseqüente aumento da degradação ambiental (ALMEIDA *et al.*, 2016).

A degradação dos sistemas naturais traz a emergente necessidade de alteração do modelo operacional da economia. O esgotamento das reservas afeta a produtividade das economias. Contribui, ainda, para o cenário de esgotamento de recursos, mudanças climáticas, perda de biodiversidade, a degradação da Terra e a

poluição dos oceanos (DOS SANTOS, 2019). Esta intensiva mudança, provocada no ambiente natural, influencia as empresas e setores que dependem de recursos finitos e não renováveis ou, quando renováveis, que não sejam contemplados com uma prática de renovação aplicada.

As empresas adotaram práticas mais sustentáveis, não apenas por força de atendimento à legislação, pressão dos clientes e stakeholders, mas, também, para um melhor aproveitamento dos recursos, maior participação no mercado, redução de custos e, ainda, por abrir grande possibilidade de fomento às inovações (MAY; LUSTOSA; VINHA., 2010).

Os efeitos negativos, causados pelo modelo linear de extração, produção e descarte, ameaçam a estabilidade da economia e a integridade dos ecossistemas naturais (GHISELLINI *et al.*, 2016; RITZÉN *et al.*, 2017). Como alternativa ao paradigma do consumo dado pela economia linear, onde é empregada a lógica da coleta de recursos, produção, consumo e descarte de resíduos, surge o modelo de negócio baseado na economia circular (EC). Este modelo permite mitigar a geração de resíduos, assim como reaproveitar bens, cuja viabilidade de seu reuso exista.

Stahel, em 1982, ganhou o prêmio Mitchell Internacional sobre Desenvolvimento Sustentável. No seu artigo, intitulado “*The Product-Life Factor*”, ele já correlaciona a extensão da vida útil de produtos com a redução da demanda por extração de recursos naturais e com uma sociedade mais sustentável. O artigo do Stahel vai além e apresenta alternativas para extensão da vida útil de produtos, com exemplos que demonstram a redução dos custos e de energia consumida com o reparo e o condicionamento de um produto, quando comparado com o custo de produção de um produto novo. Sua perspectiva adiciona o aspecto da oportunidade do aumento da indústria da transformação, da possibilidade de tornar os produtos mais acessíveis a classes sociais de menor poder aquisitivo e, principalmente, sua respectiva repercussão positiva na redução de custos, energia e consumo de recursos naturais.

Desta forma, este artigo pode ser considerado a primeira manifestação acadêmica em direção a um desenho mais conciso de modelo circular. Alguns autores identificaram um circuito fechado de fluxo de material, no qual o sistema econômico passa a dar lugar ao princípio onde “tudo é uma entrada para o resto” (MERLI *et al.*, 2018; SU *et al.*, 2013). O termo economia circular foi usado, pela primeira vez de forma explícita, por dois britânicos, economistas ambientais, Pearce

e Turner (1990), na obra *Economics of Natural Resources and the Environment*. Eles apontaram que uma economia tradicional aberta, não circular, foi desenvolvida sem a perspectiva de reciclagem já integrada ao processo, que tratava o ambiente como um reservatório de resíduos (SU *et al.*, 2013).

O modelo de economia circular pode ser definido como um sistema regenerativo, no qual os recursos de entrada, resíduos, emissões e a perda de energia precisam ser minimizados para retardar, fechar e estreitar a circularidade de materiais e energia (GEISSDOERFER *et al.*, 2017). Retardar a duração dos ciclos implica prolongar e intensificar o uso dos produtos, para reter seu valor ao longo do tempo, enquanto fechar mais o ciclo dos recursos facilita a reciclagem, para restaurar e recriar valor, a partir de materiais usados (BOCKEN *et al.*, 2016). Estreitar os ciclos do uso dos recursos, implica soluções ecologicamente eficientes, que reduzam a intensidade do uso de recursos e impacto ambiental por unidade de produto ou serviços (MENDOZA *et al.*, 2019).

De alguns anos para cá, o conceito de economia circular vem ganhando destaque das empresas, instituições e acadêmicos (GHISELLINI *et al.*, 2016). Na Tabela 1, é possível ver autores que deram diferentes contribuições sobre o tema economia circular. As abordagens vão desde os efeitos negativos da economia linear, passando por uma abordagem de como a economia circular pode contribuir para uma sociedade mais sustentável e, então, alcançando uma compreensão das contribuições de autores, com um olhar que já incorpora a economia circular e passa a analisar, numa visão mais ampla, a repercussão do seu uso nos aspectos econômico, tecnológico, ambiental e social.

Tabela 1 – Diferentes contribuições sobre economia circular

Contribuições	Referências
Os efeitos negativos dados pela economia linear estão ameaçando a estabilidade das economias e dos ecossistemas naturais, que são essenciais para a sobrevivência da humanidade e proposições de melhorias.	LETT, 2014; PARK <i>et al.</i> , 2014; SU <i>et al.</i> 2013; GENG <i>et al.</i> , 2012; ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; FENG <i>et al.</i> , 2007; YUAN <i>et al.</i> , 2006; YAP, 2005).

Contribuições	Referências
Economia circular vista como um novo modelo de negócio que possa contribuir para uma sociedade em desenvolvimento sustentável e mais harmoniosa.	FENG <i>et al.</i> , 2007; GENG <i>et al.</i> , 2008; NESS, 2008; MATHEWS, 2011; LETT, 2014; NAUSTDALSLID, 2014, LEWANDOWSKI, 2016, D'AMATO <i>et al.</i> , 2017
Desenvolvimento sustentável requer uma análise balanceada e simultânea econômica, ambiental, tecnológica e social	REN <i>et al.</i> , 2013, D'AMATO <i>et al.</i> , 2017, LEWANDOWSKI, 2016

Fonte: Elaborado pelo autor.

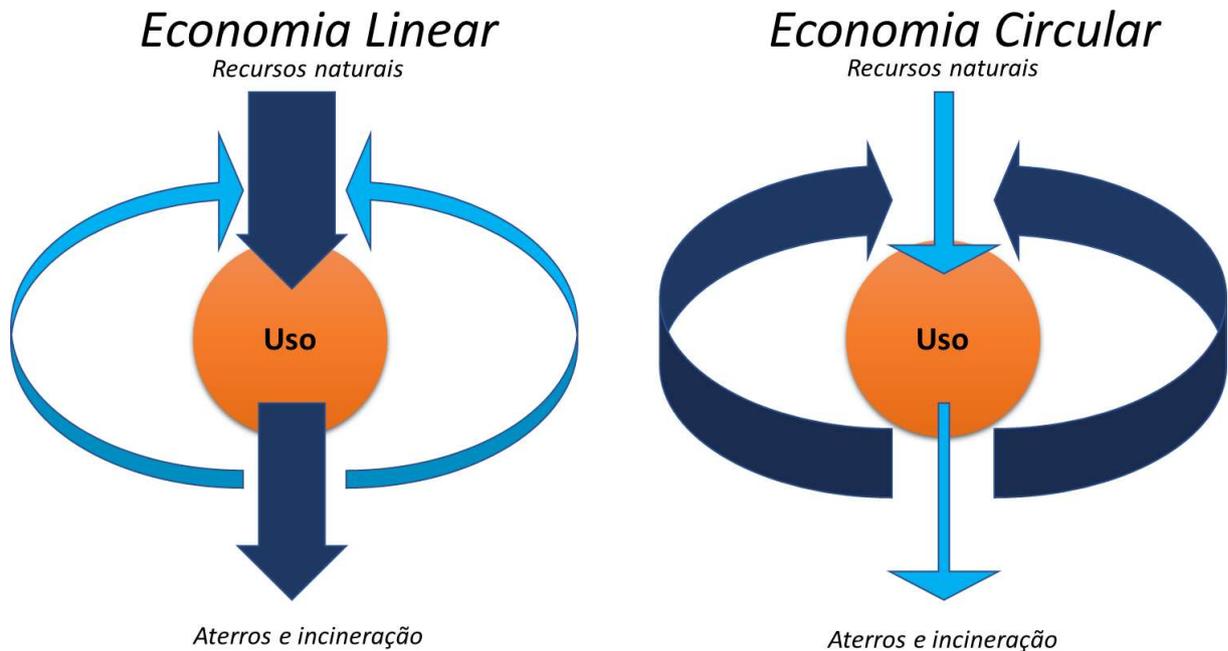
Mais recentemente, o termo economia circular foi apresentado de diversas formas na literatura. Há diferentes definições encontradas por diferentes autores (GHISELLINI *et al.*, 2016; KIRCHHERR *et al.*, 2017; KORHONEN *et al.*, 2018). Entretanto, todos concordam que se trata de conceitos, onde os princípios são baseados em:

- i. Conceber produtos, serviços e modelos de negócio que excluam a produção de resíduos e de poluição (por exemplo, materiais tóxicos);
- ii. Manter produtos e materiais em utilização, preferencialmente no seu valor econômico e utilitário mais elevado, pelo máximo de tempo possível;
- iii. Garantir a regeneração dos recursos materiais utilizados e dos sistemas naturais subjacentes, excluindo externalidades negativas desde o princípio.

(COMISSÃO EUROPEIA, 2015, ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015, p.7-8).

A Figura 3, nos permite, de forma bem simples, compreender o que se busca alcançar, por meio da migração de uma economia linear para circular. Assim, independente da abordagem dos autores ao redor do mundo. A ideia central é a mesma: reduzir as extrações de recursos naturais ao mínimo possível e só descartar os rejeitos, que, por sua vez, são tudo aquilo que não é possível reciclar ou reaproveitar. Assim, um maior volume dos resíduos, devidamente manipulados, reingressará na cadeia produtiva, ganhando uma extensão de vida útil.

Figura 3 – Da economia linear para a circular.

Da economia linear para a circular

Fonte: Adaptado de Potting *et al.*, 2017, p 9.

A migração do modelo linear para o circular requer uma mudança de paradigma, partindo da visão do aumento de custo correlacionado à implementação de medidas ambientalmente sustentáveis, para uma visão de oportunidades de sustentabilidade ambiental e corporativa. Aqui, surge o desafio de buscar alternativas que viabilizem, ao mesmo tempo, o desenvolvimento econômico, avanços na esfera social e a busca por não causar degradações irreversíveis ao meio ambiente.

Adicionado a esta visão, a migração de modelo poderá fazer frente ao novo paradigma do consumo, priorizando a extensão da vida útil dos produtos a sua troca. Esta é, inclusive, uma das iniciativas que compõem o modelo circular dado pelo PLE (*Product Life Extension*), ou extensão da vida do produto. A indústria, no lado da produção, precisará vislumbrar novos modelos de negócios que permitam obter retorno financeiro que estejam além do momento de compra. Uma alternativa é o modelo que prevê venda de serviços e a retenção da propriedade do produto pela indústria e ou parceiros comerciais RPO (*Retain Product Ownership*). Na contramão,

há a conhecida obsolescência tecnológica que tende a impor um ciclo cada vez mais reduzido. Neste último caso, uma possível alternativa se apresenta, por meio da contemplação, desde a concepção do projeto do produto, de alternativas de atualizações tecnológicas sem a necessidade do descarte ou de um descarte mais tardio. Uma aplicação neste sentido, está no exemplo dos carros elétricos, onde se busca criar baterias modulares, cujos módulos podem ser substituídos por novos, sem a necessidade de substituição de toda a bateria. Inclusive, há outras iniciativas neste setor, onde estas baterias são reutilizadas em outras aplicações estacionárias, como na acumulação de carga de energia gerada pelos sistemas de geração de energia elétrica intermitente, como a eólica e ou fotovoltaica.

A economia circular (EC) se apresenta em diferentes abordagens de modelo de negócio, desde o reuso dos resíduos, até então sendo descartados pelo modelo linear, passando pelo estímulo ao reparo e manutenção, para o aumento da vida útil dos produtos. A abordagem de uma “segunda vida” dos bens já era prevista por (STAHEL *et* REDAY-MULVEY, 1981) e que hoje se pode correlacionar com os conceitos de PLE. Já, a abordagem RPO, tendo ganhado força com os serviços atuais, oferecidos nos modelos de XaaS, *Anything as a Service*, vendas como serviço. Sua aplicação tem se estendido para diversos ramos incluindo, justamente, o mercado de veículos de passageiros na modalidade de locação com contratos por períodos mais prolongados.

Capturar o valor que é preservado em um produto após seu uso, é fundamental para a economia circular. Isto pode ocorrer, por meio do reuso direto, recondiçãoamento, remanufatura ou reciclagem. Remanufatura e reuso prolongam o ciclo de vida do produto e retardam o clico de uso dos recursos extraídos do ambiente. O processo de reciclagem e reuso são complementares, e um maior benefício de sustentabilidade pode ser alcançado, se as baterias dos veículos elétricos forem, primeiro, reutilizadas e, depois, recicladas (OLSSON *et al.*, 2018).

Os modelos circulares são relevantes para esta pesquisa, uma vez que, quando aplicados, o momento de reciclagem pode ser deslocado no tempo. Sendo assim, se houver uma reutilização ou remanufatura antes da reciclagem, então, a vida útil da bateria será prolongada ao máximo, retardando o momento da reciclagem. Além de estender o uso das baterias e postergar sua reciclagem, há modelos que podem, ainda, tornar o processo de reciclagem mais fácil, como é o caso do modelo DFR.

No Brasil, a economia circular ganha forma prática, por meio da logística reversa por força de lei, através do artigo 3º, inciso XII, da Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010.

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

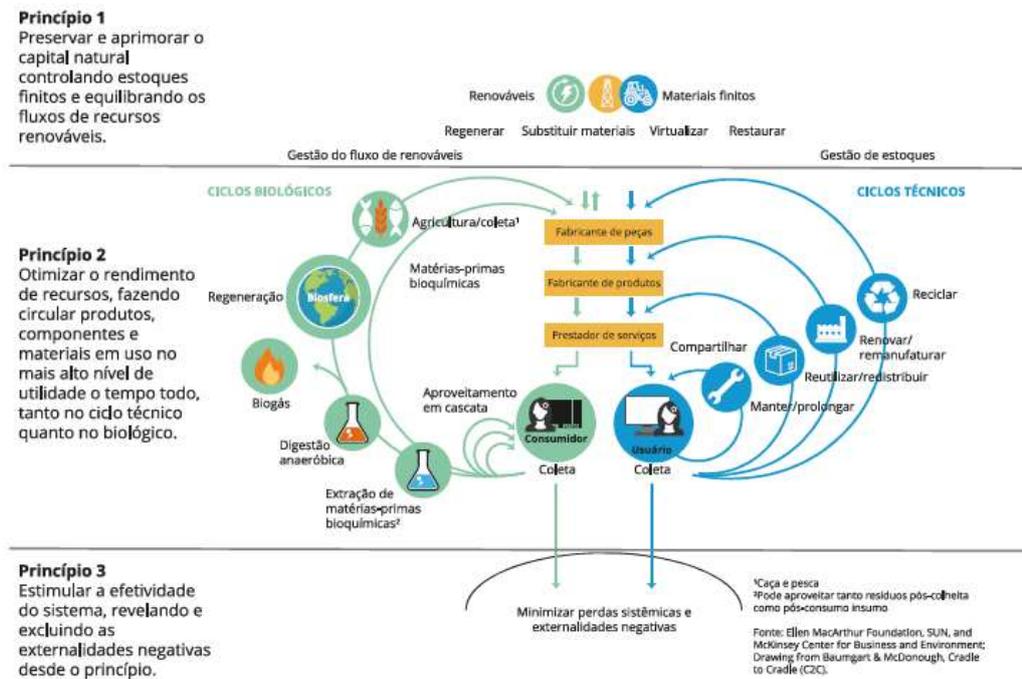
Esta lei é empregada, de forma obrigatória, em alguns casos listados no artigo 33 da Lei:12305, tais como: agrotóxicos, seus resíduos e embalagens, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens, lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, produtos eletroeletrônicos e seus componentes.

Apesar de todos os esforços mundiais com o modelo circular do clube de Roma, em 1972, quando foi publicado que o mundo consumiu 28 bilhões de toneladas, o mundo passou a consumir 54,9 bilhões de toneladas em 2000, e ultrapassou 100 bilhões de toneladas em 2019. Desta forma, fica evidente que houve uma aceleração de consumo em vez de uma redução. De 1972 a 2000, um intervalo de 28 anos, foram consumidos 26,3 bilhões de toneladas de recursos naturais, enquanto que de 2000 a 2019, em 19 anos, foram consumidos 45,1 bilhões de toneladas. Além deste cenário de aceleração do consumo, ainda há apenas 8,6% destes recursos sendo reinseridos na indústria, via o modelo circular, *The Circularity Gap* (WIT *et al.*, 2019).

A fundação ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, que é uma fundação ativa na publicação de matérias voltadas à economia circular e citada em grande parte das publicações acadêmicas voltadas ao tema, elaborou o modelo circular EMF apresentado na Figura 4 onde é possível expandir a compreensão para além da apresentada na Figura 3. Pelo modelo, é possível ter a visão de gestão do fluxo de itens biológicos e químicos renováveis, onde parte dos resíduos pode regressar para a natureza, beneficiando-a. Na mesma figura, é possível, também, ver o modelo circular de itens não renováveis, que, embora não retorne parte de seus resíduos para beneficiar o meio, ainda assim, reduz a extração de materiais virgens da natureza, intensifica o uso compartilhado de produtos, estende a vida útil dos

produtos no mercado, remanufatura-os, quando possível e, por fim, reaproveita os materiais recicláveis, para reingressarem na cadeia produtiva, minimizando a geração de rejeitos.

Figura 4 – Modelo Circular EMF



Fonte. Ellen MacArthur Foundation, 2015.

Na busca para entender quais são os modelos disponíveis que podem ser empregados pelas empresas em processos, a fim de tornar a economia circular mais aplicável, dedica-se uma seção, pretendendo ampliar a compreensão dos modelos circulares e como eles podem influenciar a economia circular.

2.2 Modelo circular

Esta seção visa ajudar na análise do emprego da economia circular, por meio do entendimento de modelos circulares e seus impactos para a viabilidade do emprego da economia circular. Esta seção foi intencionalmente nomeada de modelo circular, em vez de apenas modelo de negócio circular e teve o propósito de tentar criar uma dimensão de aplicabilidade dos modelos circulares em processos, sem a necessidade de que esta aplicação esteja conectada, necessariamente, com uma

perspectiva de ganho financeiro. Contudo, evidentemente, a aplicação de um modelo circular não exclui a captura de valor, e até eventual geração de lucro para a organização. No modelo circular, prolongar o valor é o principal objetivo, considerando que valor significa muito mais do que apenas riscos e capturar as oportunidades, com gestão de lucros para a organização (KRAMER; PORTER, 2011; STAHEL, 2016).

Para ser possível obter valor à sociedade como um todo, é necessário mudar modelos mentais atuais. Seguindo esta mudança, novos negócios, nova cadeia de valores e novas condições promotoras da implementação do modelo circular, tais como: políticas públicas e tecnologias precisam ser desenvolvidas, para que se configure um sistema de negócio circular (OMETTO *et al.*, 2018).

Há modelos que podem trazer maiores ganhos no processo de reaproveitamento de materiais. O DFR (*Design for Recycling*), por exemplo, pode trazer ganhos financeiros por facilitar a reciclagem futura de materiais eventualmente ainda valiosos ao fim da vida útil do produto. Este ganho, pode não ser captado pela empresa que desenvolveu e investiu em novas tecnologias que facilitem a reciclagem, e, sim, por outra, que vier a reciclá-los. Com isso, fica, portanto, entendido que a ideia de criar o modelo circular DFR estaria mais conectada à ideia de intensificar o reaproveitamento dos materiais recicláveis do que capitalização financeira direta.

É verdade que parte dos modelos aqui compartilhados também são encontrados na literatura, ligados a modelos de negócios circulares pelas abordagens PLE (*Product Life Extension*), ou extensão da vida do produto e RPO (*Retain Product Ownership*), ou retenção da propriedade do produto, ou o já mencionado, DFR (*Design for Recycling*), ou concebido para reciclagem.

Este trabalho, ao realizar a análise do impacto ambiental nas emissões de GEE nas reciclagens de baterias de íon-lítio, propõe oportunidades de implementação do modelo circular mais aderentes à estratégia das empresas de reciclagem de baterias veiculares, seja com base em experiências bem-sucedidas já realizadas no exterior, ou até de achados ao longo da elaboração do trabalho, que são aplicáveis à reciclagem de baterias elétricas de veículos.

As baterias são, sem dúvida, um elemento-chave de todo um sistema maior, que compõe a energia de baixo carbono. Ao mesmo tempo, elas são caras e geram óxido de carbono para ser produzidas. Sob a ótica do modelo circular, baseada no

conceito dos Rs, Figura 5, tem-se o modelo de POTTING *et al.*, (2017) que chegou a relacionar até 9 Rs dentro do modelo circular.

Figura 5 – Quadro dos 9Rs

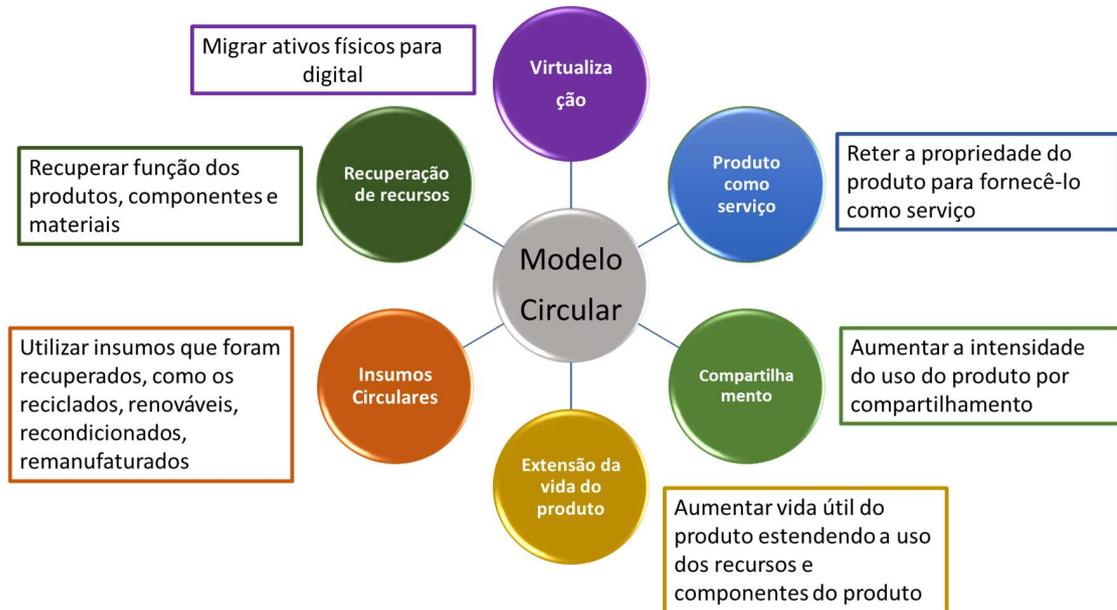
		Estratégias	
Economia circular	Uso mais inteligente	R0 Recusar	Tornar um produto desnecessário através do uso de outro produto que ofereça a mesma função
		R1 Repensar	Tornar o uso do produto mais intenso (ex. pelo compartilhamento do produto)
		R2 Reduzir	Aumentar a eficiência na fabricação do produto ou uso através da redução de uso de recursos naturais e materiais
	Estender a vida útil do produto em suas partes	R3 Reutilizar	Reutilização de produto descartado por outro usuário que ainda está em boa condição de funcionamento e preenche suas
		R4 Reparar	Reparar e manutenção de produto defeituoso de forma que ele possa ser usado em sua função original
		R5 Renovar	Restaurar um produto antigo permitindo sua atualização
		R6 Remanufaturar	Usar partes de produtos descartados em um novo produto com a mesma função
		R7 Reaproveitar	Usar partes de um produto ou como um todo em um novo produto com outra função
	Aplicação útil de materiais	R8 Reciclar	Processar material para obter o mesmo nível de qualidade
R9 Recuperar		Incineração do material com recuperação de energia	
Economia Linear			

Fonte: Adaptado de Potting *et al.*, 2017, p.5.

Além dos Rs elencados por Potting, a literatura também relaciona modelos circulares com base na abordagem que será dada para a comercialização de produtos. Na Figura 6, pode-se ver os modelos mais comumente encontrados pela literatura. Aparecendo, não necessariamente, nesta ordem: virtualização e sua preocupação em reduzir ativos físicos; produto como serviço, a fim de manter a propriedade em uma empresa de forma que ela possa manter os produtos em pleno funcionamento; compartilhamento que permite um uso mais intenso do produto, evitando sua subutilização; extensão da vida útil dos produtos, promovendo bens mais duráveis; insumos circulares, que permitem conceber o uso dos insumos, já com olhar na capacidade de seu aproveitamento e recuperação de recursos, com função de dar nova utilização de produtos e suas partes.

O termo sustentabilidade costuma ser empregado, tanto no contexto do meio ambiente, quanto da viabilidade sustentável das corporações. Além disso, ainda se correlaciona com os modelos circulares na forma de oportunidades, geradas pela economia circular (EC). Afinal, o emprego da Economia Circular pode auxiliar as empresas e reduzirem os impactos ambientais catastróficos e, assim, criar um ambiente mais previsível.

Figura 6 – Modelo circular.



Fonte: Adaptado de Bertassini, 2018, p 50.

É válido considerar ainda, que o termo sustentabilidade pode ser empregado de forma ambígua, sendo usado numa diversidade de conceitos ao longo dos anos, incluindo responsabilidade social corporativa, sustentabilidade corporativa, liderança responsável, desenvolvimento sustentável, mudanças climáticas, desempenho ambiental sustentável e economias circulares, modelos de negócios verdes, sustentabilidade no negócio, abordagem ESG (*Environmental, Social and Governance*) ou, em português, ASG, referindo-se à Ambiental, Social e Governança, suficiência econômica e modelo de negócio natural (DYLLICK, 2002; DOH *et al.*, 2014; BRANNMARK, 2012; PAUL, 2017; KETPRAPAKORN, 2019; SARDÀ *et al.*, 2018). Ainda, sustentabilidade é entendida por englobar os três elementos de ASG, já que estes três elementos contribuem para a sustentabilidade da empresa.

Dada a ampla definição sobre o tema sustentabilidade, a definição aqui escolhida para melhor atender este trabalho de pesquisa, mesmo não sendo recente, é a que melhor representa, de forma clara, o termo desenvolvimento sustentável: “desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987).

Mesmo sem a aplicação de princípios circulares, a revolução tecnológica melhorará a produtividade do uso dos recursos, mas no caminho de desenvolvimento atual, a capacidade de recuperação e a falta de um sistema integrado não resolverá os problemas de falta de recursos e das externalidades. (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Com a degradação do meio em que se vive, muitas vezes impulsionada por modelos de negócio mais preocupados com o melhor retorno financeiro a curto prazo, do que os modelos que tenham uma preocupação com recursos disponíveis a longo prazo. Neste sentido, este trabalho se propõe a investigar as emissões de gases de efeito estufa, como externalidade negativa. Para melhor entender como se dá este processo no segmento de transportes, será dedicado uma seção sobre descarbonização. Esta temática se justifica por ser chave no entendimento de como os países devem buscar o atingimento das metas globais de redução de emissão GEE, e até a neutralidade de carbono no segundo setor, que mais contribui para as emissões. Para se ter uma visão mais ampla das emissões e todo o ciclo do produto, do berço a berço, é necessário mapear todas as emissões dos diferentes componentes envolvidos na produção e reciclagem das baterias dos veículos elétricos. Visando simplificar a miríades de dados e variáveis necessários para se obter resultados confiáveis para o tema que essa pesquisa apresenta, é que se optou pela adoção de um modelo utilizado pela indústria e pela academia chamado *Everbatt*.

2.3 Modelo *Everbatt*

Everbatt é um modelo fechado desenvolvido pelo Laboratório Nacional Argonne do Departamento de Energia dos Estados Unidos, visando melhorar o entendimento dos stakeholders sobre o desempenho ambiental e de custos, na reciclagem de bateria. O *Everbatt* ajuda no desenvolvimento de planejamento de reciclagem de baterias para contribuir com um futuro mais consciente com o meio ambiente, também, economicamente viável. Este é o primeiro modelo disponível publicamente de impacto ambiental, que inclui o consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa e custo na manufatura, nos diferentes processos de reciclagem de baterias.

O modelo principalmente considera os processos de reciclagem: por pirometalurgia, por hidrometalurgia e reciclagem direta. Todos esses são previstos, tanto para o cátodo, quanto para eletrolítico. Vale informar que, enquanto a reciclagem de grafite e outros componentes inativos como coletor de corrente são possíveis e deveria ser encorajada, eles estão fora do escopo deste trabalho, devido ao menor impacto ambiental e econômico.

O modelo *Everbatt* é considerado uma importante ferramenta para a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de baterias de íons de lítio. Ele permite que os cientistas mensurem os custos e os impactos ambientais na fabricação e reciclagem de baterias, com diferentes composições químicas e, ainda, em distintos processos de reciclagem.

O modelo tem entre seus benefícios:

- Ajudar a indústria progredir na direção de um sistema de reciclagem otimizado, incluindo os aspectos econômicos, de uso de energia e ambiental;
- Pode ser adaptado para analisar químicas futuras de baterias ou produtos totalmente diferentes;
- Fornecer uma referência uniformizada para todos os *stakeholders*.

Felizmente, essa pesquisa já pode adotar a atualização do modelo *Everbatt* publicado pelo laboratório Argonne em junho de 2023. A adoção dessa versão mais recente, já nesse trabalho, demandou ainda mais esforço do que o necessário na adoção do modelo publicado em 2020. A escolha por parametrizar o modelo mais recente, mesmo com a versão anterior já parametrizada, foi tomada, a fim de tornar esse trabalho ainda mais atualizado, e com o consequente aumento do potencial do uso dos resultados apresentados pela indústria nascente de reciclagem de baterias no país.

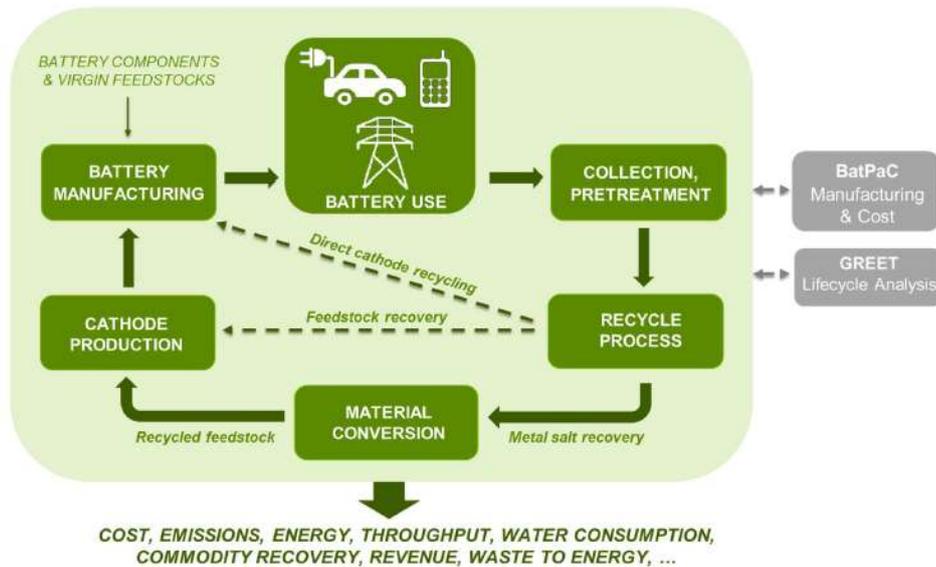
2.3.1 Escopo e objetivo

O objetivo mais abrangente do modelo *Everbatt* é ajudar nas decisões sobre reciclagem e acelerar o desenvolvimento de uma rede de suprimentos mais sustentável para baterias. Especificamente, o *Everbatt* permite aos usuários: (1) fazer um *benchmark* entre a produção de baterias com materiais reciclados, comparando com a produção de baterias com materiais virgens, a fim de prover uma visão mais holística dos benefícios e desafios; (2) estimar os impactos em custo e

ambientais das práticas industriais existentes, em conjunto com a cadeia de suprimentos de baterias; (3) identificar pontos cruciais de custo e de impacto ambiental e avaliar potenciais consequências nas dinâmicas de mercado e decisões de negócios e (4) fazer comparativo entre novas tecnologias e processos em relação as práticas existentes na indústria e analisar os impactos em custo e ambiental com as mudanças de tecnologias, processos e aumento de escala.

O modelo *Everbatt* é mostrado na Figura 7 e consiste em seis módulos: fabricação de bateria com material virgem, transporte e coleta de bateria, reciclagem de bateria, conversão de materiais, produção de pó de cátodo e fabricação de bateria com materiais reciclados. O módulo de fabricação com materiais virgens é um módulo independente e serve de referência comparativa, enquanto os demais 5 módulos compreendem o circuito fechado de reciclagem. O módulo de coleta e transporte, junto com o módulo de reciclagem, também podem ser usados de forma independente para avaliar reciclagem de circuito aberto, ou em combinação com os módulos de conversão de materiais e produção de cátodo, para avaliar a reciclagem em circuito fechado, do ponto de vista do material, apenas. Dependendo do processo de reciclagem de bateria em análise, o módulo de conversão e módulo de produção de pó de cátodo podem ser evitados no cálculo. Deve ficar esclarecido que a fase de uso da bateria não está inclusa no *Everbatt*, porque, diferente da análise de outros estágios do ciclo de vida da bateria, o estágio de uso não pode ser modelado independentemente das potências das baterias ou serviço dos fornecedores de baterias. Por exemplo, modelar a fase de uso de uma bateria de automóvel necessita da modelagem da fase de uso do VE.

Para o processo de reciclagem, o *Everbatt* considera os processos de reciclagem por pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta do cátodo. Os processos atuais de reciclagem podem ser principalmente classificados em 3 tipos, sendo eles, pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta (CHEN *et al.*, 2019; DUNN *et al.*, 2012; ELWERT *et al.*, 2018; FAN *et al.*, 2020; HARPER *et al.*, 2019; HUANG *et al.*, 2018).

Figura 7 – Esquemático do modelo *Everbatt*.

Fonte: ANL, Argonne National Laboratory, 2019

Para baterias, as composições químicas disponíveis no modelo são LiCoO_2 (LCO), LiMn_2O_4 (LMO), LiFePO_4 (LFP), $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ (NMC111), $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ (NMC622), $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ (NMC811), e $\text{LiNi}_{0.85}\text{Co}_{0.1}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA). Para regiões geográficas, o *Everbatt* inclui atualmente: Califórnia, US (média nacional), China e Korea. Essa pesquisa visa, por meio de análise documental, levantar os dados para poder adequar o modelo e obter resultados para o contexto de custo, mas, principalmente, do impacto ambiental dados pelas emissões de GEE, quando se aplica a oferta da matriz de energia elétrica do Brasil, no que diz respeito às emissões nos processos de reciclagem e fabricação.

Em geral, os dados de entrada para cada módulo incluem os materiais e fluxo de energia ao longo do processo, o equipamento usado no processo, o rendimento ou produtividade e a localização geográfica dos processos. Com esses dados de entrada, o *Everbatt*, então, estima: (1) o custo do processo, baseado no modelo *BatPac* (*Argonne's Battery Performance and Cost*) e modelo de custo para plantas químicas proposta por Peters *et al.* (PETERS *et al.*, 2003); (2) o impacto ambiental do processo, baseado nos dados do histórico do modelo *GREET* (*Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*) gases de efeito estufa, emissões reguladas e energia usada no transporte, usado para calcular as emissões (Argone 2019b).

Esse trabalho de pesquisa se concentrará na parte relacionada ao impacto ambiental do modelo. A parte de custos é bastante relevante, ainda mais para um trabalho de dissertação no curso de gestão e negócios. Contudo, a dificuldade de obtenção de dados confiáveis pela incipiência da indústria de reciclagem no Brasil, torna esta tarefa bastante difícil e com potencial de tornar o resultado obtido com menor nível de consistência.

O modelo *Everbatt*, na versão atual, considera modelos de baterias no nível de célula, porque, segundo o laboratório que o desenvolveu os dados disponíveis para conjuntos de células e BMS (*Battery Management System*), ainda não estão disponíveis. O BMS é um circuito que está integrado aos conjuntos de módulos de baterias, para ajudar a equalizar a carga e descarga das células e módulos de forma mais homogênea.

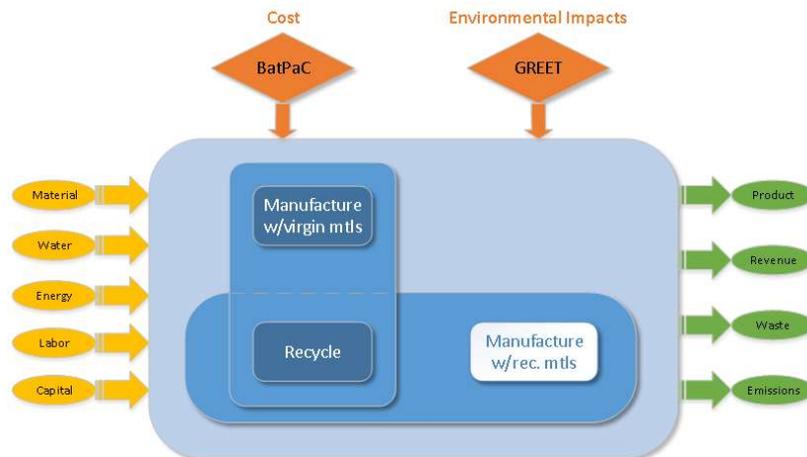
Com o modelo *Everbatt* é possível realizar um comparativo entre os custos e emissões provenientes da reciclagem de bateria, em relação àqueles advindos da fabricação da bateria, através da extração de materiais virgens da natureza (ANL, 2018a; DAI Q. *et al.*, 2019; XIONG *et al.*, 2020). Este modelo potencializa o uso dos modelos anteriores, *BatPaC*, que foi desenvolvido para mensurar o custo de fabricação de bateria e o modelo *GREET* (ANL, 2018b; DUNN *et al.*, 2015). Apesar do modelo *Everbatt* ter sido desenvolvido recentemente, os modelos *BatPac* e *GREET*, nos quais o modelo *Everbatt* se baseia, já possui um amplo uso em análises de LCA (*Life Cycle Assessment*), avaliação de ciclo de vida em baterias para veículos elétricos (CIEZ *et al.*, 2017; DUNN *et al.*, 2012; XIONG *et al.*, 2020). Uma importante melhoria da versão do modelo *Everbatt*, publicado em junho de 2023 pelo laboratório Argonne, trata-se do emprego do método estado da arte para estimar custos de plantas de reciclagem de Towler *et Sinnott*, 2021.

O Modelo *Everbatt*, junto ao *BatPac* e *GREET*, acomodam milhares de dados, podendo ser usados para quantificar o impacto ambiental do ciclo de vida das baterias e custos de produção e de materiais envolvidos na fabricação e reciclagem de baterias. Na Figura 8, é possível obter uma melhor compreensão da forma como os módulos interagem, e quais são as variáveis independentes (amarelo), as variáveis moderadoras (laranja) e as variáveis dependentes (verde).

Os retornos que o modelo entrega, quando devidamente ajustado e parametrizado, são, em parte, os retornos que este trabalho de pesquisa obteve para as análises quantitativa e comparativa na reciclagem de baterias, e das

diferentes ofertas de matrizes de energia elétrica. Dessa forma, o modelo *Everbatt* tem aderência com os objetivos deste trabalho, sendo, portanto, esse o motivo de sua escolha para auxiliar nesta pesquisa.

Figura 8 – Esquemático *Everbatt*



Fonte: Argonne Laboratory Center

Usando o modelo *Everbatt*, é possível estimar as emissões associadas à manufatura e reciclagem de baterias de veículos elétricos, para alguns países já disponíveis no modelo, tais como: Estados Unidos, China e Coreia do Sul. Para estimar, no caso do Brasil, foram inseridos dados, obtidos em análise documental, de fontes de informação sobre a matriz de oferta de energia no Brasil e, ainda, informações de custos. Os resultados obtidos são afetados por uma variedade de fatores que, entre outros, incluem a intensidade de energia no processo fabril, as distâncias envolvidas na cadeia de suprimentos, os custos de matérias primas, custos produtivos por regiões, o tipo de bateria (célula, módulo ou pacote), os produtos químicos utilizados na bateria e, também, a oferta de energia elétrica do país em análise.

Como esta pesquisa analisa a influência das matrizes de oferta de energia do Brasil e China no processo de manufatura e reciclagem de bateria, o que envolve diferentes temas e conceitos, então, uma descrição de contexto pode ajudar a esclarecer definições e escolhas dessa pesquisa.

3 DESCRIÇÃO DO CONTEXTO

A seção de descrição de contexto foi subdividida em subseções temáticas de forma estruturada, a fim de prover subsídios de informações para se ganhar uma visão mais clara, não só de cada subtema e escolhas realizadas, mas, também, como elas se imbricam para atender aos objetivos dessa pesquisa.

3.1 Descarbonizando o transporte

Os combustíveis fósseis são responsáveis por mais de 70% das emissões de gases de efeito estufa. Sendo que o segmento de transporte, sozinho, é responsável por mais de 16,2% do total de todas as emissões destes gases. O transporte só fica atrás das emissões realizadas pela produção de energia elétrica (*WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2021, BOOMBERGNEF, 2022, IEA, 2019*).

A rápida adoção de veículos elétricos, impulsionada pela necessidade imperativa de descarbonizar o transporte pessoal de passageiros, com o propósito de atingir a meta global de reduções de GEE e melhorar a qualidade do ar nos centros urbanos, deve alterar a indústria automotiva radicalmente (*HARPER et al., 2019*).

Daí, surge a importância das políticas e ações para promover um cenário de transição de consumo de combustíveis fósseis para outras fontes de força motriz em veículos, que deixem de depender de combustíveis geradores de gases de efeito estufa (GEE). Desta forma, a eletrificação dos veículos, combinado à geração de energias mais limpas, surgem como um caminho de extrema importância para cumprimento das agendas que visam as reduções das emissões de gases de efeito estufa.

Assim sendo, a eletrificação de veículos poderá desempenhar um papel de relevância para contribuir com a redução dos efeitos danosos provocados pelas emissões de GEE. Hoje, contudo, a participação no mercado dos veículos elétricos de passageiros não ultrapassa os 4% das vendas. A previsão segundo (*BOOMBLERGNET, 2022*) é de atingir 88% das vendas em 2050, no cenário de transição econômica.

A literatura existente confirma que o comportamento de compra de veículo elétrico pode ser influenciado por múltiplos fatores, como preço do veículo, total custo de propriedade, experiência na condução do veículo, disponibilidade de infraestrutura de carga, influência social, meio ambiente, entre outras (KUMAR *et al.*, 2020).

Numa perspectiva econômica, o custo de propriedade de um veículo elétrico tem sido usado como um critério para medir a viabilidade econômica do veículo elétrico por consumidores. As análises cobrem múltiplas dimensões da estrutura de custo, como preço de compra, custo de manutenção, custo de operação, depreciação e preço da energia elétrica para recarga. (KUMAR *et al.*, 2020).

Um estudo comparativo feito por DE CASTRO *et al.* (2019), conclui que o custo total de propriedade de um veículo elétrico é duas vezes e meia maior que de um veículo a combustão no segmento de miniônibus.

Vale ainda, um olhar sobre dois possíveis cenários de descarbonização dos transportes, sendo um chamado de ETS (*economic transition scenario*), cenário de transição econômico, e, o outro, NZS (*net-zero scenario*), cenário de neutralidade de GEE. Estes termos são usados para especificar as metas estabelecidas pelo (IPCC) Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, que estipula a redução de gases de efeito estufa a níveis líquidos, de forma que a produção cause menos absorção de CO₂, sendo igual a zero até 2050. Para cada tonelada de CO₂ produzida, outra tonelada do mesmo gás precisa ser removida da atmosfera.

Para atender de forma plena a neutralidade de carbono até 2050, o NZS seria o caminho a percorrer. Contudo, diante dos desafios e impactos econômicos desta transição, definiu-se o termo ETS como um eventual cenário alternativo, onde aspectos econômicos serão levados em consideração para a redução das emissões de carbono com repercussão menos aguda na economia durante a transição para um cenário de neutralidade de GEE. No cenário ETS, haveria redução intensa das emissões GEE, contudo, tenderia a não atingir emissão zero líquida até 2050.

Diante destes dois cenários, a *BloombergNEF* apresentou, no evento KOTRA, (*Korea Trade-Investment Promotion Agency*, 2022), e disponível no relatório *Outlook 2021* (*BLOOMBERG NEF*, 2021), que o cenário de emissão líquida zero, para carros elétricos de passeio, poderá atingir a neutralidade de carbono no cenário NZS, entre 2030 e 2040, enquanto que, no cenário ETS, mesmo em 2050, os carros elétricos representariam algo acima de 80% das vendas totais de veículos e, não 100%,

como no cenário NZS. Com isso, pode-se ver que no cenário ETS a descarbonização ocorrerá de forma também importante, para combater as emissões de GEE, mas de maneira mais lenta do que aquela dada pelo emprego do cenário NZS.

Para o mundo experimentar menos de 1,5° de aquecimento global até 2100, a indústria de automóveis precisa atingir o objetivo de reduzir 50% das emissões de carbono até 2030. No mesmo período, espera-se que a demanda por mobilidade deva aumentar 70% mundialmente. Circularidade e eletrificação serão estratégias-chaves para permitir a indústria se descarbonizar e preparar este aumento na demanda por mobilidade. Circularidade, neste contexto, significa usar carros de maneira mais eficiente, podendo adicionar valor para a indústria, para a sociedade e ampliar o ecossistema que os humanos habitam (*WORLD ECONOMIC FORUM, Circular, cars initiative, 2020*).

Agrega mais sentido, ao falar de descarbonização do transporte, entender, de forma concomitante, quão limpa, em termos de GEE, são as fontes de geração de energia de um determinado país ou região. Sem ter um olhar na forma de como as regiões produzem sua energia, não se poderia assegurar que emissões serão reduzidas globalmente com a implementação dos veículos elétricos. Afinal, mesmo que um VE não produza GEE de forma direta durante sua fase de uso, por não queimar combustível fóssil internamente, ele segue necessitando de energia para recarregar suas baterias que, muitas vezes, podem ter sua geração, também, a partir de combustíveis fósseis. Desta forma, torna-se importante entender um pouco melhor sobre as matrizes de geração de energia.

3.2 Matriz de oferta de energia elétrica

Já início do século XX, os veículos elétricos chegaram a ter um breve período de dominância no mercado norte-americano. Naquela época, os carros elétricos apresentavam muitas vantagens em relação aos veículos à combustão. Não emitiam poluentes como outros carros da época, eram silenciosos e fáceis de dirigir. Eles se tornaram populares entre os residentes nas áreas urbanas, especialmente entre as mulheres. Eles eram adequados para trechos mais curtos. Até mesmo as condições das estradas, fora dos grandes centros, na época, nos Estados Unidos, já limitavam os tipos de carros que podiam transitar fora das regiões urbanas. O maior acesso à

eletricidade, tornou mais fácil carregá-los. O próprio Ferdinando Porsche, fundador da Porsche, no mesmo período, desenvolveu o carro elétrico chamado P1. No mesmo ano, ele criou um carro híbrido, movido a gás e eletricidade. Mesmo com todas essas vantagens, já para época, o estágio menos evoluído das baterias naquele momento, a legislação ambiental menos exigente, o baixo custo de derivados do petróleo e, ainda, pelo sucesso do Modelo T do Henry Ford, que conseguiu baratear sobremaneira o custo dos carros com sua produção em série, foram fatores fundamentais para que a eletrificação dos veículos não avançasse mais (U.S DOE, 2014).

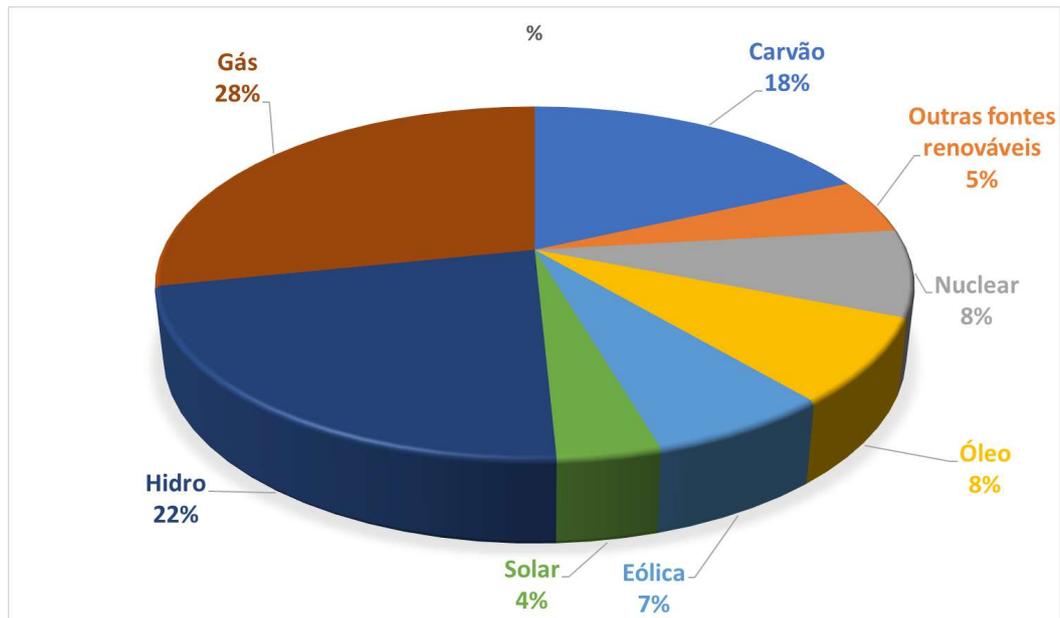
Um veículo elétrico (VE) é movido por um motor elétrico que precisa de uma bateria, que é carregada com eletricidade, tipicamente a partir da rede elétrica, portanto, as emissões de CO₂, geradas por um VE, devem levar em consideração todas as emissões de gases de efeito estufa (GEE) liberadas ao longo de todo o processo de geração, transmissão, distribuição e, finalmente, a carga do VE. Deve ser contabilizada uma combinação de fontes de energia elétrica limpas e não limpas, renováveis ou não, que estão disponíveis para carregar um veículo elétrico. Esta combinação é conhecida como matriz de oferta de energia elétrica.

Quando se aborda a transição para um ambiente mais sustentável, é importante entender em que ponto se está e, ainda mais, compreender de uma maneira mais holística, como as decisões ditas mais sustentáveis impactam na redução das emissões de GEE.

Ao colocar a geração de energia elétrica global sob perspectiva, pode-se ver uma presença ainda tímida das energias renováveis eólica e solar, mas já é possível notar uma expressiva contribuição da energia gerada por hidroelétricas, Figura 9. Contudo, ainda há um predomínio de fontes não renováveis, contribuindo com 62% das fontes de energia elétrica. Vale o destaque que, embora a energia nuclear não seja uma fonte renovável, ainda assim, é uma fonte considerada limpa em relação às emissões de gases de efeito estufa. Mas, mesmo que se retire a energia de fonte nuclear da conta das fontes não limpas e não renováveis, ainda assim, o percentual de fontes não limpas seguiria superior.

Usinas geradoras, que utilizam combustíveis como carvão, gás natural e petróleo, emitem mais emissões do que tecnologias de geração de energia, como eólica, solar, hidroelétrica e nuclear, que tem níveis de emissões de carbono baixo ou até próximo de zero (MANJUNATH *et al.*, 2017).

Figura 9 – Matriz global de energia.



Fonte: Elaborada pelo autor com dados de Our World in Data, 2021

Com isso, pode-se observar que, quanto maior for a penetração de energia limpa em uma determinada região, maior é a chance da adoção de VE se traduzir em efetiva redução de emissão de GEE. Isso se deve ao fato de que, embora o VE não emita GEE após terem sido carregados, a geração de energia, a qual ele usou para ser carregado, deve ter sua intensidade de carbono na geração de eletricidade levada em consideração, para saber se a adoção do VE gerará efetivamente menos GEE (MANJUNATH *et al.*, 2017).

Zhao desenvolveu um modelo de emissões e fornecimento de energia para prever as emissões de GEE em diferentes cenários de geração de energia, e identificou que as emissões de VEs é diretamente dependente da matriz de geração de energia elétrica (ZHAO *et al.*, 2017).

As emissões de GEE de ICEVs (tanto gasolina quanto diesel), foram superiores aos BEVs, usando eletricidade gerada por gás natural, nuclear e energias de fontes renováveis. Contudo, se BEVs usarem eletricidade gerada por carvão ou petróleo, eles terão sempre mais emissões do que veículos a combustão movidos a diesel. BEVs usando eletricidade gerada por carvão, nas categorias subcompacta e compacta, emitem mais GEE dos que seus correspondentes a gasolina (WOO *et al.*, 2017).

Neste contexto, o Brasil se posiciona com certa vantagem em relação a maioria dos países. O acesso à eletricidade no Brasil é, praticamente, de acesso a toda a população, e a presença de energia renovável corresponde a, aproximadamente, 45% da demanda primária, fazendo com que o setor de energia do Brasil esteja posicionado entre os que tem menor intensidade de carbono em sua geração. Grandes usinas hidroelétricas representam aproximadamente 64% da geração doméstica de eletricidade. Segundo o SIGA (Sistema de Informações de Geração da ANEEL), 83,79% da geração de energia elétrica em operação é gerada por fontes renováveis. (ANEEL, 2023). O EPE do Relatório de Balanço Energético (BEN) de 2021, aponta que a oferta interna de energias renováveis no Brasil representa 84,8%. (EPE, 2021). Já, o Relatório de Balanço Energético (BEN) mais recente de 2023, apresenta que as fontes renováveis representaram 88% da oferta interna de eletricidade no Brasil.

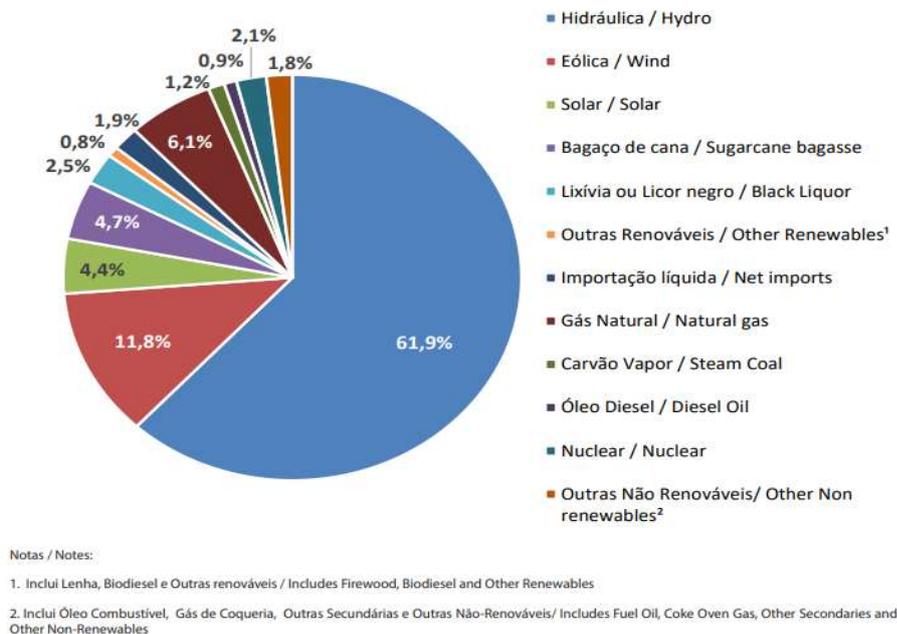
O mesmo relatório informa que a geração de energia elétrica no Brasil, em centrais de serviço público e autoprodutores, atingiu 677,1 TWh em 2022, tem sido um volume 3% superior ao de 2021. Sendo que as centrais elétricas de serviço público, representaram 81,4% da geração total. A geração por hidroeletricidade, principal fonte de produção de energia elétrica no Brasil, cresceu 17,7% em relação ao ano anterior (EPE, 2023).

A autoprodução (APE), em 2022, representou 18,6% do total produzido. Quando se considera o agregado das diferentes fontes utilizadas, atingiu-se um montante de 126 TWh. Deste total, 73,7 TWh não foram injetados na rede. Esse montante foi, então, gerado e consumido pela própria unidade geradora. A autoprodução ocorre em empresas de diferentes segmentos que produzem sua própria energia elétrica.

A geração, a partir de fontes não renováveis, representou 12,3% do total nacional em 2022, contra 22,6% em 2019. O gás natural que tinha apresentado uma evolução de 2019 para 2020 na composição das fontes, chegando a 8,3%, já no relatório de 2023 ele representou um percentual inferior com 6,1%. Embora haja essa variação na sua representatividade em relação a matriz como um todo, é importante destacar a evolução do gás natural que, ao longo dos últimos dez anos, contribuiu para minimizar as emissões provenientes da geração de eletricidade, a partir de outras fontes não renováveis com maior intensidade em emissões de GEE. Sua representatividade em 2020 era de 45% entre as fontes não renováveis e, em

2023, essa participação subiu para 49%. As importações líquidas de eletricidade ficaram em 12,9 TW. Veja a Figura 10, que ajuda a visualizar a distribuição de oferta de energia elétrica no Brasil. A maior variação positiva em 2021, de consumo por setor, ocorreu justamente no setor de transportes com 23,64% (EPE, 2021; EPE,2023).

Figura 10 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.



Fonte: EPE, BEN 2023.

Com isso, se pode ver que a matriz energética brasileira tende, na esteira do que já fora discutido em alguns estudos para outros países (MANJUNATH *et al.*; ZHAO *et al.*, 2017), a trazer um ganho superior à média mundial, com a adoção de VEs. A forma de como se dá a influência da matriz nas emissões do processo de reciclagem está entre uma das contribuições que esta pesquisa esclarece.

Já a matriz de oferta de energia elétrica da China, que é um dos países desta pesquisa para efeitos de comparação nas emissões de GEE na fabricação e reciclagem de baterias para VEs, é predominantemente advinda de fonte gerada por carvão com uma representação de aproximadamente 60% em 2020. A Tabela 2 a seguir, apresenta dados da evolução de composição da matriz chinesa de 1990 a 2020. É possível notar a evolução, praticamente geral, de todas as fontes. Embora o gráfico mostre uma evolução na participação de energias renováveis, o carvão é

dominante e ainda não conseguiu mostrar, pelo menos até 2020, uma redução absoluta no volume de eletricidade gerada por esta fonte.

Tabela 2– Oferta interna de energia elétrica por fonte na China.

Ano	Carvão	Petróleo	Gás natural	Hidro	Solar PV	Eólica	Nuclear	Bio combustíveis	Waste	Solar thermal
1990	71,04%	8,11%	0,45%	20,40%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
1995	73,75%	5,47%	0,30%	18,91%	0,00%	0,01%	1,27%	0,29%	0,00%	0,00%
2000	78,21%	3,49%	0,43%	16,41%	0,00%	0,05%	1,23%	0,18%	0,00%	0,00%
2005	79,20%	2,02%	0,49%	15,88%	0,00%	0,08%	2,12%	0,21%	0,00%	0,00%
2010	76,99%	0,35%	1,86%	17,16%	0,02%	1,06%	1,76%	0,59%	0,22%	0,00%
2015	70,19%	0,17%	2,48%	19,31%	0,67%	3,17%	2,92%	0,90%	0,19%	0,00%
2020	63,46%	0,15%	3,03%	17,45%	3,35%	6,01%	4,72%	1,71%	0,11%	0,02%

Fonte: IEA

Para inserção dos dados da matriz de energia elétrica da China no modelo adotado, optou-se por usar os valores do IEA. Esses dados estão muito próximos dos valores encontrados na literatura que apresenta a seguinte distribuição para a matriz chinesa: Carvão (65,2%), Gás Natural (3,3%), Nuclear (4,3%), Hidro (17,9%), Biomassa (1,3%), Eólica (5,3%) e Solar (2,6%) (YANG *et al.*, 2020). Com os valores tendo uma distribuição semelhante, a escolha pelo uso dos dados do IEA se deu por ser mais recente. Para as perdas de transmissão e distribuição da China fora adotado 5,21%.

Como o foco do trabalho está no processo de reciclagem e de manufatura de baterias de VEs, então é conveniente se obter uma maior compreensão do funcionamento deste componente, que é objeto de muito estudo, desenvolvimento e pesquisa na atualidade.

3.3 Baterias de íon-lítio

Uma das primeiras tentativas de armazenar energia foi com o uso de baterias de chumbo-ácido. Estas baterias possuem carga e descarga reconhecidamente estável, mas algumas de suas maiores desvantagens são: seu maior volume, além de seu peso elevado, que as tornam pouco aplicáveis para uso móvel que exija uma maior capacidade de carga. As maiores demandas para armazenamento de energia em aplicações elétricas e eletrônicas nos últimos anos são: peso-leve, vida útil

longa, capacidade de ciclos, alta densidade de energia e recarga rápida (NZEREOGU, P. U. *et al.*, 2022).

As primeiras baterias que estavam presentes nos dispositivos eletrônicos, eram compostas por Níquel-Cadmio (Ni-Cd) e Níquel-Hidreto Metálico (Ni-MH). As baterias Ni-Cd exibiam grande capacidade, quando submetidas a altas correntes, mas tinham o indesejável efeito memória, além de elevado nível de toxicidade de seus componentes. Já, as baterias de Ni-MH apresentavam longa duração e são mais amigáveis ao meio ambiente. Contudo, apresentavam o desafio de vazamentos. Consequentemente, as baterias de íon-lítio, *Lithium-Ion Battery (LIB)*, em inglês, foram inovadoras e de maior qualidade para atender as demandas de armazenagem na indústria eletroeletrônica (NZEREOGU, P. U. *et al.*, 2022).

Desde que foram introduzidas comercialmente na década de 1990, baterias de íon-lítio são extensamente usadas em celulares, *laptops*, câmeras e outros dispositivos eletrônicos. Sua capacidade de recarga e alta densidade de energia as tornam excelentes candidatas para uso em aplicações móveis. Recentemente, as baterias de íon-lítio estão sendo usadas como fonte de energia para os carros elétricos e vem substituindo gradualmente as baterias Ni-MH (WANG *et al.*, 2014). A maioria dos VEs vendidos hoje em dia tem seus motores elétricos alimentados por baterias de íon-lítio. (CASTRO *et al.*, 2021). As características das baterias de íon-lítio, são: alta densidade de energia, baixa taxa de auto descarregamento e longa vida útil, o que as tornaram superiores no seu emprego em VEs (NITTA *et al.*, 2015).

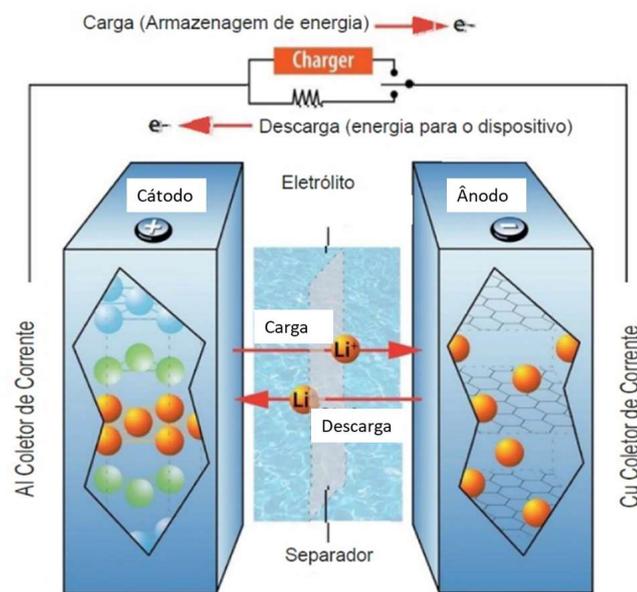
O aumento da participação das baterias de íon-lítio no mercado global de baterias despertou um aumento no interesse, para entender o impacto associado à produção, uso e estágios finais do ciclo de vidas destas baterias (WINSLOW *et al.*, 2017).

Uma bateria de íon-lítio é composta de quatro componentes básicos: um cátodo, um ânodo, um separador eletrolítico e um invólucro exterior. A massa exata e composição química de cada componente vai variar entres os diferentes fabricantes (ZHANG *et al.*, 2013).

Como conceito, as baterias de íon-lítio são baterias capazes de recarregar energia, quando esta é descarregada. Isto ocorre, por meio do movimento de íons entre os dois eletrodos com polaridades opostas, chamados de cátodo e ânodo, através de um material eletrolítico. O movimento contínuo de íons de lítio do ânodo para o cátodo e vice-versa é crítico para o funcionamento das baterias de íon-lítio. O

ânodo, que é o eletrodo negativo, descarrega íons no eletrólito, Figura 11. Os íons descarregados são, então, transferidos para o cátodo, que corresponde ao eletrodo positivo, onde eles são absorvidos. Este é o processo de descarga de uma bateria de íon-lítio. De forma semelhante, durante o processo de carga, há uma migração progressiva dos íons de lítio do cátodo para o ânodo, por meio eletrólítico. Fica, assim, claro que o processo de carga é o oposto do processo de descarga (SRIVASTAVA, 2015).

Figura 11 – Diagrama esquemático de funcionamento da bateria íon-lítio.



Fonte: Argonne National Laboratory

As baterias de íon-lítio automotivas podem variar entre diferentes tipos, tais como: $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA), $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ (NCM), LiMn_2O_4 (LMO) e LiFePO_4 (LFP). O grafite é o ânodo mais comum. (HARVEY *et al.*, 2018).

Há uma predisposição de prevalência das baterias de íon-lítio com composição de NCM e NCA, quando comparadas às de LFPs. Isto se deve as baterias NCMs terem maiores níveis de potência, maior densidade de energia, quando comparadas as LFPs. Além disso, as baterias NCMs absorvem menos água pelo ar, com conseqüente menor degradação do SEI (*Solid Electrolyte Interface*), ou interface eletrolítica sólida, cuja degradação é uma das maiores responsáveis pelo comprometimento do desempenho das baterias de íon-lítio. De acordo com (U. LANGKLOTZ *et al.*, 2013), quando baterias LFP e NMC são expostas a 40% de umidade relativa, a quantidade de água no interior da bateria NMC se mantém

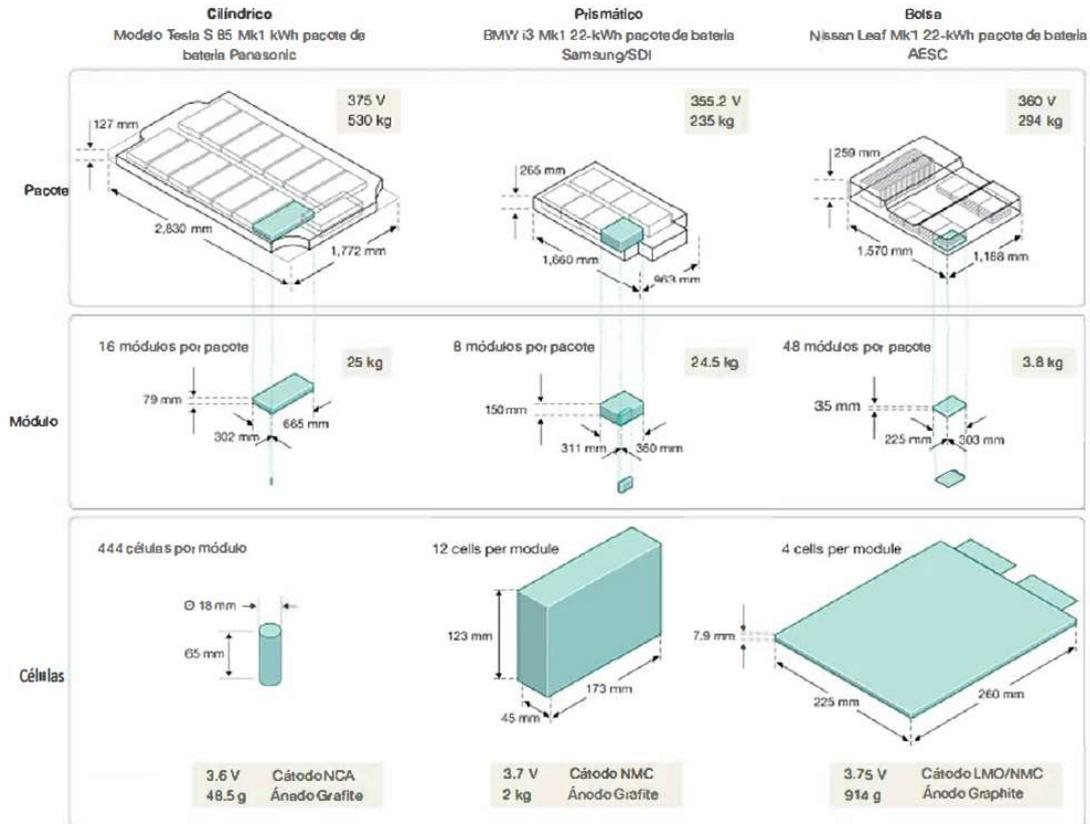
abaixo de 750 ppm, enquanto que nas baterias LFPs, esta umidade aumenta para mais de duas vezes em uma hora.

O mesmo trabalho também compara como os diferentes níveis de água no interior das baterias influenciam em suas capacidades. Quando a umidade aumenta de 1300 ppm para 1800 ppm (crescimento de 38%), a capacidade da bateria reduz para aproximadamente 10%. Outro trabalho (H. ZHENG *et al.*, 2012) demonstra que, na relação entre ciclos de carga e descarga e retenção de energia, as baterias NMC também tem melhor desempenho que as LFPs. Sendo 445 ciclos para a NMC e 377 ciclos para a LFP para atingir 80% da sua capacidade de carga. Com base neste mesmo trabalho, a mesma capacidade de carga de uma bateria NMC requer um eletrodo 1,5 vezes mais fino do que aquele presente na bateria LFP. Desta forma, a bateria LFP usa mais material no cátodo que as baterias NMC, que, por sua vez, criam menos material a ser reciclado ao final de sua vida útil. Assim, o aumento da adoção das baterias NMC, por si só, já representa uma evolução no aspecto de circularidade. Vale aqui a ressalva, por outro lado, que as baterias NMC, diferentemente as de LFP, necessitam de cobalto, o qual tem alto custo de extração e é, na maior parte, realizada na República Democrática do Congo, tendo métodos de extração questionados pelo uso de mão de obra infantil (IEA, 2021).

No que diz respeito aos formatos das células de baterias de íon-lítio para veículos de passageiros, existem três formatos mais recorrentes, que são o cilíndrico, prismático e tipo bolsa, Figura 12. O entendimento dos formatos de bateria é relevante, uma vez que o formato é determinante para se definir a taxa de aproveitamento de material. O formato prismático é o modelado no *BatPac* e utilizado no *Everbatt*.

Enquanto se espera que os VEs possam reduzir o impacto no clima e problemas de poluição relacionados ao transporte, muitos dos materiais usados nas baterias são tóxicos e raros, além de poderem reduzir o desempenho de sustentabilidade dos VEs, por meio do impacto em categorias como toxicidade humana, acidificação e potencial eutrofização.

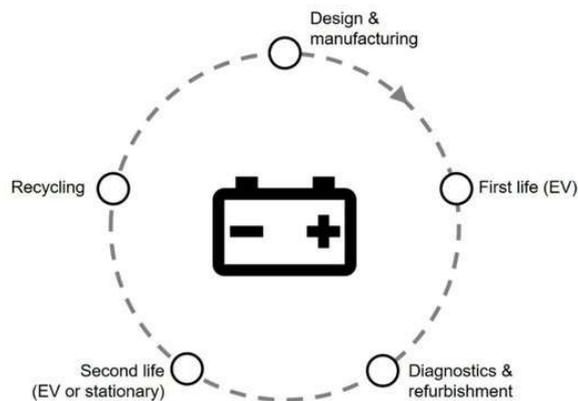
Figura 12 – Diferentes formatos de célula de bateria (cilíndrico, prismático e bolsa).



Fonte: Harper *et al.*, 2019

Estender o ciclo de vida da bateria é um aspecto crucial para melhorar a contribuição total dos VEs no desenvolvimento sustentável (OLSSON *et al.*, 2018). A Figura 13 mostra um cenário de ciclo estendido para o uso das baterias em VE.

Figura 13 – Ciclo de uso estendido da bateria elétrica veicular

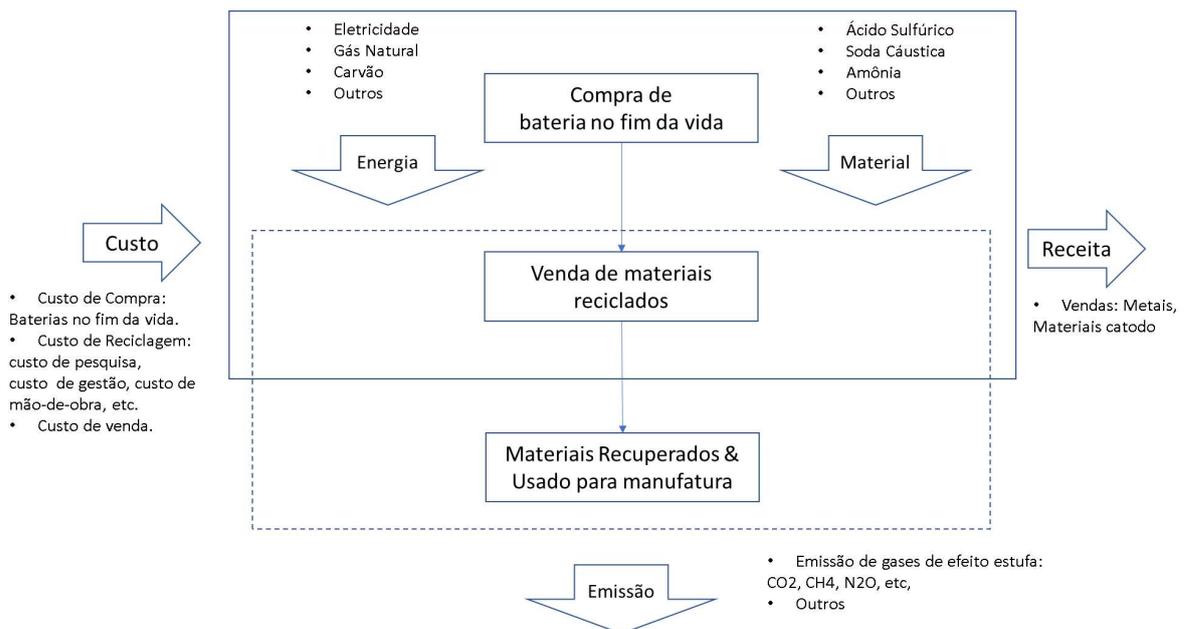


Fonte: Olsson *et al.*, 2018

Milhões de baterias de íon-lítio para veículos, vendidas na década passada, devem alcançar o final de sua vida útil, volumosos rejeitos de baterias precisarão ser apropriadamente descartados, para prevenir um maior impacto ambiental (XIONG *et al.*, 2020). Para a situação em que a extensão da vida útil da bateria não for mais possível, por meio do uso em outras aplicações além daquelas previstas no mercado de veículos elétricos e, ainda, para evitar que elas venham a ser descartadas como rejeitos nos aterros, a reciclagem é um caminho para conseguir extrair, ao menos, parte do material valioso que ainda está presente nas baterias que chegam ao primeiro ciclo de vida útil.

A Figura 14 mostra o modelo elaborado por Qiao de avaliação ambiental e econômica. O modelo tem componentes de custos como: custo de compra de bateria no fim da vida útil, custo de reciclagem com pesquisa, custo de gestão e custo de venda. Durante o processo, utiliza-se energia, usa-se materiais e, a depender do processo de reciclagem, emprega-se materiais solventes como é o caso, por exemplo, do processo por hidrometalurgia. Há como saídas de modelo, as receitas com as vendas dos metais e materiais do cátodo, e ainda as emissões geradas ao longo do processo.

Figura 14 – Modo de avaliação ambiental e econômico



Fonte: Adaptado de Qiao *et al.*, 2019.

Há, ainda, a possibilidade da remanufatura das baterias, por meio da substituição parcial do número de células contidas nas baterias em fim de vida útil, a fim de estender a sua utilização, antes de ser destinada à reciclagem e consequente reaproveitamento dos materiais químicos nelas existentes. O reuso, remanufatura e, por certo, a reciclagem são formas de reaproveitamentos contemplados no modelo circular. Como as técnicas e desempenho do nível de aproveitamento dos materiais contidos nas baterias precisam ser aprimorados ainda, já surgem muitas iniciativas de criação de centros de pesquisa, para fomentar esses avanços tecnológicos na reciclagem. Para citar alguns, há o *ReCell*, que foi criado pelo DOE, (*Department of Energy of US*), departamento de energia dos Estados Unidos. O *Relib* do Reino Unido é outro exemplo de projeto de pesquisa criado para aumentar o conhecimento na reciclagem de baterias de íon-lítio, a fim de tornar o processo cada mais viável economicamente e de reduzir a dependência da extração de novo material na sua forma bruta. Assim, é possível ganhar em circularidade na indústria de baterias de íon-lítio com seu consequente ganho, por meio da redução do impacto ambiental. Apesar de já haver um movimento no sentido de reconhecer a importância e o benefício da reciclagem, ainda é necessário ampliar os dados que apresentem a viabilidade ambiental e econômica da sua reciclagem. Alguns autores já trouxeram contribuições importantes neste sentido, Foster *et al.*, (2015), pode identificar que a remanufatura de bateria traz um custo-benefício de 40% em relação a manufatura de uma bateria nova. Kampker *et al.*, 2016, calculou que a remanufatura de bateria de íon-lítio potencialmente oferece um custo-benefício de até 60 euros por kWh. Qiao *et al.*, (2017) indicou que a renda bruta na reciclagem de bateria é aproximadamente 0,74 USD por kg. A lucratividade também foi apontada por Sanfélix *et al.*, (2016); Rohr *et al.*, (2017); Li *et al.*, (2018).

Contudo, como os minerais contidos nas baterias de maior custo estão sujeitos às variações de valores, ainda mais intensas em épocas de crise, o custo da reciclagem da bateria e sua viabilidade, em comparação com a fabricação de uma nova, estará sempre dependente dos valores dos minerais extraídos em sua forma virgem, junto à variação dos demais custos associados para a manufatura de uma bateria nova. Os preços por kWh vinham em declínio. De acordo com (BNEF, 2021), os valores médios das baterias por kWh reduziram 13% de 2019 para 2020, atingindo o valor de USD 137/kWh. Contudo, com o recente aumento dos minerais, como cobalto, níquel e lítio devido às instabilidades políticas em regiões que são

importantes produtores destes minerais, essa tendência de queda deve sofrer uma interrupção, mas que, segundo a própria BNEF, deve voltar a se restabelecer nos próximos anos.

Assim, o aspecto econômico, embora expressado de forma breve até aqui, como já vimos na seção 1.2, não será o foco de atenção desta pesquisa, pois dará mais atenção à dimensão do impacto ambiental, no que tange as emissões de GEE na reciclagem. Com uma maior compreensão das baterias de íon-lítio já estabelecida, vale entender melhor os processos de reciclagem.

3.4 Reciclagem de bateria para veículos elétricos

As aplicações das baterias são diversas, seja, no caso de baterias tracionárias em transportes tanto terrestre, aquático e até em primeiros projetos aéreos, ou, ainda, em outras aplicações já previamente existentes, como em eletrônicos em geral, armazenamentos de energia residenciais (estacionárias), só para citar algumas. Para atender esta aceleração no lado da demanda, tem se aumentado a pressão para extração de minerais como lítio, níquel e cobalto, por meio de suas minerações, para aumentar sua oferta e o respectivo impacto na redução do volume das reservas conhecidas. Para reduzir a chance de não faltar o suprimento destes recursos e a sustentabilidade da produção destas baterias em médio e longo prazo, a reciclagem tem sido vista como parte importante neste processo (SPEIRS, 2014).

A estimada faixa da futura demanda por materiais é, muitas vezes, superior a atual oferta. Enquanto isso, não há evidências de que a produção futura não poderá crescer no ritmo necessário. Contudo, um crescimento exponencial em longo termo na produção de lítio seria insustentável. Portanto, há uma preocupação em relação a disponibilidade de lítio para a fabricação de veículos elétricos (SPEIRS, 2014).

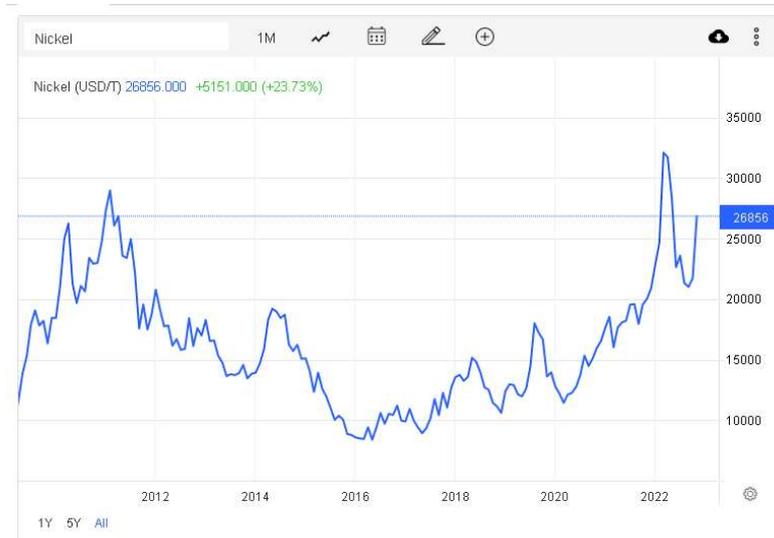
A demanda por baterias de íon-lítio para o setor automotivo cresceu 65% em 2022, em relação a 2021, sendo reflexo do aumento de 55% no registro de novos veículos elétricos (IEA, 2023). Em 2022, aproximadamente 4,5 milhões de BEVs e 2 milhões de PHEVs já estão circulando, só na Europa. A quota de mercado média de novos registros para BEV e PHEV representou 20% na região EU27 (EAF, 2022).

Em relação às baterias embarcadas nos VEs, níquel, cobalto, manganês e lítio NMC continua sendo a constituição química predominante com 71% do mercado, seguida pela composição química dada por NCA, níquel, cobalto e alumínio, representando, praticamente, o resto do mercado. LFP, fosfato de ferro lítio, começou a ressurgir com uma alternativa, mas ainda representa em torno de 10%. Essa tendência de aumento ocorre principalmente pelo uso dessas baterias em montadoras de carros elétricos na China. Mais da metade de todos os veículos da Tesla produzidos no primeiro trimestre de 2022 usaram bateria LFP (IEA, 2023).

A opção de reciclar não é só útil por motivos ecológicos, mas também, a partir de uma perspectiva econômica, isto se deve a recuperação dos materiais, depois do fim de seu ciclo de vida. Em particular, metais como níquel e cobalto, que são usados nos cátodos das células, estão fomentando a reciclagem sob o aspecto de vista econômico (KWADE *et al.*, 2018). A economia da reciclagem de baterias, no fim de vida útil, depende do valor dos metais que são separados das baterias e, assim, como o custo de reciclagem. Atualmente, alguns materiais valiosos são usados nas baterias, como por exemplo, cobalto, que é menos disponível e mais caro que outros metais usados, como manganês, ferro e níquel (*Trading Economics*, 2023) e são considerados metais estratégicos para muitos países (ZHANG *et al.*, 2013). Embora esta informação date de um artigo de 2013, esta afirmativa, ainda assim, foi inserida nesta pesquisa, uma vez que, observando as Figura 15, Figura 16 e Figura 17, pode-se ver que a relação de valor entre os minerais de maior valor se preserva. O valor do cobalto aumentou quase 4 vezes de 2013 até maio de 2022. Contudo, este metal entrou em queda, o que reduziu a relação de 2013 até novembro 2022, para 2 vezes.

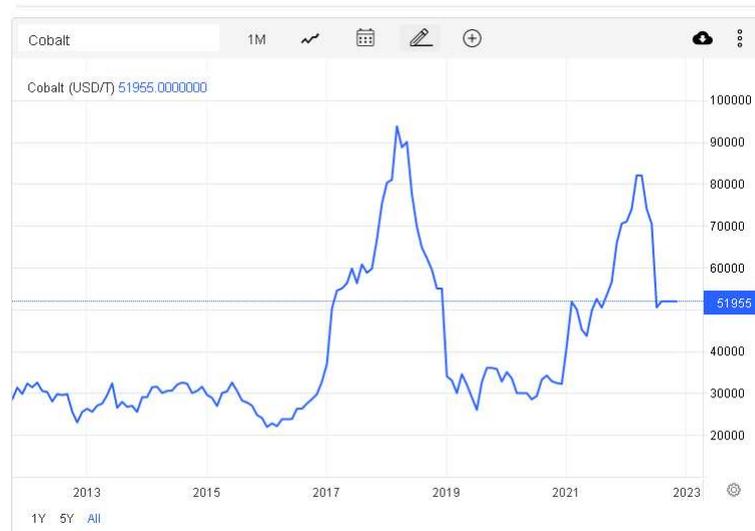
O mercado global de reciclagem de baterias de íon-lítio para veículos elétricos, foi avaliado em 4,6 bilhões em 2021, e está projetado para alcançar 22,8 bilhões de dólares (USD) em 2030, com um crescimento anual esperado entre 2021 e 2030 de 19,6% (MARKETS AND MARKETS, 2021).

Figura 15 – Evolução do preço (USD / Kg) do níquel pelo período de um ano.



Fonte: www.tradingeconomics.com

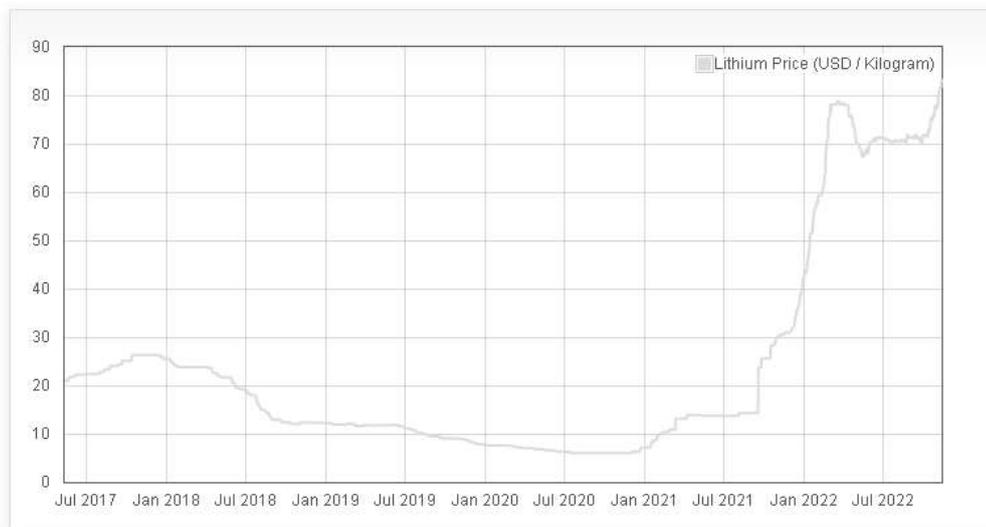
Figura 16 – Evolução do preço (USD / Kg) do cobalto pelo período de um ano



Fonte: www.tradingeconomics.com

Um grande aumento do número de baterias de veículos elétricos (VE) alcançarão seu fim da vida útil. E, mesmo que elas retenham capacidade que permitiria seu uso em outras aplicações e, assim, permitindo uma extensão de sua vida útil em armazenamento de eletricidade residencial, ou (ESS) *Energy Storage System*, em inglês, por exemplo, ainda assim, um grande volume destas baterias servirão para suprir parte da demanda incremental por materiais na fabricação de novas baterias.

Figura 17 – Evolução do preço do lítio (USD / Kg) – Jul 2017 a Nov 2022.



Fonte: <https://www.dailymetalprice.com>

As primeiras baterias tracionárias, como são chamadas as baterias que são aplicadas para energizar alguns equipamentos e veículos elétricos, de íon-lítio foram recicladas pela primeira vez no final de 1999 pela Sony e Toxico, que foi renomeada de *Retriev Technologies* (GAINES *et al.*, 2000).

Depois de anos de desenvolvimento na reciclagem de baterias, há duas tecnologias de reciclagem que hoje se destacam pelo seu emprego mais recorrente, que são: processo pirometalúrgico e hidrometalúrgico. O processo pirometalúrgico consiste em fundição, primeiro da bateria, e posterior lixiviação. A bateria, no final da vida, é derretida, formando uma liga de ferro, cobre, cobalto e níquel. Então, os metais são recuperados por meio da lixiviação, que, por sua vez, consiste na separação de metais de alto valor agregado, a partir soluções químicas. Já, o processo hidrometalúrgico consiste principalmente em banho cáustico, submersão e sinterização. Este é mais complicado e precisa de ambiente específico. O sal de lítio pode ser dissolvido através de banho cáustico (QIAO *et al.*, 2019). Os esforços na reciclagem estão voltados aos materiais do cátodo, uma vez que ele constitui um alto percentual de o todo custo e peso total da bateria e contém os materiais de interesse (OLIVETTI *et al.*, 2017).

Devido ao fato da pirometalurgia não recuperar o lítio contido nas baterias de íon-lítio, o processo hidrometalúrgico é mais provável de ser aprimorado e utilizado

(GEORGI-MASCHLER *et al.*, 2012). O processo de extração de lítio pode ser realizado em processo adicional ao da pirometalurgia e está associado com custo e energia adicional (CHEN *et al.*, 2019).

Existem muitas razões do porquê a reciclagem das baterias de íon-lítio não constitui uma prática universalmente estabelecida, ainda. As razões incluem: dificuldades técnicas, barreiras econômicas, problemas de logística, ausência de um ambiente regulatório mais robusto, entre outros (GAINES, 2019).

Vale informar, que os processos de reciclagem consomem significativa quantidade de energia, e o nível de aproveitamento dos materiais contidos nas baterias é relativamente baixo. Assim, não fica evidente, como pode parecer à primeira vista, que a reciclagem de baterias de íon-lítio proporcione redução nas emissões, quando comprado com a manufatura de uma bateria nova. A resposta a esta pergunta não é óbvia, e uma análise mais aprofundada se faz necessária para encontrar a resposta. Este esclarecimento tem desdobramentos importantes, quando envolve a inclusão da matriz de oferta de energia elétrica como variável moderadora das emissões de GEE no modelo *Everbatt*.

3.5 Emissões na reciclagem de bateria íon-lítio

Como parte da conferência de Paris em 2015, governos concordaram em limitar os níveis de aquecimento globais abaixo de 2 °C, relativamente aos níveis pré-industriais, e perseguir esforços para limitar o aumento da temperatura em 1,5° C. Isto requer permanecer dentro da estimativa de 420-1200Gt de CO₂ até 2100 (EDENHOFER *et al.*, 2014). Neste contexto, mais de 190 países submeteram suas contribuições nacionais (NDCs), *Nationally Determined Contributions*, relacionando ações climáticas voluntárias até 2030 e considerando os objetivos de desenvolvimentos nacionais, incluindo os (SDGs), *Sustainable Development Goals*. Como as contribuições dos países não somam para mitigar o esforço necessário para limitar o aumento de temperatura para abaixo de 2° C ou 1,5° C, o acordo de Paris requer que as partes submetam periodicamente ambiciosos NDCs e realize exercícios de levantamentos globais a cada 5 anos, iniciando em 2023 para avaliar o progresso em relação aos objetivos globais (FRAGKOS *et al.*, 2021).

Estratégias de baixa emissão permitem a reconciliação de objetivos climáticos de longo prazo no horizonte global com os de curto e médio prazo, baseadas em políticas climáticas nacionais, ajudando nas decisões nacionais e internacionais (WAISMAN *et al.*, 2019)

Uma estratégia de longo prazo descreve como uma nação pode reduzir emissões, enquanto melhora o desenvolvimento social e econômico. Estas estratégias podem ajudar países a desenvolver suas trajetórias de emissões de longo e médio prazo, de forma que sejam compatíveis com os objetivos de Paris, assegurando a implementação dos seus objetivos climáticos (FRAGKOS *et al.*, 2021).

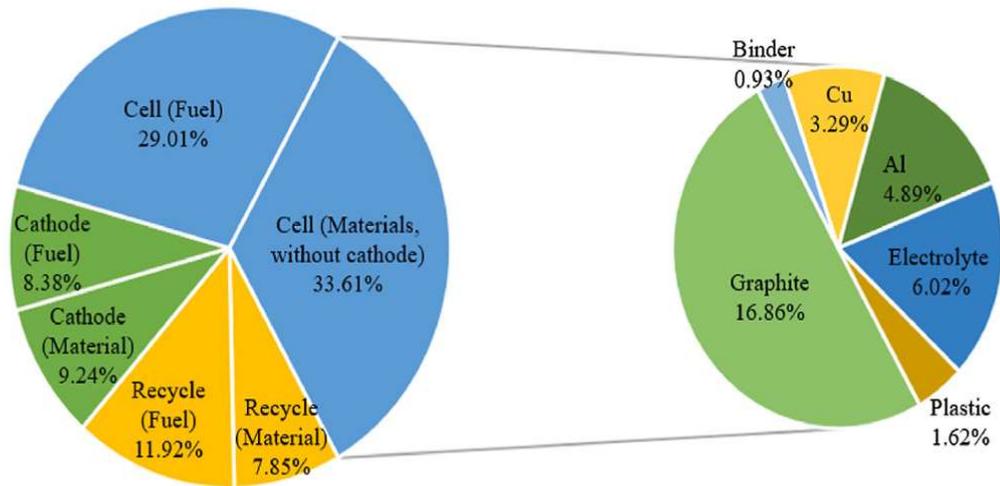
Para endereçar problemas de energia e ambientais com os veículos a combustão, algumas alternativas de combustíveis foram propostas. Esses combustíveis incluem biodiesel, gás natural, metanol, etanol, combustível de biomassa e hidrogênio, além da alternativa de veículo elétrico. Veículos elétricos são considerados os mais promissores entre as alternativas. Contudo, muitos relatórios têm questionado a possibilidade de veículos de emissão zero para mitigar os problemas ambientais associados com veículos à combustão. Isso, porque, embora os veículos não produzam CO₂ durante seu uso, eles produzem emissões indiretamente, por serem dependentes da matriz de oferta de eletricidade do país onde o VE é usado (FAN *et al.*, 2019).

Estudo de Xiong *et al.*, (2020), mostrou quanto cada processo de reciclagem de bateria consome de energia. O processo como um todo consome 29,61 MJ/Kg de energia e libera 2,37 kg/kg de emissões GEE (XIONG *et al.*, 2020).

Mais da metade da energia consumida no estágio de reciclagem vem da queima de combustível para iniciar e catalisar as reações químicas. Para o processo de manufatura do cátodo, 18,80 MJ de energia são necessários, e a emissão no processo é de 5,83 Kg/Kg, representando 17,62% e 30,48% de todo consumo de energia e emissões respectivamente. Combustíveis e materiais são aproximadamente semelhantes no consumo de energia no processo de manufatura do cátodo. A remanufatura do cátodo predomina no consumo e nas emissões de GEE em relação a todo o ciclo de remanufatura, representando 62,61% e 50,15% respectivamente. No processo de remanufatura de células, 46,33% da energia consumida é para montagem da célula e 26,92% é consumida para o ânodo de grafite. Visivelmente, 60,29% da energia é consumida nos processos de reciclagem

e, 49,31% no ciclo inteiro de remanufatura, resultando queima de combustíveis, reforçando a necessidade de se encontrar alternativas para otimizar as etapas do processo que consomem mais energia, Figura 18 (XIONG *et al.*, 2020).

Figura 18 – Contribuição do consumo de energia durante o ciclo de remanufatura



Fonte: Xiong *et al.*, 2020.

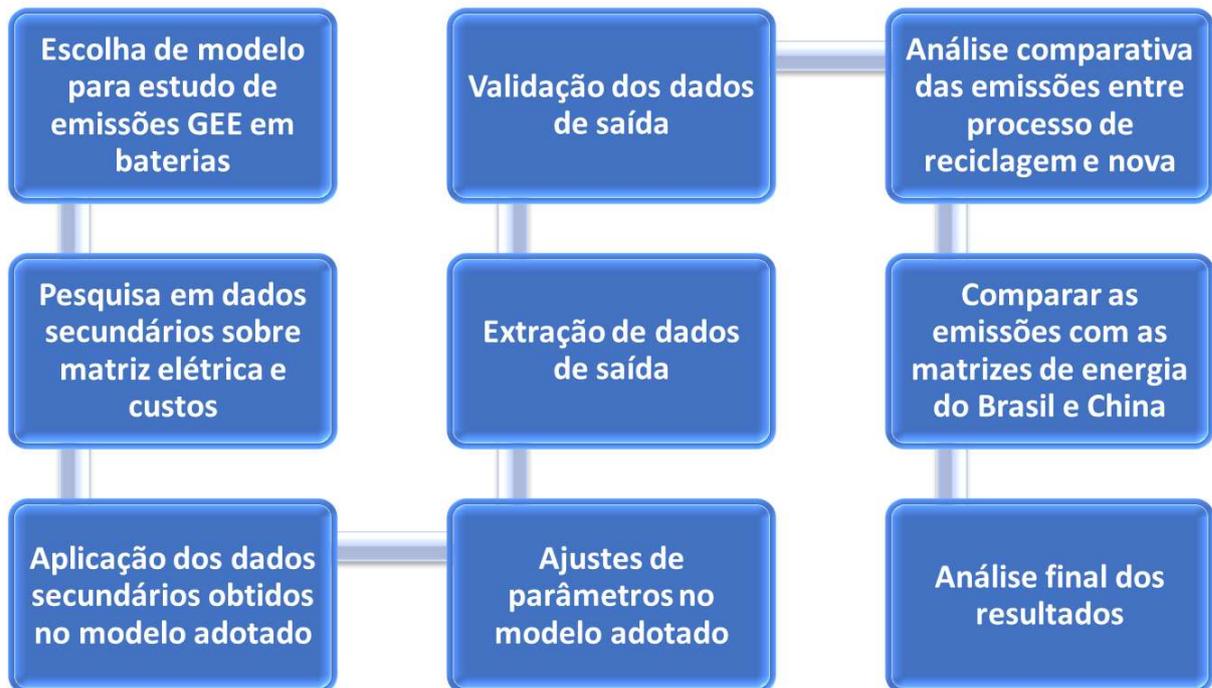
Com uma visão mais clara de como são distribuídos as fontes de emissões de uma bateria, vale dedicar uma seção para entender o modelo *Everbatt*, que é o adotado para ajudar a simplificar a conexão dos parâmetros de emissões nas reciclagens de baterias e com as emissões na manufatura de uma bateria nova e, ainda, usar a influência da matriz energética do Brasil como variável moderadora.

4 MÉTODO DE PESQUISA

Trazer novas contribuições para o conhecimento científico é uma razão central da existência da pesquisa e deve ser utilizada para investigação do tema em estudo ou em perspectiva (KARLSSON, 2009).

A pesquisa visa gerar conhecimentos práticos, científicos e identificar métricas e indicadores para propor soluções de problemas específicos (WIERINGA, 2014). Para ajudar a elucidar as etapas aplicadas nesta pesquisa, a fim de buscar a obtenção dos resultados, criou-se o fluxo de pesquisa ilustrado pela Figura 19.

Figura 19 – Fluxo de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de detalhar cada uma das etapas, estas serão divididas em seções para melhor compreensão. No que diz respeito aos parâmetros usados para extrair os resultados para o Brasil, foi feita uma pesquisa de tipologia exploratória baseada num modelo existente, chamado *Everbatt*, que permitiu chegar a uma composição de emissões de GEE, a partir de inclusão de parâmetros da matriz de oferta de energia elétrica brasileira e chinesa. Para a análise de custo, o material e

combustível foram calculados pela soma dos custos de cada material e combustível, enquanto que os custos de mão de obra foram obtidos por meio da média nacional para o setor. Certamente, o custo dos materiais é crucial para a análise de custo-benefício, particularmente quando os custos dos materiais relacionados às baterias são altamente voláteis e, alguns, com diferenças regionais. Nesse sentido, a adoção da versão mais recente de 2023 do *Everbatt* permitiu aproximar os resultados a uma realidade bastante atual. A capacidade anual das plantas de manufatura foi definida como 6,85 GWh/ano, para ficar dentro da faixa que o modelo melhor estima os custos. Dessa forma, foi necessário considerar a entrada de 41.063 toneladas de pacotes em fim de vida útil no processo de reciclagem para, enfim, gerar 9.987 toneladas de cátodo. Essa é a quantidade necessária para manufaturar novas células com material reciclado, a fim de se produzir a mesma capacidade de produção das células NMC811 com materiais virgens, que foi de 6,85 GWh/ano. Essa equalização visa evitar distorções em custos e em impacto ambiental, buscando que os resultados comparativos obtidos não estejam contaminados com diferenças em custo ou em emissões pela diferença da quantidade produzida em cada processo sob investigação.

4.1 Modelo *everbatt*

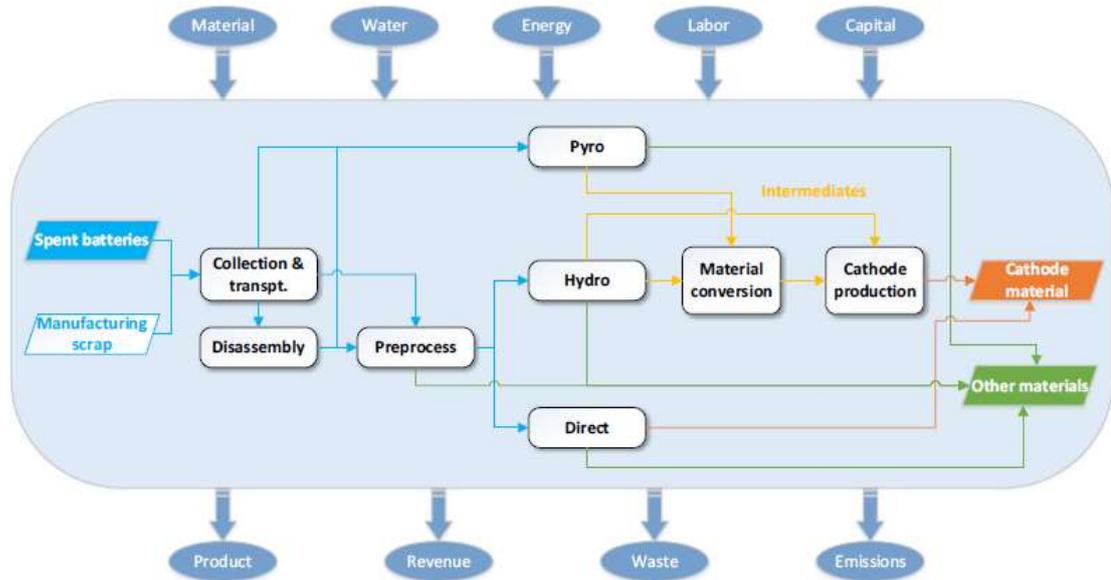
O modelo *Everbatt* foi usado para facilitar os cálculos que se fazem necessários para a obtenção do resultado comparativo do impacto econômico e ambiental dos processos de fabricação e reciclagem de baterias de VEs (ANL, 2018a; QIANG DAI *et al.*, 2019). Dado ao alto volume de variáveis necessárias de entrada para obtenção dos resultados, o modelo *Everbatt* usa a base de milhares de variáveis de outros modelos já consolidados como o *BatPaC* e o *GREET*, que foram concebidos para os custos na fabricação de bateria e o ciclo de vida do impacto ambiental, respectivamente conforme visto na Figura 8.

O *BatPaC*, é um modelo para cálculo, para estimar desempenho e custo na fabricação de baterias de íon-lítio para veículos elétricos, incluindo: HEV, PHEV, e puramente elétricos. Já o *GREET* é um modelo analítico que simula o uso de energia e as emissões de saída de vários veículos e diferentes combinações de combustíveis. Ambos os modelos foram também desenvolvidos pelo laboratório

Argonne e tem servido pesquisadores que estudam o desempenho dos materiais no projeto de células e pacotes de baterias para a aplicação automotiva.

No processo de remanufatura das células, os dados de entrada de energia e outros materiais, com exceção do cátodo, são considerados idênticos aos usados para fabricação, usando materiais virgens. Esse estudo avalia o impacto da remanufatura da bateria no nível de célula. Isso, porque informações sobre reciclagem de componentes do pacote são bastante limitadas. Para avaliar o impacto da recuperação das baterias, os valores *default* para o consumo de energia do modelo *Everbatt* usado, que é baseado em análise de processos e revisões de literatura (MAJEAU-BETTEZ *et al.*, 2011; DUNN *et al.*, 2015; J.B. DUNN *et al.*, 2012; DUNN *et al.*, 2016). Adicionalmente a parametrização do *Everbatt* com a matriz de oferta de energia elétrica no Brasil, fez-se necessário, para que o modelo pudesse ser adequado à realidade de emissões, caso as baterias sejam manufaturadas ou recicladas no Brasil.

Para melhor entender como se dão os processos de reciclagem adotados nesse trabalho, bem como as suas etapas, compartilha-se a Figura 20. O diagrama mostra o processo, dando origem com a coleta de baterias em fim de vida útil ou descartes vindos da manufatura, alimenta-se a etapa de desmontagem dos pacotes que, por sua vez, fornece o insumo para a etapa de pré-processamento. Há de se notar que se a coleta tiver ocorrido, já em nível de célula, então a etapa de desmontagem não se faz necessária. Dessa forma, as células podem ir, ou direto para o processo de reciclagem por pirometalurgia, ou para o pré-processamento que alimentará um dos outros dois processos de reciclagem contemplados pelo modelo, sejam eles: hidrometalurgia ou direto. A partir do pré-processamento, há diferentes fluxos a depender se o processo se dará por hidrometalurgia ou por processo direto. No caso do processo direto, os materiais do cátodo e demais materiais são gerados diretamente para alimentar um novo processo de fabricação. Já na hidrometalurgia há ainda as etapas de conversão de material e produção de cátodo para a produção de materiais em suas composições químicas já adequadas para fabricação de novos cátodos.

Figura 20 – Módulos de reciclagem do modelo *Everbatt*

Fonte: Modelo *Everbatt*

Dada a relevância do modelo *Everbatt* para obtenção dos resultados deste projeto de pesquisa, foram dedicadas algumas sessões para elucidar o método utilizado no modelo.

4.1.1 Modelo conceitual

Para apresentar o modelo conceitual da pesquisa, vale lembrar, mesmo que forma sucinta, a contribuição das diferentes seções do referencial teórico de forma, a compreender o fio condutor e a lógica na motivação de suas escolhas, caso ainda remanesçam dúvidas neste particular.

Na primeira seção do referencial teórico, foi possível identificar que o modelo linear atual (*cradle to grave*) é incapaz de mitigar o crescimento exponencial de extração de recursos naturais e de reduzir o volume de resíduos. Assim, o modelo circular surge com diferentes modelos circulares e que permitem mudar a lógica para (*cradle to cradle*), além de promover uma extensão da vida útil de produtos, a fim de retardar seu descarte e mitigar a necessidade de extração de novos recursos do meio ambiente.

Foi discutida a participação do setor de transporte como um dos maiores responsáveis pelas externalidades negativas em relação ao consumo de

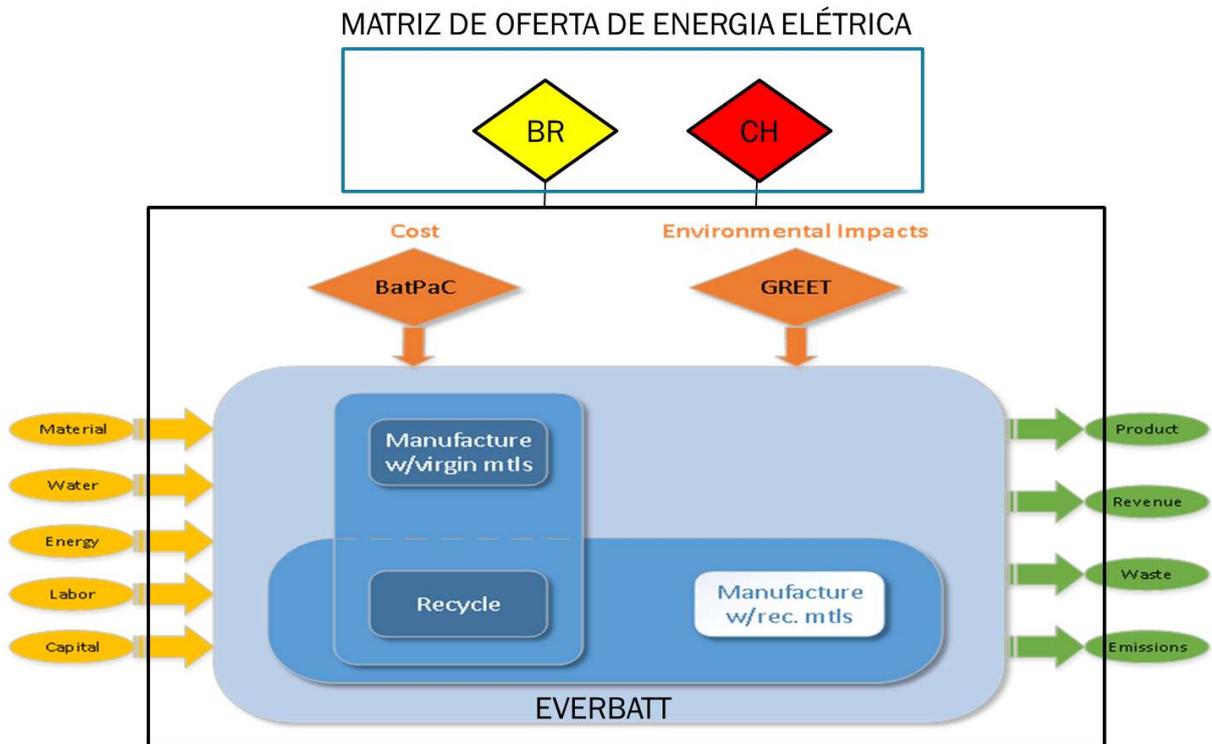
combustíveis fósseis e as respectivas emissões de gases de efeito estufa. Sendo os veículos de passageiros o maior participante do volume de veículos deste setor. O veículo elétrico surge como um possível aliado para reduzir as emissões, e o crescimento nas vendas deste tipo de veículos, tem feito crescer o número de baterias, trazendo projeções sobre o aumento no descarte das mesmas.

Deste cenário, portanto, surge a alternativa da reciclagem, para evitar que as baterias sejam despejadas em aterros, para reduzir o ritmo de extração de novos recursos virgens da natureza e como alternativa para aumentar o abastecimento de materiais valiosos e escassos, que são usados nas baterias de íon-lítio.

Contudo, a literatura não deixa claro se a reciclagem de baterias pode contribuir para reduzir as emissões, haja visto o consumo energético necessário para o processo de reciclagem em si, e ainda, a recuperação resultante, apenas parcial, dos componentes que compõem a bateria.

Ademais, foi possível identificar a importância da influência da matriz de oferta de energia elétrica, como no eventual benefício na fabricação e reciclagem de baterias dos veículos elétricos. Desta contextualização e da falta de respostas sobre a viabilidade de reciclar a bateria, quando comparado à fabricação de uma nova e, ainda, de como a matriz de oferta de energia elétrica brasileira influencia nas emissões, é que surgiu o modelo conceitual da Figura 21. Essa figura mostra o modelo do *Everbatt* com suas respectivas variáveis de entrada e saída e a utilização de parâmetros dos já consolidados modelos *BatPac* e *GREET* que contribuem com o modelo, provendo dados para as análises de custo e de impacto ambiental respectivamente. No topo do modelo vemos a adições de duas outras variáveis moderadoras que correspondem à influência das matrizes de oferta de energia elétrica nos resultados de custo e emissões finais extraídos do modelo. Os parâmetros para a China, para a matriz de oferta de eletricidade, foram ajustados conforme literatura e pesquisa exploratória em dados secundários. Já, os para a matriz brasileira, não existiam no modelo e sua adição foi uma adaptação ao modelo.

Figura 21 – Modelo conceitual da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor e baseado no modelo Everbatt do ANL (Argonne National Laboratory)

Embora o modelo permita a análise de custo e análise ambiental, este trabalho dá atenção prioritária a dimensão ambiental. Para tanto, o modelo foi alimentado com os dados pesquisados, por meio de pesquisa exploratória de dados secundários. No sentido de tornar os resultados os mais coerentes com a proposta de trazer o modelo para o cenário brasileiro, foi realizada uma pesquisa documental a fim de encontrar as variáveis que possam proporcionar um resultado mais próximo do real.

4.1.2 Definições ligadas a bateria

Na sessão de descrição de contexto, foi possível ter uma visão mais geral sobre as baterias de íon-lítio, e compreender que elas podem ter diferentes composições químicas em seu cátodo. Ainda assim, há uma prevalência no mercado das composições NMC e LFP. Os ânodos das baterias são essencialmente compostos por grafite. Como as baterias de LFP possuem tipicamente uma densidade de energia inferior à de NMC, esta tem maior probabilidade de seguir

dominando o mercado (ZUBI *et al.*, 2018). Além dos mais, essa bateria tem uma composição com mais presença de cobalto, o que a torna mais atrativa para reciclagem devido ao seu valor. Ainda que haja células de diferentes razões estequiométricas disponíveis no mercado de baterias, essa pesquisa irá se concentrar na razão estequiométrica NMC 811. Essa escolha se deve por essa bateria possuir uma maior concentração de níquel que, além de possuir maior participação do mercado, é a que possui maior densidade de carga. O que é bastante crítico para uma bateria tracionária, a fim de conseguir maior capacidade em kWh por volume e, conseqüentemente, oferecer uma maior autonomia a um VE. Segundo informação do *Global Supply Chains of EV Batteries, 2022*, as baterias com maior concentração de níquel representaram mais de 80% do mercado em 2019, 2020 e 2021. Essa pesquisa usou a lista de materiais por tipo de química de célula mostrada na Tabela 3 do modelo *Everbatt*. Para análise inicial de comparativo foi usado a química NMC 811, entretanto o estudo se estendeu as químicas: NMC 111, LCO e NCA. Essa composição de materiais leva em consideração a bateria 5 do modelo *BatPac* que, por sua vez, foi o formato utilizado no modelo. Esse modelo de bateria adotado tem 100kWh e consiste em 20 módulos de 20 células, prefazendo 400 células com capacidade de 0.250 kWh cada.

Tabela 3 – Composição da célula por material (peso %)

	NMC(111)	NMC(811)	LCO	NCA
Active cathode material	46,57%	42,89%	51,18%	44,03%
Graphite	25,27%	29,10%	19,16%	28,23%
Carbon black	0,97%	0,89%	1,07%	0,92%
Binder: PVDF	0,97%	0,89%	1,07%	0,92%
Binder: anode	0,52%	0,59%	0,39%	0,58%
Copper	8,07%	7,80%	9,04%	7,73%
Aluminum	5,19%	5,15%	5,54%	5,10%
Electrolyte: LiPF6	1,69%	1,74%	1,69%	1,71%
Electrolyte: EC	5,22%	5,36%	5,20%	5,28%
Electrolyte: DMC	4,23%	4,34%	4,21%	4,27%
Plastic: PP	0,85%	0,80%	0,99%	0,80%
Plastic: PE	0,18%	0,17%	0,22%	0,17%
Plastic: PET	0,26%	0,28%	0,25%	0,27%
Steel	0%	0%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do *Everbatt*

Optou-se por utilizar as baterias em pacotes para o cálculo de emissões na manufatura com materiais virgens e reciclados. O objetivo foi padronizar as informações, uma vez que as baterias recicladas são, em geral, recuperadas ainda nos pacotes (*packs*). Contudo, é importante destacar que essa pesquisa considera a desmontagem dos pacotes de forma manual, portanto essa etapa não gera emissões nem consumo de energia.

A distância considerada na reciclagem para a coleta e transporte de baterias em fim de vida útil, em centros de coleta até a desmontagem, foi de 360 km. O formato das células usado nessa pesquisa é o prismático.

Para conseguir realizar uma pesquisa como essa, demanda uma coleção de parâmetros e variáveis específicas da indústria e da academia, tais como: informações técnicas elétricas, de formato e dimensão sobre diferentes tipos de baterias, emissões em todo o ciclo de vida dos materiais, emissões durante o transporte manufatura e reciclagem das baterias, taxas de conversão de materiais, por meio de diferentes métodos de reciclagem, custos dos materiais virgens e reciclados, custos de transporte e de mão-de-obra, custos fabris entre outras variáveis. Então, fez-se necessário adotar um modelo para se obter dados confiáveis e aceitos pela academia. Dessa convergência de motivações foi adotado o modelo *Everbatt* elaborado e publicado pela Argonne, que é um centro de pesquisa multidisciplinar de ciência e engenharia onde cientistas e engenheiros trabalham em conjunto para responder grandes questões enfrentadas pela humanidade.

Uma vez tendo entendido as definições ligadas às baterias, vale uma seção para entender as definições ligadas as reciclagens.

4.1.3 Definições ligadas a reciclagem

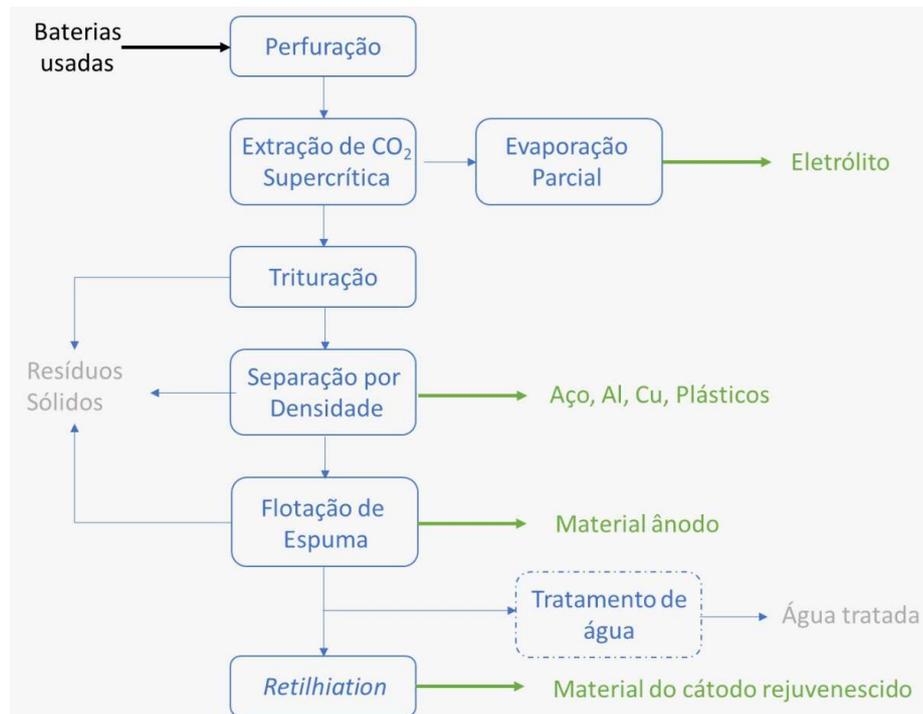
Essa pesquisa contempla o processo de recuperação de materiais de baterias em fim de vida útil. Em relação ao cátodo, isso significa recuperar compostos de cobalto, níquel e lítio que serão usados nas etapas de conversão de materiais, produção de pó de cátodo e manufatura com materiais reciclados. Dependendo de como forem as exigências de tratamento de água, a planta de reciclagem pode estar obrigada a ter uma estação de tratamento.

Os impactos ambientais da descarga e desmontagem dos pacotes de baterias não estão sendo considerados nesse trabalho, uma vez que são considerados como

realizados de maneira manual. A pesquisa considera os processos de reciclagem direto, por hidrometalurgia e por pirometalurgia apresentados nas Figuras Figura 22, Figura 23 Figura 24 respectivamente cujos processos, de forma resumida, são apresentados a seguir.

A Figura 22 ilustra o fluxograma de um processo genérico de reciclagem pelo método direto. Nesse processo as baterias descarregadas e desmontadas são perfuradas e, então, passam por um processo de extração de CO₂ supercrítica para reciclar o eletrólito. O restante da bateria é triturado e passa para uma série de processos de separação física para recuperar os plásticos, metais, material do ânodo e material do cátodo.

Figura 22 – Diagrama do processo de reciclagem direto

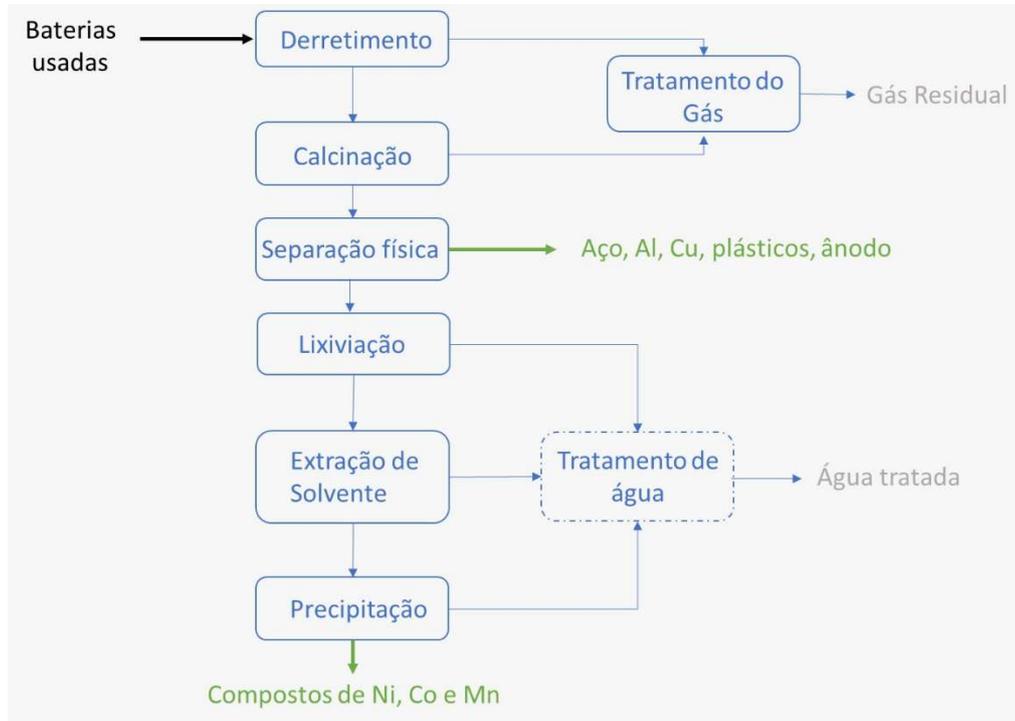


Fonte: Adaptado do modelo *Everbatt*

Na Figura 23, é possível ver o fluxo de um processo genérico por hidrometalurgia. Após ter as baterias descarregadas e desmontadas, elas são trituradas e, então, passam por uma calcinação em temperatura que queimará o aglutinante (*binder*) e o eletrólito. Em seguida, ocorrerão diversos processos de separação física para extração de alumínio, cobre, aço em forma de sucata e plásticos. Já a extração de cobalto, níquel e manganês, ocorre pelo processo de

lixiviação, procedido pela extração por solventes e, em alguns casos, por precipitação.

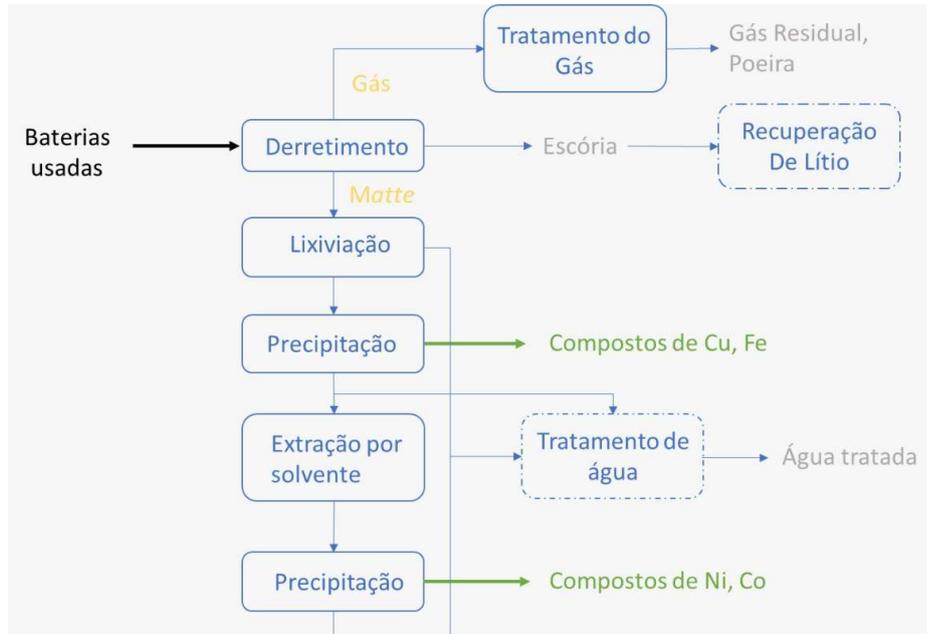
Figura 23 – Diagrama do processo de reciclagem por hidrometalurgia



Fonte: Adaptado do modelo *Everbatt*

O fluxo do processo por pirometalurgia é mostrado na Figura 24, onde a bateria é derretida, seja intacta ou triturada, em processo em que o eletrólito e plásticos são queimados para suprir aquecimento. O grafite e alumínio nas baterias agem como redutores dos metais e são oxidados. Cobalto, níquel, cobre e ferro das baterias viram *matte* e o resto dos materiais, incluindo alumínio oxidado, terminarão como produto do processo, chamado de escória. O *matte* formado pelo cobalto, níquel, cobre e ferro é processado por lixiviação com ácido, seguido de extração por solventes e precipitação para produzir compostos de cobalto e níquel, que podem ser usados como material para a produção de novos cátodos. Vale destacar, que o lítio da escória pode ser potencialmente recuperado, embora essa pesquisa não considere essa recuperação.

Figura 24 – Diagrama do processo de reciclagem por pirometalurgia



Fonte: Adaptado do modelo *Everbatt*

Os processos adotados pela pesquisa podem diferir de outros processos específicos usados por unidades de reciclagens. Considerando os processos escolhidos, os materiais da Tabela 4 podem ser recuperados para cada um dos processos de reciclagem estudados.

Tabela 4 – Materiais recuperados por processo de reciclagem

Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Direto
• Compostos de cobre	• Cobre	• Cobre
• Compostos de ferro	• Aço	• Aço
• Co ₂ ⁺	• Alumínio	• Alumínio
• Ni ₂ ⁺	• Grafite	• Grafite
• Compostos de Lítio	• Plásticos	• Plásticos
• Agregado (Escória)	• Carbonato de lítio	• LCO
•	• Co ₂ ⁺	• NMC (111)
•	• Ni ₂ ⁺	• NMC (622)
•	• Mn ₂ ⁺	• NMC (811)
•	• Solventes de eletrólito	• NCA
•	•	• LMO
•	•	• LFP
•	•	• Solventes de eletrólito

Fonte: Adaptado do modelo *Everbatt*

Com base nos rendimentos adotados por essa pesquisa, a produção de 1kg de cátodo necessita de 1.147 kg de material. Isso se deve ao aproveitamento (*yield*) que se dá no processo de reciclagem com 95% células produzidas sendo aprovadas, e 92,2% do material que entra no processo de reciclagem é efetivamente transformado em célula nova.

Todo o material utilizado traz consigo um histórico de emissão de gases de efeito estufa ao longo de sua cadeia produtiva. Com isso, uma pesquisa que trata de emissões de gases de efeito estufa estaria incompleta se não apresentasse, como resultado do estudo de emissões, todo o ciclo de vida dos materiais envolvidos. Isso deve incluir sua extração do ambiente natural, transporte e processos de transformação, até estar na condição de uso pela indústria de baterias. O acumulado de emissões dos materiais vindos de baterias de fim de vida útil e as respectivas emissões, ao longo das etapas dos processos de reciclagem, também estão contemplados nessa pesquisa. Para melhor entender como se dá a metodologia de análise do ciclo de vidas dos produtos, foi dedicada a seção seguinte para esses esclarecimentos.

4.1.4 Análise do ciclo de vida

O ciclo de vida, ou *Life Cycle Analysis* (LCA), é um passo importante para avaliar a sustentabilidade de tecnologias e políticas de uma forma holística. As categorias de impacto ambiental e emissões avaliadas incluem energia total utilizada, consumo de água, emissões de poluição do ar e gases de efeito estufa (GEE). A energia total utilizada é quebrada em uso de energia fóssil e não fóssil. Na energia fóssil pode ser ainda desagregada em carvão, gás natural e petróleo. As emissões de poluição do ar incluem compostos orgânicos voláteis (VOC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NO_x), óxido de enxofre (SO_x), material particulado com diâmetro de 10 micrômetros ou menor (PM10), material particulado de 2,5 micrômetros ou menor (PM2.5), carbono preto (BC) e carbono orgânico (OC). Os gases de efeito estufa incluem dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Esses impactos ambientais e categoria de emissões são atributos de saída do *REET*, que é utilizado e já incorporado ao modelo adotado pela pesquisa.

O ciclo de vida do impacto ambiental de cada processo é calculado baseado no fluxo de energia e de materiais no processo, a intensidade do impacto ambiental

e de cada material bruto e entrada de energia obtidos, a partir do modelo *GREET*, por meio da seguinte equação.

Equação 1 – Equação das emissões dadas pelo modelo

$$Elk = \sum_i m_i \times ei_{ik} + \sum_j q_j \times ei_{jk} + P_k$$

Onde *Elk* denota o ciclo de vida da categoria de emissão / impacto ambiental *k* para o processo (por uma questão de clareza, assume-se que a categoria de impacto /emissão ambiental *k* é considerada para a emissão de gases de efeito estufa pelo modelo, mas a equação poderia ser usada para qualquer categoria de impacto ambiental listada anteriormente).

m_i denota a massa em Kg do material *i* consumido no processo;

ei_{ik} denota as emissões de GEE por 1 Kg de material *i* no *GREET*;

q_j denota a quantidade em MJ de energia tipo *j* consumida no processo;

ei_{jk} denota as emissões de GEE para 1 MJ de energia tipo *j* no *GREET*;

P_k denota as emissões de GEE do processo como combinação da combustão e decomposição térmica do material bruto (ex: combustão no caso da pirometalurgia, processo de reciclagem, decomposição térmica, do Li_2CO_3 no processo de produção de pó de cátodo NMC (ARGONNE, 2019)).

4.1.5 Variação geográfica

Com base na cadeia de suprimentos global de bateria, o modelo também avalia a mudança do custo, os impactos ambientais associados com diferentes estágios do ciclo de vida, por meio de diferentes regiões geográficas. O *Everbatt* atualmente cobre 4 regiões geográficas: Califórnia, U.S., média nacional (nos EUA), China, Coreia do Sul, permitindo a definição de outras localidades, desde que os dados apropriados da localidade sejam inseridos pelo pesquisador.

O *Everbatt* não considera alteração de custo por variações geográficas em materiais nem de gás natural. Na produção de gás não é esperado que se tenha uma variação substancial em diferentes localizações e os principais materiais são commodities com preços fixados internacionalmente. Em contrapartida, o modelo adotado, leva em consideração a variação da matriz de geração de energia elétrica

por localidade. Isso, porque essas mudanças na composição das fontes de geração, por variações geográficas, são importantes e precisam ter as os diferentes impactos ambientais estudados.

4.2 Pesquisa exploratória

Por se tratar de uma pesquisa aplicada de tipologia exploratória num modelo existente, foi realizada uma etapa de coleta de dados. Como outros métodos analíticos em pesquisa qualitativa, a análise de documentos exige que os dados sejam examinados e interpretados para obter significado, obter compreensão e desenvolver conhecimento empírico (STRAUSS, 1998; RAPLEY, 2007)

Do pesquisador fazendo uso de método qualitativo se espera, pelo menos, fontes de evidência, para buscar convergência, por meio do uso de diferentes fontes de métodos (BOWEN, 2009).

Para identificar a influência da matriz da oferta interna de energia elétrica brasileira e sua repercussão, tanto nas emissões da reciclagem, quanto da fabricação de uma bateria nova, foi realizado um primeiro passo de levantamento de dados em documentos secundários, apresentações de congressos e eventos setoriais, em fontes disponíveis publicamente, sendo a internet, relatórios anuais setoriais e eventuais consultas com especialistas, uma das formas mais recorrentes de coleta dos dados neste trabalho.

Documentos são considerados “primários”, quando produzidos por pessoas que vivenciaram diretamente o evento que está sendo estudado, ou “secundário”, quando coletados por pessoas que não estavam presentes por ocasião da ocorrência (GODOY, 1995).

Nesta etapa, foi feita uma ampla pesquisa para extrair de fontes secundárias o maior número de informações que corroborem ao preenchimento das informações necessárias ao modelo adotado.

Em análise preliminar, fora identificado que parte dos dados necessários já estão disponíveis no modelo adotado. Sendo, contudo, necessário validá-los. Há ainda, como fonte de pesquisa documental, outros trabalhos que já fizeram algumas adequações de valores no modelo adotado que poderão ser utilizados como referência para esta pesquisa. Como exemplo, o estudo de Lander *et al.*, (2021) que

trouxe a adequação de alguns dados ajustados no modelo *Everbatt* sobre os custos de transportes para a China.

O levantamento das informações e análise dos documentos ajuda a definir quais são os documentos e dados mais apropriados para ajudar a analisar o problema proposto pela pesquisa. (GODOY, 1995).

4.3 Validação dos dados coletados

Uma vez coletados, os dados foram validados por meio da literatura e, ainda, por análise de mais de uma fonte. Foram levados em consideração a data de publicação, dando prioridade para dados mais recentes e como maior pertinência ao tema. Em seguida, os dados foram submetidos a um processo de validação, quando possível, por meio de triangulação ou, pelo menos, duas fontes de dados, antes de aplicá-los no modelo. Vale a ressalva de que, para o cenário com a fabricação de referência, foram usados os parâmetros disponíveis no modelo adotado para China. Excetuando-se, contudo, os dados da matriz de eletricidade chinesa que foram ajustados. Para os dados aproveitados do modelo, eles foram revisados de forma criteriosa, a fim de incluir os parâmetros faltantes e avaliação da necessidade de atualização dos existentes. Estes ajustes visam assegurar um resultado de pesquisa o mais coerente possível com as condições atuais. A adoção da versão mais recente do modelo publicado em junho de 2023 do *Everbatt* ajudou a ter seus dados já mais aderentes às condições atuais, o que é crítico para o tema escolhido e que está inserido no segmento que está em plena evolução. Ainda assim, os dados da matriz de oferta de energia elétrica da China foram validados e se optou pela adoção dos valores da Tabela 2, por sua proximidade com valores presentes na literatura e maior atualidade.

4.4 Ajustes dos dados aos parâmetros de pesquisa

Somado aos dados de composição das matrizes de oferta de energia elétrica da China e Brasil, outros parâmetros necessários para adaptar o modelo às emissões e custos, voltados à realidade brasileira, estão relacionados na Tabela 5.

Esses dados foram inseridos no modelo adotado, a fim de que sejam o mais apropriados para elucidar as perguntas da pesquisa.

Tabela 5 – Principais parâmetros e seus valores adotados

Descrição da variável no modelo	Descrição em Português (Valores ajustados para o Brasil)	Valor usado	Fontes utilizadas
Equipment cost adjustment (%)	Ajuste de custo com equipamento.	110%	> NCM - adotado - 8543.90.90 - Máquinas e aparelhos elétricos com função própria, não especificados nem compreendidos noutras posições do presente Capítulo. > Alíquotas - https://portalunico.siscomex.gov.br/classif/#/nomenclatura/854390?criterio=85439090 > Classificação fiscal - https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/aduana-e-comercio-exterior/classificacao-fiscal-de-mercadorias/ncm > Custo de Frete: https://ship.freightos.com/search > Risco cambial: 5% > País origem considerado: China
Direct labor (\$/hr)	Mão de obra direta (USD / hr)	7,4	> Valor considerando os encargos - https://ccbc.org.br/en/publicacoes/artigos-ccbc-en/how-much-do-your-employees-in-brazil-really-cost/ > Valor da hora - https://tradingeconomics.com/brazil/wages-in-manufacturing
Electricity cost (\$/kWh)	Custo de eletricidade (USD / kWh).	0,137	https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/custo-da-energia-eletrica-para-industria/
Natural gas cost (\$/MMBTU)	Custo de gás natural (USD/MMBTU)	12,1	>Valor gás natural no Brasil: https://utilitieslocal.com/states/indiana/brazil/#:~:text=Residencial%20natural%20gas%20prices%20in%20Brazil%20in%20March,rate%20of%2013.80%20%24%2FMcf%20%28March%202023%29.%20%5B%20%25D > conversion mmbtu to Mcf - https://learnmetrics.com/mcf-to-mmbtu/
Water cost (\$/gal)	Custo da água (USD/Gal)	0,025	https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/tabelas_tarif%C3%A1rias/comunicado_1_2023.pdf
Wastewater discharge cost (\$/gal)	Custo de descarte de água	0,025	https://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/tabelas_tarif%C3%A1rias/comunicado_1_2023.pdf
Landfill cost (tip fee \$/ton)	Custo aterro sanitário	41,4	http://www.singep.org.br/5singep/resultado/333.pdf
Building cost (\$/m2)	Custo de construção m2	600	http://www.cub.org.br/ https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9270-sistema-nacional-de-pesquisa-de-custos-e-indices-da-construcao-civil.html?=&t=resultados
Capital cost adjustment (%)	Custo de capital ajustado	130%	WACC ou CMPC para Brasil em comparação ao dado no modelo como referência para os EUA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros que ainda não foram encontrados na indústria nacional de forma pública, nem disponíveis no *Everbatt*, foram coletados na literatura, em sites especializados em suas respectivas áreas, entidades de classe, ou ainda, por especialistas do setor.

4.5 Aplicação dos parâmetros no modelo adotado

Os parâmetros iniciais encontrados foram desdobrados em variáveis, para alimentar o modelo, de forma que esteja adaptado aos resultados para a matriz de oferta de energia elétrica no Brasil.

4.6 Adaptação do modelo

Ao se incluir as devidas variáveis para cada um dos cenários em estudo, foi feita uma avaliação crítica para analisar eventuais distorções que podiam ter sido geradas, ou por variáveis inseridas de forma inadequada ou distante dos números vigentes na indústria para o cenário. Quando se inseriu a quantidade de 6,85GWh em baterias produzidas por materiais virgens, notou-se distorções nas primeiras análises de emissões, quando se comparava com as emissões das baterias recicladas. A fim de evitar essa distorção, fez-se necessário calcular a quantidade de baterias em fim de vida útil que precisavam ser inseridas nos processos de reciclagem, para que o total de baterias manufaturadas por meio de materiais oriundos de reciclagem coincidissem exatamente com a quantidade produzidas com materiais virgens. Esse cálculo precisou ser refeito para cada nova química de bateria em estudo. Essa necessidade de adaptar a variável entre diferentes químicas ocorre, porque os materiais presentes em cada tipo de bateria têm diferentes níveis de aproveitamento. Como houve tempo de adotar o modelo mais recente do *Everbatt* publicado em junho de 2023. Então, menos adaptações se fizeram necessárias em relação ao modelo de 2019, que foi usado no início dessa pesquisa.

4.7 Extração dos parâmetros de saída do modelo

Após os desdobramentos de parâmetros em variáveis e, por conseguinte, sua aplicação ao modelo adotado, foi necessário extrair os parâmetros e variáveis de saída. Nessa etapa, foi feita uma análise crítica de validação, para descartar informações que estejam nitidamente distorcidas por uma eventual incorreção na variável de entrada. Desta etapa, dada a atualidade dos dados e confiabilidade das

fontes utilizadas, não foi necessário identificar e isolar as variáveis que precisaram ser revisadas nas etapas anteriores. Na Tabela 6, apresenta-se as 4 variáveis de saída a serem extraídas do modelo adotado.

Tabela 6 – Parâmetros de saída

Id. parâmetro de saída	Cálculo	Descrição do parâmetro
1a	1a	Emissões na fabricação de bateria com materiais virgens (China)
1b	1b	Emissões na fabricação de bateria com materiais reciclados (China)
2a	2a	Emissões na fabricação de bateria com materiais virgens (Brasil)
2b	2b	Emissões na fabricação de bateria com materiais reciclados (Brasil)

Fonte: Elaborada pelo autor

4.8 Análise comparativa das emissões

Da extração dos parâmetros de saída do modelo adotado, foram realizadas análises comparativas entre as emissões na fabricação de bateria com materiais virgens (1a), e emissões na fabricação de bateria com materiais reciclados (1b), para o cenário de matriz de oferta de energia da China. Após os devidos ajustes nos parâmetros de entradas ao modelo, foram extraídos dois novos parâmetros de saída: emissões na fabricação de bateria com materiais virgens e emissões de bateria com materiais reciclados, desta vez, considerando, também, a oferta de energia elétrica no Brasil.

Tabela 7 – Tabela de parâmetros comparativos

Id. parâmetro de saída	Cálculo	Descrição do parâmetro
3a	1a/1b	Relação de emissões entre fabricação de bateria nova e reciclada (China)
3b	2a/2b	Relação de emissões entre fabricação de bateria nova e reciclada (Brasil)

Fonte: Elaborada pelo autor

Vale informar, que os cálculos, que o modelo usa para se obter as emissões, são dados pela Equação 1. Deve ser notado que a combustão de material e emissão no processo de decomposição P_k somente se aplica para CO_2 e é estimado em cálculos estequiométricos.

4.9. Comparativo das emissões com as matrizes de energia

Após as alterações das variáveis, para a coleta das emissões na fabricação de baterias novas e recicladas, tanto do cenário com variáveis da China e variáveis do Brasil, realizaremos a análise da influência da matriz de energia elétrica. Para tanto, serão somadas as emissões no cenário com variáveis da China, dividindo-a pelas emissões dadas pelas variáveis do Brasil. Desta forma, será obtida a 4a variável, que corresponde a relação das emissões entre os dados obtidos com as variáveis da China, com as emissões obtidas com variáveis do Brasil. Esses cálculos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetro da influência da matriz de energia elétrica

Id. parâmetro de saída	Cálculo	Descrição do parâmetro
4a	$(1a/1b)/(2a/2b)$	Influência da matriz de energia elétrica no total de emissões

Fonte: Elaborada pelo autor

Com as variáveis para o cenário brasileiro inseridas no modelo em conjunto com as variáveis já existentes, foi possível obter resultados comparativos das emissões. Na seção seguinte, apresenta-se os resultados, por meio dos quais será possível encontrar respostas para os problemas de pesquisa. Na seção resultados será possível encontrar respostas para os problemas de pesquisa. A seção seguinte começa com apresentação dos resultados das emissões extraídas do modelo que permite comparar as emissões da manufatura com materiais virgens com as emissões pelos diferentes métodos de reciclagem. Em seguida, são apresentados resultados que mostram como a matriz de oferta de energia elétrica influencia as emissões. Por fim, a subseção 5.4 apresenta sugestões na reciclagem de baterias de íon-lítio em conjunção com as melhores práticas para redução das emissões.

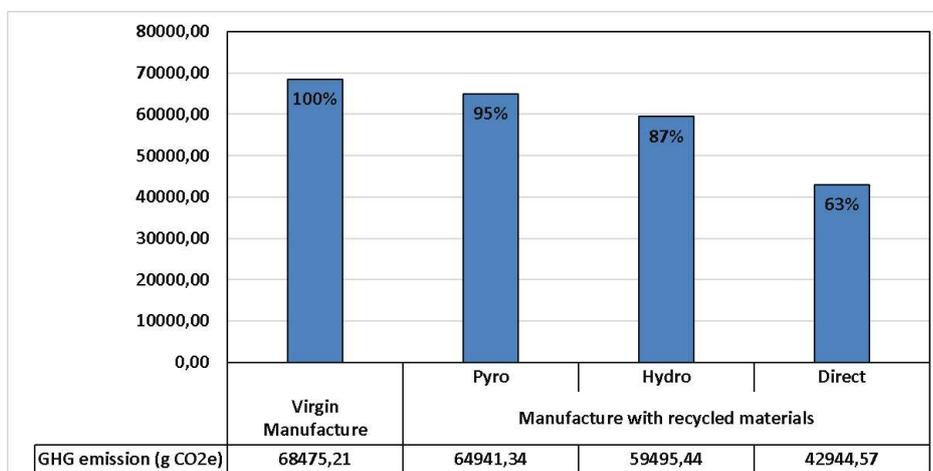
5 RESULTADOS

Na seção anterior foram criados parâmetros presentes nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 da seção metodologia. A fim de tornar mais fácil o entendimento dos parâmetros nessa seção eles são apresentados com suas respectivas descrições, à medida que são apresentados pela primeira vez. Seguindo a sequência dos objetivos dessa pesquisa, a apresentação de resultados será iniciada pelo comparativo entre as emissões geradas pela manufatura de baterias materiais virgens com as emissões geradas pelos diferentes processos de reciclagem. Embora a subseção seguinte já traga informações sobre a influência da matriz nas emissões, é na seção subsequente que o resultado para o parâmetro que quantifica a influência da matriz brasileira comparativamente a chinesa é apresentado.

5.1 Comparativo das emissões de GEE entre a manufatura de uma bateria nova e a reciclagem.

Quando utilizamos os dados do modelo para as emissões na fabricação e reciclagem de bateria NMC 811 com a matriz de oferta de energia elétrica China, pode-se obter os resultados comparativos das emissões GEE geradas pela fabricação de baterias com materiais virgens com as emissões dadas para os processos de reciclagem por pirometalurgia, hidrometalurgia e direto. Esses resultados podem ser vistos na Figura 25.

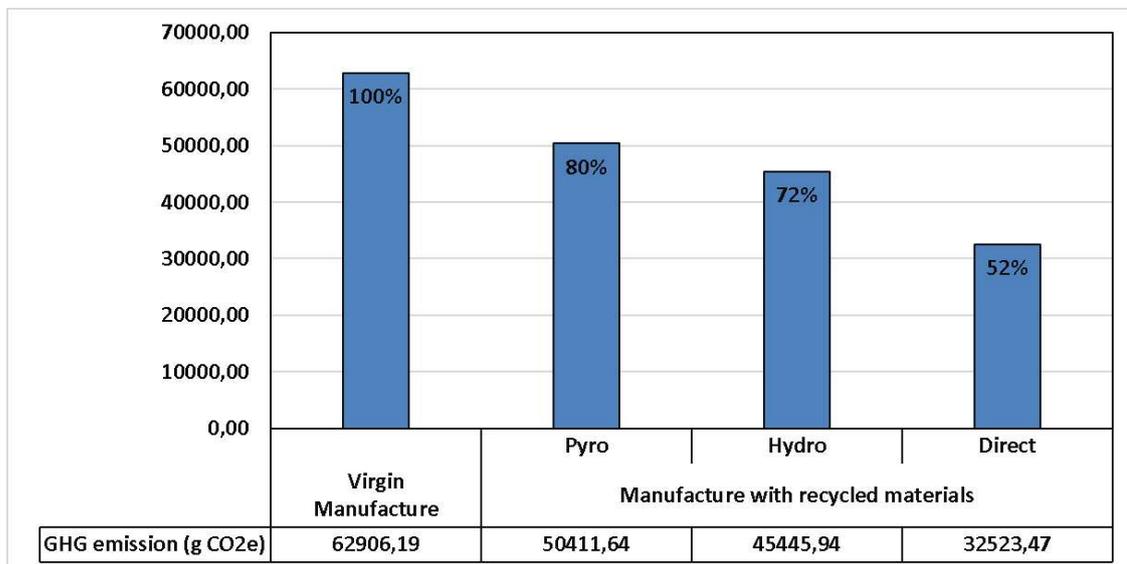
Figura 25 – Comparativo de emissões de GEE (matriz da China)



Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do modelo

Com a inserção dos dados da matriz de oferta de energia elétrica do Brasil, no modelo por tipo de fonte, que, se agrupadas, possui 83.79% da oferta de origem em fontes renováveis e, de 85.89%, de fonte de energia de baixo carbono. Essa distinção entre fontes de baixo carbono e fonte renovável se dá pelo fato da energia elétrica, gerada por fonte nuclear, embora não renovável, também seja de baixo carbono. O Brasil possui, segundo dados da ANEEL, 2.1% de sua matriz de oferta de energia vinda de fonte nuclear. Dessa forma, a composição de emissões/kWh na manufatura e reciclagem de baterias NMC 811 extraída do modelo, devidamente parametrizado para a matriz brasileira, é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Comparativo de emissões de GEE (matriz do Brasil)



Fonte: Elaborada pelo autor com dados extraídos do modelo.

Com os dados acima extraídos do modelo, foi possível encontrar os primeiros parâmetros informados na seção de metodologia. Assim, obtém-se os parâmetros de 1a (emissões dadas pela manufatura de material virgem com a matriz da China), 1b (emissões dadas pelos processos de reciclagem com a matriz da China), 2a (emissões dadas pela manufatura de material virgem com a matriz do Brasil) e 2b (emissões dadas pelos processos de reciclagem com a matriz da China) apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de emissões GEE por tipo de processo de fabricação

Id. parâmetro de saída	Manufatura / Reciclagem	Emissões GEE (gCO ₂ e)	Descrição do parâmetro
1a	Manufatura Virgem	68475,21	Emissões na fabricação de bateria com materiais virgens (China)
1b	Pirometalurgia	64941,34	Emissões na fabricação de bateria com materiais reciclados (China)
	Hidrometalurgia	59495,44	
	Reciclagem Direta	42944,57	
2a	Manufatura Virgem	62906,19	Emissões na fabricação de bateria com materiais virgens (Brasil)
2b	Pirometalurgia	50411,64	Emissões na fabricação de bateria com materiais reciclados (Brasil)
	Hidrometalurgia	45445,94	
	Reciclagem Direta	32523,47	

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio dos parâmetros 1a,1b,1c e 1d apresentados acima, pode-se conseguir os parâmetros 3a (relação de emissões entre fabricação de bateria nova e reciclada na China) e 3b (relação de emissões entre fabricação de bateria nova e reciclada na China) dados pela Tabela 5 da seção de metodologia na subsecção 4.9 e apresentados já com seus respectivos valores na Tabela 10.

Tabela 10 – Comparativo entre emissões de manufatura com material virgem e reciclado

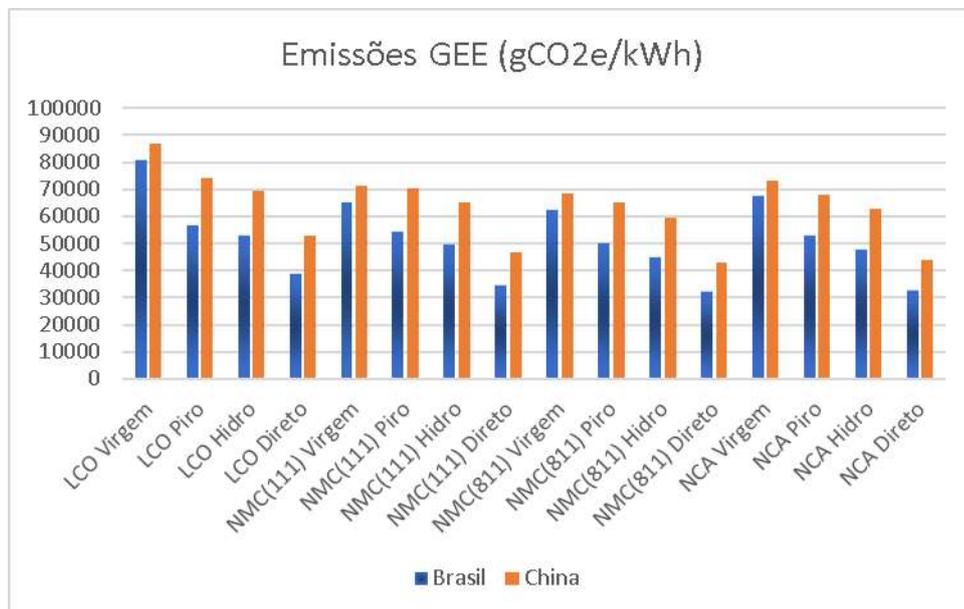
Parâmetros		Resultado por Método de reciclagem			Descrição do parâmetro
Id. parâmetro	Cálculo	Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Reciclagem Direta	
3a	1a /1b	1,054416317	1,150932057	1,594502117	Relação de emissões entre fabricação de bateria nova e reciclada (China)
3b	2a/2b	1,247850518	1,384198345	1,934178105	Relação de emissões entre fabricação de bateria nova e reciclada (Brasil)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a análise dos dados extraídos do modelo, foi possível observar que a intensidade das emissões de GEE são dependentes da composição química da bateria. Ademais o benefício na redução das emissões de GEE nos processos de reciclagem que se tornaram notáveis para as células da bateria NMC811, também fora observada quando se estende a análise para os baterias com as composições químicas LCO, NMC111 e NCA. A Figura 27, a seguir, mostra o comparativo das emissões de GEE entre a manufatura com material virgem e a manufatura usando

material reciclado. No gráfico ainda é possível ver a influência da matriz de oferta de energia elétrica nas emissões entre as diferentes químicas e processos de manufatura. O resultado comparativo entre as químicas estudadas permitiu também observar que os métodos de reciclagem têm menor emissões, quando comparados com as emissões para fabricação de baterias com materiais virgens da mesma química e processo. Contudo, quando se compara as emissões na manufatura de bateria LCA por processo de pirometalurgia com a fabricação usando material virgem para a bateria NMC811, nota-se que o primeiro caso é mais poluente do que o segundo.

Figura 27 – Emissões com as matrizes do Brasil e da China



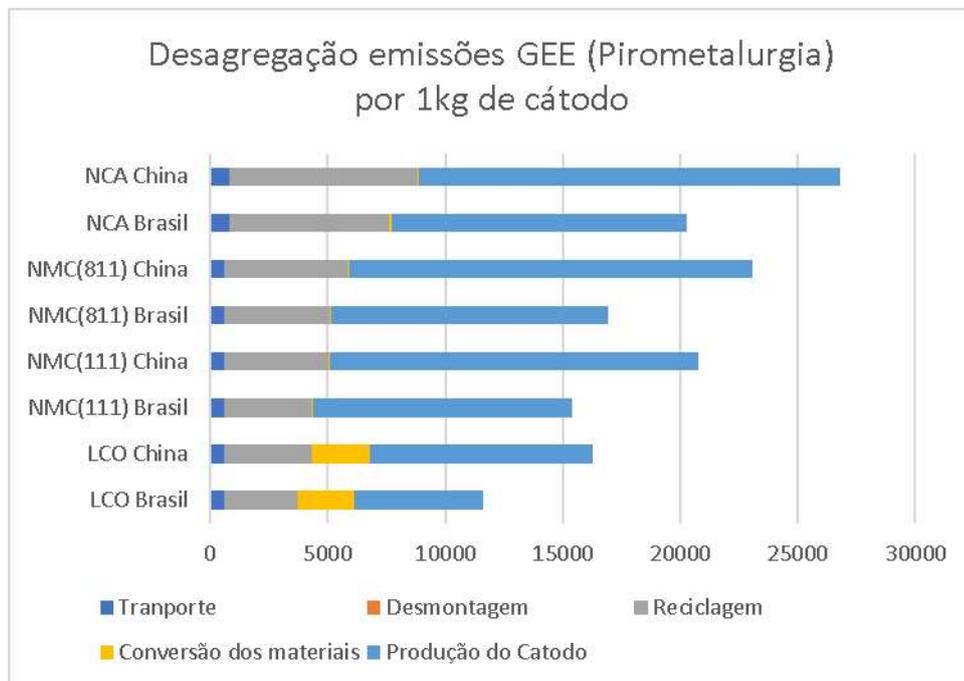
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 27, pode-se ver que o processo de reciclagem por pirometalurgia aparece como mais intenso nas emissões na maior parte das químicas estudadas. Para melhor entender a distribuição das emissões nas diferentes químicas nos processos hidrometalúrgico e pirometalúrgico, coloca-se a seguir as emissões desagregadas nos processos pirometalúrgico e hidrometalúrgico. Os valores de emissões nos gráficos desagregados estão por gCO₂e por 1kg de cátodo produzido. Nos gráficos das emissões desagregadas das apresentados na Figura 28 e Figura 29, há um predomínio das emissões na etapa de produção de cátodo para a maior parte das composições químicas das baterias em estudo, à exceção da LCO para o

processo de hidrometalurgia. Nesse cenário, essa química apresenta maior participação das emissões na reciclagem.

Outra informação importante que essa pesquisa trouxe, foi a possibilidade de observar que a influência da oferta da matriz de eletricidade nas emissões foi maior nos comparativos dos processos de reciclagem do que na manufatura com material virgem. Isso se deu, porque fora considerado todo o ciclo de vida dos materiais importados usados na manufatura com material virgem que já vêm para o processo de manufatura com suas respectivas pegadas de carbono.

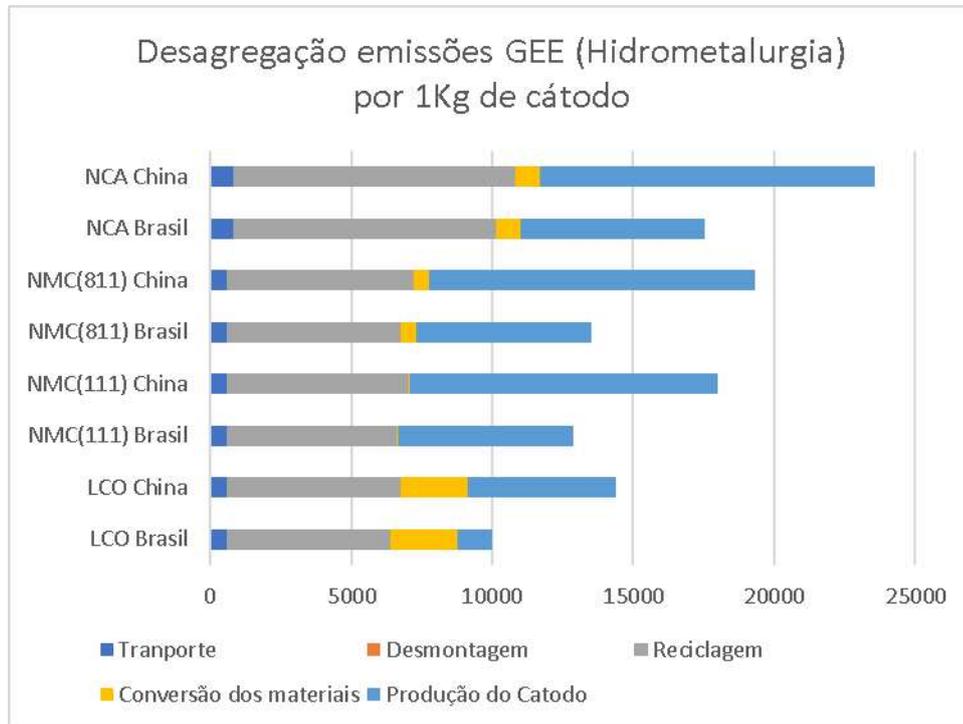
Figura 28 – Desagregação de emissões de GEE no processo de pirometalurgia



Fonte: Elaborado pelo autor

Tanto para o processo de pirometalurgia, visto na Figura 28, quanto para o processo de hidrometalurgia da Figura 29, é possível notar que as emissões obtidas por baterias manufaturadas com materiais virgens ou por meio de materiais aproveitados da reciclagem com a matriz brasileira são inferiores.

Figura 29 – Desagregação de emissões de GEE no processo de hidrometalurgia



Para a parte do transporte, os valores obtidos para a China e Brasil foram os mesmos, quando comparados as mesmas químicas e mesmo processo de reciclagem. Isso ocorre, porque para o transporte não há influência do uso da eletricidade. Como a maior parte do transporte considerado no estudo é realizado por caminhões de médio porte e pesados, então o consumo de combustível fóssil foi considerado. As distâncias entre coleta das baterias em fim de vida útil e a reciclagem, assim como as distância entre o fabricante até a recuperação de materiais críticos, e da produção de cátodo até a fabricação, não tiveram alterações entre um cenário de bateria e outro, a fim de assegurar a comparação de emissões em condições equivalentes.

A desmontagem do pacote (*pack*) não apresenta emissões em ambos gráficos, porque foi considerado que essa etapa é realizada de forma manual. Isso ocorre, porque as diferentes montadoras de veículos elétricos usam formatos do pacotes distintos o que dificulta a automatização do processo. Um outro aspecto da reciclagem que dificulta a uniformização, são os diferentes tipos de químicas com diferentes materiais. Fora realizada uma simulação para produção de baterias

NMC811 com materiais reciclados obtidos pela bateria do tipo NCA que também possui níquel, cobalto e lítio. O resultado demonstrou que a mistura de diferentes químicas torna o processo mais intenso em emissões de GEE. Nesse caso em específico, as emissões, para o processo de reciclagem por pirometalurgia, foram acrescidas de 64.944,34 gCO₂e, emissão dada em caso do uso de mesma química NMC811 como material de entrada, para 68475,21 gCO₂e por kWh de bateria NMC811 produzida, tendo a bateria NCA como material de entrada. Esse acréscimo é ainda maior, quando simulado, por exemplo, como material de entrada, para as baterias LCO, para produzir NMC811 por meio do processo de reciclagem por pirometalurgia. Nesse novo cenário, as emissões saltariam dos 64.944,34 gCO₂e obtidos com a reciclagem por pirometalurgia, de baterias da mesma química NMC811, para 71.366,33 gCO₂e. Essas simulações com diferentes materiais de entrada foram realizadas tendo como base a matriz de eletricidade da China.

5.2 Análise da influência da matriz de oferta de energia elétrica no Brasil nas emissões.

Uma vez obtido os resultados da relação entre as emissões na manufatura de baterias com materiais virgens e métodos de reciclagem por pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta dados pelas matrizes de oferta de energia elétrica de China e Brasil, então foi possível determinar, pelo parâmetro 4a, a influência da matriz do Brasil em relação a da China.

Tabela 11 – Influência da matriz de oferta de energia elétrica

Id. parâmetro de saída	Cálculo	Manufatura com material virgem	Resultado por Método reciclagem			Descrição do parâmetro
			Pirometalurgia	Hidrometalurgia	Reciclagem Direta	
4a	$(1a/1b)/(2a/2b)$	1,088528917	1,288221124	1,309147587	1,320417688	Influência da matriz de energia elétrica no total de emissões por processo

Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre emissões de GEE na manufatura com material virgem nem sempre é superior com as emissões dadas pelo processo de reciclagem, como vimos anteriormente. Contudo, a influência da matriz de oferta de energia elétrica do

Brasil traz ganhos significativos nos comparativos de todos os itens de baterias e processos. Outro ponto notável é que, embora a bateria do tipo NMC (811) não seja a que tenha melhor desempenho para a redução das emissões, quando recicladas, ela segue sendo a que possui níveis mais baixos de emissões GEE por kWh, comparativamente às demais baterias estudadas nessa pesquisa.

Para que se possa entender a influência nas emissões por fonte geradora de eletricidade, considerou-se cenários de emissão de GEE para manufatura com materiais virgens, pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta da bateria NMC811. A Tabela 12 apresenta as emissões por fonte geradora. As emissões por fonte considera um cenário onde a fonte em análise corresponda a 100% da fonte geradora. Evidentemente que é um cenário hipotético, mas que ajuda na compreensão de quão intensa é a participação de cada uma das fontes isoladamente. Assim, vemos que, se em um cenário onde a fonte geradora de eletricidade fosse puramente de origem em hidroelétrica, das alternativas comparadas, seria a que traria menores níveis de emissões seguida da nuclear, biomassa, gás natural, óleo e, por fim, fonte de carvão como a que emite gases de efeito estufa.

Tabela 12 – GEE (gCO_{2e}/kWh) por matriz isoladamente

	Óleo Residual	Gás Natural	Carvão	Biomassa	Nuclear	Hidro
Virgem	71326,54	66589,68337	71356,45	62566,1	62171,97	62117,49
Piro	72380,53	60021,95872	72458,57	49524,34	48496,04	48353,89
Hidro	66688,77	54738,64074	66764,23	44587,97	43593,65	43456,19
Direto	48280,16	39416,25621	48336,13	31887,08	31149,55	31047,6

Fonte: Elaborada pelo autor

Por meio da Tabela 12 é possível observar uma oportunidade muito significativa de redução das emissões com o devido ajuste da matriz de oferta de eletricidade, privilegiando, em sua composição, a presença de mais fontes, como hidroelétrica, nuclear e biomassa em detrimento das fontes de carvão, gás natural e óleo residual (petróleo). Pode-se ver que a emissão para fabricação de baterias com materiais virgens, tendo como matriz petróleo ou carvão, emitem mais que o dobro de GEE, que o comparado com as emissões oriundas do processo de reciclagem

direto com uma geração puramente dada pela fonte de hidroeletricidade. Com isso, essa pesquisa ajuda elucidar que há muito espaço para melhorar as emissões nas reciclagens, não só pela influência da matriz de oferta de energia elétrica, como pela escolha do processo de reciclagem mais adequado.

5.3 Análise de custo para manufatura e reciclagem

Embora o foco dessa pesquisa seja mais no impacto ambiental do que no custo, essa seção visa trazer informações bastante resumidas sobre os custos associados à fabricação de baterias com materiais virgens e, ainda, prover informações sobre custos por métodos de reciclagem. Na Tabela 13, há os valores em dólares dos Estados Unidos dos custos para fabricação de uma célula, usando materiais virgens ou materiais obtidos pelos diferentes métodos de reciclagem. Como se nota, nem sempre a reciclagem se apresenta como alternativa mais viável economicamente, como é o caso do processo por pirometalurgia, que tem um custo de recuperação dos materiais até superior ao custo do materiais virgens. Essa subsecção permite estender a análise, além do impacto ambiental, para a tomada de decisão da escolha do melhor método, sob o ponto de vista financeiro.

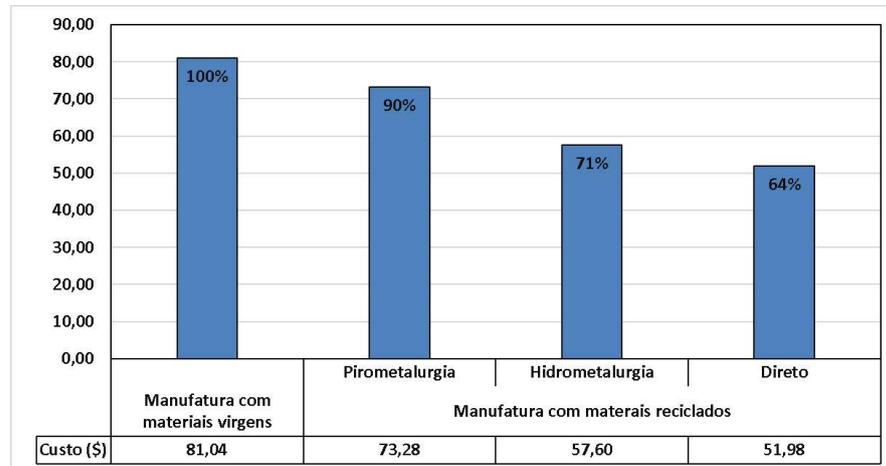
Tabela 13 – Custo desagregado por origem dos materiais (NMC 811)

	Materiais virgens	Materiais reciclados por pirometalurgia	Materiais reciclados por hidrometalurgia	Materiais recuperados por método direto
Materiais	\$ 22,95	\$ 23,79	\$ 18,99	\$ 15,48
mão-de-obra	\$ 0,24	\$ 0,24	\$ 0,24	\$ 0,24
Depreciação	\$ 3,44	\$ 2,66	\$ 2,66	\$ 2,66
Custos indiretos	\$ 0,78	\$ 0,63	\$ 0,63	\$ 0,63
Vendas e administração	\$ 1,12	\$ 0,88	\$ 0,88	\$ 0,88
P&D	\$ 1,38	\$ 1,06	\$ 1,06	\$ 1,06
Lucro	\$ 1,99	\$ 1,60	\$ 1,56	\$ 1,52
Garantia	\$ 1,79	\$ 1,73	\$ 1,46	\$ 1,26

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o custo por kWh para a baterias NMC 811, obteve-se os seguintes resultados encontrados para a China, na Figura 30, e para o Brasil, na Figura 31.

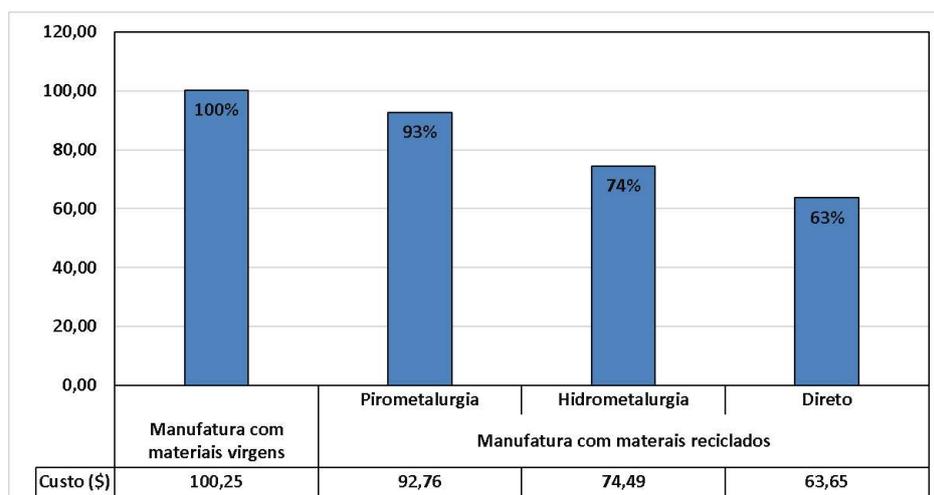
Figura 30– Custo por processo de fabricação para a China por kWh (NMC811)



Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do *Everbatt*.

Os valores encontrados variam em função do volume de células produzidos. Nesse caso, assim como para o caso da análise de impacto ambiental, o volume ajustado foi de 6,85 GWh por ano. Os dados de entrada de custos para a China foram os apresentados pelo modelo adotado e que teve atualização recente. Já para o Brasil, os dados foram os encontrados em dados secundários por diferentes fontes que estão relacionadas na Tabela 5.

Figura 31– Custo por processo de fabricação para o Brasil por kWh (NMC811)



Fonte: Elaborado pelo autor com dados extraídos do *Everbatt*.

A fim de se facilitar uma visualização comparativa entre os resultados obtidos para o cenário da matriz de oferta de energia elétrica brasileira e chinesa, elaborou-se a Tabela 14.

Tabela 14 – Tabela comparativa de resultados entre Brasil e China

Tabela comparativa entre Brasil e China				
Descrição Parâmetros				
Composição da matriz de oferta de energia elétrica	Fontes fósseis *		9,90%	66,85%
	Fontes não fósseis *		90,10%	33,15%
Emissões na fabricação com materiais: (gCO _{2e})	Virgens		62906,19	68475,21
	Vindos da redigem	Pirometalurgia	50411,64	64941,34
		Hidrometalurgia	45445,94	59495,44
		Direto	32523,47	42944,57
Custo fabricação de célula por processo: (USD)	Fabricação com materiais Virgens		100,25	81,04
	Fabricação por redigem	Pirometalurgia	92,76	73,28
		Hidrometalurgia	74,49	57,60
		Direto	63,65	51,98
Percentual relativo das emissões tendo a China como referência por processo: (%)	Fabricação com materiais Virgens		92%	100%
	Fabricação por redigem	Pirometalurgia	78%	100%
		Hidrometalurgia	76%	100%
		Direto	76%	100%
Percentual relativo das emissões tendo a China como referência por custo: (%)	Fabricação com materiais Virgens		124%	100%
	Fabricação por redigem	Pirometalurgia	127%	100%
		Hidrometalurgia	129%	100%
		Direto	122%	100%
* Valores arredondados				

Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo provido uma breve visão de custos, a seção seguinte versa sobre como os achados dessa pesquisa podem ser traduzidos em oportunidades de melhoria para a redução das emissões na fabricação de baterias com materiais virgens e reciclados.

5.4 Oportunidades de melhoria para redução de emissões

As análises comparativas entre os processos de reciclagem e de fabricação de uma bateria nova, agregado aos comparativos entre as matrizes de energia elétrica do Brasil e da China, contribuíram na apresentação de resultado que podem auxiliar na elaboração das iniciativas de reciclagem, também com o objetivo de redução das emissões. Assim, processos de reciclagem com menor geração de

emissões, como o por hidrometalurgia e direto, devem ser preferidos em detrimento do processo por pirometalurgia.

Há uma variedade de projetos de pacotes de baterias por montadoras não padronizados e de diferentes composições químicas que adicionam uma complexidade no ganho em escala na reciclagem. (CHITRE *et al.*,2020). Fora visto ao longo dessa pesquisa que os processos de reciclagem, além de terem suas adoções ainda incipientes, têm seus processos de reciclagem em constante adaptação, para trazer ganhos de viabilidade financeira e de redução do impacto ambiental.

Com isso, pode-se notar que, se por um lado o processo já poderia estar com taxas de reaproveitamento das baterias muito superior ao que temos, por outro, conclui-se que há, ainda, muito para melhorar. O estudo evidenciou a importância da matriz de eletricidade na redução das emissões, o que pode ser visto como uma oportunidade de negócio alinhado à agenda global de redução de emissões para os países com matriz mais limpas, como é o caso do Brasil. Outro movimento possível, mas que requer ainda mais tempo e investimento, trata-se da adoção de matrizes cada vez mais limpas pelos países que concentram a manufatura de baterias com materiais virgens, ou que possuem plantas de reciclagem, como é o caso da China. Esse é um movimento que até vem sendo notado no país asiático, mas que ainda vai precisar de algum tempo para ver a importância da fonte de carvão e outras de combustíveis fósseis serem reduzidas a níveis mínimos em sua matriz geradora de energia elétrica.

Para além do aspecto que tange as matrizes de eletricidade, tem-se ainda ações que podem ser adotadas do lado das baterias e seus fabricantes. Como visto nas possíveis estratégias de economia circular, o DFR (*Design For Recycling*) pode ser uma proeminente estratégia para alavancar o processo de reciclagem direto. Assim, como vistos os fluxos de reciclagem, muitas etapas seriam suprimidas do processo, reduzindo custos e emissões.

Para tanto, torna-se premente a criação de uma padronização mundial com códigos definidos e adotados pela indústria nos pacotes de bateria, a fim de se permitir uma maior automatização do processo de desmontagem dos pacotes. Contudo, só a padronização dos pacotes, que é um problema encontrado na maior parte das literaturas estudadas, não é suficiente. Ainda há muito que se evoluir na parte de métodos e processos na fabricação das células para que elas sejam

concebidas, ainda em sua fase de fabricação, de uma forma que a recuperação dos cátodos seja feita de forma direta. Dessa forma, como visto, teria-se oportunidades de redução significativa nas emissões em conjunto com a redução de custos.

No estágio atual, nenhuma das tecnologias de reciclagem para baterias de íon-lítio é ideal, uma vez que há muitas limitações e desafios em fase de resolução. Estão sendo empregados esforços para melhorar o desempenho das baterias, por meio do aumento da densidade de carga, maior autonomia nos veículos e aumento da segurança. Com isso, grande atenção tem sido dedicada na descoberta de materiais e melhoria dos projetos das baterias que tem contribuído para a rápida evolução desse importante componente do VE. Contudo, essa rápida evolução nos materiais e concepção das baterias em uso torna a reciclagem muito mais desafiadora (MA *et al*, 2022).

Adicionalmente às iniciativas encontradas através da revisão da literatura, as pesquisas realizadas, informações obtidas em artigos da indústria e nas consultas aos especialistas, foi possível listar oportunidades identificadas de uso de modelos circulares que possam ajudar a ter um impacto na redução das emissões dadas pela reciclagem das baterias.

A Fundação Ellen Macarthur publicou relatório que estabelece os objetivos universais de políticas para economia circular. Sendo eles: Estimular o design para a economia circular, gerenciar recursos para preservar o valor, criar as condições econômicas para a transição, investir em inovação, infraestruturas e competências, promover colaboração para a mudança do sistema.

Nesse contexto, iniciativas de modelos circulares que vão além de reciclagem podem ser empregadas. Como estratégia, por exemplo, que visa intensificar o uso do produto através do uso compartilhado, pode-se, por exemplo, adotar o modelo de transporte como serviço, que de certa forma já está presente nos modelos das empresas de motorista por aplicativo, mas que poderiam priorizar veículos elétricos que tenham um menor nível de emissão de GEE em sua fabricação. Essa estratégia poderia ir além do VEs e contemplar outros tipos de veículos que tragam menor emissão todo o seu ciclo de vida, como pode ser o caso de veículos movidos por biocombustíveis e os do equipados com células de combustíveis, apenas para citar alguns que poderiam ser beneficiados por esse tipo de iniciativa. Se a métrica contemplar as emissões por passageiros, então veículos elétricos de transporte que

comportem mais passageiros poderiam também estar ainda melhor posicionados como alternativa de menor emissão.

5.5 Implicações gerenciais

Este trabalho apresenta na Tabela 15 algumas implicações gerenciais com base nos resultados encontrados para fornecer uma abordagem consolidada sobre como os resultados podem ser apresentados de forma mais simplificada para a referência de tomadores de decisão, administradores públicos e legisladores. Isso lhes permite avaliar os impactos nas dimensões ambiental, de mercado e econômica da escolha do Brasil para o estabelecimento de plantas de reciclagem e fabricação de baterias para veículos elétricos.

Tabela 15 – Impacto gerencial e três dimensões

Dimensões	Manufatura de baterias			Composição da Matriz Elétrica como variável moderadora
	Com material virgem	Com material reciclado	Oportunidades de melhoria	
Ambiental	<p>Diante do fato de que a cadeia de suprimentos para os materiais virgens utilizados nos cátodos das baterias tem sua origem predominantemente em um número limitado de países, a pegada de carbono desses materiais depende do matriz de geração de energia elétrica de seus países de origem e processamento. Assim, os ganhos de fabricação com materiais virgens em um país com rede elétrica limpa são evidentes, mas resultam em uma redução comparativamente menor nas emissões devido à limitação à etapa de produção das células da bateria</p>	<p>Há uma redução nas emissões de gases de efeito estufa na fabricação quando se utilizam materiais reciclados, especialmente ao considerar materiais recuperados por meio do processo de reciclagem de baterias no final de sua vida útil, coletadas dentro do mesmo país onde a fabricação com materiais reciclados ocorrerá. Esse ganho é ainda mais amplificado em países com redes elétricas mais limpas</p>	<p>As oportunidades identificadas para melhoria no estudo em relação aos ganhos na redução das emissões de gases de efeito estufa podem ser resumidas da seguinte forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adoção de modelos circulares como DFR e PLE; - Priorização do uso de composições químicas de baterias que geram menores emissões de gases de efeito estufa por kWh; - Estabelecimento de um padrão global para rotulagem e processos que permitam a desmontagem automatizada de pacotes de baterias e o reuso de cátodos sem a necessidade de desmontagem das células e a respectiva redução de emissões 	<p>A composição da matriz elétrica serve como uma variável que amplifica os ganhos na redução de emissões</p>
Mercado	<p>No mercado, há uma prevalência do uso de materiais virgens na produção de baterias para veículos elétricos (VEs). O mercado de fabricação, especialmente para células de bateria, é predominantemente dominado por países asiáticos, sendo a China o principal player, responsável por aproximadamente 77% da fabricação de células</p>	<p>O mercado de reciclagem de baterias ainda é bastante incipiente em todo o mundo, abrindo oportunidades para empresas de diversos países que buscam aproveitar materiais valiosos de baterias que atingem o final de seu ciclo de vida em veículos elétricos usados dentro de seus territórios</p>	<p>O significativo crescimento na adoção de veículos elétricos em todo o mundo cria um mercado substancial para baterias que atingirão o final de sua vida útil. Com uma expectativa de vida útil de aproximadamente 10 anos, as baterias precisam ser substituídas antes que os veículos se tomem obsoletos, criando assim oportunidades para reutilização das baterias em várias aplicações, bem como para a sua reciclagem</p>	<p>Com a transição energética no setor de transporte ganhando momentum, aliada a um interesse genuíno em reduzir os impactos ambientais por meio da adoção de veículos elétricos, surge uma oportunidade para inúmeros países com redes elétricas mais limpas</p>
Econômica	<p>O processo de fabricação utilizando materiais virgens está sujeito a flutuações nos preços internacionais de commodities como Níquel, Cobalto e Lítio. Com a China liderando as cadeias de processamento dos principais materiais utilizados na fabricação de baterias, há espaço limitado para melhorias de custo a menos que os ganhos financeiros com a redução de carbono sejam considerados. Potenciais contabilizações envolvendo os benefícios de créditos de carbono podem reformular esse cenário</p>	<p>Com base nos resultados de custo obtidos, torna-se evidente tanto para a China quanto para o Brasil que a reciclagem oferece ganhos econômicos, que podem variar dependendo do processo de reciclagem. No entanto, todos os processos de reciclagem resultam em uma vantagem de custo significativa na fabricação ao utilizar materiais reciclados em comparação com materiais virgens. Embora economias de custo sejam observadas em todos os processos, o processo de reciclagem direta se destaca mais nesse aspecto</p>	<p>Dado que os resultados demonstraram economias de custo na fabricação de células ao usar materiais provenientes da reciclagem de cátodos, isso deve ampliar o interesse dos empreendedores no setor. Além disso, o crescimento esperado no mercado de carbono adicionará um novo incentivo financeiro às iniciativas de reciclagem</p>	<p>Uma rede elétrica mais limpa em um ambiente onde as reduções de emissões podem ser monetizadas representa novas perspectivas de ganhos para países que têm a capacidade de transicionar suas redes em benefícios na fabricação e reciclagem de baterias.</p>

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os aspectos gerenciais mais significativos dos resultados foram resumidos para apresentar uma das contribuições desta pesquisa em um nível gerencial mais elevado. Esta tabela multidimensional ajuda a elucidar de forma concisa as implicações dos resultados em diferentes dimensões, além de fornecer suporte ao se decidir sobre uma fábrica de manufatura ou reciclagem no Brasil. Se as oportunidades de melhoria forem devidamente observadas, os ganhos ambientais e econômicos podem se estender além dos proporcionados por uma matriz elétrica mais limpa quando as sugestões de melhoria propostas forem implementadas.

5.6 Considerações finais e demais implicações

Com o reconhecimento da importância dos temas correlacionados à preservação do meio ambiente ganhando espaço nas agendas da academia e de cada vez mais governantes pelo mundo, nota-se um crescimento de fóruns intergovernamentais e número de trabalhos ligados ao tema. Ações relacionadas à sustentabilidade estão cada vez mais presentes nas estratégias de negócios das empresas e de governos, com isso, soluções para mitigar o impacto antrópico ao ambiente natural tem sido intensamente debatidas com algumas iniciativas já sendo adotadas. Gradualmente, ainda que de forma incipiente, os temas ligados à preservação vêm convergindo para sustentabilidade ambiental e desenvolvimento sustentável. Dessa forma, vem aumentando o nível de conscientização de se traduzir em ações o atendimento das necessidades atuais sem comprometer, ou reduzindo o nível de comprometimento, para as gerações futuras poderem atender suas próprias necessidades.

Dessa tomada de consciência, a economia circular é uma alternativa ao modelo linear e suas externalidades negativas. A circularidade como contraponto a linearidade da extração, produção, consumo e descarte, é um modelo que pode reduzir as ameaças à estabilidade da economia e a integridade dos ecossistemas naturais.

Nesse contexto, a reciclagem, que é uma das estratégias de modelo circular, vem sendo cada vez mais adotadas em diferentes segmentos. Quando se dá

destaque a um dos setores que mais poluem, que é o do transporte, vê-se iniciativas, como a da adoção massiva do carro elétrico na tentativa de reduzir as emissões de GEE. Essa substituição de veículo elétrico, como alternativa aos veículos à combustão, visando a redução das emissões, traz consigo uma nova preocupação com o volume das baterias que estão atingindo e, em maior número, seguirão atingindo o final de sua vida útil. Para evitar que as baterias tenham um descarte inapropriado face aos seus componentes tóxicos, e ainda, para reduzir a pressão no volume de extração dos recursos naturais para a fabricação de baterias novas, a sua reciclagem surge como uma possível estratégia de modelo circular. Assim, ao se juntar essas duas iniciativas, levanta-se a dúvida sobre como a reciclagem, que já é um ganho do ponto de vista da redução na pressão por extração de novos recursos naturais e menor contaminação de aterros, poderia, também, traduzir-se em um benefício em termos de redução de emissões, quando comparada à fabricação de novas.

O desafio de responder a esse questionamento foi possível, por meio de um modelo já consolidado, que reúne o volume de informações e método que uma pesquisa desse nível exige. O modelo adotado, *Everbatt*, mostrou-se bastante adequado, pela sua abrangência em termos de dados necessários, por considerar o ciclo de vida completo dos materiais e suas emissões, pela sua adoção na academia com diferentes artigos publicados e, ainda, pela sua atualidade, já que ele fora revisado em 2023. Embora o *Everbatt* tenha uma abrangência já suficiente para responder à pergunta de comparativo de emissões entre a fabricação de uma bateria nova e diferentes processos de reciclagem, ele não conseguia responder sobre como seria a influência da matriz de oferta de energia elétrica brasileira sobre os comparativos de emissões. A necessidade de considerar a matriz se embasa no fato de que a fabricação e a reciclagem também requerem eletricidade para terem seus processos realizados.

Muitos estudos e modelos teóricos, inclusive os que foram utilizados para elaborar o *Everbatt*, tem como mercado de análise outros países como China, Korea, Estados Unidos. O Brasil não figura na lista de países, cujos dados já estão disponíveis no modelo. Para mitigar esta limitação, o trabalho de coletas de dados secundários teve que ser abrangente e exaustivo, a fim de obter os resultados mais próximos do cenário real.

Além disso, poucas iniciativas de reciclagem de baterias de veículos elétricos já estão em andamento em nosso país. Desta forma, os modelos observados em outros mercados podem servir de referência desde que se tenha o olhar crítico para as particularidades regionais. As baterias para veículos elétricos têm suas tecnologias desenvolvidas e adotadas principalmente nos países citados, dessa forma, o *Everbatt* contempla as informações que refletem a características de projetos e processos de fabricação e reciclagem das baterias de maior emprego pela indústria.

Contudo, uma das adaptações que se fez necessária para ajudar a elucidar as perguntas da pesquisa foi justamente entender como seria ter uma planta de reciclagem num contexto da matriz de oferta de energia do Brasil. A pertinência desse tema se alinha com a avaliação crítica de que as adoções de veículos elétricos como uma alternativa ecologicamente benéfica, tenham suas plantas de fabricação e reciclagem de baterias majoritariamente instaladas na China, que conta com uma matriz composta por alta participação de fontes de origem fósseis. Assim, os benefícios de redução de emissões dos VEs, durante a fase de uso aqui no Brasil, que possui uma matriz mais limpa, podem ser reduzidos, quando a fabricação e ou reciclagem das baterias desses mesmos veículos já vêm com um acúmulo de emissões, por terem suas fabricações em seus países com matrizes menos limpas.

Com base nos achados dessa pesquisa, pode-se concluir que tanto a manufatura e reciclagem de baterias de íon-lítio para veículos elétricos no Brasil traria ganhos significativos do ponto de vista do impacto ambiental, dados pela redução das emissões de gases de efeito estufa. Pode ser notado, que o menor ganho se apresenta no processo de manufatura com materiais virgens. Isso ocorre, porque o modelo adotado considera as emissões em todo o ciclo de vida dos materiais usados na bateria.

Assim, as emissões na extração e transporte dos materiais até a planta de manufatura já vem com níveis elevados de emissões de GEE. Os materiais, como cobre, níquel, cobalto e lítio tem suas minerações concentradas no Chile, Indonésia, República Democrática do Congo e Austrália, respectivamente. Para o caso do níquel de 1ª classe, a Rússia participa com a produção de 20%. Assim, o ganho no processo de manufatura se daria na etapa de manufatura das baterias, mas não evitaria toda a pegada de emissões, provenientes do ciclo de extração, refino e transporte.

Já para os métodos de reciclagem, percebeu-se um ganho mais significativo. Isso, porque os materiais considerados como de entrada para o processo de reciclagem são oriundos de baterias em fim de vida útil utilizadas no Brasil. Essas baterias ao serem recicladas, diferentemente dos materiais virgens, não trazem consigo as emissões de extração e refino. Os cálculos desse estudo consideram as emissões de transporte, entre a coleta das baterias em fim de vida útil até as plantas para as diferentes etapas do processo de reciclagem.

Dado um elevado número de variáveis para elaborar este tipo de pesquisa, em conjunto com poucas referências na literatura sobre as emissões na reciclagem e manufatura no Brasil, e pela falta de informações vindas da indústria local, fica entendido que novas pesquisas serão necessárias, para validar ou confrontar os dados aqui obtidos. Apesar dessas lacunas informadas, tem-se o vanguardismo desse estudo como um aliado dos primeiros que desejam empreender nesse setor e que tenha a agenda ambiental como parte da estratégia dos negócios.

Esse vanguardismo, contudo, combinado ao mencionado volume de variáveis e particularidades regionais para esse tipo de estudo, cria-se uma faixa de resultados por variações dos dados, métodos e premissas diferentes de estudos que examinam as emissões em baterias de VE. Essa incipiência aliada à complexidade em estudos que avaliam todo o ciclo de vidas dos materiais, tornam difícil encontrar uma metodologia que apresente o maior nível de incerteza e que seja consensual na comunidade acadêmica. Por isso, os comparativos de resultados dificilmente convergem. Isso, por fim, dificulta uma validação dos resultados encontrados nessa pesquisa com outros já realizados dentro da literatura.

A China concentra o processamento dos materiais como lítio, níquel, cobalto e grafite, a manufatura dos componentes das células e produção de bateria. Assim, o aproveitamento dos materiais das baterias usadas no Brasil abre uma janela de oportunidade para reduzir a dependência do Brasil em relação a Cobalto, Lítio principalmente. Já o grafite e níquel, o Brasil já possui produção própria. Contudo, mesmo para esses materiais que o país produz, o aproveitamento por meio da reciclagem local das baterias em fim de vida útil por VEs usados no Brasil, além de produzir uma fonte de renda local, trará redução de emissões caso a reciclagem seja utilizada no processo de fabricação de novas baterias.

Considerando a nossa matriz de oferta de energia elétrica, a reciclagem ganha ainda mais importância quando comparada as fabricadas com materiais

novos. Isso, enquanto perdurar a dependência do Brasil dos materiais importados que já vêm com suas emissões acumuladas dos seus países de onde foram extraídas e processadas.

Esta pesquisa destaca os significativos benefícios ambientais e econômicos da fabricação e reciclagem de baterias de íon de lítio para veículos elétricos no Brasil. Ele destaca o potencial de redução de emissões, especialmente na reciclagem, e o papel crucial da matriz elétrica brasileira na consecução dessas reduções. Além disso, a pesquisa enfatiza a relevância do papel do Brasil na redução da dependência de materiais críticos provenientes do exterior. Reconhecendo a complexidade e variabilidade dos dados nesse campo, este estudo fornece perspectivas valiosas para os primeiros adotantes, formuladores de políticas e pesquisadores que buscam promover práticas sustentáveis no setor de veículos elétricos e reciclagem de baterias

Além dos benefícios ambientais com a reciclagem, há ainda ganhos econômicos diretos da indústria de reciclagem e ganhos indiretos com a comercialização de créditos adquiridos com as reduções nas emissões de GEE em mercados de carbono, que pode ser um objeto de pesquisas futuras, para estender o alcance dos resultados aqui encontrados.

6 REFERÊNCIAS

ACEA, l'Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, **The mobility Industry, Pocket Guide 2021/2022**, Disponível em:

https://www.acea.auto/files/ACEA_Pocket_Guide_2021-2022.pdf. Acesso em 22 de Maio de 2022.

ALMEIDA, Danilo Sette de, **Recuperação ambiental da mata atlântica**. Editus, [S.l., s.n., s.d.], 2016.

ALVES DIAS, P.; BLAGOEVA, D.; PAVEL, C.; ARVANITIDIS, N.. Cobalt: Demand-Supply Balances in the Transition to Electric mobility. (Tech. Rep. No. EUR 29381 EN). **European Commission, Joint Research Centre**, 2018

ANEEL, **Agência nacional de Energia Elétrica**, <https://www2.aneel.gov.br/>. Acesso em 21 setembro de 2023.

ANFAVEA, **Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, Anuário de 2021**. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/anuarios/>. Acesso em 05 de fevereiro de 2022.

ANEEL, **Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração por fonte**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/>. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.

ANL, BatPaC: A Lithium-Ion Battery Performance and Cost Model for Electric-Drive Vehicles. *In: US Department of Energy*, 2016

ANL, **Closing the loop on battery recycling**, 2018a

ANL,. The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation Model, *in: Laboratory, A.N.* (Ed.), 2018b.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. Disponível em: <https://www.anl.gov>. Acessado em: 25 de Abril de 2022

BloombergNEF, **Electric Vehicle Outlook 2021**. Disponível em: EVO Report 2021 | BloombergNEF | Bloomberg Finance LP (bnf.com). Acesso em: 15/04/2021

BRANNMARK, M., & BENN, S.. A proposed model for evaluating the sustainability of continuous change programmes. *In: Journal of Change Management*, 231–245, 2012.

BAUER, C.; HOFER, J.; ALTHAUS, H.; DUCE, A.D. Andrew Simons. The environmental performance of current and future passenger vehicles: *In: life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework*. Appl. Energy 157, 871–883, 2015.

BERTASSINI, Ana Carolina. Captura de valor em uma economia circular: guia para a identificação de oportunidades de valor circular. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, 2018.

BICER, Y.; DINCER, I..Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel. *In: Int. J. Hydrogen Energy* 42 (6), 3767–3777, 2017

BOCKEN, N.M.P.; PAUW, I de.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B., 2016. Product design and business model strategies for a circular economy. *In: J. Ind. Prod. Eng.* 33 (5), 308 e 320.

BOULDING, Kenneth E. The economics of the coming spaceship earth. *In: New York*, p. 1-17, 1966.

BOWEN, Glenn A. Document analysis as a qualitative research method. *In: Qualitative research journal*, 2009.

BRASIL, **Política Nacional de Resíduos Sólidos, 2010**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 10 de fevereiro de 2022.

BRUDERMÜLLER M.; SOBOTKA B.; WAUGHRAY D. A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation, **World Economic Forum**, 2019.

BRUNDTLAND, Gro Harlem; COMUM, Nosso Futuro. *In: Relatório Brundtland*. Our Common Future: United Nations, 1987.

CANALS, L.; MARTINEZ-LASERNA, E.; AMANTE, B.; NIETO, N.. Sustainability analysis of the electric vehicle use in Europe for CO2 emissions reduction. *In: J. Clean. Prod.* 127, 425–437, 2016.

CASTRO, Francine Duarte; CUTAIA, Laura; VACCARI, Mentore. End-of-life automotive lithium-ion batteries (LIBs) in Brazil: Prediction of flows and revenues by 2030. *In: Resources, Conservation and Recycling*, v. 169, p. 105522, 2021.

CHAPMAN, Eric J.; BYRON, Carrie J. The flexible application of carrying capacity in ecology. *In: Global ecology and conservation*, v. 13, p. e00365, 2018.

CBIE, 2020. **O que é o Rota 2030?** Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/o-que-e-o-rota-2030/>. Acessado em: 12 de abril de 2022.

CHEN, Xuedong; GENG, Yong; FUJITA, Tsuyoshi. An overview of municipal solid waste management in China. *In: Waste management*, v. 30, n. 4, p. 716-724, 2010.

CHEN, Mengyuan *et al.* Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries. *In: Joule*, v. 3, n. 11, p. 2622-2646, 2019.

CHITRE, Aniket *et al.* Towards a more sustainable lithium-ion battery future: recycling libs from electric vehicles. *In: Batteries & Supercaps*, v. 3, n. 11, p. 1126-1136, 2020.

CHOI, H.; SHIN, J.; WOO, J.. Effect of electricity generation mix on battery electric vehicle adoption and its environmental impact. *In: Energy Policy* 121, 13 e 24, 2018

CHOI, W.; SONG, H.H.. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: a South Korean case study. *In: Appl. Energy* **230**, 135 e 147, 2018.

CIEZ, R.E.; WHITACRE, J.F.. Comparison between cylindrical and prismatic lithium-ion cell costs using a process-based cost model. *In: J. Power Sources* **340**, 273–281, 2017.

D'AMATO, D.; DROSTE, N.; ALLEN, B.; KETTUNEN, M.; L€AHTINEN, K.; KORHONEN, J.; LESKINEN, P.; MATTHIES, B.D.; TOPPINEN, A.. **Green, circular, bio economy: a comparative analysis of sustainability avenues. J. Clean. Prod.** <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>, 2017.

DAI, Q.; KELLY, J.C.; DUNN, J.; BENAVIDES, P.. **Update of Bill-of-Materials and Cathode Materials Production for Lithium-Ion Batteries in the GREET Model.** **Available** at: https://greet.es.anl.gov/publication-update_bom_cm_2018a.

DE CASTRO, Nivalde *et al.* **Veículos Elétricos e Possíveis Impactos nas Redes de Distribuição.** [S.l., s.n., s.d.], 2019.

DOS SANTOS, Ivanna Pequeno; DOS SANTOS, Jahyra Helena Pequeno; SANTIAGO, Liane Maria. ECONOMIA CIRCULAR: BREVE ANÁLISE DOS SEUS PRINCÍPIOS, **XIX Encontro de Pós-graduação e pesquisa**, 2019.

DOH, J. P.; & QUIGLEY, N. R.. Responsible leadership and stakeholder management: Influence pathways and organizational outcomes. *In: Academy of Management Executive*, 28(3),255–274, 2014.

DU J, Ouyang D. **Progress of Chinese electric vehicles industrialization in 2015: A review. Appl Energy; 188:529–46.** <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.129>, 2017.

DUNN, J.B.; KELLY, L.G.J.C.; JAMES, C.; GALLAGHER, K.G.. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. *In: Energy Environ. Sci.* 8, 158–168, 2015.

DUNN, J.; GAINES, C.J.L.; GALLAGHER, K.; DAI, Q.; KELLY, J.C.. Material and Energy Flows in the Production of Cathode and Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. **Argonne National Laboratory**, US, 2015.

DYLLICK, T.; & HOCKERTS, K.. Beyond the business case for corporate sustainability. *In: Business Strategy and the Environment*, 11(2), 130–141, 2002.

EDENHOFER O, *et al.*, editors. IPCC climate change 2014: mitigation of climate change. *In: Cambridge Univ. Press*; 2014.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy – economic and business rationale for an accelerated transition. **Ellen Macarthur Foundation**, 2013. (a)

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy – opportunities for the consumer goods sector. **Ellen Macarthur Foundation**, 2013. (b)

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA; LIFE. Circularity Indicator: an approach to measuring circularity. **Ellen Macarthur Foundation**, 2015

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Balança Energético Nacional 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 23/02/2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Balança Energético Nacional 2023**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/>

PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf. Acesso em: 21/09/2023.

EUROPEAN ALTERNATIVE FUELS OBSERVATORY. EAF. Online available on: <https://alternative-fuelsobservatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>. European Commission, 2022.

EV Global Outlook 2022 Report. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>. Acesso em 14 de fevereiro de 2023.

ELWERT, Tobias *et al.* Recycling of batteries from electric vehicles. **Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles: battery health, performance, safety, and cost**, [S.l., s.n.] p. 289-321, 2018.

FAN, Ersha *et al.* Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects. *In: Chemical reviews*, v. 120, n. 14, p. 7020-7063, 2020.

FENG, Z.; YAN, N.. Putting a circular economy into practice in China. *In: Sustain. Sci.*, 95 e 101, 2007.

FOSTER, Meaghan *et al.* Feasibility assessment of remanufacturing, repurposing, and recycling of end of vehicle application lithium-ion batteries. *In: Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, v. 7, n. 3, p. 698-715, 2014.

FRAGKOS, Panagiotis *et al.* Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. *In: Energy*, v. 216, p. 119385, 2021.

GAINES, L.; CUENCA, R.. Costs of Lithium-ion Batteries for Vehicles. Available at. **Argonne National Laboratory (ANL)**. <https://www.anl.gov/energy-systems/publication/costs-lithium-ion-batteries-vehicles>, 2000.

GAINES, Linda. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *In: Sustainable Materials and Technologies*, v. 1, p. 2-7, 2014.

GEORGI-MASCHLER, Tim *et al.* Development of a recycling process for Li-ion batteries. *In: Journal of power sources*, v. 207, p. 173-182, 2012.

GENG, Y.; FU, J.; SARKIS, J.; XUE, B.. Towards a circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. *In: J. Clean. Prod.* 23, 216 e 224, 2012.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N.M.P.; HULTINK, E.J.. The Circular Economy e a new sustainability paradigm? *In: J. Clean. Prod.* 143, 757 e 768, 2017.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *In: Journal of Cleaner production*, v. 114, p. 11-32, 2016.

GODOY, Arilda Schmidt. Pesquisa qualitativa: tipos fundamentais. *In: Revista de Administração de empresas*, v. 35, n. 3, p. 20-29, 1995.

GOODWIN P, Katavouta A, *et al.* Pathways to 1.5° C and 2° C warming based on observational and geological constraints. *In: Nat Geosci* 2018; 11:102 e 7, 2018.

HARPER, Gavin *et al.* Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *In: Nature*, v. 575, n. 7781, p. 75-86, 2019.

HARVEY, LD Danny. Resource implications of alternative strategies for achieving zero greenhouse gas emissions from light-duty vehicles by 2060. *In: Applied energy*, v. 212, p. 663-679, 2018. *In: Recycling*, v. 169, p. 105522, 2021.

HAWKINS, T.R.; SINGH, B.; MAJEAU-BETTEZ, G.; STRØMMAN, A.H.. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *In: J. Ind. Ecol.* 17 (1), 53–64, 2013.

HÉRIZ, I. B. Economía circular: un nuevo modelo de producción y consumo sostenible. *In: Madri: Editorial Tébar Flore*, 2018.

HUANG, Bin *et al.* Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *In: Journal of Power Sources*, v. 399, p. 274-286, 2018.

HUO, H.; CAI, H.; ZHANG, Q.; LIU, F.; HE, K.. **Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: a comparison between China and the U.S.**, [S.l., s.n., s.d.], 2015.

INTERNATIONAL GLOBAL CO2 EMISSIONS by sector, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2019>. Acesso em: 02 de maio de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (). Global EV Outlook 2019: **Scaling-Up the Transition to Electric Mobility (OECD)**. <https://doi.org/10.1787/35fb60bd-en>, 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV Outlook 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **An energy sector roadmap to carbon neutrality in China, IEA, Paris** <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>, License: CC BY 4.0. Acesso em 25 de fevereiro de 2023

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acessado em 30 de julho de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), **Global Supply Chains of EV Batteries**. IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>, 2022. Acesso em março de 2023.

ICES, R.E.; WHITACRE, J.F.. Comparison between cylindrical and prismatic lithium-ion cell costs using a process-based cost model. *In: J. Power Sources* 340, 273–281, 2017.

JONES, B.; ELLIOTT, R.J.R.; NGUYEN-TIEN, V.. The EV revolution: the road ahead for critical raw materials demand. *In: Appl. Energy*. 280, 11507, 2020.

J.B. DUNN, L.G.; BARNES, M.; SULLIVAN, J.; WANG, M.. Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End of Life Stages of the Automotive Lithium Ion Battery Life Cycle. **Argonne National Laboratory**, US, 2012.

JONATHAN B, Julia K.S.; DAVID, AD; PHIL P, Katy R. Managing critical materials with a technology-specific stocks and flows model. *In: Environ Sci Technol* 2013; 48:1298–305.

KAMPKER, Achim *et al.* Evaluation of a remanufacturing for lithium ion batteries from electric cars. *In: International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, [S.l., s.n.], v. 10, n. 12, p. 1929-1935, 2016.

KARA H, Chapman A; CRICHTON T, Willis P. Lanthanide resources and alternatives: a report for department for transport and department for business, innovation, and skills. *In: Aylesbury, UK: Oakdene Hollins*; 2010

KARLSSON, C. Researching Operations Management. **Routledge**, p.336, 2009.

KETPRAPAKORN, N. (2019). Toward an Asian corporate sustainability model: An integrative view, *In: Journal of Cleaner Production*, Volume 239, Article 117995, 1 December 2019.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. **Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, conservation and recycling**, [S.l., s.n.], v. 127, p. 221-232, 2017.

KORHONEN, Jouni; HONKASALO, Antero; SEPPÄLÄ, Jyri. Circular economy: the concept and its limitations. *In: Ecological economics*, v. 143, p. 37-46, 2018.

KRAMER, Mark R.; PORTER, Michael. Creating shared value. *In: Harvard business review*, v. 89, n. 1/2, p. 62-77, 2011.

KUMAR, Rajeev Ranjan; ALOK, Kumar. Adoption of electric vehicle: A literature review and prospects for sustainability. *In: Journal of Cleaner Production*, v. 253, p. 119911, 2020.

KWADE, A.; DIEKMANN, J. Recycling of Lithium-Ion Batteries; KWADE, A.; DIEKMANN, J., Eds.; Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management; *In: Springer International Publishing*: Cham, Switzerland, 2018; ISBN 978-3-319-70571-2.

LANDER, Laura *et al.* financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *In: Iscience*, v. 24, n. 7, p. 102787, 2021.

LETT, Lina A. Las amenazas globales, el reciclaje de residuos y el concepto de economía circular. *In: Revista argentina de microbiología*, v. 46, n. 1, p. 1-2, 2014.

LI, Lin; DABABNEH, Fadwa; ZHAO, Jing. Cost-effective supply chain for electric vehicle battery remanufacturing. *In: Applied energy*, v. 226, p. 277-286, 2018.

MA, Xiaotu; AZHARI, Luqman; WANG, Yan. Li-ion battery recycling challenges. *In: Chem*, v. 7, n. 11, p. 2843-2847, 2021.

MARKETS AND MARKETS, 2021. Disponível em:

<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lithium-ion-battery-recycling-market-153488928.html>. Acesso em 01/05/2022.

MAY, Peter; LUSTOSA, Maria Cecília; VINHA, Valéria. **Economia do meio ambiente**. [S.l.], Elsevier Brasil, 2010.

MAY, Peter; ROMEIRO, Ademar. **Economia do meio ambiente**. [S.l.], Elsevier Brasil, 2010.

MAYYAS, A.; OMAR, M.; HAYAJNEH, M.; MAYYAS, Abdel R.. Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective. *In: J. Clean. Prod.* 167,687–701, 2017.

MANJUNATH, A.; & GROSS, G.. Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs). *In: Energy Policy*, 102, 423–429. doi:10.1016/j.enpol.2016.12.003, 2017.

MATHEWS, J.A.; TAN, H.. Progress towards a circular economy: the drivers and inhibitors of eco-industrial initiative. *In: J. Ind. Ecol.* 15, 435-457, 2011.

MENDOZA, J.M.F.; SHARMINA, M.; GALLEGO-SCHMID, A.; HEYES, G.; AZAPAGIC, A.. Integrating backcasting and eco-design for the circular economy: the BECE framework. *In: J. Ind. Ecol.* 21 (3), 526 e 544, 2017.

MERLI, Roberto; PREZIOSI, Michele; ACAMPORA, Alessia. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *In: Journal of cleaner production*, v. 178, p. 703-722, 2018.

MERSKY AC, Sprei F; SAMARAS C, Qian Z (Sean). **Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway**. *Transp Res Part D* 2016; 46:56–68. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.011>, 2016.

NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA.. China Energy Statistical Yearbook 2021. **China Statistics Press**. Retrieved from <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>, 2021.

NAUSTDALSLID, J.. **Circular economy in China e the environmental dimension of the harmonious society**. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.*

<http://dx.doi.org/10.1080/13504509.2014.914599>, 2014.

NAUSTDALSLID, Jon. Circular economy in China—the environmental dimension of the harmonious society. *In: International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, v. 21, n. 4, p. 303-313, 2014.

NESS, D.. Sustainable urban infrastructure in China: towards a factor 10 improvement in resource productivity through integrated infrastructure system. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 15, 288-301

NICHOLS, B.G.; KOCKELMAN, K.M.; REITER, M., 2015. Air quality impacts of electric vehicle adoption in Texas. *In: Transp. Res. D Transp. Environ.* 34, 208 e 218, 2008

NITTA, N.; WU, F.; LEE, J. T.; & YUSHIN, G.. Li-ion battery materials: present and future. *Materials today*, [S.l., s.n.], 18(5), 252-264, 2015.

NZEREOGU, P. U. *et al.* Anode materials for lithium-ion batteries: A review. *In: Applied Surface Science Advances*, v. 9, p. 100233, 2022.

OLIVETTI, Elsa A. *et al.* Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals. *In: Joule*, v. 1, n. 2, p. 229-243, 2017.

OLSSON, Linda *et al.* Circular business models for extended EV battery life. *In: Batteries*, v. 4, n. 4, p. 57, 2018.

OMETTO, A. R. *et al.*, Economia Circular: oportunidades e desafios para a indústria brasileira. **Confederação Nacional da Indústria**. Brasília, 2018.

OUR WORLD IN DATA. <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?country=~CHN>. Acesso em 29/07/2023.

POTTING, José *et al.* Circular economy: measuring innovation in the product chain. *In: PBL publishers*, 2017.

PARK, Joo Young; CHERTOW, Marian R. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. *In: Journal of environmental management*, v. 137, p. 45-53, 2014.

PAUL, A. C.; JONAS, W. B.; LANG, B.; RUPERT, J. Baumgartner, A.C. A multilevel approach for assessing business strategy on climate. *In: Journal of Cleaner Production*, 160, 2017.

PEARCE, David William; TURNER, R. Kerry; TURNER, R. Kerry. Economics of natural resources and the environment. *In: Johns Hopkins University Press*, 1990.

PETERS GP, Weber CL; GUAN DB, Hubacek K. *In: Environ Sci Technol*;41(17):5939–44, 2007.

PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D.; WEST, R.E.. **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. [S.I.], McGraw-Hill Education, 2003.

PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D.; WEST, R.E..**Equipment Costs**. Available, at: <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/ce.html>. Acesso em julho de 2023.

PORTER, Michael E.; KRAMER, Mark R. Criação de valor compartilhado. *In: Harvard Business Review*, v. 89, n. 1/2, p. 62-77, 2011.

QIAO, Qinyu *et al.* Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits. *In: Resources, Conservation and Recycling*, v. 140, p. 45-53, 2019.

QIAO, Q.; ZHAO, F.; LIU, Z.; HAO, H.. Recycling-Based Reduction of Energy Consumption and Carbon Emission of China’s Electric Vehicles: Overview and Policy Analysis. *In: SAE Technical Paper* 2018-01-0659, 2018.

QUAK, H.; NESTEROVA, N.; VAN ROOIJEN, T.. Possibilities and barriers for using electric-powered vehicles in city logistics practice. *In: Trans. Res. Procedia* 12,157 e 169, 2016.

RAPLEY, T.. **Doing conversation, discourse and document analysis**. London: Sage, 2007.

RECELL, ReCell Center. Disponível em:

<https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/109713>. Acesso em: 20/04/2022.

REN, J.; MANZARDO, A.; TONIOLO, S.; SCIPIONI, A.. Sustainability of hydrogen supply chain. Part I: identification of critical criteria and cause-effect analysis for enhancing the sustainability using DEMATEL. *In: Int. J. Hydrog. Energy* 38,14159 e 14171, 2013.

REUTERS, **Iron man Elon Musk places his Tesla battery bets**. Disponível em:

<https://www.reuters.com/business/autos-transportation/iron-man-elon-musk-places-his-tesla-battery-bets-2022-04-27/>. Acesso em 01/05/2022.

ROHR, Stephan *et al.* A techno-economic analysis of end of life value chains for lithium-ion batteries from electric vehicles. *In: 2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE, p. 1-14, 2017.

ROY, Poulomi; SRIVASTAVA, Suneel Kumar. Nanostructured anode materials for lithium ion batteries. *In: Journal of Materials Chemistry A*, v. 3, n. 6, p. 2454-2484, 2015.

SANDOVAL, L.; LEUNG, P.; & SADLER, W.. The current and future state of electric vehicle battery production and recycling. *In: Nature Energy*, 6(3), 237-245, 2021.

SANFÉLIX, Javier *et al.* Environmental and economic performance of an li-ion battery pack: A multiregional input-output approach. *In: Energies*, v. 9, n. 8, p. 584, 2016.

SARDÀ, Rafael; POGUTZ, Stefano. **Corporate sustainability in the 21st century: Increasing the resilience of social-ecological systems**. [S.l.], Routledge, 2018.

SOFIA RITZÉN, Gunilla Ölundh Sandström, **Barriers to the Circular Economy – Integration of Perspectives and Domains**, [S.l.], Procedia CIRP, v. 64, Pages 7-12, ISSN 2212-8271, 2017.

SONG, Xiaoxu *et al.* Estimation of waste battery generation and analysis of the waste battery recycling system in China. *In: Journal of Industrial Ecology*, v. 21, n. 1, p. 57-69, 2017.

SPEIRS, Jamie *et al.* The future of lithium availability for electric vehicle batteries. *In: Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 35, p. 183-193, 2014.

STATISTA 2021. Acessível em: <https://www.statista.com/statistics/269872/largest-automobile-markets-worldwide-based-on-new-car-registrations/>. Acesso em 17/04/2022.

STAHEL, W. R. The circular economy. *In: Nature*, v. 531, p. 435-438, 2016.

STAHEL, Walter R.; REDAY-MULVEY, Genevieve. Jobs for tomorrow: the potential for substituting manpower for energy. *In: Vantage Press*, 1981.

STRAUSS, A.; & CORBIN, J.. **Basics of qualitative research: Grounded theory procedures and Techniques**. Newbury Park, CA: Sage, 990.

STRAUSS, A.; & CORBIN, J.. **Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory** (2nd ed.). London: Sage, 1998.

SU, Biwei *et al.* A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. *In: Journal of cleaner production*, v. 42, p. 215-227, 2013.

TAN, Darren HS *et al.* Sustainable design of fully recyclable all solid-state batteries. *In: MRS Energy & Sustainability*, v. 7, 2020.

TAHIL, William. The trouble with lithium. Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. Martainville: *In: Meridian International Research*, 2007.

THE CIRCULARITY GAP REPORT, 5 th Anniversary, **Cricle Economy Report, CGR Global, 2022**. Disponível em: CGR 2022 (circularity-gap.world). Acesso em 15/01/2022.

TOWLER, Gavin; SINNOTT, Ray. **Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design**. [S.l.], Butterworth-Heinemann, 2021.

TRADE ECONOMICS. <https://tradingeconomics.com/commodity/>. Acessado em 30/07/2023.

U. Langklotz *et al.*, Water Uptake of Tape-Cast Cathodes for Lithium-Ion Batteries, Journal of Ceramic Science and Technology. *In: Journal of Ceramic Science and Technology*, 69-29, 2013.

U.S DOE. **The history of the Electric Car**. Disponível em: Energy.gov. Acesso em: 30 de janeiro de 2022.

WANG, Xue *et al.* Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *In: Resources, Conservation and Recycling*, v. 83, p. 53-62, 2014.

WANG NN, Chang YC. The development of policy instruments in supporting low-carbon governance in China. *In: Renew Sustain Energy Rev*; 35: 126–35, 2014.

WAISMANN H, Battaille C, *et al.* A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies. *In: Nat Clim Change 2019*; 9: 261-8, 2019.

WIERINGA, Roel. Empirical research methods for technology validation: Scaling up to practice. *In: Journal of systems and software*, v. 95, p. 19-31, 2014.

WINSLOW, Kevin M.; LAUX, Steven J.; TOWNSEND, Timothy G. A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. *In: Resources, Conservation and Recycling*, v. 129, p. 263-277, 2018.

WOO, JongRoul; CHOI, Hyunhong; AHN, Joongha. Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective. *In: Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 51, p. 340-350, 2017.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD). **Circular Economy** Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Programs/Circular-Economy>, Acesso em 29 de janeiro de 2021.

WORLD ECONOMIC FORUM, **The Global Risks Report 2021**. Disponível em: <https://reports.weforum.org/global-risks-report-2021/>. Acesso em 20 de abril de 2022.

WORLD ECONOMIC FORUM, **Circular Cars Initiative**. Disponível em: [Circular Cars Initiative_launched at WEF Davos \(climate-kic.org\)](https://www.weforum.org/initiatives/circular-cars). Acesso em 25 de abril e 2022.

WORLD ECONOMIC FORUM, **The world needs 2 billion electric vehicles to get to net zero. But is there enough lithium to make all the batteries?** Electric vehicle demand – has the world got_enough lithium? | World Economic Forum (weforum.org). Acesso em 29/07/2023.

WORLD ECONOMIC FORUM, **Global risks report (2021, 16th edition)**. Disponível em https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2021.pdf. Acesso em 19 de março de 2022.

XIONG, Siqin; JI, Junping; MA, Xiaoming. Environmental and economic evaluation of remanufacturing lithium-ion batteries from electric vehicles. *In: Waste Management*, v. 102, p. 579-586, 2020.

YANG, Lai *et al.* Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China. *In: Journal of Cleaner Production*, v. 285, p. 124899, 2021.

YANG, Yue *et al.* On the sustainability of lithium-ion battery industry – A review and perspective. *In: Energy Storage Materials*, v. 36, p. 186-212, 2021.

YAKSIC, Andrés; TILTON, John E. Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *In: Resources Policy*, v. 34, n. 4, p. 185-194, 2009.

YAP, N.U.. Towards a circular economy: progress and challenges. *In: Green Manag. Int.* 50, 11 e 24, 2005.

YUAN, Z.; BI, J.; MORIGUICHI, Y.. The circular economy; a new development strategy in China. *In: J. Ind. Ecol.* 10, 4 e 8, 2006.

ZHANG, Xihua

. An overview on the processes and technologies for recycling cathodic active materials from spent lithium-ion batteries. *In: Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 15, n. 4, p. 420-430, 2013.

ZHAO, S.J.; HEYWOOD, J.B.. Projected pathways and environmental impact of China's electrified passenger vehicles. *In: Transp. Res. D Transp. Environ.* 53, 334 e 353, 2017.

ZHENG, Honghe *et al.* A comprehensive understanding of electrode thickness effects on the electro chemical performances of Li-ion battery cathodes. *In: Electrochimica Acta*, v. 71, p. 258-265, 2012.

ZHOU Y, Wang M; HAO H, Johnson L; WANG H, Hao H. **Plug-in electric vehicle market penetration and incentives: a global review. Mitig Adapt Strateg Glob Chang; 20: 777–95.** <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9611-2>, 2015.

ZUBI, G.; DUFO-LÓPEZ, R.; CARVALHO, M.; PASAOGLU, G.. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *In: Renew. Sustain. Energy Rev.* 89, 292–308, 2018.