

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

Victor de Oliveira e Silva Mello Carnevale

**Projeto Conceitual da Rota de Extração do Lítio das Baterias de Carros Elétricos
Usadas**

Rio de Janeiro

2024



SENAI CETIQT



Victor de Oliveira e Silva Mello Carnevale

**Projeto Conceitual da Rota de Extração do Lítio das Baterias de Carros Elétricos
Usadas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador: Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc.

Rio de Janeiro

2024



Ficha Catalográfica

Carnevale, Victor de Oliveira e Silva Mello.
Projeto conceitual da rota de extração do lítio das baterias de carros elétricos Usadas. / Victor de Oliveira e Silva Mello Carnevale – 2024.

nº. f. 61; 30cm.

Orientador: Roberto Bentes de Carvalho
Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) – Centro de tecnologia da indústria química e têxtil faculdade de Engenharia Química Senai CETIQT, Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, 2024.

1. Extração do lítio de baterias de carros elétricos. 2. Carros elétricos. 3. Baterias de lítio. 4. Reciclagem de baterias. 5. Impactos gerados pelos carros elétricos. I. Projeto conceitual da rota de extração do lítio das baterias de carros elétricos usadas.

CDD

Victor de Oliveira e Silva Mello Carnevale

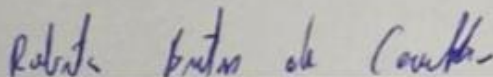
Projeto Conceitual da Rota de Extração do Lítio das Baterias de Carros Elétricos

Usadas

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

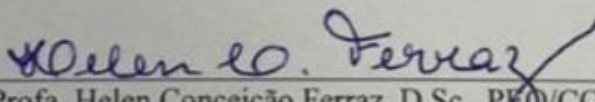
Aprovada em:

Aprovado por:

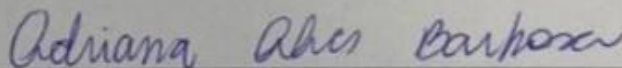


Orientador: Prof. Roberto Bentes de Carvalho, D.Sc., SENAI CETIQT

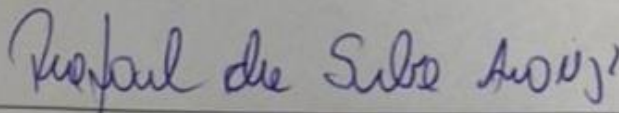
Banca Examinadora:



Profa. Helen Conceição Ferraz, D.Sc., PEQ/COPPE/UFRJ



Profa. Adriana Alves Teixeira, M.Sc., SENAI CETIQT



Prof. Rafael da Silva Araújo, D.Sc., SENAI CETIQT

Rio de Janeiro

2024

Dedico este trabalho ao futuro automotivo, a todos os meus familiares, professores, amigos e
a todos que fizeram parte desta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Este projeto não poderia ter sido concluído sem a ajuda direta e indireta de diversas pessoas que passaram e outras que ainda continuam presentes em minha vida. Primeiramente, presto homenagem aos meus pais, que no jeito deles, sempre me incentivaram e ajudaram a compreender que “se trabalharmos por amor, nunca será trabalho” e, com tal frase filosófica escolhi a minha carreira aos 15 anos de idade, onde diversos trabalhos facultativos elaborados nunca eram feitos com desdenha, mas sim com responsabilidade e, por fim, este é o documento que tornará isso possível.

Agradeço também aos meus avós, onde parte deles não estão mais presentes para poder vivenciar essa parte da minha vida, mas que sempre procuraram me mimar e me proporcionar o lado bom da vida. As memórias de quando eu era criança e nos divertíamos sempre serão eternas. Aos meus avós por parte de mãe, apesar de morarem em outro país também são muito especiais, onde a cada visita, uma história é contada e diversos ensinamentos são ensinados.

Uma das pessoas mais especiais e inteligentes, a que também devo agradecimentos, Giovana Diel, minha namorada, que conseguiu e ainda consegue me aturar. Junto a ela, devo agradecimentos à sua irmã, Clara Diel e a minha sogra, Renata Diel, onde ambas me dão conselhos sobre a vida e me fazem enxergar certas situações com outro ponto de vista. Durante a elaboração deste projeto, minha namorada foi o meu Norte, minha calma durante a tempestade e meu energético nesta caminhada. Sou muito grato tê-la em minha vida, onde sonhos são compartilhados e planos para o futuro são elaborados. Agradeço tanto pelos momentos de felicidade quanto os de tristeza, já que este último faz com que a gente fique ainda mais forte e aprenda com os erros. Por fim, sou grato por você gostar de comida japonesa tanto quanto eu e ainda estou a espera pelo abafador esportivo de presente.

Sou grato a todos os professores que fizeram parte desta jornada, com agradecimentos especiais ao orientador deste projeto, Roberto Bentes, cujas orientações, apoio e até incentivos foram essenciais para a conclusão do curso de Engenharia Química e à professora Glaiza Esteves, que foi minha professora no colégio e com quem tive meu primeiro contato com a química e, portanto, tenho a certeza que foi graças a sua maneira de ensinar que fez com que eu me aprofundasse nesta matéria tão espetacular e me fizesse querer cursar Engenharia Química.

Aos profs da faculdade Senai CETIQT, meus profundos agradecimentos. Todos vocês acabam agindo como pais dos alunos em certo momento. Gostaria de citar todos aqui, mas como são muitos, irei agradecer aos que estiveram presentes desde o meu ingresso neste curso, como o André Simões, Luciano Portilho, Michelle Reich, Geneci Sousa, Cláudia de

Abreu e Marta Cristina. Obrigado a todos pelos momentos de ensinamentos e pelas “broncas” que se fizeram necessárias.

Aos meus amigos, agradeço pela amizade e pelo companheirismo. Alguns de vocês estão presentes em minha vida desde o colégio, Antônio Sérgio e Marcus Vinícius, que apesar de morarem longe, sempre estamos mantendo contado. Antônio, é o mais engraçado do trio e neste momento está cursando medicina. Apesar de nunca ter compartilhado tais palavras, tenho enorme orgulho dos seus futuros, onde Marcus recentemente se tornou noivo. Agradeço imensuravelmente pela nossa amizade e estou ansioso para as coisas que ainda estão por vir. Aos amigos que fiz na faculdade, em especial, André, Brenno, Gabriela, Glen, Laura, Lucas, Matheus e muitos outros, agradeço pelo companheirismo, pelo estudo em grupo até altas horas da madrugada e pelos ensinamentos que cada um pôde compartilhar. Apesar de alguns já terem se formado, desejo a todos um futuro repleto de sucesso e felicidade.

Por último, mas não menos importante, meu grande amigo, Matheus Schuengue. Um excelente Químico, que acabara de concluir seu mestrado. Nossa amizade se iniciou há 3 anos, através da paixão pelo mundo automotivo, que fez com que a gente se esbarrasse em um encontro de carros modificados. Desde então, diversos conselhos profissionais e pessoais foram abordados, apesar de quase sempre estarem focados em assuntos relacionados a carros e, com isso, um trabalho de conclusão de curso não poderia ser de um tema que não envolvesse tal assunto. Agradeço muito pela nossa amizade e desejo sempre muito sucesso em sua vida. Ah, e que ela venha acompanhada de muitos carros, sejam eles lentos ou velozes.

*"Um cientista no seu laboratório não é apenas um técnico:
é, também, uma criança colocada à frente de fenômenos
naturais que impressionam como se fossem
um conto de fadas."
(Marie Curie)*

RESUMO

Tendo início no Acordo de Paris, a alta demanda na produção de baterias de lítio para a fabricação de carros elétricos, geradas com o intuito de reduzir os Gases de Efeito Estufa, somada com o descarte inadequado, tem acarretado impactos ambientais significativos, principalmente em uma futura escassez das matérias-primas necessárias para a fabricação destes dispositivos de armazenamento. Com isso, o principal objetivo deste trabalho foi desenvolver um projeto conceitual de extração do lítio dessas baterias usadas, visando minimizar as extrações desse material e reduzir o descarte inadequado, que contribui para a contaminação dos lençóis freáticos. No projeto conceitual proposto foram desenvolvidos os seguintes documentos de engenharia: a Tabela de Processos, que responde às perguntas-chaves sobre as operações unitárias presentes na rota de processo proposta; o Diagrama de Blocos de Processo, que representa uma visão macroscópica da rota de processo proposta, com identificação das operações unitárias, dos fluidos de entrada e de saída e das correntes envolvidas no processamento; e a Memória de Cálculo de Balanço de Massa Preliminar, elaborada através de dados da literatura. A rota de processo proposta foi baseada no sistema empregado pela *Li-Cycle*, que através de um processo circular, sem emissões de poluentes atmosféricos, é obtida a Massa Negra. A partir dela, foi utilizado a metodologia aplicada por Joshi *et.al* (2024), onde se faz possível a extração do lítio dessa massa. No final do processo, o produto obtido é o carbonato de lítio (Li_2CO_3), que foi recuperado através da precipitação heterogênea, que consiste na injeção de dióxido de carbono (CO_2) na solução. Ao todo, a rota do processo contou com onze operações unitárias, onde foi estipulado uma vazão de entrada de acordo com o divulgado pela *Li-Cycle*, 18.000 toneladas por ano, mas a unidade foi convertida para toneladas por hora afim de facilitar os cálculos de vazão de cada etapa e da composição da solução existente na operação. Foi obtido uma concentração de aproximadamente 92,0% de pureza no produto final, o que pode ser alterado modificando a concentração de compostos inseridos durante a operação, como o hidróxido de sódio (NaOH).

Palavras-chave: Baterias de lítio; Carros elétricos; Extração do lítio; Reciclagem de baterias de lítio

ABSTRACT

Beginning with the Paris Agreement, the high demand for the production of lithium batteries for the manufacture of electric cars, generated with the aim of reducing Greenhouse Gases, combined with inadequate disposal, has led to significant environmental impacts, mainly in a future shortages of the raw materials needed to manufacture these storage devices. Therefore, the main objective of this work was to develop a conceptual project for extracting lithium from these used batteries, with the aim of minimizing the extraction of this material and reducing improper disposal, which contributes to the contamination of groundwater. In the proposed conceptual project, the following engineering documents were developed: the Process Table, which answers the key questions about the unit operations present in the proposed process route; the Block Diagram, which represents a macroscopic view of the proposed process route, with identification of the unit operations, the inlet and outlet fluids and the streams involved in the processing; and the Preliminary Mass Balance Calculation Report, prepared using data from the literature. The proposed process route was based on the system used by Li-Cycle, which obtains Black Mass through a circular process without emissions of atmospheric pollutants. From this, the methodology applied by Joshi et.al was used, which makes it possible to extract lithium from this mass. At the end of the process, the product obtained is lithium carbonate (Li_2CO_3), which was recovered through heterogeneous precipitation, which consists of injecting carbon dioxide (CO_2) into the solution. In total, the process route had eleven unit operations, where an input flow rate was stipulated according to that disclosed by Li-Cycle, 18,000.0 tons per year, but the unit was converted to tons per hour in order to facilitate the flow calculations of each stage and the composition of the solution existing in the operation. A concentration of approximately 92.0% purity was obtained in the final product, which can be altered by modifying the concentration of compounds inserted during the operation, such as sodium hydroxide (NaOH).

Keywords: Lithium batteries; Electric cars; Lithium extraction; Lithium battery recycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão de Gases de Efeito Estufa por setor no Mundo em 2013.....	20
Figura 2 - Funcionamento eletroquímico de uma bateria de lítio.....	23
Figura 3 - Representação de uma célula de bateria de íons de lítio com seus componentes básicos.....	23
Figura 4 - Consumo por aplicação de cobalto de 2013 a 2020.....	26
Figura 5 - Bateria de lítio de um carro elétrico usada entrando no processo de extração de seus componentes.....	27
Figura 6 - Massa Negra recuperada do processo de extração empregado pela empresa <i>Li-Cycle</i>	28
Figura 7 - Reator de vidro revestido utilizado em bancada para precipitação homogênea dos compostos de lítio recuperado.....	29
Figura 8 - Modelo de folha de rosto utilizada para construção do Diagrama de Blocos de Processo no <i>Draw.io</i>	36
Figura 9 - Diagrama de blocos do processo de extração do lítio das baterias de carros elétricos usadas através da precipitação heterogênea.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos cátodos dos principais tipos de baterias de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos.....	24
Quadro 1 - Metodologia FEL de desenvolvimento de projeto de engenharia.....	31
Quadro 2 - Documentos e desenhos de engenharia principais gerados em um projeto conceitual, seguindo a metodologia FEL.....	32
Tabela 2 - Tabela de Processos da trituração com lâminas submersa, correspondente à 1ª etapa do processo de extração de lítio.....	38
Tabela 3 - Tabela de Processos da flotação, correspondente à 2ª etapa do processo de extração de lítio.....	39
Tabela 4 - Tabela de Processos da Peneira Rotativa, correspondente à 3ª etapa do processo de extração de lítio.....	40
Tabela 5 - Tabela de Processos do Filtro Prensa, correspondente à 4ª etapa do processo de extração de lítio.....	40
Tabela 6 - Tabela de Processos da Pirólise, correspondente à 5ª etapa do processo de extração de lítio.....	41
Tabela 7 - Tabela de Processos da lixiviação com NaOH, correspondente à 6ª etapa do processo de extração de lítio.....	42
Tabela 8 - Tabela de Processos da filtração, correspondente à 7ª etapa do processo de extração de lítio.....	42
Tabela 9 - Tabela de Processos da agitação, correspondente à 8ª etapa do processo de extração de lítio.....	43
Tabela 10 - Tabela de Processos da precipitação heterogênea, correspondente à 9ª etapa do processo de extração de lítio.....	43
Tabela 11 - Tabela de Processos da Filtração, correspondente à 10ª etapa do processo de extração de lítio.....	44
Tabela 12 - Tabela de Processos da secagem, correspondente à 11ª etapa do processo de extração de lítio.....	44
Tabela 13 - Composição média das baterias de lítio.....	47
Tabela 14 - Estimativa dos valores da vazão de entrada de baterias e da relação de água por hora no processo.....	48
Tabela 15 - Parte 1 da tabela contendo o balanço de massa preliminar do processo, com os dados das correntes de 1 a 8.....	48

Tabela 16 - Parte 2 da tabela contendo o balanço de massa preliminar do processo, com os dados das correntes de 9 a 16.....	48
Tabela 17 - Massa dos compostos flotados de acordo com a eficiência da operação unitária.....	49
Tabela 18 - Massa dos compostos retidos na peneira rotativa de acordo com a eficiência da operação unitária.....	50
Tabela 19 - Massa dos compostos retidos no filtro prensa de acordo com a eficiência da operação unitária.....	51
Tabela 20 - Estequiometria da conversão de Li em Li_2O pela reação representada pela Equação 4.....	51
Tabela 21 - Estequiometria da conversão de Ni, Co e Mn em seus respectivos óxidos pela reação representada pela Equação 4.....	51
Tabela 22 - Estequiometria do carbono pela reação representada pela Equação 4.....	51
Tabela 23 - Estequiometria da conversão de Li_2O e CO_2 em Li_2CO_3 pela reação representada pela Equação 5.....	52
Tabela 24 - Estequiometria da conversão de Li_2O e HF em LiF e H_2O pela reação representada pela Equação 6.....	52
Tabela 25 - Estequiometria da degradação de Li_2CO_3 em LiF pela reação representada pela Equação 7.....	52
Tabela 26 - Massa de NaOH que será adicionada na etapa da lixiviação.....	53
Tabela 27 - Estequiometria da formação de LiOH pela reação representada pela Equação 8.....	53
Tabela 28 - Massa dos compostos retidos no filtro 1 de acordo com a eficiência da operação.....	54
Tabela 29 - Massa dos compostos gerados após a lixiviação de acordo com a eficiência da operação.....	54
Tabela 30 - Massa dos compostos gerados após a lixiviação de acordo com a eficiência da operação.....	55
Tabela 31 - Massa dos compostos gerados após a secagem de acordo com a eficiência da operação.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEV'S	Baterias de veículos elétricos
BM	Massa Negra
BMS	Sistema de gerenciamento de baterias
CETIQT	Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil
EV	Veículos elétricos
FEL	<i>Front end loanding</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
MP-AES	Espectrometria de emissão atômica por plasma induzido por micro-ondas
PHEV'S	Veículos híbridos recarregável
P&IDS	Fluxogramas de Tubulação e Instrumentação
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
XRD	Difração de raio X

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	16
1.1. INTRODUÇÃO.....	16
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1. Objetivo Geral.....	18
1.2.2. Objetivos Específicos.....	18
1.3. JUSTIFICATIVA.....	18
1.4. DELIMITAÇÃO.....	19
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. ACORDO DE PARIS.....	20
2.2. CARROS ELÉTRICOS.....	20
2.2.1. Princípio de Funcionamento.....	21
2.2.2. Poluentes.....	21
2.3. BATERIAS DE LÍTIO.....	22
2.3.1. Princípio de Funcionamento.....	22
2.3.2. Composição.....	24
2.3.3. Vida Útil.....	25
2.3.4. Reciclagem.....	25
2.3.5. Recuperação do Lítio.....	26
2.3.6. Benefícios da Reciclagem do Lítio Proveniente das Baterias de Carros Elétricos.....	30
2.4. ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA.....	31
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	34
3.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	34
3.2. ESTUDO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO LÍTIO DA BATERIA DE CARRO ELÉTRICO.....	34
3.3. TABELA DE PROCESSOS.....	35
3.4. DIAGRAMA DE BLOCOS.....	35
3.5. MEMÓRIA DE CÁLCULO DE BALANÇO DE MASSA PRELIMINAR.....	36
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1. TABELAS DE PROCESSOS.....	38
4.2. DIAGRAMA DE BLOCOS.....	45

4.3. MEMÓRIA DE CÁLCULO DE BALANÇO DE MASSA PRELIMINAR.....	47
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO.....	56
5.1. CONCLUSÃO.....	56
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A 21ª Conferência das Partes (COP21) ficou marcada pela aprovação de um novo acordo que possui como objetivo central fortalecer a resposta global às mudanças climáticas e reforçar os seus impactos gerados. Tal acordo, denominado Acordo de Paris, envolve todos os países do G20 e tem como meta reduzir as emissões de gases de efeito estufa, fazendo com que cada nação apresentasse um planejamento de contribuição para alcançar tal objetivo, onde um dos focos definidos foi o investimento em veículos elétricos (Brasil, 2015).

O setor de petróleo é um dos mais importantes da indústria mundial, que por ser utilizado na fabricação de borrachas, tintas, adesivos, detergentes, produtos farmacêuticos e diversos outros, o petróleo se tornou indispensável para o cotidiano humano. Dentro dessas inúmeras áreas de atuação encontra-se o combustível, que é utilizado tanto na geração de energia quanto como forma indispensável para se locomover em veículos motores (Ohtsuka, 2022).

O mundo automobilístico vem chamando a atenção pelo seu crescimento constante no mercado mundial, com isso as grandes empresas estão em uma competição acirrada em busca de inovação e tecnologia neste setor (Goldenstein e Azevedo, 2006).

Em contrapartida, com o crescimento desse setor, o mundo começa a discutir a respeito da preservação do meio ambiente e do futuro do planeta com mais seriedade, principalmente sobre o excesso de dióxido de carbono que impactou no aquecimento global. A partir de pesquisas, as indústrias do petróleo tendem a perder pelos próximos anos a sua principal fonte de renda: o combustível fóssil (Dias, 2013).

Neste cenário, uma alternativa de locomoção surge no mercado automobilístico: o carro elétrico. Cada vez mais presente nas ruas e que possivelmente marcará o fim da era do combustível fóssil e o início da inserção de novas fontes de energia para substituir os derivados do petróleo (Ohtsuka, 2022).

Os carros elétricos (BEV), considerados o futuro, apesar de possuírem um preço elevado, estão se tornando cada vez mais populares com a premissa de que as pessoas irão economizar dinheiro com combustível. Tais veículos, além de possuir uma bateria recarregável também possuem uma bateria auxiliar responsável pelo funcionamento dos faróis, rádio e outros acessórios existentes no veículo (Ohtsuka, 2022).

A vida útil de uma bateria elétrica varia de 8 a 20 anos, mas é importante ressaltar que os impactos climáticos (temperaturas extremas ou temperaturas moderadas) irão interferir diretamente nisso (Biswas *et al.*, 2023).

As baterias elétricas existentes nesses tipos de veículos, em geral, são feitas à base de íons de lítio, ficam na parte inferior dos carros e são formadas por um módulo, um banco de bateria (BMS), barramento, uma célula que fica dentro do módulo e um invólucro mecânico (Sistemas e Tecnologia Aplicada, 2023).

O Brasil ainda não possui uma regulamentação de descarte específica para essas baterias. Apesar dos carros elétricos serem considerados “amigos do meio ambiente”, as suas baterias, quando descartadas incorretamente, podem causar sérios danos ao meio ambiente. Isso ocorre por conta da grande quantidade de substâncias químicas e tóxicas que compõe tal mecanismo de armazenamento de energia (Ohtsuka, 2022).

Portanto, a principal alternativa para um descarte correto tem sido a devolução aos fabricantes ou importadores. Porém, há o risco de que o gerenciamento inadequado dessas baterias, por meio das empresas, possa se converter em riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Granda, 2023).

Apesar de estarem sendo vendidos por um alto valor no mercado, os veículos híbridos (PHEV's) e os veículos elétricos (EV's) estão se tornando cada vez mais populares e a tendência é continuar aumentando. No Brasil, por exemplo, ocorreu um aumento de 138,0% nas vendas de carros elétricos de 2022 para 2023 e a tendência é continuar aumentando (Motorshow, 2023).

A consequência dessa tendência é aumentar também o volume de baterias de lítio existentes, fazendo com que ambientalistas comecem a questionar sobre possíveis impactos ambientais gerados pela exploração dos materiais que compõe as baterias. Com isso, um importante ponto a ser investigado é saber o quão vasta é a disponibilidade desses materiais e avaliar quais os riscos da escassez dessas matérias-primas num futuro próximo, principalmente com relação ao lítio, que possui um alto valor e é um elemento fundamental para a indústria moderna. Sendo assim, a reciclagem das baterias de carros elétricos usadas é apresentada como uma forma de minimizar a exploração dessas matérias-primas e proporcionar uma opção de descarte adequado para tais baterias.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver um projeto conceitual de engenharia, buscando identificar as operações unitárias necessárias para realização da recuperação do lítio a partir da bateria de carros elétricos usadas.

1.2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Identificar as operações unitárias necessárias para a realização do processo de recuperação do Lítio a partir de baterias de carros elétricos usadas;
- Elaborar a Tabela de Processo respondendo as perguntas chaves sobre as operações unitárias presentes na recuperação de Lítio a partir de baterias de carros elétricos usadas;
- Construir o Diagrama de Blocos do Processo de recuperação de Lítio a partir de baterias de carros elétricos usadas;
- Desenvolver a Memória de Cálculo de Balanço de Massa e Energia preliminar do processo de recuperação de Lítio a partir de baterias de carros elétricos usadas.

1.3. JUSTIFICATIVA

É vivenciado um aumento exponencial do mercado de carros elétricos, que leva junto a ele, uma maior procura por matérias-primas responsáveis pela elaboração de baterias para mover esses tipos de veículos. Com isso, apesar de serem considerados “amigos do meio ambiente”, esse mercado vem gerando preocupações com relação ao futuro da escassez dessas matérias-primas. Por exemplo, o lítio, que é um dos principais metais necessários para o desenvolvimento desse armazenamento de energia (Ohtsuka, 2022).

Além disso, o descarte inadequado gera diversas consequências tanto para o meio ambiente quanto para os seres humanos, como a contaminação do solo e dos lençóis freáticos, juntamente com inúmeros incêndios e como são compostos de metais pesados, como o chumbo, mercúrio e níquel, são capazes de causar doenças renais, cânceres e problemas no sistema nervoso central (Ohtsuka, 2022).

Desta forma, a compreensão e o levantamento das etapas necessárias para a remoção e reutilização do lítio das baterias dos carros elétricos usadas é uma maneira de contribuir tanto para uma possível limitação da procura desenfreada por este material, evitando problemas de escassez futura, quanto para a redução do descarte inadequado desses tipos de baterias.

1.4. DELIMITAÇÃO

O presente trabalho delimitou-se na apresentação de como ocorre a recuperação do lítio a partir das baterias de carros elétricos usadas, através de um projeto conceitual de engenharia da rota dessa extração. Foram desenvolvidos documentos de engenharia, como: Tabela de Processos, Diagrama de Blocos do Processo e Balanço de Massa preliminar. Tais documentos foram elaborados utilizando dados e informações obtidas através de pesquisas bibliográficas na literatura.

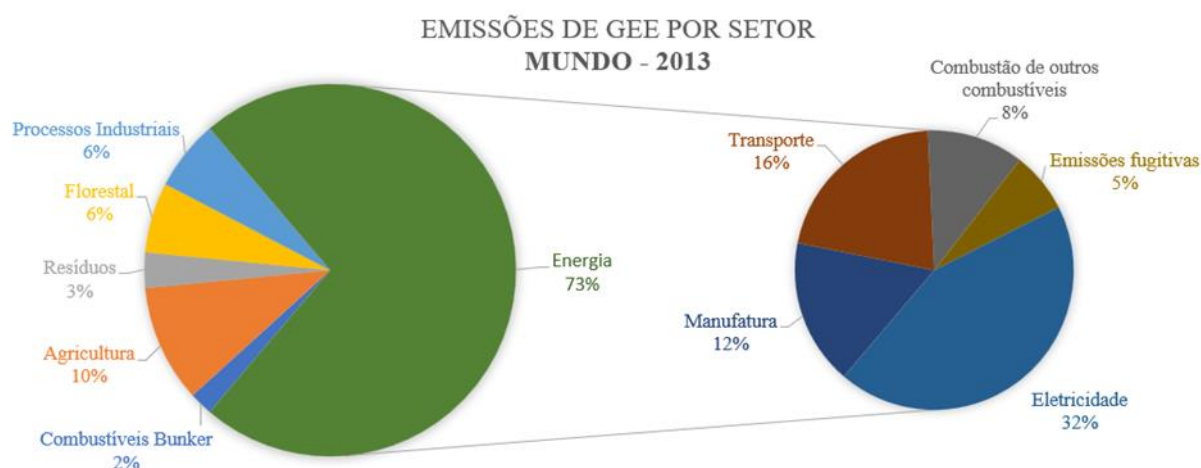
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ACORDO DE PARIS

Aprovado por 195 países que compõe a UNFCCC, o Acordo de Paris, num contexto sustentável, possui como objetivo principal promover uma união entre os países do G20 à estabelecer projetos de reduções de gases de efeito estufa (GEE) e se tornando o principal responsável pelo início de uma competição entre empresas do setor automotivo em busca de inovação e tecnologia para descarbonizar seus veículos (Brasil, 2015).

De acordo com a Figura 1, que ilustra a participação de cada setor nas emissões de GEE, o setor automotivo apresentar porcentagem significativa na emissão de gases atual, sendo que os carros elétricos possuem um importante e fundamental papel para se atingir o objetivo de redução de emissões.

Figura 1 – Emissão de Gases de Efeito Estufa por setor no Mundo em 2013.



Fonte: World Resources Institute, CAIT Climate Data Explorer (2017).

2.2. CARROS ELÉTRICOS

Por meio de uma pesquisa realizada pela *Union of Concerned Scientists*, foi descoberto que os carros elétricos geram, desde sua fabricação até o descarte, menos emissões quando comparados aos veículos movidos à combustão. Apesar de emitirem 15,0% de emissões a mais durante a sua fabricação, após 6 meses de uso os veículos elétricos conseguem compensar essas

emissões extras através da inibição do lançamento de poluentes na atmosfera durante o seu uso (UCSUSA, 2015).

2.2.1. Princípio de funcionamento

Como o próprio nome já diz, os veículos elétricos são movidos através de eletricidade, podendo ser conectado diretamente a uma fonte externa, por um sistema de indução eletromagnética e/ou por meio da energia mecânica de frenagem. Tal carga obtida por um desses meios é armazenada em baterias que fornece energia a uma máquina elétrica que atua como um motor responsável por converter essa energia elétrica ou cinética (no caso dos geradores que são carregados através do processo de frenagem), em energia mecânica para a propulsão do veículo (Delgado *et al.*, 2017).

Nos motores à combustão, ocorre um consumo de energia mesmo quando não é solicitado tal demanda, pois esses os motores dos veículos movidos à combustível, apresentam um limite mínimo de rotação, que é um pouco abaixo da rotação de marcha-lenta. Foram elaboradas soluções para não ocorrer esse consumo e consequentemente liberação de poluentes atmosféricos, já que o carro está parado, como desligamento parcial do motor, conhecido como “*start&stop*”. Nos carros movidos à eletricidade, não possui um limite mínimo de rotação, o que pode acarretar na eliminação da transmissão de múltiplas velocidades (Noce, 2009).

Dependendo do tipo de veículo essas baterias podem ser a base de hidreto metálico de níquel, cloreto de sódio e níquel e principalmente por íons de lítio, que por possuir um custo reduzido e um melhor desempenho, tem sido a mais adotada pelas fabricantes (Delgado *et al.*, 2017).

2.2.2. Poluentes

Os carros elétricos geram significativas emissões de gases de efeito estufa, principalmente durante a extração de matérias-primas necessárias para a fabricação de baterias. Portanto, esses veículos emitem poluentes em 3 fases de sua vida útil: em sua fabricação, em sua operação e em seu descarte.

A elaboração de uma bateria para EV (*Electric Vehicle*), costuma ser longa e árdua, fazendo com que esse tipo de produção necessite de mais energia e consequentemente emita mais CO₂ do que os carros à combustão. No entanto, com o avanço de tecnologias e pesquisas que vêm sendo realizadas, estão se tornando cada vez mais sustentáveis e, com isso, os impactos

ambientais gerados por este setor vem diminuindo. Além disso, outro ponto que essas pesquisas buscam solucionar é a questão de as baterias de lítio possuírem maior risco de incêndio quando superaquecidas (Delgado *et al.*, 2017).

Com relação ao descarte em aterros, pode levar à infiltração dos metais tóxicos e pesados, que compõe as baterias, em corpos de água subterrâneos, resultando em uma grave poluição ambiental. Da mesma forma que se for queimado, produzirá uma quantidade considerável de gases nocivos, como o fluoreto de hidrogênio ou ácido fluorídrico (HF), prejudicando ainda mais a atmosfera terrestre. (Zheng *et al.*, 2018)

Sendo assim, um tratamento de reciclagem para as baterias de Lítio de carros elétricos usadas é muito necessário, uma vez que essas têm um alto valor econômico, devido à presença significativa de metais valiosos. (Zheng *et al.*, 2018).

2.3. BATERIAS DE LÍTIO

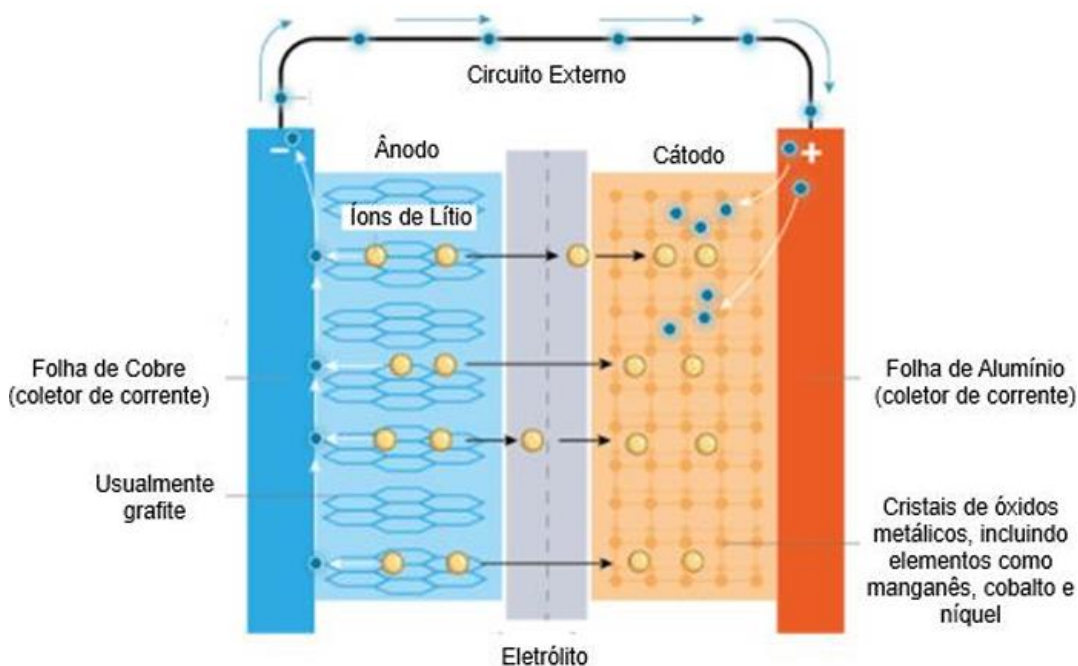
Juntamente com o aumento da demanda de EV, ocorre um aumento também das baterias de Lítio, que é a mais utilizada para armazenar energia nesses tipos de veículos. As baterias de lítio são vistas como uma alternativa mais ecológica e limpa em comparação com outras baterias, devido à sua maior voltagem, elevada densidade de energia, baixa taxa de autodescarga e menor impacto ambiental. Contudo, elas ainda apresentam riscos para o meio ambiente e a saúde humana devido aos materiais perigosos que a compõe (Zheng *et al.*, 2018).

2.3.1. Princípio de funcionamento

O funcionamento de uma bateria de um veículo elétrico depende de reações de redução e de oxidação nos eletrodos, onde ocorre uma difusão dos íons de lítio (Li^+), fazendo com que eles sejam intercalados nas redes cristalinas do cátodo para o ânodo, se for um processo de carga, ou do ânodo para o cátodo, se for um processo de descarga, conforme a Figura 2. Este fenômeno é chamado de “intercalação iônica”, o qual estabelece que para que ocorra neutralidade de carga, cada Li^+ intercalado na rede deve conter um elétron (Chagas, 2006).

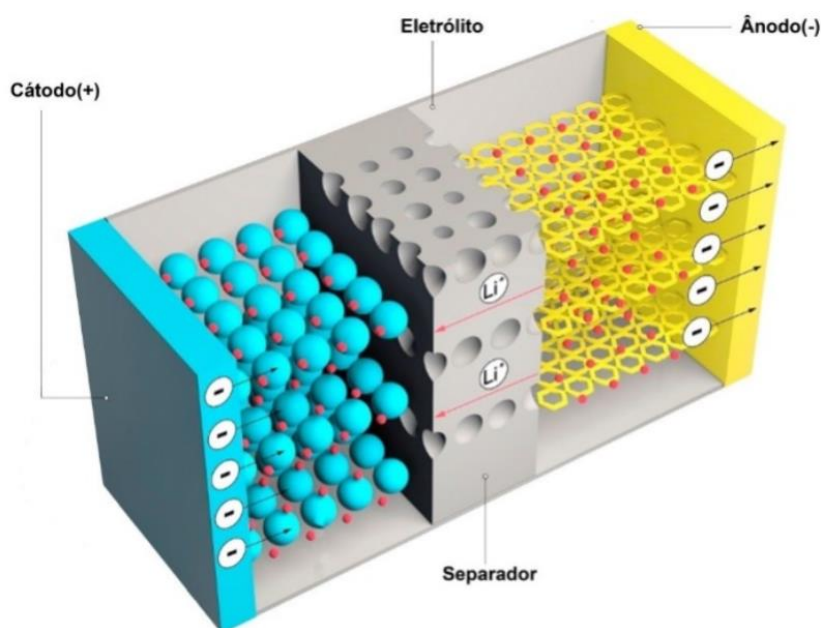
A Figura 3 representa os componentes de uma bateria de lítio atual, indicando a existência de 4 partes específicas: separador, eletrólito e seus respectivos eletrodos. A combinação dos materiais e as composições específicas de cada componente definem o desempenho e a aplicação comercial da bateria (Sistemas e Tecnologia Aplicada, 2023).

Figura 2 – Funcionamento eletroquímico de uma bateria de lítio.



Fonte: Ohtsuka, 2022.

Figura 3 – Representação de uma célula de bateria de íons de lítio com seus componentes básicos.



Fonte: Sistemas e Tecnologia Aplicada, 2023.

No caso das baterias para EV, os materiais dos anodos mais utilizados são a base de carbono, como grafite natural e sintético, enquanto os catodos são compostos principalmente por níquel (Ni), lítio (Li), cobalto (Co), manganês (Mn) e ferro (Fe) (Sistemas e Tecnologia Aplicada, 2023).

2.3.2. Composição

As baterias de Lítio são desenvolvidas a partir de minerais responsáveis pelo armazenamento de energia utilizada pelo motor (Brasil, 2023). O cátodo (+), por exemplo, um eletrodo com carga positiva, é feito de óxido de metal de lítio e combinações de cobalto, níquel, manganês, ferro e alumínio. O ânodo (-), por sua vez, um eletrodo carregado negativamente, geralmente é composto por grafite. O eletrólito, que pode ser encontrado em forma líquida ou em gel, é um sal de lítio que proporciona a condução do fluxo de íons. Por fim, o separador é um componente que bloqueia o fluxo de elétrons, tanto negativos quanto positivos, mas permite a passagem dos íons (Martinho *et al.*, 2021).

As baterias são definidas pela composição química de seu cátodo, devido ao fato deles serem responsáveis por determinar a capacidade de armazenamento de energia. Por outro lado, o ânodo, está relacionado com a segurança e com o tempo de recarga do dispositivo. Com isso, apesar de ter o nome de Bateria de Lítio, tal dispositivo de armazenamento pode ter diferentes tipos de composição, conforme apresentado na Tabela 1 (Monteiro, 2021).

Tabela 1 – Composição química dos cátodos dos principais tipos de baterias de íons de lítio utilizadas em veículos elétricos.

Cátodos	Composição Química	Capacidade (mAh/g)	Voltagem de Operação (V)	Vida Útil	Segurança
LCO	LiCO_2	140	3,9	Média	Alta – média
NMC111	$\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$	160	3,8	Excelente	Média
NMC532	$\text{LiNi}_{0,50}\text{Mn}_{0,30}\text{Co}_{0,20}\text{O}_2$	170	3,8	Média	Média
NMC622	$\text{LiNi}_{0,60}\text{Mn}_{0,20}\text{Co}_{0,20}\text{O}_2$	180	3,8	Média	Média
NMC811	$\text{LiNi}_{0,80}\text{Mn}_{0,10}\text{Co}_{0,10}\text{O}_2$	200	3,8	Média – baixa	Baixa
NCA80-15-05	$\text{LiNi}_{0,80}\text{Mn}_{0,15}\text{Co}_{0,05}\text{O}_2$	200	3,8	Média	Baixa
LMO	LiMnO_4	125	4,0	Média – baixa	Alta
LNMO	$\text{LiNi}_{0,50}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$	135	4,7	Baixa	Média – baixa
LFP	LiFePO_4	160	3,45	Excelente	Excelente
LMP	LiMnPO_4	160	4,1	Baixa	Alta

Fonte: Warner, 2019

Tais baterias geralmente possuem 5% - 20% de Cobalto (Co), 5% - 10% de Níquel (Ni), 5% - 7% de Lítio (Li), 5% - 10% de outros metais, como Cobre (Cu), Alumínio (Al), Ferro (Fe), 15% de compostos orgânicos e 7% de plástico (Zheng *et al.*, 2018).

2.3.3. Vida útil

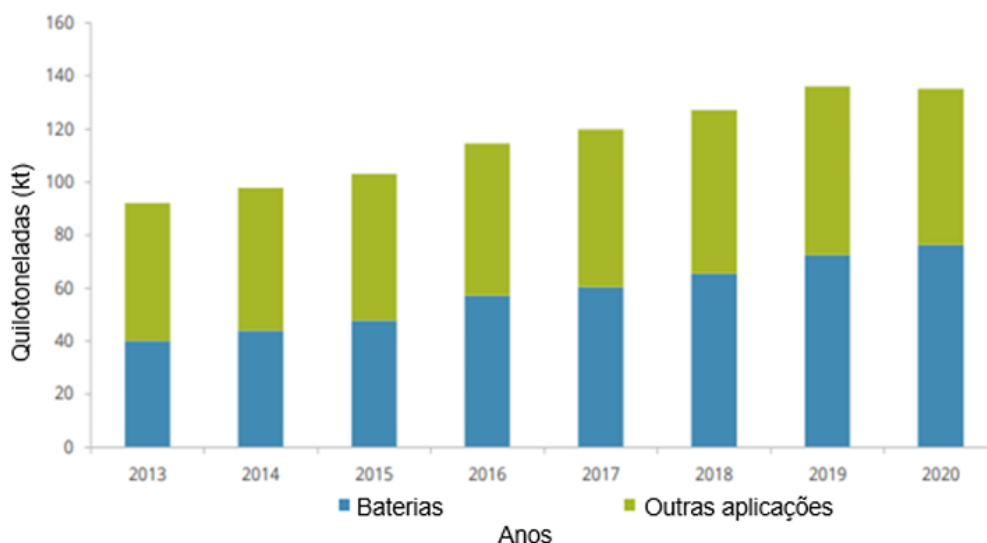
Além de serem mais eficientes e consistentes, as baterias de íons de lítio não necessitam de uma manutenção durante o seu uso e não ocorre um comprometimento da bateria caso elas sejam recarregadas sem antes ter zerado sua carga. Por oferecer uma densidade energética maior que suas concorrentes, é o tipo de bateria mais utilizada em veículos híbridos e elétricos, possuindo uma considerável vida útil, podendo variar de 8 a 20 anos (Biswas *et al.*, 2023).

Contudo, o processo de envelhecimento de uma bateria é variado e depende de vários fatores que podem interferir na sua durabilidade, como às variações de carga e descarga, o mau uso do veículo e a temperatura de operação, onde a dependência da degradação da bateria com a temperatura, muitas vezes é informada pelo próprio fabricante (Lazarini, 2020).

2.3.4. Reciclagem

A maioria dos componentes desse tipo de bateria são recicláveis, tornando-a uma boa opção para questões ambientais. Porém, tais materiais que a compõem são prejudiciais e perigosos tanto para o meio ambiente quanto para a saúde humana, caso sejam manuseados manualmente. Sendo assim, a reciclagem das baterias dos carros elétricos é um processo complexo e longo, cujo objetivo é separar as matérias-primas, como por exemplo, o níquel, manganês, cobalto e lítio (Neocharge, 2020).

Outro ponto importante a ser observado é o aumento da procura pelas matérias-primas que compõem as baterias, como o lítio, que por ser apenas o 33º metal mais abundante da Terra, é considerado escasso. O cobalto (Co) é outro importante constituinte das baterias de lítio utilizadas em carros elétricos e, portanto, pode ocorrer também um aumento significativo na demanda deste metal, acompanhando o crescimento da produção de carros elétricos. A Figura 4 informa a massa de cobalto consumido entre 2013 e 2020, ilustrando as aplicações destinadas à essa procura, permitindo concluir que aproximadamente 50% são direcionados para a fabricação de baterias (Ohtsuka, 2022).

Figura 4 – Consumo por aplicação de cobalto de 2013 a 2020.

Fonte: Adaptado de *Cobalt Institute*, 2021.

Tal reaproveitamento irá minimizar a busca insaciável por novos recursos e os impactos ambientais gerados, tendo em vista que os metais elementares podem ser infinitamente reciclados e 95% dos materiais que compõe as baterias são recuperados ao passar pelo sistema inicial de reciclagem (Nelson, 2023).

2.3.5. Recuperação do Lítio

Para reduzir o risco de explosão durante o processo de reciclagem, é necessário um pré-tratamento, no qual o sistema precisa ser completamente descarregado, por meio de curto-circuito através de, por exemplo, tratamento térmico, que consiste em aquecer as baterias até temperaturas próximas a 300°C para evaporar os solventes, ou a descarga por imersão em uma solução salina (Martinho *et al.*, 2021).

Já descarregadas, as baterias de lítio sobem por uma esteira em direção a um funil cheio de um líquido proprietário, representado pela Figura 5, onde um enorme triturador industrial está submerso na parte inferior. A presença desse líquido garante a ausência de micropartículas no ar. Dentro dos módulos das baterias, há uma variedade de materiais, incluindo a caixa de metal, plásticos que mantêm todos os componentes estáveis, além de níquel, cobalto e lítio. Após serem moídas, as baterias passam de um estado carregado para um estado totalmente inerte, não restando eletricidade nos materiais após o processo de trituração. Os plásticos, flutuam para o topo do líquido, separados e seguem por uma esteira vibratória para processamento posterior (Nelson, 2023).

Figura 5 – Bateria de lítio de um carro elétrico usada entrando no processo de extração de seus componentes.



Fonte: Nelson, 2023.

Após a bateria passar pelo triturador, ela fica moída e se transforma em pequenos flocos de metal, que afundam para o fundo do tanque, passam por uma peneira vibratória de tamanho 0,75 mm e são transportados para cima e para fora do líquido. Saindo da peneira, temos alumínio, aço, cobre e outros metais preciosos como ouro, platina e paládio. A distribuição do tamanho das partículas trituradas é influenciada pela velocidade das lâminas do britador, pelo tempo de contato e pela eficiência da transferência de energia dessas lâminas para o material de alimentação (Bhar *et al.*, 2023).

A forma como cobalto, lítio, manganês e níquel são extraídos desse líquido proprietário dentro da máquina trituradora, é a operação unitária chamada de Filtro Prensa. O líquido rico em metal é bombeado para a prensa que contém um tecido filtrante e é espremido hidraulicamente, sendo retido um fluído chamado de “Massa Negra”. Essa massa do interior do filtro em sua limpeza e é o que contém todos os elementos cobiçados. A Massa Negra (*Black Mass* ou *BM*) é valiosa o suficiente para ser chamada de “Novo Ouro” (Nelson, 2023).

Importante ressaltar que embora este processo utilize grande quantidade de água internamente, é um sistema de circuito fechado e, portanto, não se esgota em nenhuma das reações. Além disso, não há poluentes atmosféricos, já que nada está sendo queimado (Nelson, 2023).

Depois que as baterias foram trituradas, classificadas, filtradas e prensadas, sobram três produtos: Plásticos (que flutuaram no topo do líquido), fragmentos de metais (que afundaram

no líquido) e a cobiçada BM, representada pela Figura 6, rica em cobalto, níquel, manganês e lítio (Nelson, 2023).

Figura 6 – Massa Negra recuperada do processo de extração empregado pela empresa Li-Cycle.



Fonte: Nelson, 2023.

Agora com a Massa Negra, o processo começa com um tratamento térmico denominado pirólise. Neste estágio, as células da bateria são aquecidas em atmosfera inerte, geralmente a cerca de 600-700 °C, fazendo com que ocorra a degradação dos materiais orgânicos, culminando no seu consumo e na formação de CO₂ e CO, que acabam reagindo com os materiais que compõe a Massa Negra, gerando compostos como Óxido de Lítio (Li₂O), Carbonato de Lítio (Li₂CO₃), Óxido de Alumínio (Al₂O₃) e Ácido Fluorídrico (HF), gerado pela degradação do ligante Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) através do tratamento térmico (Balachandran *et. al*, 2021).

Ainda na pirólise, o ácido fluorídrico (HF) proveniente do PVDF, reage com o óxido de lítio e com o carbonato para formar o Fluoreto de Lítio (LiF), que embora seja insolúvel em água, é facilmente manuseado em solução ácida ou alcalina. (Balachandran *et. al*, 2021).

Após o tratamento térmico, a solução pirolisada é submetida a uma lixiviação, onde ocorre uma mistura com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em um reator, onde a proporção sólido-líquido, temperatura e agitação são rigorosamente controladas. Ao atingir a temperatura desejada, 5g de Massa Negra são adicionados ao sistema do reator afim de obter 100g/L de “lama”. A solução de NaOH é preparada a uma concentração de 5%, com a mistura sendo mantida à temperaturas em torno de 55 °C e a lama é homogeneizada por 180 minutos através de uma agitação magnética, promovendo a dissolução do lítio na solução e gerando uma

solução lixiviada contendo Hidróxido de Lítio (LiOH) e impurezas, como NaF, Na_2CO_3 , $2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (Joshi *et al.*, 2024).

Após a lixiviação, a mistura é resfriada e filtrada a vácuo em um sistema de filtração, para separar os sólidos não dissolvidos como: NiO, CoO e MnO_2 da solução lixiviada (Joshi *et al.*, 2024).

A solução lixiviada filtrada deve ser transferida para um recipiente, onde é continuamente agitada a 500 rpm e aquecida a 90 °C, a fim de supersaturar a solução em relação ao Li_2CO_3 . Com isso, a solução concentrada pode ser submetida a três tratamentos diferentes:

- **Cristalização Evaporativa:** A solução é aquecida para evaporar parte do líquido, aumentando a concentração de lítio até que comece a cristalizar;
- **Precipitação Homogênea:** A adição de carbonato de sódio (Na_2CO_3) à solução provoca a formação de carbonato de lítio (Li_2CO_3), que se precipita;
- **Precipitação Heterogênea:** O gás dióxido de carbono (CO_2) é injetado na solução, que também resulta na precipitação de carbonato de lítio.

O princípio do tratamento da Massa Negra através da precipitação heterogênea, envolve a formação de sólidos a partir de uma solução líquida por meio da adição de um agente que provoca a saturação e a formação de cristais (Joshi *et al.*, 2024).

A então solução concentrada é transferida para um reator para o processo de precipitação heterogênea. Em estudo de bancada, Joshi *et al.* utilizou um reator de vidro revestido (*glass-jacketed reactor*) de 1000 mL, conforme ilustrado na Figura 7 (Joshi *et al.*, 2024).

Figura 7 – Reator de vidro revestido utilizado em bancada para precipitação homogênea dos compostos de lítio recuperado.



Fonte: Joshi *et.al*, 2024.

Dentro do reator, a solução contendo Hidróxido de Lítio (LiOH) e impurezas é mantida em agitação contínua a 500 rpm por um agitador mecânico, enquanto um banho de óleo fornece aquecimento controlado a 90 °C. O banho é configurado em modo de controle ativo de temperatura, assegurando que a temperatura permaneça constante ao longo de toda a reação. Para evitar a absorção de CO₂ atmosférico durante a fase de aquecimento, um fluxo de gás nitrogênio (N₂) é purgado na parte superior do reator e um condensador de vidro é conectado ao reator para minimizar a perda de solvente por evaporação (Joshi *et al.*, 2024).

A injeção de CO₂ deve ser cuidadosamente controlada e o gás é saturado com vapor d'água na temperatura experimental antes de ser introduzido no reator. A purga de CO₂, mantida a uma taxa constante, é iniciada assim que a temperatura do reator atinge 90 °C e dura um período de 90 minutos, o que permite que o pH e a temperatura se estabilizem (Joshi *et al.*, 2024).

Com a introdução do CO₂, a solução reage, fazendo com que o hidróxido de lítio se cristalice na forma de carbonato de lítio (Li₂CO₃), e as impurezas geradas durante o processo de lixiviação se transformem em NaHCO₃ e NaAlCO₃(OH)₂ (Joshi *et al.*, 2024).

Após essa etapa, a solução resultante deve ser filtrada. Uma torta de filtro de Li₂CO₃ é obtida, mas ainda com um pouco de volume de impurezas, então como forma de aumentar ainda mais a pureza desses cristais de Lítio, são secados através de fornecimento de calor, garantindo grande remoção do solvente residual (Joshi *et al.*, 2024).

O lítio recuperado em forma de carbonato de lítio é analisado quanto à sua pureza e composição, frequentemente usando técnicas como difração de raios X (XRD) e espectroscopia de emissão atômica (MP-AES). Esse processo não apenas fornece lítio reciclado, mas também reduz os impactos ambientais associados à mineração de novas fontes (Joshi *et al.*, 2024).

2.3.6. Benefícios da reciclagem do lítio proveniente das baterias de carros elétricos

A reciclagem do lítio recuperado das baterias de carros elétricos usadas apresenta diversos benefícios tanto nos âmbitos ambientais quanto nos âmbitos econômicos, principalmente pelo fato desta ação possibilitar uma significativa redução da quantidade de materiais, provenientes do descarte das baterias de lítio, em aterros sanitários, que devido à sua composição podem levar à contaminação do solo e dos lençóis freáticos existentes na região (Costa *et al.*, 2021).

De todas as etapas de fabricação de uma bateria de lítio, a etapa de extração das matérias-primas, em especial, o lítio, é uma das que mais impactam o meio ambiente, desde a criação da

mina até o refino do material. Com isso, tendo em vista a sustentabilidade na produção dos veículos elétricos, a busca por uma menor extração desses materiais se torna uma preocupação crescente (Costa *et al.*, 2021).

Surgindo como uma solução, a extração de materiais de baterias de lítio de carros elétricos usadas, caso seja mais econômico que a obtenção desses materiais da natureza, teria um impacto significativo na redução dos preços das baterias e consequentemente, dos carros elétricos, onde uma bateria proveniente de materiais reciclados, poderia servir para diversas aplicações, tanto para uso residencial quanto para uso urbano (Melin, 2021; Zhu et al., 2021).

2.4. ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE ENGENHARIA

A metodologia *Front End Loading* (FEL) é um método de execução de projetos de engenharia que envolve o seu desenvolvimento em etapas, a fim de ter o controle dos riscos e de maximizar os resultados esperados. O Quadro 1 apresenta o desenvolvimento das três etapas (FEL 1, FEL 2 e FEL 3) ao longo do tempo. A metodologia caracteriza-se pelo uso de documentos e desenhos de engenharia de modo a garantir que o produto do projeto esteja dentro das especificações técnicas esperadas (FERREIRA, 2018).

Quadro 1 – Metodologia FEL de desenvolvimento de projeto de engenharia.

<i>Front End Loading</i>			Execução do Projeto	
FEL 1	FEL 2	FEL 3	Design detalhado	Construção
- Planejamento de negócios; - Estudo de mercado; - Avaliação de tecnologia; - Design conceitual; - Estimativa preliminar investimento; - Definição vazão e composição das correntes de entrada e saída; -Análise de risco.	- Revisão do FEL 1; - Design preliminar; - Balanço de massa e de energia; - Análise econômica; -Análise de Risco.	- Revisão FEL 1 e FEL 2; - Design “Classe A”; - Análise de Segurança; - Detalhamento dos demais componentes e instrumentos; - Definição final dos custos; - Análise de Risco.	- Projeto de engenharia detalhado; - Compra de equipamentos; - Subcontrato de licitação para desenvolvimento de atividades.	- Mobilização; - Construção; - Comissionamento e começo de produção.

Fonte: SPANGLER, 2005 (modificado).

O FEL é constituído de três etapas de planejamento prévias à execução do projeto, que são responsáveis pela avaliação de qualidade e, consequentemente, pela aprovação dos entregáveis de cada fase. As etapas constituintes do FEL são o projeto conceitual (FEL 1), o

projeto básico (FEL 2) e o projeto de detalhamento (FEL 3). Cada uma das etapas possui um escopo de documentos e desenhos de engenharia, com determinados níveis de precisão e de detalhamento, de modo que o grau de detalhamento aumenta ao longo das etapas do processo. No presente trabalho, foi executado apenas o Projeto Conceitual (FEL1).

Seguindo as etapas de um Projeto de Engenharia Conceitual via metodologia FEL, tem-se o desenvolvimento de um sequenciamento de documentos fundamentais à análise e desenvolvimento do projeto. O Quadro 2 apresenta os principais documentos e desenhos de engenharia a serem gerados, incluindo seus respectivos objetivos, entradas e saídas (BASSANE et al., 2019; AMERICAN NATIONAL STANDARD, 2009).

Quadro 2 – Documentos e desenhos de engenharia principais gerados em um projeto conceitual, seguindo a metodologia FEL.

Documentos	Objetivos	Entradas	Saídas
Tabela de Processos (TP)	Apoiar na busca das informações chaves sobre o processo, ajudando o projetista na obtenção de conhecimento prévio.	Literatura, informações fornecedores, <i>hansbooks</i> industriais	Tabela preenchida
Relatório Técnico (RT) de Processo	Descrever resultados obtidos na Tabela de Processo, descrevendo ainda os dados de vazão e composição na entrada e saída do processo.	Dados encontrados na Tabela de Processo	Descrições; Resultados.
Diagrama de Blocos (DB) de Processo	Visão macroscópica do processo; Identificar principais fluídos e tecnologias presentes no processo; Servir de referência para construção do PFD.	Ideia Inicial; Teste piloto; Conhecimento prévio em Engenharia de Processos.	Sequência dos Processos; Correntes principais do processo.
Memória de Cálculo (MC) de Balanço de Massa Preliminar	Apresentar os cálculos balanço de massa preliminar do processo	Estudo Literatura; Pesquisas.	Cálculo do balanço de massa Preliminar.
MC de Custos	Fazer uma estimativa inicial dos custos de investimentos necessários (CAPEX) e custos de operação (CAPEX)	Demais documentos do projeto conceitual.	Obtenção da estimativa dos custos preliminares do projeto.

Fonte: BASSANE et al., 2019 e ANSI/ISA-5.1, 2009.

A fase de FEL 1 busca identificar, desenvolver e avaliar as fases iniciais do projeto, com ou sem levantamento dos seus custos. Nesta fase, deseja-se entender preliminarmente o processo, saindo do *status* “só sei que nada sei” para o “conheço alguma coisa” (MOTTA et al., 2011). Nesta etapa ainda não são fornecidos detalhes sobre os processos a serem executados, são apenas citados e conectados de forma lógica a fim de obter-se o produto de interesse. Logo,

ao realizar-se o Diagrama de Blocos do Processo, o bloco referente a cada etapa é representado por uma caixa preta, de modo a saber-se apenas que a etapa existe e o que ela faz (SPANGLER, 2005).

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Este projeto inicialmente consistiu na compreensão do aumento da demanda de carros elétricos, tendo como base a instauração do Acordo de Paris, que por sua vez, ficou marcada pelo comprometimento entre países afim de reduzir o lançamento de gases de Efeito Estufa na atmosfera.

Como consequência do aumento desse mercado automotivo, ocorreu o aumento do descarte inadequado de baterias, que geram significantes impactos ambientais. Além desses impactos, também ocorre um uso exacerbado das matérias-primas que compõe as baterias, principalmente do Lítio, que é o material mais necessário na elaboração e fazendo com que a sua escassez se torne cada vez mais eminente.

Com isso, foi feito uma pesquisa bibliográfica, principalmente em artigos científicos, dessas baterias de lítio utilizadas nos carros elétricos, com a finalidade de identificar seus componentes e verificar se é possível realizar a extração do lítio, tornando possível a sua reutilização na elaboração de novas baterias.

3.2 ESTUDO DO PROCESSO DE EXTRAÇÃO DO LÍTIO DA BATERIA DE CARRO ELÉTRICO

Este projeto baseou-se no processo empregado pela empresa *Li-Cycle*, que possui capacidade de processar 18.000,0 toneladas de baterias de lítio por ano, onde ocorre a obtenção da Massa Negra e a recuperação de plásticos, papeis e parte dos metais que fazem parte das matérias-primas que constituem as baterias de carros elétricos.

Como a empresa ainda não concluiu a construção da instalação de “*Rochester Hub*”, em *Nova York*, que é o local para onde a BM seria enviada para prosseguir com a recuperação dos demais compostos, foi realizado revisões bibliográficas afim de se obter a melhor metodologia de extração do lítio dessa massa, avaliando quantidade de reagentes utilizados, grau de pureza do produto final e viabilidade econômica, cujo projeto realizado por Joshi *et.al* se destacou, por apresentar três diferentes metodologias (Joshi *et.al*, 2024).

O método da *Li-Cycle* utilizado para a conceituação deste projeto conceitual proposto consistiu em quatro etapas, iniciando com a entrada de baterias usadas e encerrando com a

obtenção da Massa Negra, como já dito na fundamentação teórica e descrito detalhadamente na Tabela de Processos presente na seção de Resultados e Discussão a seguir.

A metodologia utilizada por Joshi *et.al* consiste na recuperação seletiva de lítio da Massa Negra por meio da lixiviação cáustica e da precipitação. Tal metodologia possibilita a recuperação do elemento desejado por três diferentes processos: Cristalização evaporativa, precipitação heterogênea e precipitação homogênea. Cada uma dessas etapas consegue realizar a extração do lítio da Massa Negra, mas com concentração distinta em cada um dos processos.

Baseando-se em grau de pureza do lítio recuperado, neste projeto conceitual foi adotada a metodologia da precipitação heterogênea, que conseguiu um recuperado de pureza superior à dos demais, com 17,39% de Lítio na base elementar, que é 92,56% Li_2CO_3 , que consiste na inserção de dióxido de carbono na solução.

Juntamente com o processo empregado para a obtenção da Massa Negra, as etapas utilizadas para a recuperação do precipitado foram inseridas também na documentação do projeto conceitual desenvolvido. Para isso, realizou-se um levantamento das operações unitárias necessárias para elaboração de tal procedimento, transferindo as informações obtidas para a Tabela de Processo, contendo perguntas chaves a respeito de cada operação, e para o Diagrama de Blocos.

3.3 TABELA DE PROCESSOS

A elaboração da Tabela de Processos foi o primeiro documento elaborado no Projeto Conceitual, fornecendo as informações a respeito de cada operação unitária existente em cada etapa do processo de extração do lítio das baterias.

Pode-se dizer que a conclusão deste documento é fundamental para o sucesso no desenvolvimento de etapas seguintes, já que nele é onde estão presentes características de cada fase do processo, desde o nome da operação unitária necessária em cada etapa até as informações de entrada e saída de compostos químicos da mesma. Sendo assim, esta tabela teve atenção apropriada e diversas referências bibliográficas como base em sua elaboração.

3.4 DIAGRAMA DE BLOCOS

Através do software Draw.io, foi desenvolvido um Diagrama de Blocos, que contribui para uma visão macroscópica do processo, além de facilitar a descoberta de erros e melhorias que possam ser efetuadas.

Draw.io trata-se de um software gratuito de desenho gráfico, em que se pode criar diagramas, fluxogramas, wireframes, entre outros tipos de gráfico. Neste projeto conceitual, foi utilizado a versão online do programa.

Figura 8 – Modelo de folha de rosto utilizada para construção do Diagrama de Blocos de Processo no *Draw.io*.

	A	B	C	D	E		
1					DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA	1	
					SIMBOLOGIA		
2							2
3							3
4							4
					EXEC. DATA APROVA. DATA REV		
					CLIENTE:		
					NOME DO PROJETO:		
5					Nº DO DESENHO	REV	5
					TÍTULO:		
	A	B	C	D	ESC.: Sem Escala FORM.: A3 29,7 cm x 42 cm FOLHA: 1 de 1		E

Fonte: Bezerra, 2024.

O Diagrama de Blocos de Processo fornece uma representação macroscópica da sequência das operações unitárias, mostrando o fluxo de materiais entre cada etapa, servindo como uma ferramenta importante para facilitar a comunicação e o entendimento do processo, além de ser útil na identificação de gargalos e otimizações potenciais.

3.5 MEMÓRIA DE CÁLCULO DE BALANÇO DE MASSA PRELIMINAR

A memória de cálculo do balanço de massa preliminar foi desenvolvida em seguida, através do *software Excel* (Microsoft, 2024) permitindo uma análise quantitativa do processo e com os cálculos preliminares para avaliar as entradas e saídas de cada operação unitária, bem

como a geração de resíduos. Essa etapa é fundamental para garantir a viabilidade econômica do processo e para embasar decisões sobre a escala de operação.

Assim, a metodologia adotada para a elaboração deste projeto conceitual ofereceu uma abordagem abrangente e integrada para a recuperação de lítio, alinhando eficiência técnica e benefícios ambientais.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 TABELA DE PROCESSOS

As Tabelas de Processos elaboradas para as etapas de extração do Lítio das baterias de carros elétricos usadas são apresentadas nas Tabelas de 2 a 12. Nelas foram levantadas as características das operações unitárias de cada uma das onze etapas do processo de recuperação de lítio de baterias usadas de carros elétricos, além de seus respectivos princípios de funcionamento, força motriz, eficiência, recuperação, parâmetros para dimensionamento da tecnologia utilizada, dentre outras perguntas básicas que ajudam a definir o processo em questão.

Na Tabela 2, estão apresentadas informações a respeito da primeira etapa do processo, onde ocorre a trituração das baterias de carro elétrico usadas. Como já dito, temos informações mais detalhadas a respeito da operação unitária, como o tipo de equipamento utilizado, que no caso, ocorre através de lâminas. Além disso, é informado que, após esta etapa é desejado matérias-primas trituradas, juntamente com a água que flui durante o processo.

Tabela 2 – Tabela de Processos da trituração com lâminas submersa, correspondente à 1ª etapa do processo de extração de lítio.

1ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Trituração com lâminas submersa em água.
Operação Unitária de separação ou reação?		-
Princípio de funcionamento		Etapa inicial do processo, cujo objetivo é fragmentar a bateria em componentes menores, facilitando a separação e a recuperação de materiais valiosos e a remoção de resíduos não desejados.
Força Motriz		Pressão exercida na amostra e a potência do motor do equipamento.
Remove ou degrada o que?		-
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Plásticos, metais (alumínio, aço, cobre, ouro, platina e paládio) e líquido contendo cobalto, níquel e lítio.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		-
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		100%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Potência do motor do triturador, considerando variáveis de processo, como: tamanho das partículas desejadas; capacidade de processamento; configuração do equipamento (martelo ou lâmina).
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Contínua. Automatizada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Baterias de Lítio em final de uso.
	Saídas	Mistura de materiais plásticos, metais e demais constituintes da bateria triturados e no tamanho desejado.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		-

Fonte: O autor, 2024.

Contendo informações acerca da segunda etapa do processo, a Tabela 3 descreve as respostas as perguntas-chave a respeito da operação unitária de flotação, que realiza a separação

dos materiais plásticos e papeis do líquido contido no equipamento após a trituração. Tal separação ocorre por diferença de densidade, com os materiais plásticos e papeis flutuando na água e sendo removidos mecanicamente.

Tabela 3 – Tabela de Processos da flotação, correspondente à 2ª etapa do processo de extração de lítio.

		2ª ETAPA
Nome da Operação Unitária		Flotação.
Operação Unitária de separação ou reação?		Separação.
Princípio de funcionamento		Os materiais plásticos, por possuírem uma densidade menor que a do líquido, irão flutuar e tornar possível a sua fácil remoção e separação do processo.
Força Motriz		Diferença de densidade entre os materiais plásticos e o líquido.
Remove ou degrada o que?		Remove os materiais plásticos e papeis triturados do líquido.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Plásticos.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		Remoção de 100% dos materiais plásticos e dos papeis presentes.
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		100%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Tamanho do tanque de flotação, considerando o tempo de residência necessário e a vazão de material processada.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Contínua. Automatizada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Mistura de materiais plásticos, metais e demais constituintes da bateria triturado e no tamanho desejado.
	Saídas	Materiais plásticos e papéis separados; Mistura de água e partículas de metais presentes.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		-

Fonte: O autor, 2024.

Agora sem os materiais que flutuaram no líquido, o restante dos componentes triturados segue o fluxo do líquido e passam por uma peneira vibratória, que possui uma abertura de 0,75 mm, conforme o informado pela Tabela 4. Tal operação unitária possui o objetivo de extrair a maior parte dos metais contidos nesse líquido, tendo uma eficiência de remoção igual a 95,0%.

A Tabela 5 é o final do processo empregado pela *Li-Cycle*, onde é obtida a Massa Negra através do bombeamento da água, juntamente com os compostos triturados, para um filtro prensa, cuja eficiência é de 95,0% e fazendo com que a água removida retorne para a etapa de trituração e a Massa Negra fique acumulada nas calhas do filtro para prosseguir no processo. Como já dito na fundamentação teórica, nessa massa, constituída de compostos sólidos, é onde estão presentes os principais componentes químicos responsáveis pelo funcionamento da bateria.

Tabela 4 – Tabela de Processos da Peneira Rotativa, correspondente à 3ª etapa do processo de extração de lítio.

3ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Peneiramento.
Operação Unitária de separação ou reação?		Separação.
Princípio de funcionamento		Os metais irão afundar no líquido proprietário e o fluxo de água os levarão a uma peneira de 0,75mm de abertura. Os materiais sólidos de maior tamanho do que a abertura da peneira ficarão retidos e serão retirados do processo. Já a água e os materiais sólidos de menor tamanho do que a abertura da peneira irão passar e seguirão para os processos de separação seguintes.
Força Motriz		A gravidade e a energia vibratória da peneira.
Remove ou degrada o que?		Remoção dos metais sólidos do líquido.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Metais (alumínio, aço, cobre, ouro, platina e paládio).
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		Remoção de 95% do material sólido presente.
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		100%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		A área da peneira é o principal parâmetro a ser dimensionado. As principais variáveis de processo a serem consideradas seriam: relação entre o tamanho das partículas e o tamanho da abertura; material da tela; capacidade da peneira.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Contínua. Automatizada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Mistura de água e partículas de metais presentes.
	Saídas	Partículas de metais separadas; e mistura de água com partículas de metais residual.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		-

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 5 - Tabela de Processos do Filtro Prensa, correspondente à 4ª etapa do processo de extração de lítio.

4ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Filtração por Filtro Prensa.
Operação Unitária de separação ou reação?		Separação.
Princípio de funcionamento		Após a separação dos plásticos e dos metais, o líquido é bombeado para um filtro prensa e pressurizado hidráulicamente, deixando para trás o que é chamado de Massa Negra.
Força Motriz		Pressão.
Remove ou degrada o que?		Remoção da Massa Negra nas placas do Filtro Prensa.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Massa Negra. Contendo níquel, cobalto e lítio.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		100%
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		95%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Área de filtração; Tamanho e quantidade de placas; Pressão; Vazão.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Contínua. Automatizada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Líquido.
	Saídas	Massa Negra.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		-

Fonte: O autor, 2024.

A pirólise é a quinta e uma das principais fases do processo, responsável por converter o lítio em compostos solúveis. Com uma eficiência de 100%, de acordo com a Tabela 6, esta operação unitária realiza tal conversão através de aquecimento, que acarreta a degradação dos

materiais orgânicos e na formação de dióxido e monóxido de carbono. Além da importante degradação do PVDF, gerando o ácido fluorídrico, que irá reagir com parte do carbonado de lítio e com o óxido de lítio, formando o composto LiF.

Tabela 6 - Tabela de Processos da Pirólise, correspondente à 5ª etapa do processo de extração de lítio.

		5ª ETAPA
Nome da Operação Unitária		Pirólise.
Operação Unitária de separação ou reação?		Reação.
Princípio de funcionamento		Decomposição térmica dos materiais da bateria em uma atmosfera inerte, a altas temperaturas (por exemplo, 603 °C). Nesta etapa, os materiais orgânicos são consumidos para formar CO ₂ e CO reagindo com a massa negra e gerando compostos, como Li ₂ O e Li ₂ CO ₃ , que, em seguida, reagem com o HF gerado pela degradação do ligante fluoreto de polivinilideno (PVDF), formando o fluoreto de lítio (LiF).
Força Motriz		Temperatura.
Remove ou degrada o que?		Converter o lítio em compostos solúveis.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		LiF (Fluoreto de Lítio) , Li ₂ CO ₃ (Carbonato de Lítio) e Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio).
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		100%
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		100%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Temperatura.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Batelada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Massa Negra e Energia Térmica.
	Saídas	LiF (Fluoreto de Lítio), Li ₂ CO ₃ (Carbonato de Lítio), Al ₂ O ₃ (Óxido de Alumínio), NiO, CoO, MnO ₂ e Gases.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		

Fonte: O autor, 2024.

Com compostos solúveis em meio ácido, a solução pirolisada segue para a etapa de lixiviação com NaOH, representado pela Tabela 7. Esta operação unitária de reação é fundamental para dissolver o lítio, formando LiOH e tornando possível a sua separação do cobalto, níquel e do manganês, que permanecem no estado sólido.

O Co, Ni e Mn, agora óxidos, formados pela reação com NaOH, serão extraídos na sétima etapa do processo, a filtração 1, detalhada pela Tabela 8, o qual nos fornecerá uma solução pirolisada lixiviada livre de sólidos.

Com o objetivo de supersaturar a solução, essa é submetida a uma agitação com aquecimento, conforme descrito na Tabela 9, que fornece informações da oitava etapa do processo. Com esta operação, ocorre a minimização da formação de sedimentos ou da inatividade das partículas em suspensão, resultando em uma elevada eficiência de recuperação e conseqüentemente, uma maior pureza do produto final.

Tabela 7 - Tabela de Processos da lixiviação com NaOH, correspondente à 6ª etapa do processo de extração de lítio.

6ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Lixiviação.
Operação Unitária de separação ou reação?		Reação.
Princípio de funcionamento		Com agitação e aquecimento, ocorre uma dissolução LiF (Fluoreto de Lítio), que apesar de ser insolúvel em água, é solúvel à lixiviação cáustica, onde ao reagir com o NaOH (Hidróxido de Sódio). Com a sua capacidade de solubilidade em meio alcalino, reage com o LiF reage com NaOH e forma também LiOH (Hidróxido de Lítio).
Força Motriz		Concentração dos reagentes
Remove ou degrada o que?		Dissolve o Lítio para separá-lo dos demais metais.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		LiOH, NaF, Na_2CO_3 , $2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		100% para Li_2CO_3 , 37% para LiF e 100% para AL.
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		70%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Temperatura, Tempo e Agitação.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Batelada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	LiF (Fluoreto de Lítio), Li_2CO_3 (Carbonato de Lítio) e NaOH (Hidróxido de Sódio).
	Saídas	Solução lixiviada, composta por LiOH (Hidróxido de Lítio) e Impurezas.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Sim.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	NaOH.
	Saídas	
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		NaOH à 5%.

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 8 - Tabela de Processos da filtração, correspondente à 7ª etapa do processo de extração de lítio.

7ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Filtração.
Operação Unitária de separação ou reação?		Separação.
Princípio de funcionamento		Para clarificar o líquido, separando os sólidos não dissolvidos da solução líquida que contém o Lítio.
Força Motriz		Pressão
Remove ou degrada o que?		Remove os sólidos não dissolvidos da solução líquida que contém o Lítio.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Solução lixiviada livre de sólidos.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		100% para LiF(Sólido) e para óxidos sólidos; 10% para impurezas e água.
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		95%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Vazão, Área e Pressão.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Batelada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Solução lixiviada, LiOH (Hidróxido de Lítio) e Impurezas.
	Saídas	Solução de LiOH contendo NaF, Na_2CO_3 , $2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$, NiO, CoO e MnO_2 .
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Sim.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	NiO, CoO e MnO_2 .
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		

Fonte: O autor, 2024.

Com isso, a solução, agora supersaturada, está pronta para ser submetida à precipitação heterogênea, que ocorre com a inserção de CO_2 , provocando saturação na solução e a formação de cristais de carbonato de lítio. Baseado na revisão bibliográfica de Joshi *et.al*, a Tabela 10

informa que 95,0% do carbonato de lítio aquoso se precipita na forma de cristais e serão extraídos na etapa a seguir (Joshi *et.al*, 2024).

Tabela 9 - Tabela de Processos da agitação, correspondente à 8ª etapa do processo de extração de lítio.

8ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Agitação.
Operação Unitária de separação ou reação?		Reação.
Princípio de funcionamento		Promover uma interação eficiente entre o reagente adicionado (CO ₂) e os íons de lítio presentes na solução e facilitar as reações químicas necessárias para a precipitação do lítio, supersaturando a solução em relação ao Li ₂ CO ₃ . Além disso, a agitação contínua minimiza a formação de sedimentação ou a inatividade das partículas em suspensão, resultando em uma maior eficiência de recuperação e pureza do produto final.
Força Motriz		Solubilidade.
Remove ou degrada o que?		-
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Solução supersaturada.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		-
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		-
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Velocidade de agitação, Volume da solução, Temperatura e Tempo.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?		Entradas
		Saídas
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?		Entradas
		Saídas
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?		Entradas
		Saídas
Concentração desses produtos químicos:		

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 10 - Tabela de Processos da precipitação heterogênea, correspondente à 9ª etapa do processo de extração de lítio.

9ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Precipitação heterogênea.
Operação Unitária de separação ou reação?		Reação.
Princípio de funcionamento		Formação de sólidos a partir de uma solução líquida por meio da adição de um agente que provoca a saturação e a formação de cristais (CO ₂).
Força Motriz		Concentração dos reagentes
Remove ou degrada o que?		-
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Carbonato de lítio (Li ₂ CO ₃) cristalizado.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		95% para Li ₂ CO ₃ .
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		95%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Concentração, Temperatura e Agitação.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?		Entradas
		Saídas
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Sim.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?		Entradas
		Saídas
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?		Entradas
		Saídas
Concentração desses produtos químicos:		

Fonte: O autor, 2024.

A recuperação do lítio foi concluída, mas ainda podemos aumentar a sua pureza e para isso, o processo segue para a décima etapa, onde ocorre mais uma filtração, denominada de “filtração 2” e se estende até a décima primeira etapa, correspondente à operação de secagem, onde a Tabela 11 e 12, respectivamente, informa detalhes de cada uma dessas últimas operações unitárias do processo.

Tabela 11 - Tabela de Processos da Filtração, correspondente à 10ª etapa do processo de extração de lítio.

10ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Filtração.
Operação Unitária de separação ou reação?		Separação.
Princípio de funcionamento		Separar o carbonato de Lítio cristalizado do restante da solução, reduzindo o volume de impurezas contidas nesses cristais.
Força Motriz		Pressão
Remove ou degrada o que?		Separar os cristais de carbonatos de Lítio do restante da solução.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Torta de filtro de Li_2CO_3 com baixo volume de impurezas.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		100% para Li_2CO_3 , 70% para impurezas e 95% de água.
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		95%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Vazão, Área e Pressão.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Batelada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Solução contendo carbonato de lítio (Li_2CO_3) cristalizado.
	Saídas	Torta de filtro de Li_2CO_3 e Efluente líquido.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Sim.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	Efluente líquido.
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 12 - Tabela de Processos da secagem, correspondente à 11ª etapa do processo de extração de lítio.

11ª ETAPA		
Nome da Operação Unitária		Secagem.
Operação Unitária de separação ou reação?		Separação.
Princípio de funcionamento		Torta de filtro de Li_2CO_3 é secada em uma cabine de exaustão por 24 horas com o objetivo de aumentar ainda mais a pureza do Carbonato de Lítio obtido no processo de extração.
Força Motriz		Temperatura
Remove ou degrada o que?		Remover por completo a umidade do carbonato de Lítio obtido.
Quais solutos são desejados após a separação ou reação?		Li_2CO_3 seco.
Qual a eficiência típica da Operação Unitária?		70% para impurezas e 95% para água.
Qual a recuperação típica da Operação Unitária?		70%
Quais os parâmetros principais para dimensionamento da tecnologia?		Temperatura e Tempo.
Operação contínua ou batelada? Manual ou automatizada?		Batelada.
Quais as correntes da operação unitária/tecnologia na operação principal?	Entradas	Torta de filtro de Li_2CO_3 .
	Saídas	Li_2CO_3 e Efluente gasoso.
Na etapa existe operação secundária ou de limpeza? Quais?		Sim.
Quais as correntes da etapa presentes na operação secundária ou de limpeza?	Entradas	
	Saídas	Efluente gasoso.
Existe operação não contínua ou manobra de parada? Qual?		Não.
Quais as correntes da etapa presentes na operação não contínua?	Entradas	
	Saídas	
Concentração desses produtos químicos:		

Fonte: O autor, 2024.

4.2 DIAGRAMA DE BLOCOS

Com o intuito de sintetizar as informações existentes na Tabela de Processos, foi construído um Diagrama de Blocos (Figura 9), favorecendo para uma compreensão mais apurada em relação às etapas existentes no processo de reciclagem de baterias de Lítio e no processo extração desse metal alcalino dos dispositivos de armazenamento de energia ao qual o projeto se refere.

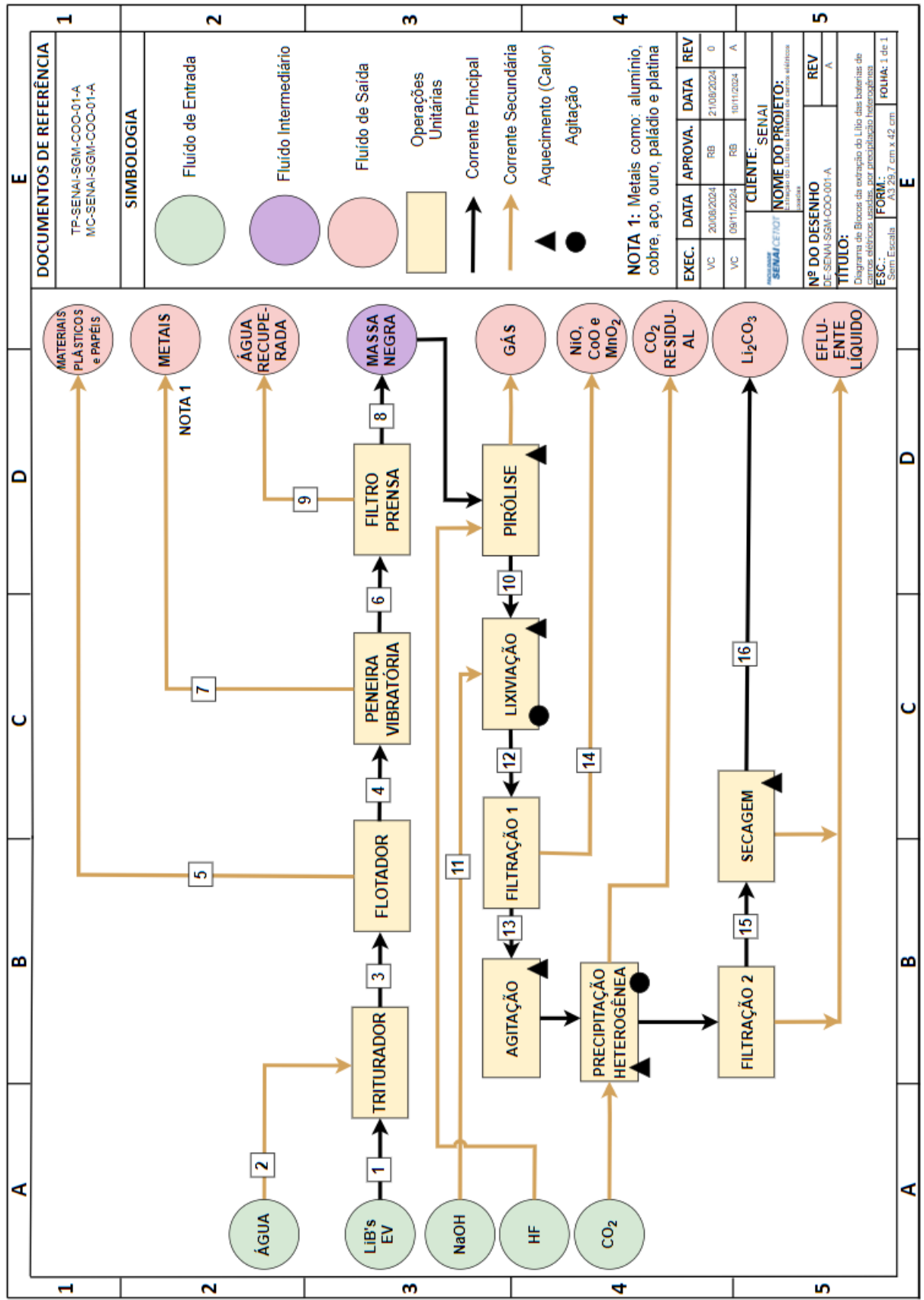
Um diagrama de blocos apresenta 3 secções: “Área gráfica”, “Área de grid” e “Demais áreas”. Na “Demais áreas” é onde estão localizadas as informações a respeito do documento, como a simbologia, título e dimensões. Já na “Área gráfica”, onde foi elaborado o diagrama, destacam-se 16 correntes essenciais devidamente numeradas, onde 10 são correntes principais e 6 são correntes secundárias.

A corrente 1 representa as baterias de lítio de carros elétricos usadas, que ao passar pelo triturador, que apresenta uma corrente de água (2), gera a corrente das baterias trituradas (3), que seguem para a etapa da flotação, responsável por separar os materiais plásticos e papeis (corrente 5) e em seguida, por uma peneira rotativa responsável por separar os metais da composição (corrente 7). Sendo assim, a corrente de resíduos da bateria de lítio triturada sem plásticos, papeis ou metais, juntamente com a água (6), é bombeada para um filtro prensa, gerando a corrente de recuperação d’água e seu reinserimento no sistema (9) e fazendo com que fique retido no filtro a corrente de Massa Negra (8).

Indo para o segundo estágio do diagrama, a corrente da Massa Negra (8) é pirolisada através de um aquecimento e de uma reação com o ácido fluorídrico (HF), gerando uma corrente de gás e a corrente da solução pirolisada (10), que ao ser lixiviada com hidróxido de sódio (NaOH), representada pela corrente 11, gera a corrente de solução lixiviada (12), que passa por uma etapa de filtração (13), separando os óxidos formados na lixiviação, sendo representados pela corrente 14.

A solução lixiviada e filtrada segue para um agitador com aquecimento e parte para a etapa de precipitação heterogênea, possuindo uma corrente de entrada de gás CO_2 e uma corrente de saída de gás residual. Com compostos precipitados, a solução segue novamente para uma nova filtração, separando efluentes líquidos e fazendo com que a corrente de carbonato de lítio com impurezas (15) siga para uma etapa de secagem e gere uma corrente de Li_2CO_3 com uma maior pureza (16).

Figura 9 – Diagrama de blocos do processo de extração do lítio das baterias de carros elétricos usadas através da precipitação heterogênea.



Fonte: O autor, 2024.

4.3 MEMÓRIA DE CÁLCULO DE BALANÇO DE MASSA PRELIMINAR

A partir das diferentes Tabelas de Processos elaboradas anteriormente, foi desenvolvida uma memória de cálculo de balanço de massa preliminar, tendo como processamento inicial de 18.000,0 toneladas por ano, conforme o elaborado pela empresa *Li-Cycle*. Para estipular a vazão de entrada no sistema, o projeto se baseou na composição química das baterias de lítio, adaptada na Tabela 13, divulgado por Zheng *et. al*, o qual ressalta que a composição pode mudar dependendo do fabricante.

Em seguida, a unidade foi transformada em toneladas por hora, conforme a Tabela 14, com o objetivo de facilitar os cálculos de vazão de cada etapa do processo, em que também pode-se observar uma estimativa da relação da água contida nos equipamentos com a entrada das baterias de lítio de carros elétricos usadas.

Tabela 13 – Composição média das baterias de lítio.

Componentes	%
Cobalto (Co)	5,0 – 20,0
Níquel (Ni)	5,0 -10,0
Lítio (Li)	5,0 – 7,0
Demais metais: Cobre (Cu), Alumínio (Al) e Ferro (Fe)	5,0 – 10,0
Plástico e Papel	7,0
Compostos orgânicos	15,0

Fonte: Zheng *et.al*, 2018.

A elaboração dessa conversão possibilitou o início do desenvolvimento da memória de cálculo de balanço de massa preliminar, demonstrada por completo nas Tabelas 15 e 16, onde os valores foram devidamente calculados de acordo com a eficiência de cada etapa do processo. Os cálculos permitiram informar não somente a composição do produto final, mas também a composição da solução de cada etapa, evidenciando perdas e purezas, além de facilitar a leitura de eficiência e a realização de possíveis modificações no processo, com o objetivo de torna-lo mais sustentável, gerando produtos de maior pureza e, conseqüentemente, garantindo uma viabilidade econômica atraente.

Tabela 14 – Estimativa dos valores da vazão de entrada de baterias e da relação de água por hora no processo.

Entrada de LIB's EV	18000	T/ano
Produção anual	365,25	dias/ano
Produção diária	24	h/dia
Entrada de LIB's EV	18000	T/h
Relação Água/LIB's EV triturado	2,05	

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 15 – Parte 1 da tabela contendo o balanço de massa preliminar do processo, com os dados das correntes de 1 a 8.

Número da Corrente	1	2	3	4	5	6	7	8
Nome da Corrente	LIB's EV	Água	LIB's Triturado	Não Flotado	Flotado	Passante Peneira	Retido Peneira	Retido Filtro Prensa
Vazão (T/h)	2,05	4,11	6,16	5,86	0,30	5,34	0,51	0,98
Li (%)	0,0750	0,0000	0,0250	0,0263	0,0000	0,0274	0,0150	0,1490
Li ₂ CO ₃ (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
LiF (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
LiOH (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ni, Co e Mn (%)	0,2000	0,0000	0,0667	0,0701	0,0000	0,0730	0,0400	0,3973
NiO, CoO e MnO ₂ (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Materiais Plásticos e Papéis (%)	0,0700	0,0000	0,0233	0,0000	0,4714	0,0000	0,0000	0,0000
Metais (%)	0,0750	0,0000	0,0250	0,0263	0,0000	0,0014	0,2847	0,0078
NaF, Na ₂ CO ₃ e 2Na[Al(OH) ₄]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NaHCO ₃ e NaAlCO ₃ (OH) ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Compostos Orgânicos e Outros (%)	0,5800	0,0000	0,1933	0,1932	0,1953	0,1483	0,6604	0,2420
Água (%)	0,0000	1,0000	0,6667	0,6840	0,3333	0,7498	0,0000	0,2039
NaOH (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 16 – Parte 2 da tabela contendo o balanço de massa preliminar do processo, com os dados das correntes de 9 a 16.

Número da Corrente	9	10	11	12	13	14	15	16
Nome da Corrente	Passante Filtro Prensa	Solução após Pirólise	Solução NaOH	Solução após Lixiviação	Passante Filtro 1	Retido Filtro 1	Retido Filtro 2	Li ₂ CO ₃ após Secagem
Vazão (T/h)	4,36	0,98	19,50	15,93	13,94	2,00	1,08	0,44
Li (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Li ₂ CO ₃ (%)	0,0000	0,1863	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3727	0,9202
LiF (%)	0,0000	0,1699	0,0000	0,0065	0,0000	0,0522	0,0000	0,0000
LiOH (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0267	0,0305	0,0000	0,0000	0,0000
Ni, Co e Mn (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NiO, CoO e MnO ₂ (%)	0,0000	0,4001	0,0000	0,0245	0,0000	0,1955	0,0000	0,0000
Materiais Plásticos e Papéis (%)	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Metais (%)	0,0000	0,0079	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NaF, Na ₂ CO ₃ e 2Na[Al(OH) ₄]	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,0005	0,0004	0,0000	0,0000
NaHCO ₃ e NaAlCO ₃ (OH) ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0038	0,0028
Compostos Orgânicos e Outros (%)	0,1272	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Água (%)	0,8728	0,2358	0,9500	0,9418	0,9690	0,7519	0,6235	0,0770
NaOH (%)	0,0000	0,0000	0,0500	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: O autor, 2024.

Os valores de vazão e composição de cada corrente foram calculados baseados na eficiência de cada operação unitária, em concordância com o que é demonstrado pelas tabelas a seguir. A composição de “LIB’s Triturado” é baseada na Tabela 13, adequando valores conforme a porcentagem de cada composto presente na estruturação das baterias de lítio, mas dessa vez, com a água, existente no sistema, em sua composição.

Na Tabela 17, são apresentados a massa de entrada e de saída, em toneladas por hora dos compostos flotados, onde tais valores são calculados pela fórmula apresentada na equação 1, que estabelece uma multiplicação da porcentagem do composto pela vazão da solução total de entrada, que em seguida, é multiplicada pela eficiência da operação unitária e dividida pela vazão da solução total de saída, demonstrada na Equação 2 e 3, respectivamente.

$$mentrada = Vazão * \% \quad (1)$$

$$msaída = eficiência * mentrada \quad (2)$$

$$\% = \frac{msaída}{Vazão} \quad (3)$$

Para os valores da corrente 4, foram calculados de acordo com os compostos que saíram do triturador menos os compostos que flotaram. Com isso, foi descoberto a vazão de materiais que permaneceram no equipamento, já que os flotados foram removidos. Seguindo a mesma metodologia, temos em seguida, a peneira rotativa, na qual a Tabela 18 apresenta os compostos retidos no equipamento que, por ter uma abertura de 0,75 mm, tem o objetivo de remover da solução grande parte dos metais.

Tabela 17 – Massa dos compostos flotados de acordo com a eficiência da operação unitária.

Corrente 5 (Flotado)		
Água	0,50	
Massa de Água Saída	0,10164271	
Massa outros compostos Entrada	1,190965092	T/h
Eficiência Flotador para outros compostos	0,05	
Massa outros compostos Saída	0,059548255	T/h
Massa materiais plásticos e papéis Entrada	0,143737166	T/h
Eficiência Flotador	1,00	
Massa materiais plásticos e papéis Saída	0,143737166	T/h

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 18 – Massa dos compostos retidos na peneira rotativa de acordo com a eficiência da operação unitária.

Corrente 7 (Retido Peneira)		
Massa de Li Entrada	0,154004107	T/h
Eficiência Peneira para Li	0,05	
Massa de Li Saída	0,007700205	T/h
Massa de Ni, Co e Mn Entrada	0,410677618	T/h
Eficiência Peneira para Ni, Co e Mn	0,05	
Massa de Ni, Co e Mn Saída	0,020533881	T/h
Massa de metais Entrada	0,154004107	T/h
Eficiência Peneira para metais	0,95	
Massa de metais Saída	0,146303901	T/h
Massa de outros compostos Entrada	1,131416838	T/h
Eficiência Peneira para outros compostos	0,30	
Massa de outros compostos Saída	0,339425051	T/h

Fonte: O autor, 2024.

Sendo assim, os compostos passantes da peneira, representados pela corrente 6, conforme a Tabela 15, foram calculados de acordo com a solução não flotada (Corrente 4), já que apresenta a solução passante. Como podemos observar, a solução que seguirá para o filtro prensa possui menor quantidade de metais e nenhuma de materiais plásticos e papéis, significando a eficiência dos cálculos e dos equipamentos.

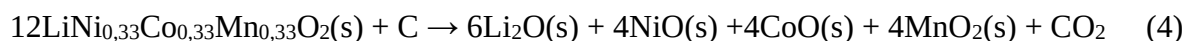
O “Retido Filtro Prensa”, apresenta a solução que permanece no filtro, que também é conhecida como “Massa Negra”. Este filtro, como o próprio nome já diz, tem a função de remover grande quantidade de água existente na “lama” que queremos obter. A massa apresentada pela Tabela 17 foi elaborada seguindo o mesmo princípio e equações utilizadas nos cálculos anteriores.

A solução passante do filtro prensa, representado pela corrente 9 na Tabela 13, corresponde ao líquido recuperado que é retornado ao sistema na etapa de trituração, fazendo com que seja um processo de circuito fechado e não ocorrendo perdas durante o processo. Aqui é onde se encerra o sistema empregado pela *Li-Cycle* e se inicia o procedimento aplicado por Joshi *et.al*. Nesse processo a BM é submetida a uma operação unitária de pirólise, acarretando no consumo dos materiais orgânicos existentes e culminando na formação de CO, CO₂ e HF, este último proveniente da degradação do ligante PVDF, conforme as Equações 4, 5, 6 e 7, além das Tabelas 20, 21, 22, 23, 24 e 25, respectivamente.

Tabela 19 – Massa dos compostos retidos no filtro prensa de acordo com a eficiência da operação unitária.

Corrente 8 (Retido Filtro Prensa)		
Massa de Li Entrada	0,146303901	T/h
Eficiência Filtro Prensa para Li	1,00	
Massa de Li Saída	0,146303901	T/h
Massa de Ni, Co e Mn Entrada	0,390143737	T/h
Eficiência Filtro Prensa para Ni, Co e Mn	1,00	
Massa de Ni, Co e Mn Saída	0,390143737	T/h
Massa de metais Entrada	0,007700205	T/h
Eficiência Filtro Prensa para metais	1,00	
Massa de metais Saída	0,007700205	T/h
Massa de água Entrada	4,00513347	T/h
Eficiência Filtro Prensa para água	0,05	
Massa de água Saída	0,200256674	T/h
Massa de outros compostos Entrada	0,791991786	T/h
Eficiência Peneira para outros compostos	0,30	
Massa de outros compostos Saída	0,237597536	T/h

Fonte: O autor, 2024.

**Tabela 20** – Estequiometria da conversão de Li em Li₂O pela reação representada pela Equação 4.

Corrente 10 (Solução após Pirólise)					
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final
Li	12	0,1463	0,1463	0	0
Li ₂ O	6	0	0	0,0732	0,0732

Eficiência 100%

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 21 – Estequiometria da conversão de Ni, Co e Mn em seus respectivos óxidos pela reação representada pela Equação 4.

Corrente 10 (Solução após Pirólise)					
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final
Ni, Co, Mn	1	0,3901	0,39014	0	0,0000
Óxidos	1	0	0	0,3901	0,3901

Eficiência 100%

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 22 – Estequiometria do carbono pela reação representada pela Equação 4.

Corrente 10 (Solução após Pirólise)					
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final
C	1	0,2376	0,2376	0	0,0000

Eficiência 100%

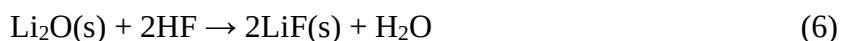
Fonte: O autor, 2024.



Tabela 23 – Estequiometria da conversão de Li₂O e CO₂ em Li₂CO₃ pela reação representada pela Equação 5.

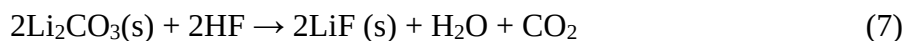
Corrente 10 (Solução após Pirólise)							
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final		
Li ₂ O	1	0,0732	0,02195	0	0		
CO ₂	1	0,2376	0	0	0	Eficiência	100%
Li ₂ CO ₃	1	0	0	0,2595	0,2595	Eficiência	30%

Fonte: O autor, 2024.

**Tabela 24** – Estequiometria da conversão de Li₂O e HF em LiF e H₂O pela reação representada pela Equação 6.

Corrente 10 (Solução após Pirólise)							
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final		
Li ₂ O	1	0,0732	0,04389	0	0		
LiF	2	0	0	0,0878	0,0878	Eficiência	60%
H ₂ O	1	0	0	0,0037	0,0037	Eficiência	10%

Fonte: O autor, 2024.

**Tabela 25** – Estequiometria da degradação de Li₂CO₃ em LiF pela reação representada pela Equação 7.

Corrente 10 (Solução após Pirólise)							
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final		
Li ₂ CO ₃	2	0,2595	0,07786	0	0,1817	Eficiência	30%
LiF	2	0	0	0,0779	0,0779	Eficiência	50%
H ₂ O	1	0	0	0,0260	0,0260	Eficiência	20%

Fonte: O autor, 2024.

Com a estequiometria devidamente realizada, o cálculo da vazão da solução pirolisada (corrente 10) é constituído pela adição dos valores finais encontrados nas Tabelas 21, 24 e 25 além da massa de água e de metais da Massa Negra, que corresponde ao “Retido do Filtro Prensa”. Encontrando uma vazão de 0,98t/h de solução pirolisada, é possível encontrar a porcentagem de cada componente existente, voltando a utilizar a Equação 3.

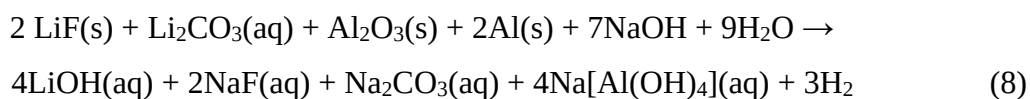
A corrente 11, apresentada pela Tabela 26 a seguir, representa a solução de NaOH, que por ser alcalino, consegue realizar a lixiviação da solução pirolisada contendo fluoreto de lítio, conforme mostrado nas Tabelas 21 e 22, após a reação do carbonato de lítio (Li₂CO₃) e do óxido de lítio (Li₂O). Com isso, tal composto é preparado para ser adicionada na etapa de lixiviação, de acordo com a quantidade e com a concentração utilizada no experimento de Joshi *et.al*.

Tabela 26 – Massa de NaOH que será adicionada na etapa da lixiviação.

Corrente 11 (Solução NaOH)		
Massa após pirolise	0,000005	T
Volume Sol NaOH	0,10	L
Massa Processo	0,98	T
Volume Sol NaOH	19500,75975	L
Densidade sol NaOH	0,001	T/L
Massa Sol NaOH	19,50075975	T

Fonte: O autor, 2024.

Com a adição do NaOH na etapa de lixiviação, ocorre uma reação com a solução pirolisada, demonstrada pela Equação 8, que consiste na formação do hidróxido de lítio (LiOH), com o objetivo de realizar a dissolução desse material. Porém, como podemos observar nas Tabelas 16 e 27, o hidróxido de sódio acaba reagindo com parte dos metais existentes, principalmente o alumínio (Al), que juntamente com o Li, se dissolve e faça parte da composição da solução pirolisada lixiviada.



Como pode-se observar, a lixiviação não possui eficiência para cobalto, níquel e manganês, fazendo com que estes materiais permaneçam no estado sólido, permanecendo retidos na etapa da “Filtração 1”, que está representada pela corrente 14 e apresentada na Tabela 28, que informa que além de 100% dos componentes citados, tal operação também possui 100% de eficiência para o restante do fluoreto de lítio que não conseguiu ser lixiviado.

Tabela 27 – Estequiometria da formação de LiOH pela reação representada pela Equação 8.

Corrente 12 (Solução após Lixiviação)							
	Estequiometria	Início	Reage	Forma	Final		
LiF	2	0,1656	0,06145	0	0,1042	Eficiência	37%
Li ₂ CO ₃ (aq)	1	0,18168	0,18168	0	0,0000	Eficiência	100%
NaOH	7	0,975038	0,97504	0	0,0000	Eficiência	100%
H ₂ O	9	18,75559	1,87556	0	16,8800	Eficiência	10%
LiOH(aq)	4	0	0	0,4248	0,4248	Água evaporada	10%

Fonte: O autor, 2024.

Para estabelecer a composição e a vazão do “Passante do Filtro 1”, corrente 13, realizou-se o mesmo método empregado na corrente 4 e 6, calculando a diferença do que entrou (solução pirolisada lixiviada, corrente 12) e do que ficou retido no filtro 1.

Tabela 28 – Massa dos compostos retidos no filtro 1 de acordo com a eficiência da operação.

Corrente 14 (Retido Filtro 1)		
Massa de LiF Entrada	0,1042	T/h
Eficiência Filtro 1 para LiF	1,00	
Massa de LiF Saída	0,1042	T/h
Massa de NiO, CoO e MnO ₂ Entrada	0,390143737	T/h
Eficiência Filtro 1 para NiO, CoO e MnO ₂	1,00	
Massa de NiO, CoO e MnO ₂ Saída	0,390143737	T/h
Massa de água Entrada	15,00447228	T/h
Eficiência Filtro 1 para água	0,10	
Massa de água Saída	1,500447228	T/h
Massa de NaF, Na ₂ CO ₃ e 2Na[Al(OH) ₄] Entrada	0,007700205	T/h
Eficiência Filtro 1 para NaF, Na ₂ CO ₃ e 2Na[Al(OH) ₄]	0,10	
Massa de NaF, Na ₂ CO ₃ e 2Na[Al(OH) ₄] Saída	0,000770021	T/h

Fonte: O autor, 2024.

Já com os valores do “Passante Filtro 1” (corrente 13) calculados, ocorre a etapa de precipitação, através da injeção de dióxido de carbono na solução que faz com que o hidróxido de lítio se cristalize na forma de carbonato de lítio, facilitando sua extração em etapas posteriores. Esta etapa de precipitação heterogênea não foi atribuída a uma corrente ou calculada matematicamente devido ao fato de não ocorrer alteração nem perdas de compostos na solução. Porém, por apresentar uma eficiência de 95,0%, a Tabela 29 tornou-se necessária por demonstrar que apenas tal porcentagem de lítio é cristalizada.

Tabela 29 – Massa dos compostos gerados após a precipitação heterogênea de acordo com a eficiência da operação.

Precipitação heterogênea		
Massa de LiOH Entrada	0,424806	T/h
Eficiência Precipitação	0,95	
Massa de Li ₂ CO ₃ Saída	0,403565	T/h

Fonte: O autor, 2024.

Para remover os cristais de carbonatos de lítio gerados pela reação com CO₂, a solução é submetida à “Filtração 2”, conforme o indicado no Diagrama de Blocos e apresentado na Figura 9. Nesta segunda etapa de filtração, o passante não é importante, já que a parte que contém o lítio está em estado sólido. Com isso, o retido deste filtro, demonstrado na Tabela 30 ainda pode conter impurezas, contendo ainda 5% de água e 60% de impurezas, fazendo com que uma etapa de secagem tornasse crucial, aumentando assim, a pureza do composto final.

Tabela 30 – Massa dos compostos retidos no filtro 2 de acordo com a eficiência da operação.

Corrente 15 (Retido Filtro 2)		
Massa de Li_2CO_3 Entrada	0,403565364	T/h
Eficiência Filtro 2 para Li_2CO_3	1,00	
Massa de Li_2CO_3 Saída	0,403565364	T/h
Massa de água Entrada	13,50402505	T/h
Eficiência Filtro 2 para água	0,05	
Massa de água Saída	0,675201253	T/h
Massa de NaF, Na_2CO_3 e $2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ Entrada	0,006930185	T/h
Eficiência Filtro 2 para NaF, Na_2CO_3 e $2\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$	0,60	
Massa de NaHCO_3 e $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ Saída	0,004158111	T/h

Fonte: O autor, 2024.

Finalizando o processo aplicado por Joshi *et.al* na extração do lítio da Massa Negra, realiza-se a secagem do carbonato de lítio com a intenção de realizar a evaporação da água e o consequente aumento da pureza do Li_2CO_3 , onde as massas dos compostos e tais eficiências estão informadas na Tabela 31.

Joshi *et.al* também avaliou uma mudança de concentrações no NaOH inserido na etapa da lixiviação, como objetivo de lixiviar maior porcentagem de compostos, mas a concentração de 5% demonstrou melhor eficácia de reação e por conta disso, foi utilizado tal valor na elaboração deste projeto nos concedendo um carbonato de lítio com aproximadamente 92,0% de pureza.

Tabela 31 – Massa dos compostos gerados após a secagem de acordo com a eficiência da operação.

Corrente 16 (Li_2CO_3 após Secagem)		
Massa de NaHCO_3 e $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ Entrada	0,004158111	T/h
Eficiência Secagem para NaHCO_3 e $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$	0,70	
Massa de NaHCO_3 e $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$ Saída	0,001247433	T/h
Massa de água Entrada	0,675201253	T/h
Eficiência Secagem para água	0,95	
Massa de água Saída	0,033760063	T/h

Fonte: O autor, 2024.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÃO

Com uma sequência lógica de construção, os documentos de engenharia elaborados foram essenciais para a conclusão deste projeto conceitual, mas tendo como base principal a Tabela de Processos, dando certa robustez e permitindo a elaboração do Diagrama de Blocos e de outros documentos com mais facilidade.

A partir do cenário de carros elétricos atual, apresentando um aumento exponencial diário, o presente trabalho apresentou uma alternativa efetiva de mitigar impactos ambientais gerados pelas baterias de lítio, principalmente na extração de uma de suas essenciais matérias-primas, o lítio, cujo sistema elaborado com base na metodologia aplicada pela empresa *Li-Cycle* e pelo trabalho realizado por Joshi *et. al*, tornou possível a recuperação desse material e consequentemente, sua reciclagem.

A recuperação deste composto poderá acarretar o adiamento da escassez desse material, já que poderá ser infinitamente reciclado, o que também irá favorecer com a redução do lançamento de Gases de Efeito Estufa que são liberados durante a sua extração do meio ambiente.

É importante observar que, apesar deste projeto focar no lítio, também foi realizada a separação dos outros compostos que constituem as baterias de lítio, fazendo com que tais operações unitárias não sejam viáveis somente para a recuperação de um único elemento e sim para todos eles. Além disso, a metodologia é eficaz para qualquer bateria de lítio, mesmo que não esteja aplicada a um carro elétrico.

Com isso, o aprimoramento deste projeto e das tecnologias envolvidas são essenciais para uma ampla contribuição ambiental, não somente do setor automotivo, mas sim de quase todo setor energético envolvido com baterias de lítio.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar um projeto conceitual de extração completa dos demais elementos constituintes das baterias de lítio, verificando métodos e tecnologias ainda mais eficazes para a sua elaboração. Outra sugestão é realizar uma análise da viabilidade econômica do projeto realizado, com a finalidade de obter sua rentabilidade, tendo em vista que parte dele foi baseado em um procedimento utilizado por indústrias.

Por fim, outra sugestão seria realizar os projetos básicos e detalhados de engenharia da rota de recuperação de lítio estudada, seguindo a metodologia FEL. No FEL2 seria elaborado o Fluxograma de Processo (PFD), com revisão da memória de cálculo de balanço de massa realizado e confecção das memórias de cálculo de balanço de energia, das operações unitárias presentes, bem como de tanques, das bombas, dos compressores e dos trocadores de calor. Já no FEL3 seriam elaborados os Fluxogramas de Tubulação e Instrumentação (P&IDs), as memórias de cálculos das linhas hidráulicas presentes, a maquete 3D do processo, bem como toda a documentação de controle e automação do processo, dentre outros documentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD. 2009. **ANSI/ISA-5.1-2009: Instrumentation Symbols**. s.l.: AMERICAN NATIONAL STANDARD, 2009.

BALACHANDRAN, S.; FORSBERG, K.; LEMAÎTRE, T.; VIECELI, N.; LOMBARDO, G.; and PETRANIKOVA, M. “**Comparative Study for Selective Lithium Recovery via Chemical Transformations during Incineration and Dynamic Pyrolysis of EV Li-Ion Batteries**” *Metals*, vol. 11, no. 8, p.1240, Aug. 2021, doi: 10.3390/met11081240.

BASSANE, B. C.; ANTUNES, M. R.; VILANI, C.; CARVALHO, R. B. **Projeto conceitual e análise econômica preliminar do processo de pervaporação para recuperação do aroma do suco de abacaxi**. In: VOIGT, C. L. (coord.). *Impacto das Tecnologias na Engenharia Química 2*. Ponta Grossa: Atena, 2019. Cap. 29., p. 257-273. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeq2018/PT.0757.pdf> Acesso em: 18/11/2024.

BISWAS, J.; ULMALA, S.; WAN, X.; PARTINEN, J.; LUNDSTRÖM, M.; JOKILAAKSO, A. **Selective Sulfation Roasting for Cobalt and Lithium Extraction from Industrial LCO-Rich Spent Black Mass**. *Metals*, [S. l.], n. 13358, p. 1-19, 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/2/358>. Acesso em: 19 jun. 2024.

BHAR, M.; GHOSH, S.; KRISHNAMURTHY, S.; YALAMANCHILI, K.; MARTHA, S. K. **A review on spent lithium-ion battery recycling: from collection to black mass recovery**. *RSC Sustainability*, [S. l.], p. 1150-1167, 10 mar. 2023. DOI 10.1039/d3su00086a. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2023/su/d3su00086a>. Acesso em: 14 set. 2024.

BRASIL, Conferência de Partes, 21ª., 2015, Paris. **Acordo de Paris [...]**. [S. l.: s. n.], 2015. 42 p. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-08/Acordo-de-Paris.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2023.

BEZERRA, L. S. **Projeto Conceitual de uma Planta de Remoção de CO₂ de Biogás de Aterro Sanitário por Permeação em Membranas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química). Faculdade SENAI CETIQT. 2024.

MOTORSHOW. In: **Vendas de veículos eletrificados aumentam 138% no Brasil**. [S. l.]: Motorshow, 7 ago. 2023. Disponível em: <https://motorshow.com.br/vendas-de-veiculos-eletrificados-aumentam-138-no-brasil/>. Acesso em: 10 jul. 2024.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Minerais são matérias-primas para confecção de baterias de carros elétricos: Com o crescimento da eletrificação da frota brasileira e mundial, demanda global por algumas substâncias deve aumentar mais de 1.000%**. [S. l.]: 4 out. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/minerais-sao-materia-prima-para-confeccao-de-baterias-de-carros-eletricos#:~:text=Mas%20como%20s%C3%A3o%20feitas%20as,mat%C3%A9rias%2Dprimas%20para%20essas%20baterias>. Acesso em: 19 out. 2024.

COSTA, V. J. *et al.* **A importância da reciclagem de baterias para uma mobilidade elétrica sustentável**. GESEL, [s. l.], p. 1-8, 2021. Disponível em:

https://www.gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/49_Costa_2021_10_13.pdf. Acesso em: 5 nov. 2024.

CHAGAS, L. **Princípios Físicos e Químicos de Baterias de Íon Lítio**.

Disponível em: <<https://www.uel.br/cce/fisica/sefis/xisefis/arquivos/resumos/r44.pdf>>. Acesso em: 29/01/2022.

DELGADO, F. *et al.* Carros Elétricos. **Impactos, definições e conceitos de um veículo elétrico**, Rio de Janeiro, ano 4, n. 7, p. 9-50, 1 maio 2017. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_carros_eletricos-fgv-book.pdf Acesso em: 1 nov. 2023.

DIAS, M. V. X. **Impacto no consumo de energia elétrica e nas emissões decorrente da introdução de carros elétricos na frota de automóveis**. 2013. 136 fl. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Minas Gerais, 2013. 136 fl.

FERREIRA, A. S. **Utilização da metodologia FEL (*Front End Loading*) no gerenciamento de riscos dos aspectos de segurança de processo em projetos de uma empresa petroquímica na Bahia**. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Gerenciamento de Projetos) – Fundação Getúlio Vargas, Salvador, 2018. Disponível em: <https://www15.fgv.br/network/tcchandler.axd?tcid=7881>. Acesso em: 11 nov. 2024.

GRANDA, A. **Destino errado de bateria de carro elétrico põe em risco meio ambiente**. Agência Brasil, Rio de Janeiro, 6 maio 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-05/destino-errado-de-bateria-de-carro-eletrico-poe-em-risco-meio-ambiente>. Acesso em: 17 set. 2024.

GOLDENSTEIN, M.; AZEVEDO, R. L. S. **Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: será o fim da "era do petróleo**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 23, p. 235266, mar. 2006. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2531/1/BS%2023%20Combust%C3%ADvel%20alternativos%20e%20inova%C3%A7%C3%B5es_P.pdf>. Acesso em: 03. Jul. 2018

GOOGLE. **Draw.io**. Versão 24.8.6. [Londres]: Google, 2024.

JOSHI, B. *et al.* **Selective Lithium recovery from black mass by optimizing caustic leaching and precipitation**. SSRN, [S. l.], p. 1-29, 2 abr. 2024. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4782095. Acesso em: 28 set. 2024.

LAZARINI, A. P. **Desenvolvimento de metodologia universal de determinação da vida útil de baterias baseada nas informações dos fabricantes**. Orientador: Dr. Patrício R. Impinnisi. 2020. 81 p. Dissertação (Mestre em Desenvolvimento de Tecnologia) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 2020. Disponível em: https://mestrado.lactec.com.br/wp-content/uploads/2020/02/310_PT.pdf. Acesso em: 8 nov. 2024.

MICROSOFT. **Excel 365**. Versão 2410 [Albuquerque]: Microsoft, 2024.

MARTINHO, G.; SANTOS, P.; PINA, J.; ARGUILLARENA, A.; PIRES, A. **RECICLAGEM DE BATERIAS DE IÕES DE LÍTIO (BIL): UMA REALIDADE PARA PORTUGAL?**

GVB, 2021. Disponível em: https://gvb.pt/wp-content/uploads/2022/04/Estudo-sobre-Reciclagem-BIL_v2.pdf. Acesso em: 14 set. 2024.

MELIN, H. E. **The lithium-ion battery end-of-life market – A baseline study**. Circular Energy Storage, [s. l.], p. 1-11, 2021. Disponível em: https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf. Acesso em: 12 out. 2024.

MONTEIRO, R. Novas químicas de materiais para as baterias de lítio impulsionam o mercado de veículos elétricos. **MIT Technology Review**, [s. l.], 16 jul. 2021. Disponível em: <https://mittechreview.com.br/novas-quimicas-de-materiais-para-as-baterias-de-litio-impulsionam-o-mercado-de-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 3 nov. 2024.

MOTTA, O. M. *et. al.* Alinhando os objetivos técnicos do projeto às estratégias de negócio: contribuição da metodologia FEL no pré-planejamento de grandes empreendimentos. **Revista Gestão Industrial**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 99-117, 2011. DOI 10.3895/S1808-04482011000400005.

NELSON, Z. **What *Really* happens to used Electric Car Batteries? - (you might be surprised)**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=s2xrarUWVRQ&t=277s>. Acesso em: 8 nov. 2022.

NEOCHARGE. **Bateria de um veículo elétrico**. [S. l.], 18 dez. 2020. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>. Acesso em: 27 maio 2024.

NOCE, T. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. Orientador: Denílson Laudares Rodrigues. 2009. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: https://bib.pucminas.br/teses/EngMecanica_NoceT_1.pdf. Acesso em: 13 out. 2024.

OHTSUKA, R. S. **Estudo sobre os métodos de reciclagem e reutilização das baterias de lítio de carros elétricos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16259/Rodrigo%20Seiji%20Ohtsuka.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 maio 2024.

SISTEMAS E TECNOLOGIAS APLICADAS. **Como funcionam as baterias**. [S. l.], 2 jul. 2020. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/informacoes-basicas/como-funcionam-as-baterias>. Acesso em: 16 abr. 2024.

SPANGLER, R. C. **Front End Loading (FEL) and Process Engineering Workflow**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências) - The University of Kansas, [S. l.], 2005. Disponível em: <https://kuscholarworks.ku.edu/handle/1808/939>. Acesso em: 18 nov. 2024.

UCSUSA. **Cleaner Cars from Cradle to Grave**. 2015. Disponível em: <<https://www.ucsusa.org/resources/cleaner-cars-cradle-grave>>. Acesso em: 31 out. 2023.

WARNER, J. Lithium-ion battery chemistries: Overview and comparison of different lithium-ion chemistries. **Elsevier**, [s. l.], p. 79-96, 17 maio 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128147788000041>. Acesso em: 13 nov. 2024.

ZHENG, X.; ZHU, Z.; LIN, X.; ZHANG, Y.; HE, Y.; CAO, H.; SUN, Z. **A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries**. Elsevier, [S. l.], 24 maio 2018. Engineering, p. 361-370. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917308226?via%3Dihub>. Acesso em: 14 set. 2024.

ZHU, J. *et al.* **End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries**. Cell Reports Physical Science, v.2, n.8, p.26, ago. 2021.