

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA DE PROCESSOS III - DEQ1023

Erick Schünke Karnopp
Felipe Moro
Ingrid Souza Brikalski
Rodrigo Romano dos Santos
Vicente Augusto Squizani Rodrigues

**RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO COM FOCO NA
ECONOMIA CIRCULAR DO MATERIAL CATÓDICO NMC
($\text{LiNi}_{0,33}\text{CO}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$)**

Santa Maria, RS
2023

Erick Schünke Karnopp
Felipe Moro
Ingrid Souza Brikalski
Rodrigo Romano dos Santos
Vicente Augusto Squizani Rodrigues

**RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO COM FOCO NA ECONOMIA
CIRCULAR DO MATERIAL CATÓDICO NMC ($\text{LiNi}_{0,33}\text{CO}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Química, da
Universidade Federal de Santa Maria, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Assumpção Bertuol

Santa Maria, RS
2023

Erick Schünke Karnopp
Felipe Moro
Ingrid Souza Brikalski
Rodrigo Romano dos Santos
Vicente Augusto Squizani Rodrigues

**RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO COM FOCO NA ECONOMIA
CIRCULAR DO MATERIAL CATÓDICO NMC ($\text{LiNi}_{0,33}\text{CO}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Química, da
Universidade Federal de Santa Maria, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 06 de fevereiro de 2023.

Daniel Assumpção Bertuol, Dr. (UFSM)
(Orientador)

Christian Luiz da Silveira, Dr. (UFSM)
(Professor Convidado)

Eduardo Hiromitsu Tanabe, Dr. (UFSM)
(Professor Convidado)

Santa Maria, RS
2023

RESUMO

RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO COM FOCO NA ECONOMIA CIRCULAR DO MATERIAL CATÓDICO NMC ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$)

AUTORES: Erick Schünke Karnopp, Felipe Moro, Ingrid Souza Brikalski, Rodrigo Romano dos Santos, Vicente Augusto Squizani Rodrigues
ORIENTADOR: Prof. Dr. Daniel Assumpção Bertuol

A recente popularização dos veículos elétricos vem trazendo benefícios ao meio ambiente, como os relacionados à redução das emissões dos gases do efeito estufa. Atualmente, devido a grande demanda por veículos elétricos e dispositivos portáteis, as matérias-primas que compõem as baterias de íons de lítio estão ficando cada vez mais escassas e caras, tornando o mercado da reciclagem muito atrativo e promissor. Contudo, grande parte das matérias-primas ainda são extraídas de fontes naturais, ocasionando problemas ambientais e, muitas vezes, sociais onde a exploração destes recursos é realizada de maneira irregular. Para tanto, o presente trabalho buscou analisar a viabilidade técnica e econômica da reciclagem de baterias de íons de lítio, com foco na recuperação do material catódico NMC ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$) pela sua ampla utilização na atualidade, tendo em vista o foco na economia circular deste material, visando reinseri-lo na cadeia produtiva de baterias de íons de lítio. Para esse objetivo, tendo como referência o que é praticado em outros países, espera-se reciclar anualmente 3350 toneladas de baterias de íons de lítio, gerando um total de 1632,30 toneladas de material catódico NMC por ano, sendo a unidade industrial localizada em Campinas-SP. O investimento para o empreendimento é de R\$202.710.194,50. Assim, espera-se um *payback* no sétimo ano com uma Taxa Interna de Retorno de 26,66%, em comparação a uma Taxa Média de Atratividade de 13,75% ao ano, apresentando deste modo uma viabilidade teórica da aplicação deste empreendimento em solo nacional, considerando maiores avanços neste mercado nos próximos anos no Brasil.

Palavras-chave: Economia Circular. Reciclagem. Material catódico. Baterias. LIBs.

ABSTRACT

RECYCLING OF LITHIUM-ION BATTERIES WITH FOCUS IN THE CIRCULAR ECONOMY OF THE CATHODIC MATERIAL NMC ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$)

AUTHORS: Erick Schünke Karnopp, Felipe Moro, Ingrid Souza Brikalski, Rodrigo Romano dos Santos, Vicente Augusto Squizani Rodrigues
ADVISOR: Prof. Dr. Daniel Assumpção Bertuol

The recent popularization of electric vehicles has brought benefits to the environment, such as those related to the reduction of greenhouse gas emissions. Currently, due to the great demand for electric vehicles and portable devices, the raw materials that make up lithium-ion batteries are becoming increasingly scarce in cars, making the recycling market very attractive and promising. However, a large share of raw materials are still extracted from natural sources, causing environmental and, many times, social issues where the exploration of these sources is done in an irregular manner. For such, this given work looked to analyze the technical and economic viability of recycling lithium-ion batteries to recover the cathodic material, with focus in the NMC cathodic material ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$), because of its ample utilization nowadays, in view of its focus in the circular economy of this material, seeking to reinsert it in the productive chain of lithium-ion batteries. For this objective, with its vision turned to what is done in other countries and to what is beginning to be practiced in Brazil, where such market is until now underdeveloped, it is expected to be recycled annually 3350 tons of lithium-ion batteries, generating a total of 1632.30 tons of NMC cathodic material a year, the industrial plant being located in Campinas-SP, in its Industrial District. The investment for this business is R\$202.710.194,50. It is expected a payback of seventh year and an Internal Rate of Return of 26,66%, in comparison to a Minimum Required Rate of Return of 13,75% per year, presenting this way as a theoretically viable application of this business in national soil, considering bigger advancements in this market in the next years in Brazil.

Keywords: Circular economy. Recycling. Cathodic material. Batteries. LIBs

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável..... | 24 |
| Figura 2 – Esquema intracelular de LIBs | 30 |
| Figura 3 – Migração de elétrons conforme o modo da bateria..... | 30 |
| Figura 4 – Empacotamento atômico do LCO..... | 33 |
| Figura 5 – Empacotamento atômico do LCO..... | 33 |
| Figura 6 – Empacotamento atômico do LFP..... | 34 |
| Figura 7 – Empacotamento atômico do NMC..... | 35 |
| Figura 8 – Diagrama ternário para diferentes composições de NMCs..... | 35 |
| Figura 9 – Empacotamento atômico do NCA | 37 |
| Figura 10 – Empacotamento atômico do grafite com Li intercalado | 39 |
| Figura 11 – Tipos de separadores de poliolefinas | 42 |
| Figura 12 – Sistemas de refrigeração utilizados em LIBs | 46 |
| Figura 13 – Bateria de lítio veicular | 46 |
| Figura 14 – Baterias de células cilíndricas (A) e de células prismáticas (B) | 47 |
| Figura 15 – Design do pacote, módulo e células para as dimensões consideradas | 53 |
| Figura 16 – Distribuição de fornecimento de baterias para veículos elétricos..... | 57 |
| Figura 17 – Cadeia de fornecimento de baterias EV | 58 |
| Figura 18 – Expectativa de crescimento de 2021 a 2030 no mundo | 58 |
| Figura 19 – Porcentagens em relação ao tipo de bateria presente no mercado | 59 |
| Figura 20 – NMC em pó sinterizado | 63 |
| Figura 21 – Modelo de Negócios estilo Canvas | 64 |
| Figura 22 – Moinho de martelos | 78 |
| Figura 23 – Triturador rotativo | 78 |
| Figura 24 – Evaporador de simples efeito | 81 |
| Figura 25 – Transportador de sólidos de correia transportadora..... | 83 |
| Figura 26 – Transportador helicoidal | 84 |
| Figura 27 – Princípio de operação das peneiras vibratórias..... | 85 |
| Figura 28 – Tambor rotativo para separação magnética..... | 88 |
| Figura 29 – Esquema de funcionamento de um separador por corrente parasita | 89 |
| Figura 30 – Funcionamento de um rolo separador eletrostático | 90 |
| Figura 31 – Fases de equilíbrio de um metal M em um diagrama de Pourbaix | 92 |
| Figura 32 – Design de um espessador circular industrial..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 33 – Esquema de um filtro simples | 99 |
| Figura 34 – Centrífuga aplicável a reciclagem de LIBs | 100 |
| Figura 35 – Modelo de flotação por espuma | 101 |
| Figura 36 – Demonstração de um forno de fundição | 103 |
| Figura 37 – Estágios da densificação para o processo de MP | 103 |
| Figura 38 – Processo de MP convencional..... | 104 |
| Figura 39 – Compactador de rolos vertical | 106 |
| Figura 40 – Forno contínuo de sinterização | 107 |
| Figura 41 - Diagrama abrangente do processo | 108 |
| Figura 42 – Fluxograma de recebimento da matéria-prima | 112 |
| Figura 43 – FRX portátil | 113 |
| Figura 44 – Equipamento Agilent 5900 ICP-OES (esq.) e Agilent 7900 ICP-MS (dir.) | 115 |
| Figura 45 - Thermo Scientific Apreo 2 SEM | 115 |
| Figura 46 – Distrito Industrial de Campinas (SP) | 121 |
| Figura 47 – Diagrama de blocos do processo..... | 126 |
| Figura 48 – Diagrama de blocos do pré-tratamento | 127 |
| Figura 49 – Guindaste de ponte rolante..... | 128 |
| Figura 50 – Carga ajustável eletronicamente para descarregamento de módulos..... | 129 |
| Figura 51 – Componentes da bateria pós-desmontagem | 129 |
| Figura 52 – Estação de trabalho da etapa de desmontagem | 130 |
| Figura 53 – Diagrama de blocos do pré-processamento..... | 131 |
| Figura 54 – Centrífuga de tigela sólida horizontal | 133 |
| Figura 55 – Diagrama de blocos do processamento | 136 |
| Figura 56 – Diagrama de Pourbaix para o Al com condições de lixiviação | 141 |
| Figura 57 – Diagrama de Pourbaix para o Cu com condições de lixiviação..... | 141 |
| Figura 58 – Diagrama de Pourbaix para o Fe com condições de lixiviação | 142 |
| Figura 59 – Diagrama de Pourbaix para o Co com condições de lixiviação..... | 142 |
| Figura 60 – Diagrama de Pourbaix para o Li com condições de lixiviação..... | 143 |
| Figura 61 – Diagrama de Pourbaix para o Mn com condições de lixiviação..... | 143 |
| Figura 62 – Diagrama de Pourbaix para o Ni com condições de lixiviação | 144 |
| Figura 63 – Faixa de precipitação do $\text{Fe}(\text{OH})_3$ | 147 |
| Figura 64 – Faixa de precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ | 148 |
| Figura 65 – Alteração do K_{ps} do hidróxido de Cu com relação aos hidróxidos de Ni, Co e Mn com diferentes temperaturas | 149 |

| | |
|---|-----|
| Figura 66 – Faixa de precipitação do $\text{Cu}(\text{OH})_2$ | 150 |
| Figura 67 – Faixa de precipitação do $\text{Ni}(\text{OH})_2$ | 152 |
| Figura 68 – Faixa de precipitação do $\text{Co}(\text{OH})_2$ | 152 |
| Figura 69 – Faixa de precipitação do $\text{Mn}(\text{OH})_2$ | 153 |
| Figura 70 – Diagrama de blocos do acabamento do produto | 155 |
| Figura 71 – Área 100..... | 159 |
| Figura 72 – Descarregamento EL-101..... | 160 |
| Figura 73 – Desmontagem manual DM-101 | 161 |
| Figura 74 – Moinho SR-101 | 162 |
| Figura 75 – Área 200..... | 163 |
| Figura 76 – Extratores EX-201 até EX-205 | 164 |
| Figura 77 – Filtro centrífugo FC-201 | 165 |
| Figura 78 – Evaporador D-201 | 166 |
| Figura 79 – Trocadores de calor E-201 e E-202..... | 167 |
| Figura 80 – Centrífuga CF-201 | 167 |
| Figura 81 – Secador DE-201 | 168 |
| Figura 82 – Peneira vibratória S-201..... | 169 |
| Figura 83 – Separador magnético MS-201 | 170 |
| Figura 84 – Separador eletrostático ES-201 | 171 |
| Figura 85 – Flotador FL-201 | 172 |
| Figura 86 – Área 300..... | 172 |
| Figura 87 – Reator de lixiviação R-301 e filtro gravitacional FG-301 | 174 |
| Figura 88 – Reatores de lixiviação R-302 e R-303 | 175 |
| Figura 89 – Reator de precipitação R-304 e filtro gravitacional FG-303..... | 176 |
| Figura 90 – Reator de precipitação R-304 e filtro gravitacional FG-304..... | 178 |
| Figura 91 – Misturador ácido M-301 | 179 |
| Figura 92 – Misturador ácido M-302 | 179 |
| Figura 93 – Misturador básico M-303..... | 180 |
| Figura 94 – Misturador básico M-304..... | 180 |
| Figura 95 – Misturador básico M-306..... | 181 |
| Figura 96 – Misturador de sulfatos M-305..... | 182 |
| Figura 97 – Reator de precipitação R-306 e filtro gravitacional FG-305..... | 183 |
| Figura 98 – Reator de precipitação R-307 e filtro gravitacional FG-306..... | 184 |
| Figura 99 – Misturador de carbonato M-307..... | 185 |

| | |
|---|-----|
| Figura 100 - Área 400..... | 186 |
| Figura 101 – Misturador M-401 e moinhos SR-401 e SR-402 | 187 |
| Figura 102 – Misturador M-402 | 187 |
| Figura 103 – Compactador por rolos JC-401 e forno de sinterização B-401 | 188 |
| Figura 104 - Curva de cristalização do Na ₂ SO ₄ | 202 |
| Figura 105 - Diagrama de blocos da ETE | 204 |
| Figura 106 – Malha de controle do R-306..... | 207 |
| Figura 107 – Saldo Acumulado durante 10 anos..... | 225 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Propriedades relevantes dos carbonatos orgânicos..... | 41 |
| Tabela 2 – Propriedades da composição de LIBs conforme o modelo GREET® | 49 |
| Tabela 3 – Energia específica do pacote para diferentes cátodos de EVs..... | 49 |
| Tabela 4 – Composição elementar do material ativo do cátodo..... | 50 |
| Tabela 5 – Composição da matéria-prima para diferentes EVs e cátodos | 51 |
| Tabela 6 – Dimensões de uma bateria genérica com base no BatPaC v5.0 | 54 |
| Tabela 7 – Companhias envolvidas na reciclagem de baterias de íons de lítio e volumes processados..... | 61 |
| Tabela 8 – Propriedades físico-químicas a 25 °C..... | 69 |
| Tabela 9 – Valores para diferentes tipos de material ativo e suas composições | 70 |
| Tabela 10 – Valores para diferentes tipos de bateria..... | 71 |
| Tabela 11 – Eficiência de remoção do LiPF ₆ do material cominuído (L:S de 10) | 132 |
| Tabela 12 – Dados de solubilidade para hidróxidos metálicos em T padrão de 25 °C | 146 |
| Tabela 13 – Demanda de água fria necessária para o processo..... | 190 |
| Tabela 14 – Consumo nas peças e aparelhos sanitários | 191 |
| Tabela 15 – Demanda de vapor necessário para o processo..... | 194 |
| Tabela 16 – Consumo de ar comprimido para desmontagem manual..... | 195 |
| Tabela 17 – Identificação das tubulações | 197 |
| Tabela 18 - Saídas de efluentes sólidos do processo | 201 |
| Tabela 19 - Saídas de efluentes líquidos do processo | 202 |
| Tabela 20 - Saídas de efluentes gasosos do processo..... | 205 |
| Tabela 21 - Instrumentos utilizados no reator R-306 | 207 |
| Tabela 22 - Custos previstos para aquisição, preparação de terreno e construção civil..... | 211 |
| Tabela 23 - Estimativa de custos com equipamentos do fluxograma | 213 |
| Tabela 24 - Custos com demais equipamentos do processo..... | 214 |
| Tabela 25 - Custos com utensílios gerais | 215 |
| Tabela 26 - Custos com folhas de pagamento | 217 |
| Tabela 27 - Custos com matérias-primas do processo | 219 |
| Tabela 28 - Custos com utilidades..... | 220 |
| Tabela 29 - Comportamento do financiamento em um período de 10 anos..... | 221 |
| Tabela 30 – Receita total bruta..... | 222 |
| Tabela 31 - Fluxo de caixa durante 10 anos | 224 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 32 - Valor Presente Líquido..... | 226 |
|---|-----|

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 – Pontuação de Campinas (SP)..... | 118 |
| Quadro 2 – Pontuação de Contagem (MG) | 118 |
| Quadro 3 – Níveis do tratamento de efluentes | 199 |
| Quadro 4 – Custos totais do empreendimento..... | 222 |
| Quadro 5 – Resultados para o Lucro do Empreendimento..... | 223 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|---|
| BE | Balanço de Energia |
| BESS | Sistema de armazenamento de energia de bateria (<i>Battery Energy Storage System</i>) |
| BEV | Veículo elétrico a bateria (<i>Battery Electric Vehicle</i>) |
| BM | Balanço de Massa |
| BMS | Sistema de Gerenciamento da Bateria (<i>Battery Management System</i>) |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| DMC | Carbonato de Dimetil |
| EC | Carbonato de Etileno |
| EMC | Carbonato de Etil Metil |
| EREV | <i>Extended Range Electric Vehicle</i> |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluentes |
| EV | Veículo elétrico (<i>Electric Vehicle</i>) |
| FCEV | Veículo elétrico a célula de combustível (<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>) |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| GN | Gás Natural |
| HCV | Veículo pesado de comércio (<i>Heavy Commercial Vehicles</i>) |
| HEV | Veículo elétrico híbrido (<i>Hybrid Electric Vehicle</i>) |
| ICE | Motor de combustão interna (<i>Internal Combustion Engine</i>) |
| LCO | Cátodo de óxido de lítio-cobalto (LiCoO ₂) |
| LCV | Veículo leve de comércio (<i>Light Commercial Vehicles</i>) |

| | |
|------|--|
| LFP | Cátodo de fosfato de ferro (LiFePO_4) |
| LI | Licença de Instalação |
| LIBs | Baterias de Íons de Lítio (<i>Lithium-Ion Batteries</i>) |
| LMO | Cátodo de óxido de lítio-manganês (LMn_2O_4) |
| LO | Licença de Operação |
| LP | Licença Prévia |
| LTO | Baterias de óxido de lítio-titânio (<i>Lithium-Titanium-Oxide Battery</i>) |
| NCA | Cátodo de óxido de lítio, níquel, cobalto e alumínio ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$) |
| NMC | Cátodo de óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PC | Carbonato de Propileno |
| P&ID | <i>Piping & Instrument Diagram</i> |
| PHEV | Veículo elétrico híbrido plug-in (<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>) |
| PNRS | Política Nacional dos Resíduos Sólidos |
| PP | Polietileno |
| PP | Polipropileno |
| PVDF | Fluoreto de Polivinilideno |
| SCH | <i>Schedule</i> |
| SEI | Interface Eletrolítica Sólida (<i>Solid Electrolyte Interface</i>) |

| | |
|-----|-----------------------------|
| TIR | Taxa Interna de Retorno |
| TMA | Taxa Mínima de Atratividade |
| TR | Tonelada de Refrigeração |
| VPL | Valor Presente Líquido |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 22 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL | 23 |
| 1.1.1 Objetivos Específicos..... | 23 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA | 24 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO..... | 26 |
| 2.1 BATERIAS: PRINCÍPIO GERAL | 26 |
| 2.2 APLICAÇÕES DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO..... | 26 |
| 2.2.1 Aplicações em veículos..... | 27 |
| 2.2.2 Eletrônicos..... | 28 |
| 2.2.3 Outros | 28 |
| 2.3 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO | 28 |
| 2.3.1 Funcionamento eletroquímico..... | 29 |
| 2.3.2 Cátodos..... | 32 |
| 2.3.3 Ânodos | 37 |
| 2.3.4 Eletrólito..... | 40 |
| 2.3.5 Separador..... | 41 |
| 2.3.6 Polímeros em LIBs..... | 42 |
| 2.3.7 Coletores de corrente..... | 43 |
| 2.3.8 Outros materiais | 44 |
| 2.4 DEFINIÇÕES DA MATÉRIA-PRIMA | 46 |
| 2.4.1 Divisões da bateria | 47 |
| 2.4.2 Composição mássica da matéria-prima..... | 48 |
| 2.4.3 Dimensões das baterias a serem utilizadas no projeto proposto | 53 |
| 3 DEFINIÇÃO DE PRODUTO | 55 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DOS PRODUTOS A SEREM COMERCIALIZADOS | 55 |
| 3.2 ANÁLISE DE MERCADO | 56 |
| 3.2.1 Análise mundial dos minérios e produção de matérias-primas presentes nas baterias | 56 |
| 3.2.2 Análise do mercado em relação aos produtos | 58 |
| 3.3 AVALIAÇÃO DOS COMPETIDORES | 60 |
| 3.4 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO | 62 |
| 3.5 MODELO DE NEGÓCIOS | 64 |

| | |
|---|-----|
| 3.5.1 Segmentos de Clientes | 64 |
| 3.5.2 Proposta de Valor | 65 |
| 3.5.3 Canais | 65 |
| 3.5.4 Relacionamento com Clientes | 65 |
| 3.5.5 Fontes de Receita | 66 |
| 3.5.6 Recursos Principais | 66 |
| 3.5.7 Atividades-Chave | 66 |
| 3.5.8 Parcerias Principais | 66 |
| 3.5.9 Estrutura de Custos | 67 |
| 3.6 MATÉRIA-PRIMA NECESSÁRIA..... | 67 |
| 3.6.1 Carbonato de dimetil | 68 |
| 3.6.2 Peróxido de hidrogênio | 68 |
| 3.6.3 Ácido sulfúrico..... | 68 |
| 3.6.4 Hidróxido de sódio..... | 69 |
| 3.6.5 Sulfatos e carbonatos..... | 69 |
| 3.7 PREÇOS DOS COMPONENTES DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO..... | 69 |
| 4 DEFINIÇÕES DO PROCESSO..... | 73 |
| 4.1 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS..... | 73 |
| 4.1.1 Etapas de pré-tratamento..... | 73 |
| 4.1.2 Operações com o eletrólito..... | 79 |
| 4.1.3 Transporte de sólidos | 82 |
| 4.1.4 Separação e classificação física..... | 84 |
| 4.1.5 Processos hidrometalúrgicos | 90 |
| 4.1.6 Separações sólido-líquido | 97 |
| 4.1.7 Processos pirometalúrgicos | 101 |
| 4.1.8 Processos metalúrgicos do pó | 103 |
| 4.2 ESCOLHA DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS | 107 |
| 4.3 ESCALA DE PRODUÇÃO..... | 110 |
| 4.4 TEMPO DE OPERAÇÃO | 111 |
| 4.5 NECESSIDADES LABORATORIAIS..... | 111 |
| 4.6 LOCALIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL | 116 |
| 4.6.1 Unidade industrial em Campinas | 119 |
| 4.6.2 Unidade industrial em Contagem..... | 119 |
| 4.7 EXIGÊNCIAS LEGAIS | 121 |

| | |
|--|------------|
| 4.7.1 Registro de CNPJ | 121 |
| 4.7.2 Licenciamento Ambiental | 121 |
| 4.7.3 Alvará de Funcionamento | 122 |
| 4.7.4 Política Nacional de Resíduos Sólidos..... | 123 |
| 4.7.5 Normas Regulamentadoras | 123 |
| 5 PROJETO DO PROCESSO | 125 |
| 5.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO | 125 |
| 5.1.1 Etapa de pré-tratamento | 127 |
| 5.1.2 Etapas de pré-processamento | 131 |
| 5.1.3 Etapas de processamento..... | 136 |
| 5.1.4 Etapas de acabamento do produto..... | 154 |
| 6 FLUXOGRAMA DETALHADO DO PROCESSO | 158 |
| 6.1 ÁREA 100..... | 158 |
| 6.1.1 Descarregamento das baterias de íons de lítio (EL-101)..... | 159 |
| 6.1.2 Desmontagem manual (DM-101) | 160 |
| 6.1.3 Moinho roto shredder (SR-101)..... | 161 |
| 6.2 ÁREA 200..... | 163 |
| 6.2.1 Extratores de sal LiPF_6 (EX-201 até EX-205) | 163 |
| 6.2.2 Filtro centrífugo (FC-201)..... | 164 |
| 6.2.3 Evaporador de reciclagem do DMC (D-201)..... | 165 |
| 6.2.4 Trocadores de calor para o DMC (E-201 e E-202)..... | 166 |
| 6.2.5 Centrífuga (CF-201)..... | 167 |
| 6.2.6 Secador (DE-201)..... | 167 |
| 6.2.7 Peneira vibratória (S-201) | 168 |
| 6.2.8 Separador magnético (MS-201) | 169 |
| 6.2.9 Separador eletrostático (ES-201) | 170 |
| 6.2.10 Flotador (FL-201)..... | 171 |
| 6.3 ÁREA 300..... | 172 |
| 6.3.1 Reatores de lixiviação (R-301, R-302 e R-303)..... | 173 |
| 6.3.2 Reatores de precipitação de metais contaminantes (R-304 e R-305)..... | 175 |
| 6.3.3 Misturadores ácidos (M-301 e M-302) | 178 |
| 6.3.4 Misturadores básicos de hidróxido (M-303, M-304 e M-306) | 179 |
| 6.3.5 Misturador de sulfatos (M-305) | 181 |
| 6.3.6 Reatores de precipitação dos componentes para produto ativo (R-306 e R-307) .. | 182 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.3.7 | Misturador de carbonato (M-307) | 184 |
| 6.4 | ÁREA 400..... | 185 |
| 6.4.1 | Cominuição e homogeneização (SR-401, SR-402, M-401 e M-402)..... | 186 |
| 6.4.2 | Compactação e calcinação/sinterização do material (JC-401 e B-401) | 188 |
| 7 | PROJETO DE UTILIDADES DO PROCESSO | 189 |
| 7.1 | INSTALAÇÕES DE ÁGUA POTÁVEL | 189 |
| 7.1.1 | Instalações de água fria | 189 |
| 7.1.2 | Instalações de água quente | 192 |
| 7.1.3 | Instalações de água gelada | 193 |
| 7.1.4 | Reservatório de água | 193 |
| 7.2 | INSTALAÇÕES DO PROCESSO | 193 |
| 7.3 | INSTALAÇÕES DE VAPOR E CONDENSADO | 194 |
| 7.3.1 | Demanda de vapor necessária ao processo | 194 |
| 7.3.2 | Geração de vapor..... | 195 |
| 7.4 | INSTALAÇÕES DE AR COMPRIMIDO | 195 |
| 7.4.1 | Demandas de ar comprimido | 195 |
| 7.4.2 | Sistema de air-lift | 196 |
| 8 | TRATAMENTO DE EFLUENTES | 198 |
| 8.1 | TRATAMENTO DE EFLUENTES SÓLIDOS | 200 |
| 8.2 | TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS | 201 |
| 8.3 | TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS | 204 |
| 9 | CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DO PROCESSO | 206 |
| 9.1 | LÓGICA DE CONTROLE..... | 208 |
| 10 | ANÁLISE ECONÔMICA..... | 210 |
| 10.1 | ESTIMATIVA DE INVESTIMENTOS TOTAIS..... | 210 |
| 10.1.1 | Investimento ISBL | 210 |
| 10.1.2 | Investimento OSBL..... | 215 |
| 10.1.3 | Investimento Fixo Indireto | 216 |
| 10.1.4 | Capital de Giro | 216 |
| 10.1.5 | Investimento de Partida..... | 216 |
| 10.2 | CUSTOS COM A PRODUÇÃO | 216 |
| 10.2.1 | Custos Fixos | 217 |
| 10.2.2 | Custos Variáveis..... | 219 |
| 10.3 | FINANCIAMENTO | 221 |

| | |
|--|-----|
| 10.4 FLUXO DE CAIXA | 221 |
| 10.4.1 Payback | 225 |
| 10.5 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE, VALOR PRESENTE LÍQUIDO E TAXA INTERNA DE RETORNO..... | 225 |
| 11 CONCLUSÕES | 227 |
| 11.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 229 |
| REFERÊNCIAS | 230 |
| APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULOS | 261 |
| APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS INSTALAÇÕES | 454 |
| APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS..... | 487 |
| APÊNDICE D – PLANTA BAIXA DA UNIDADE INDUSTRIAL | 488 |
| APÊNDICE E – FLUXOGRAMA DETALHADO | 489 |
| APÊNDICE F – FLUXOGRAMA DETALHADO COM VAZÕES | 490 |
| ANEXO A – ROTORSHREDDER BHS SONTHOFEN | 491 |
| ANEXO B – MIXER-SETTLERS DE DIETRICH | 492 |
| ANEXO C – FILTRO CENTRÍFUGO HEINKEL..... | 493 |
| ANEXO D – EVAPORADOR DE SIMPLES EFEITO | 494 |
| ANEXO E – CENTRÍFUGA DE TIJELA SÓLIDA | 495 |
| ANEXO F – TÚNEL DE SECAGEM | 496 |
| ANEXO G – PENEIRA VIBRATÓRIA..... | 497 |
| ANEXO H – SEPARADOR MAGNÉTICO | 498 |
| ANEXO I – SEPARADOR ELETROSTÁTICO | 499 |
| ANEXO J – MÁQUINA DE FLOTAÇÃO SMARTCELL® | 500 |
| ANEXO K – REATOR DE LIXIVIAÇÃO | 501 |
| ANEXO L – COMPACTADOR DE ROLOS FREUND VECTOR..... | 502 |
| ANEXO M – FORNO DE SINTERIZAÇÃO EASYBRAZE | 503 |
| ANEXO N - CALDEIRA..... | 504 |
| ANEXO O – FATORES PARA ESTIMAÇÃO DO INVESTIMENTO FIXO..... | 505 |
| ANEXO P – FATOR DE CUSTO DE MATERIAIS | 506 |
| ANEXO Q – PARÂMETROS DE CUSTOS COM EQUIPAMENTOS..... | 507 |
| ANEXO A.A – TRANSPORTADORES HELICOIDAIS..... | 509 |
| ANEXO A.B – EXTRATORES..... | 513 |
| ANEXO A.C – CENTRÍFUGA | 515 |
| ANEXO A.D – SECADOR DE ESTEIRA | 516 |

| | |
|---|-----|
| ANEXO A.E – PROPRIEDADES DO NITROGÊNIO..... | 517 |
| ANEXO A.F – EVAPORADOR..... | 518 |
| ANEXO A.G – PENEIRA VIBRATÓRIA..... | 521 |
| ANEXO A.H – TROCADORES DE CALOR..... | 523 |
| ANEXO A.I – REATORES | 527 |
| ANEXO A.J – MISTURADOR TIPO RIBBON | 528 |
| ANEXO A.K – MISTURADOR DE PÁS | 529 |
| ANEXO A.L – FILTRO DE TAMBOR ROTATIVO | 530 |
| ANEXO A.M – FORNO DE CALCINAÇÃO/SINTERIZAÇÃO | 531 |
| ANEXO B.A – DIMENSÕES DE TUBOS COMERCIAIS..... | 532 |
| ANEXO B.B – ESPESSURA DO ISOLAMENTO TÉRMICO..... | 534 |
| ANEXO B.C – TUBULAÇÃO DE CONDENSADO | 535 |
| ANEXO B.D - COMPRESSOR INDUSTRIAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO ... | 536 |
| ANEXO B.E – LIMITES PARA A SUBMERGÊNCIA E FATORES DE CONSUMO..... | 537 |
| ANEXO B.F – ESQUEMA HIDROEMULSOR | 538 |
| ANEXO B.G – VALORES DE C CONSIDERANDO A SUBMERSÃO | 539 |
| ANEXO B.H – BOMBA CENTRÍFUGA..... | 540 |

1 INTRODUÇÃO

Em meio aos avanços tecnológicos, sociais e ambientais, a Organização Mundial da Saúde (OMS) propôs, em 2015, um plano de ação global com intuito de promover qualidade de vida para todos, tendo o setor energético como forte aliado no alcance dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim sendo, a sociedade tem demonstrado interesse em repensar as formas de gerar e consumir energia, visando preservar os recursos naturais, bem como diminuir os impactos ambientais (PEREIRA, 2020).

No estudo realizado por pesquisadores da FGV Energia (2017), foi possível demonstrar que o setor de transportes tem grande impacto nas emissões de gases de efeito estufa (GEE), correspondendo a cerca de 23% das emissões globais provenientes da combustão. Tendo em vista a necessidade de aprimorar as formas de mobilidade, a indústria automobilística recorreu a novas tecnologias e desenvolveu veículos que promovem a utilização de energia sem a emissão de GEE, como os motores elétricos à bateria de íons de lítio (LIBs) (BNDES, 2013).

As baterias de íons de lítio são empregadas em diferentes variações, classificadas conforme as matérias-primas presentes na composição do cátodo. Atualmente, as baterias mais utilizadas em veículos elétricos são as de cátodo de óxido de cobalto, manganês, níquel e lítio (NMC) e de óxido de alumínio, cobalto, níquel e lítio (NCA) (WARNER, 2019). A bateria $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA) oferece alta energia, boa potência e uma longa vida útil, porém possui desvantagens quanto à segurança e ao alto custo (KAM & DOEFF, 2012). Enquanto isso, as baterias $\text{LiNi}_y\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ (NMC) conferem um sistema bem-sucedido, com teor de cobalto reduzido, são mais seguras e adequadas para utilização em veículos elétricos (SUN & ZHAO, 2017).

Visando a crescente utilização e, por consequência, o aumento no descarte de baterias de íons lítio, devem ser desenvolvidos processos de reciclagem do material, no qual podem ser aplicadas diferentes metodologias, como a hidrometalurgia, pirometalurgia e nanometalurgia (DUTTA, 2019). Nesse sentido, torna-se possível promover uma economia circular, que consiste na síntese de novos materiais por fontes secundárias, ou seja, os resíduos são processados e utilizados como matéria-prima (PAVOSKI et al., 2022).

Ressalta-se que, o descarte incorreto de LIBs pode acarretar uma série de impactos ambientais, pois apresentam em sua composição uma série de materiais que geram resíduos perigosos devido suas características, como a taxa de toxicidade (DIEKMAN et al., 2018). Ademais, as reservas mundiais para extração de cobalto são limitadas, garantindo um alto valor agregado para o metal, o mesmo ocorre para os metais lítio e cobre.

No Brasil, o descarte das baterias descartadas é regulamentado pela Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), que prevê a logística reversa, de responsabilidade do fabricante, após o uso pelo consumidor. Portanto, é interessante a implementação de meios que promovam a economia circular no país, tornando o processo economicamente viável e ambientalmente amigável, reduzindo os impactos do descarte incorreto dos resíduos ao meio ambiente, como também a necessidade de exploração de recursos naturais (BRASIL, 2010).

A partir disso, o desdobramento de conhecimentos para a reciclagem das baterias de íons de lítio presentes, principalmente, em carros elétricos, além de outras baterias menores, com a utilização de tecnologias e equipamentos adequados, é objetificado ao longo do trabalho. Ao fim, a REFVI Metal deseja obter um processo completo e efetivo, considerando os benefícios sociais, ambientais e econômicos para aplicação em âmbito industrial.

1.1 OBJETIVO GERAL

Considerando a perspectiva de aplicação da economia circular em bateria de íons de lítio, para acompanhar o avanço na utilização de carros elétricos de modo sustentável, o trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade de implementação de uma planta industrial que realize a reciclagem de baterias de cátodo de óxido de cobalto, manganês, níquel e lítio (NMC) e de óxido de alumínio, cobalto, níquel e lítio (NCA) em final de vida para produção de 1632,3 toneladas de material catódico NMC por ano.

1.1.1 Objetivos Específicos

Ademais, para contemplar todos os aspectos pertinentes ao desenvolvimento do projeto, os objetivos específicos a serem alcançados são:

- Realizar uma análise de mercado para determinar o potencial de comercialização e a demanda do produto a ser obtido;
- Analisar as tecnologias existentes para desenvolvimento do projeto e selecionar as rotas mais adequadas;
- Elaborar o fluxograma do processo produtivo, indicando os equipamentos e materiais envolvidos em cada etapa;
- Desenvolver os balanços de massa e energia, e demais cálculos para o dimensionamento dos equipamentos necessários para o projeto;
- Realizar uma análise econômica para verificação da viabilidade de implementação da unidade industrial.

1.2 JUSTIFICATIVA

O projeto proposto apresenta algumas justificativas que coincidem com os planos de ações mundiais da ONU, conhecidos como “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável” apresentados na Figura 1. Os objetivos estão alinhados a ações de todos os países para promover prosperidade e proteção ao planeta, a partir de um conjunto de estratégias de construção econômica para atingir as demandas sociais de educação, saúde, segurança e oportunidades de trabalho enquanto se preocupa com a proteção do meio ambiente e as mudanças climáticas (ONU, 2022).

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU (2022).

A importância da realização de ações almejando estes 17 objetivos vem com maior força após o sofrimento mundial gerado pela COVID-19, da qual aumentou a importância desta agenda de ações até o período de 2030 pelo acordo de Paris de mudanças climáticas. Neste sentido, esses objetivos são vitais para atividades econômicas mais fortes, inclusivas, verdes e sociedades mais resilientes (ONU, 2022).

Dentro deste contexto, o desenvolvimento de economias circulares como a apresentada neste projeto faz promoção de oportunidades de emprego para a população, incentivando o estudo e a formação de novos trabalhadores, como também uma nova forma de investimento para países e empresas, tratando de uma forma de tecnologia presente no âmbito social da qual sua vida útil é de longa data e de renovação ao longo prazo visando equilíbrio ambiental, social e econômico (BERGER, 2022). Para este projeto de economia circular com o foco na recuperação de matérias-primas para a produção de novas baterias de íons de Lítio, pode-se

citar a importância do processo em relação ao impacto ambiental, proporcionando a redução da quantidade de resíduos não tratados no meio ambiente e a reutilização de materiais com valor agregado.

Além disso, busca diminuir a necessidade do uso de matérias-primas obtidas pela extração de minérios do planeta, com o interesse de minimizar o impacto ambiental gerado por mineradoras, já que o local de extração sofre devastação em grandes proporções e a existência de uma demanda maior de metais nos últimos tempos faz com que seja de interesse comum uma busca de alternativas para atender o seu consumo.

Outra justificativa é o combate à exploração ilegal de mão de obra insalubre proporcionada em algumas regiões do planeta, como evidenciadas nas mineradoras localizadas na República Democrática do Congo, apresentadas por veículos de notícias, que representam grande parcela na obtenção do cobalto mundial, porém, são operadas de forma violenta e desigual (BBC, 2019). Assim, o processo de reciclagem permite a diminuição da demanda de matéria-prima apenas por esta forma de obtenção.

Como benefício econômico o projeto torna-se uma alternativa para países dependentes de exportações de matéria-prima com uma opção de uma fonte renovável ao seu dispor a fim de diminuir os custos de processamento das baterias de íons de Lítio (BERGER, 2022). Outro fator é o incentivo de novas culturas sociais relacionadas ao descarte de materiais com possibilidade de reciclagem, a criação de novas empresas e normas governamentais, com o intuito de aumentar o interesse de investimento em economias circulares.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BATERIAS: PRINCÍPIO GERAL

O avanço contínuo do desenvolvimento tecnológico, provoca um aumento da demanda por diferentes fontes de energia elétrica. Assim, a necessidade de soluções de armazenamento para balancear a demanda e oferta é inevitável.

Em princípio, uma bateria é um dispositivo simples, que requer três componentes básicos, sendo eles dois eletrodos e um eletrólito no qual o controle das interações destes componentes, como a sua dinâmica, em particular as suas reações químicas, podem produzir sistemas de alto desempenho. Deve-se considerar seus custos de produção, peso, composição e morfologia do material, criticidade do material e condições de produção, além de outros aspectos específicos que devem ser atendidos (ZSCHORNAK, 2018).

Estes e outros inúmeros desafios devem ser considerados para aplicação correta da bateria, tornando o projeto de baterias uma tarefa duradoura e trabalhosa, cada vez mais complexa em busca do alto rendimento, menor custo, segurança e desempenho. Para isto, deve-se realizar um estudo sobre as relações de reação de interface eletrificada e transporte iônico, discussões abrangentes das peculiaridades químicas e físicas, como também os aspectos estruturais favoráveis e desfavoráveis, bem como considerações à estrutura eletrônica e de ligação (ZSCHORNAK, 2018).

2.2 APLICAÇÕES DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

O desenvolvimento das baterias de íons de Lítio nos últimos anos focara no melhor aproveitamento de sua aplicação e desempenho da energia eletroquímica armazenada. Como o lítio é um dos elementos mais leves da tabela periódica, com potenciais eletroquímicos altos e também alta reatividade, tornou-se um material ideal para ser utilizado na construção de baterias. A LIB é capaz de alcançar alta densidade de energia, obtendo um bom ciclo de vida, com maior tensão da célula e manutenção mais fácil, além de proporcionar uma bateria mais ambientalmente amigável comparada a outros tipos de baterias (S. ABDULLAH, 2018).

As LIBs são fabricadas a partir de sais de Lítio, extraídos de atividades mineradoras e também obtidos por reciclagem de LIBs descartadas. A sua aplicação é ampla, usadas em praticamente todos os aparelhos eletrônicos, incluindo *laptops*, celulares, câmeras, tablets, relógios, dentre outros, como também é utilizada em veículos elétricos (EVs) como carros elétricos e motos elétricas. Para as baterias envolvendo aparelhos eletrônicos, utilizam por

exemplo, LCO, óxido de lítio cobalto e também possui baterias do tipo Li-PO, polímero de lítio, sendo elas trabalhadas como uma célula única e assim, para esta funcionalidade, são de fácil produção e menor custo (S. ABDULLAH, 2018).

2.2.1 Aplicações em veículos

As LIBs estão em desenvolvimento para diferentes veículos de transporte, como os veículos de passageiros, veículos leves de comércio (LCV), veículos pesados de comércio (HCV), veículos de duas rodas (motos), patinetes e bicicletas eletrônicas. Estes veículos elétricos (EV) podem ser classificados em diferentes modos de propulsão, como BEV, FCEV, PHEV, HEV (BENEVELLI, 2022).

Battery Electric Vehicle (BEV) é a classe de carros mais utilizada no mercado, são os veículos que utilizam apenas a energia elétrica proveniente da bateria, sem um motor a combustão via *plug-in*. Estes veículos são carregados em casa ou em estações de recarga comercial. Estes veículos têm uma autonomia maior do que os veículos híbridos, sendo este o seu maior diferencial entre outros veículos movidos a energia elétrica (BENEVELLI, 2022).

Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) são os veículos movidos apenas por energia elétrica, mas diferentemente dos BEV a energia é proveniente de células de combustível de hidrogênio por meio de uma combinação de hidrogênio líquido comprimido e oxigênio. O veículo é movido pela reação do hidrogênio com o oxigênio sem emissão de gases nocivos (NEXT, 2022).

Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) são utilizados em veículos híbridos que possuem uma bateria recarregável via *plug-in* com um motor a combustão, assim diminui a utilização dos combustíveis em até 60 por cento. Existem dois tipos de PHEV, os *Extended Range Electric Vehicles* (EREV) que utilizam a energia elétrica proveniente da bateria para mover o veículo enquanto o motor a combustão gera eletricidade e quando termina a energia da bateria é utilizada a energia armazenada pelo motor. Por outro lado, existem os PHEV que utilizam ambos os motores em simultâneo, para mover o veículo (BENEVELLI, 2022).

Hybrid Electric Vehicle (HEV) utiliza um motor a combustão e um motor elétrico que utiliza energia armazenada em uma bateria para a locomoção do veículo, porém, diferentemente dos outros veículos elétricos ele não é recarregável via *plug-in*. A bateria é recarregada por meio de frenagem regenerativa, da qual armazena a energia cinética usada para parar o carro, assim carregando a sua bateria e ajudando o motor a combustão a acelerar o veículo, usando

ambos os motores para seu funcionamento. Embora seja necessário o motor a combustão para seu funcionamento, ele maximiza a economia de combustível (BENEVELLI, 2022).

2.2.2 Eletrônicos

Com a existência de diferentes tipos de baterias íons de Lítio, a mais comum utilizada é a LCO, o óxido de lítio cobalto, onde o principal material ativo é o cobalto, consistindo de um cátodo de óxido de lítio cobalto e um anodo de grafite. Em sistemas mais recentes são incluídos o níquel, manganês e o alumínio para melhorar a longevidade, a capacidade de carregamento e o custo. A desvantagem desta bateria LCO é a vida relativamente curta, baixa estabilidade térmica e capacidade de carga limitada. Assim sendo, a alta energia específica faz dela a mais popular para celulares, tablets, *laptops* e câmeras digitais (ULISSES, 2019).

2.2.3 Outros

Além da funcionalidade em veículos, a utilização em diferentes áreas como, por exemplo, o uso da bateria de Titanato de Lítio (LTO) em nobreaks, iluminação pública com energia solar. As baterias de óxido de Lítio, Níquel, Cobalto e Alumínio (NCA) para dispositivos médicos e industriais. Baterias de fosfato de Ferro e Lítio (LFP) para veículos pesados elétricos, como empilhadeiras e caminhões como também baterias para ar condicionados.

Ademais, tem-se a NMC utilizada para ferramentas elétricas industriais e dispositivos médicos, como por também a utilização das baterias de óxido de Lítio Manganês (LMO) para ferramentas elétricas e instrumentos médicos. Outras aplicações possíveis para as baterias são para as chamadas Battery Energy Storage System (BESS), sendo uma estação de armazenamento de energia utilizando baterias, podendo ser de escala industrial ou escala portáteis (ULISSES, 2019).

2.3 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias de íons de lítio são uma invenção relativamente nova e só existem comercialmente desde a década de 1980. O ânodo desse tipo de bateria consiste majoritariamente de grafite, mas podem ser usados outros materiais como silício, lítio metálico, alumínio, germânio, estanho, antimônio e titânio. O cátodo consiste principalmente de um óxido metálico. Entre os diferentes tipos de cátodo, o óxido de lítio-cobalto (LCO) consegue

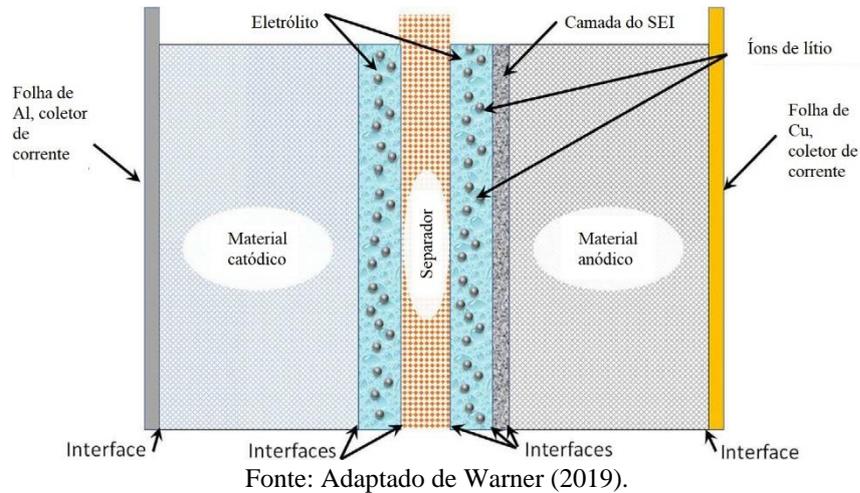
oferecer maior densidade energética, mas apresenta maior risco de segurança, principalmente quando danificado. Neste contexto, esta composição química tem sido adotada em eletroeletrônicos (pelo menor risco de explosão). Em contraste, as baterias de fosfato de ferro e lítio (LFP), óxido de manganês de lítio (LMO) e óxido de cobalto manganês de lítio (NMC) oferecem densidades de energia mais baixas, mas são mais seguras, principalmente para necessidades energéticas maiores. Já o eletrólito consiste principalmente de um sal de lítio em um solvente orgânico (VETTER & LUX, 2016; WARNER, 2019; LIU, WANG & LAI, 2022).

As principais vantagens das baterias de íon de lítio são: alta densidade de energia, alto ciclo e vida útil, carregamento rápido e eficiente com pouco desperdício de energia, baixa taxa de autodescarga, pouca necessidade de manutenção e pouca queda de tensão. Suas principais desvantagens são o preço relativamente alto (em melhora) e a possibilidade de fuga térmica que está em aprimoramento com circuitos de proteção elaborados (sistema de gerenciamento de bateria) (VETTER & LUX, 2016).

2.3.1 Funcionamento eletroquímico

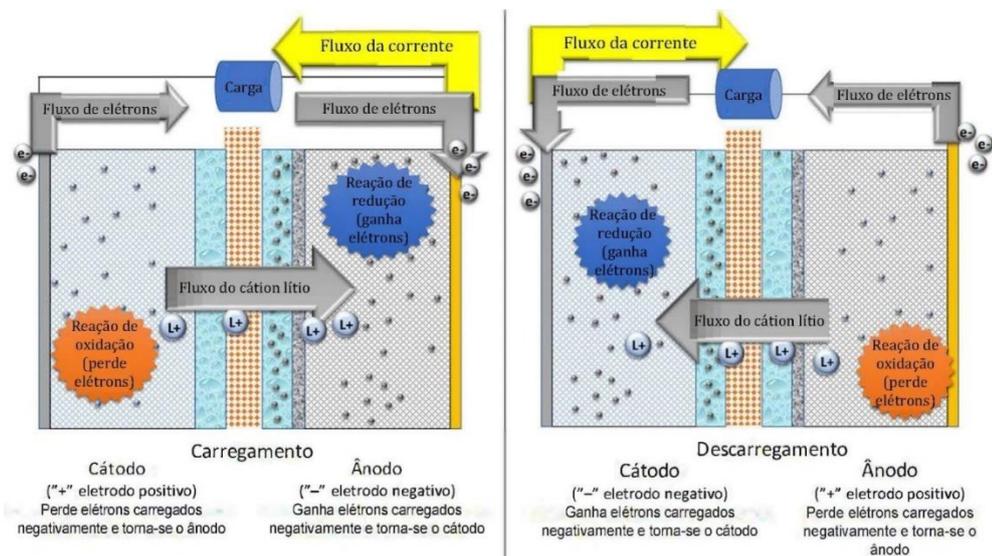
Em suma, o funcionamento eletroquímico de uma bateria se dá pelo transporte dos íons de lítio. Durante o processo de operação da bateria em uma etapa de carga, o lítio é transportado do cátodo, através do eletrólito e do separador, para o ânodo. Já em uma descarga, o lítio volta para o cátodo pelos mesmos meios. Nas primeiras cargas e descargas, é esse processo que cria a camada de interface eletrolítica sólida (SEI), que é um processo eletroquímico que cria um revestimento nos materiais do ânodo, composto de íons de lítio que formam ligações permanentes com as moléculas no ânodo. Assim, o processo é então repetido com a boa parte dos íons de lítio remanescentes (que não foram ligados permanentemente com o ânodo) viajando de ânodo para cátodo e vice-versa (WARNER, 2019). O esquema de montagem da bateria é descrito na Figura 2.

Figura 2 – Esquema intracelular de LIBs

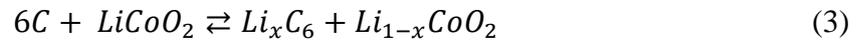
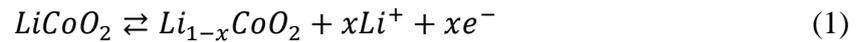


O eletrodo positivo é chamado de cátodo e o eletrodo negativo de ânodo. Esses nomes representam a realidade apenas ao descarregar a bateria, diferindo durante o processo de carregamento, onde o eletrodo positivo funciona como ânodo e o negativo funciona como cátodo. Durante o carregamento, a reação catódica ocorre no ânodo, pois oxida e libera elétrons, enquanto a reação anódica ocorre no cátodo, pois reduz e ganha elétrons. Quando as células passam a descarregar, a reação catódica ocorre no cátodo, pois é neste que os elétrons são ganhos à medida que eles seguem o circuito condutivo do ânodo, onde ocorre uma reação de oxidação anódica para liberar esses elétrons (LEUTHNER, 2018; WARNER, 2019; VUORILEHTO, 2018). A Figura 3 demonstra a migração dos elétrons conforme o estado da bateria.

Figura 3 – Migração de elétrons conforme o modo da bateria



De acordo com Wu et al. (2015), utilizando o óxido de lítio-cobalto como exemplo de cátodo (eletrodo positivo) e o grafite como ânodo (eletrodo negativo), as semirreações no eletrodo positivo ocorrem como mostrado na Equação 1, e as semirreações no eletrodo negativo ocorrem como mostrado na Equação 2. A reação redox é mostrada na Equação 3. Considera-se o processo de carga do lado esquerdo para o direito das reações, e o processo de descarga do lado direito para o esquerdo das semirreações.



Eletroquimicamente, durante o processo de carregamento, o lítio se desintercala da estrutura do eletrodo positivo, liberando um elétron e oxidando o componente ligado (neste caso Co^{3+} para Co^{4+}). Com o processo de descarga, o componente ligado é reduzido (neste caso Co^{4+} para Co^{3+}), ganhando um elétron. No eletrodo negativo, com a intercalação do Li^+ na camada de grafite, um elétron é obtido, transformando o lítio para o estado atômico. Durante o processo de descarga, o lítio do estado atômico perde um elétron para se tornar um íon de lítio e se desintercala das camadas de grafite (WU et al., 2015).

O uso do lítio para o armazenamento de energia se justifica por ser o metal mais leve da tabela periódica (número atômico 3), sendo que apenas os gases hélio e hidrogênio possuem pesos atômicos menores (2 e 1, respectivamente). Por fazer parte do grupo dos metais alcalinos, o lítio também é altamente reativo e assim, combina um baixo peso e alta reatividade, contendo mais energia por unidade de peso do que outros metais como, por exemplo, o níquel (número atômico 28) e o chumbo (número atômico 82), usados em baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e chumbo-ácido (baterias recarregáveis mais antigas). Além disso, outra razão na utilização do lítio é a posse de um elétron de valência (elétrons que podem ser perdidos ou adquiridos mais facilmente), já que o átomo de lítio contém três elétrons que circulam em torno de um núcleo em duas bandas de energia. Os elétrons na banda mais interna não são móveis, mas o elétron na banda externa é móvel, tornando-se um elétron de valência e favorecendo a movimentação deste (WARNER, 2019).

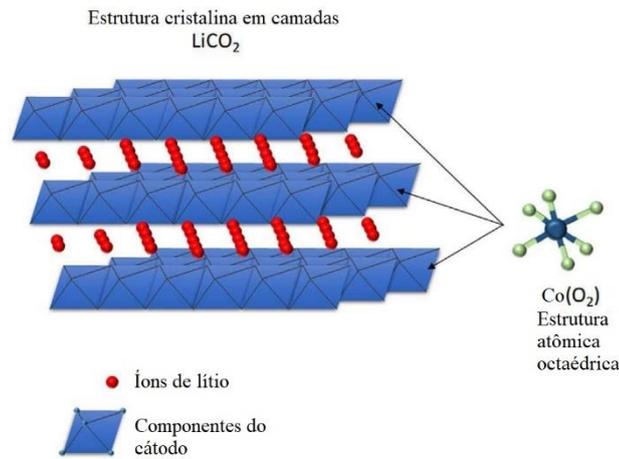
2.3.2 Cátodos

Em uma célula de íons de lítio, íons ou átomos de lítio individuais são intercalados dentro da rede cristalina no material ativo em um eletrodo, estando nos espaços vazios entre os átomos no material ativo. Para que um material seja considerado uma boa opção para um cátodo, este deve ter uma reação de alta energia livre com o lítio, resultando em alta tensão. Também deve conseguir incorporar reversivelmente inúmeros íons de lítio, o que lhe confere capacidade energética e capacidade de recarga, fazendo isso sem causar mudanças estruturais no material (longo ciclo de vida), já que isso faz com que o material se degrade, quebre ou desprenda do coletor de corrente. Ainda, um bom material também deve conseguir intercalar rapidamente os íons de lítio, oferecendo um alto nível de difusividade destes que também pode se traduzir em alta capacidade de potência. Os cinco produtos químicos em uso geral hoje incluem cátodos LFP, LMO, LCO, NCA e NMC (ANDREA, 2020; WARNER, 2019).

2.3.2.1 Cátodo LCO

Óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2) foi o primeiro cátodo de baterias de íons de lítio. O LCO possui uma estrutura cristalina em camadas com seis átomos de cobalto dispostos em sítios octaédricos ao redor do átomo de oxigênio, e esse material em camadas alternadas de óxido de cobalto e lítio. É insolúvel em soluções aquosas e é estável, o que o torna tão útil em aplicações eletroquímicas, devido à sua excelente condutividade iônica. Possui em generalidades uma tensão média de 4,0 V e uma densidade energética na faixa de 140-180 mAh/g. O LCO continua a ser uma das principais químicas para uso em *smartphones*, *laptops* e *tablets*, devido à sua alta densidade de energia, alta tensão e bom desempenho. Porém, é limitado a grandes aplicações pelo alto custo do cobalto e pela sua instabilidade em altas temperaturas (fuga térmica a partir de 150°C) (NITTA et al., 2015; WARNER, 2019; ANDREA, 2020). A Figura 4 demonstra o empacotamento atômico do LCO.

Figura 4 – Empacotamento atômico do LCO

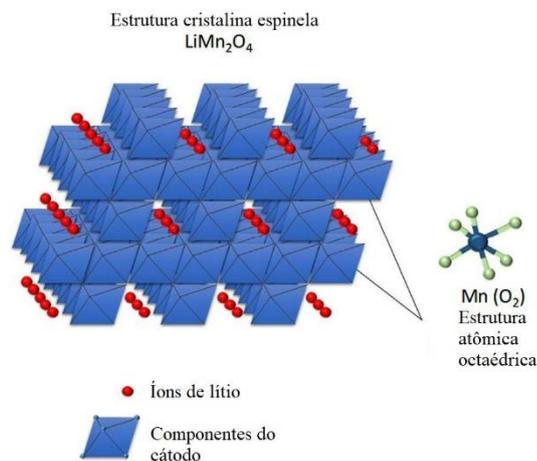


Fonte: Adaptado de Warner (2019).

2.3.2.2 Cátodo LMO

Óxido de lítio-manganês (LiMn_2O_4) possui uma forma cristalina em espinélio. Os átomos de manganês estão em uma formação de sítio octaédrico tridimensional, com o manganês ocupando um quarto da localização na camada de lítio. O manganês é uma matéria-prima mais barata e muito menos tóxica que o cobalto ou o níquel (WARNER, 2019). Além disso, o LMO opera com uma tensão média maior, de 4,1 V. Porém, possui uma menor densidade energética, de 100 a 120 mAh/g, maior perda de capacidade durante o armazenamento e baixo desempenho em altas temperaturas (NITTA et al., 2015). A Figura 5 demonstra o empacotamento atômico do LMO.

Figura 5 – Empacotamento atômico do LCO

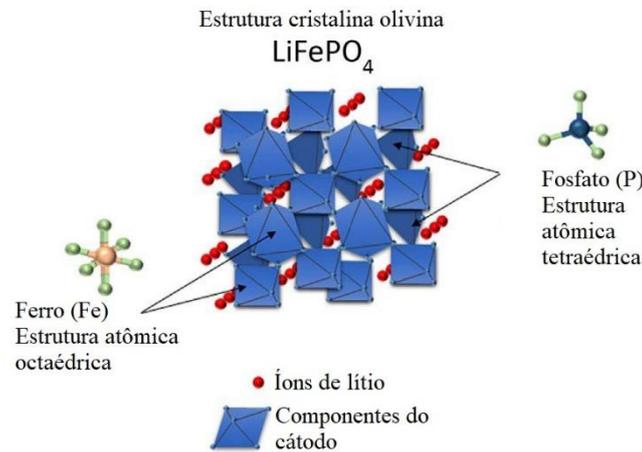


Fonte: Adaptado de Warner (2019).

2.3.2.3 Cátodo LFP

As células de fosfato de ferro (LiFePO_4) são um material de estrutura olivina, onde o Li e o Fe ocupam sítios octaédricos, enquanto P está localizado em sítios tetraédricos em uma matriz de oxigênio hexagonal. As principais desvantagens do material incluem a menor densidade energética de 150 a 170 mAh/g perante tecnologias mais atuais (NMC e NCA), porém ótima densidade comparado a outros materiais mais antigos, além de possuir baixa condutividade elétrica e iônica. Porém, o material dura mais, pois o eletrólito não se decompõe tanto em sua voltagem mais baixa, com tensão média de 3,4 V (NITTA et al., 2015; ANDREA, 2020). A Figura 6 demonstra o empacotamento atômico do LFP.

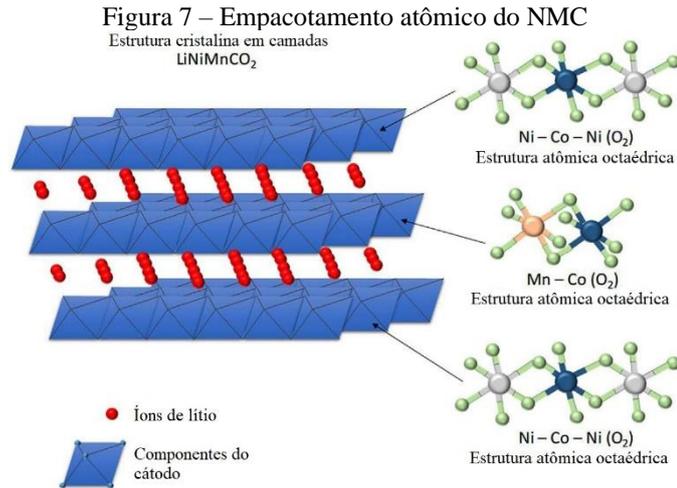
Figura 6 – Empacotamento atômico do LFP



Fonte: Adaptado de Warner (2019).

2.3.2.4 Cátodo NMC

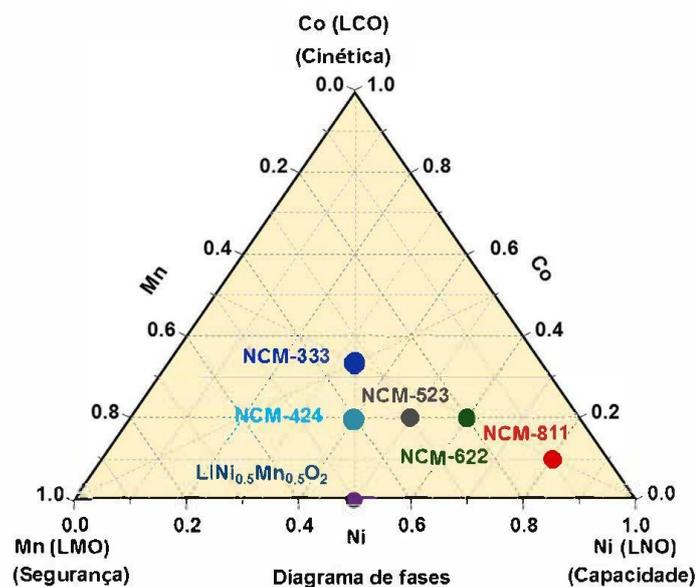
O cátodo de óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$) é a química padrão usada para baterias de alto desempenho, pois fornece alta densidade de energia e boa densidade de potência, bem como um nível aceitável de segurança. Pode ser usado na maioria das aplicações. O material ativo NMC é uma estrutura cristalina de camadas dispostas em sítios octaédricos em camadas alternadas de átomos de níquel e cobalto, átomos de manganês e cobalto, e lítio (ANDREA, 2020; NITTA et al., 2015). A Figura 7 demonstra o empacotamento atômico NMC.



Fonte: Adaptado de Warner (2019).

Diferentes tipos de razões molares entre os metais de transição podem ser estabelecidos para a composição desse material. A mistura de diferentes metais de transição no material oferece diferentes benefícios de desempenhos com relação ao uso dos metais sozinhos, já que, por exemplo, combinações ricas em níquel no NMC oferecem alta capacidade de descarga, enquanto combinações ricas em manganês oferecem melhor ciclo de vida e estabilidade térmica, e combinações ricas em cobalto oferecem boa taxa de capacidade (cinética de carga e descarga) (CHAKRABORTY et al., 2020; WARNER, 2019). A Figura 8 demonstra o diagrama ternário para composições NMCs com relação às qualidades de cada metal de transição.

Figura 8 – Diagrama ternário para diferentes composições de NMCs

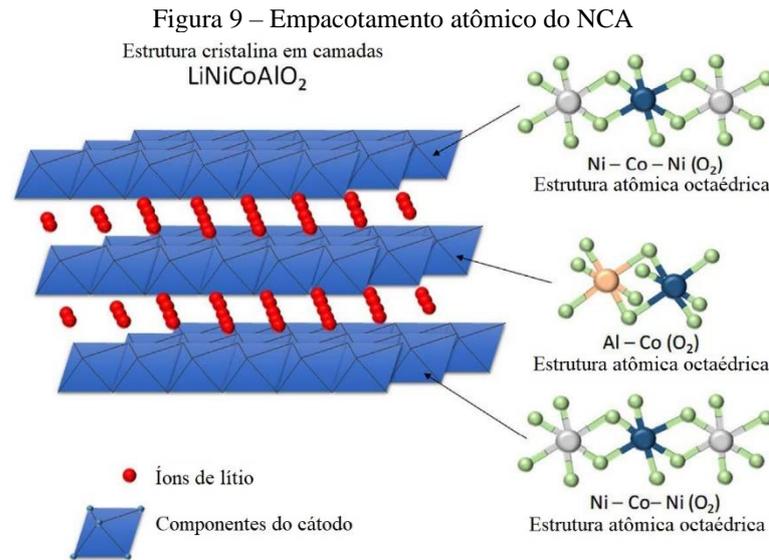


Fonte: Adaptado de Chakraborty et al. (2020).

As químicas tradicionais de NMC usam combinações de Ni, Mn e Co em proporção 1:1:1, o que significa que os três materiais foram usados em quantidades iguais nos materiais catódicos 33% níquel, 33% manganês e 33% cobalto, caracterizando o NMC 111 ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$). A partir desta, outras composições foram estabelecidas, como NMC 532 ($\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,3}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$), NMC 622 ($\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$) e NMC 811 ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$). Em generalidades, esse tipo de material ativo apresenta tensões médias de operação em 3,7 V, e as densidades energéticas dos cátodos NMC 111, NMC 622 e NMC 811, por exemplo, estão na faixa de 160 a 170, 175 a 195, e 200 a 225 mAh/g, respectivamente (NITTA et al., 2015; WARNER, 2019).

2.3.2.5 Cátodo NCA

O óxido de lítio, níquel, cobalto e alumínio ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$) é usado em algumas baterias de carros elétricos, principalmente em composições catódicas das baterias de veículos da Tesla. É formado por uma estrutura cristalina em camadas dispostas em sítios octaédricos com camadas alternadas de átomos de níquel e cobalto, átomos de alumínio e cobalto, e lítio. O material ativo NCA é composto de diferentes metais de transição, assim como o NMC, e possui normalmente 80% de níquel, 15% de cobalto e 5% de alumínio. A razão de usar alumínio é que ele estabiliza a resistência térmica e a transferência de carga. Esse material opera em uma tensão média de 3,7 V e oferece uma densidade energética alta, de 180 a 200 mAh/g, mas é uma tecnologia mais cara que a de outros materiais (como NMC) e um pouco mais insegura (ANDREA, 2020; NITTA et al., 2015; WARNER, 2019; GRAF, 2018). A Figura 9 demonstra o empacotamento atômico do NCA.



Fonte: Adaptado de Warner (2019).

2.3.3 Ânodos

Assim como o cátodo, o ânodo é composto de um grupo de moléculas mantidas juntas em um aglutinante que liga os materiais ativos a um coletor de corrente de cobre, sendo o ânodo o eletrodo negativo da bateria. Para que um material seja um bom candidato para ser usado em um ânodo, ele deve ter algumas características específicas como: ser leve e acomodar o máximo de Li possível para otimizar a capacidade, possuir o menor potencial redox possível em relação ao Li^0/Li^+ em qualquer concentração de Li (já que este é subtraído do potencial redox do cátodo para a voltagem total da célula), ter boas condutividades eletrônicas e iônicas (densidade energética) e outras propriedades e segurança comuns ao do cátodo (insolubilidade ao eletrólito, seguro, estável e barato). Dessa forma, o grafite ainda é o material anódico mais utilizado e ainda é a referência nesse quesito, apesar de também ser usado o carbono não-grafítico (carbono amorfo e carbono preto). Outros materiais estão em desenvolvimento para o ânodo como silício, lítio metálico, alumínio, germânio, estanho, antimônio e titânio (JULIEN et al., 2016).

2.3.3.1 Carbono não-grafítico/preto

O carbono preto é um exemplo de carbono amorfo utilizado em baterias devido a sua alta condutividade elétrica, principalmente como aditivo de condução para os materiais de cátodo e ânodo, além de material de revestimento. Também podem ser utilizados como uma pré-camada nas folhas de metal em que os ânodos e cátodos são revestidos, melhorando a adesão destes às folhas de metal e também a condutividade. Porém, todos os carbonos amorfos

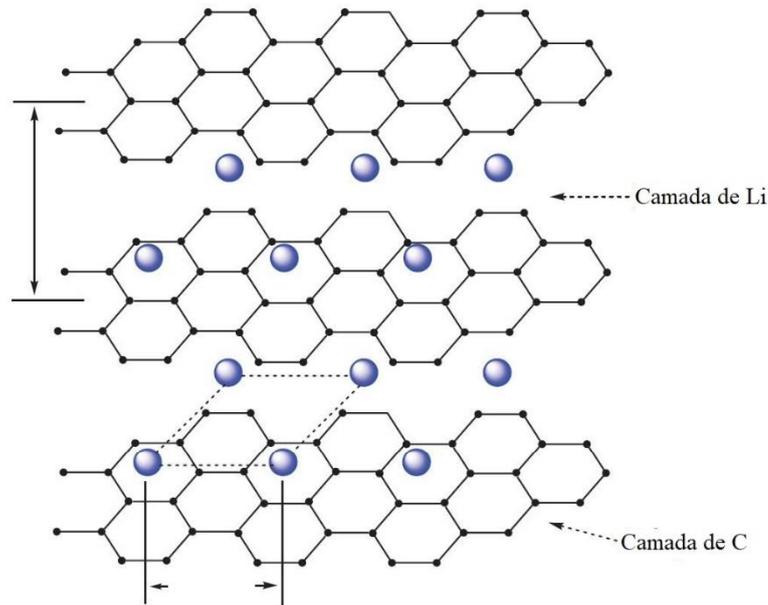
têm o mesmo padrão e características eletroquímicas que limitam o uso em excesso, como: alta capacidade específica, mas com taxas de carregamento extremamente baixas, e alta perda de capacidade energética durante o primeiro ciclo da bateria. Eles diferem dos carbonos grafíticos porque sua estrutura cristalina não tem a mesma ordem ou repetibilidade de longo alcance que o grafite (não são caracterizáveis), podendo ser convertidos para a forma cristalina do grafite por tratamento a temperaturas entre 2000°C e 3000°C. Possui custo baixo, entre 10% e 20% do custo do grafite, além de ter grande disponibilidade, com volume de produção de aproximadamente 900% a mais do que o grafite natural (WARNER, 2019; WURM et al., 2018).

2.3.3.2 Carbono grafítico ou grafite

Grafite (C_6) é a forma mais comum de carbono usada em ânodos de baterias de lítio atualmente, podendo ser usado de fontes naturais ou sintéticas. Suas grandes vantagens são: o baixo custo, a grande abundância, a facilidade de processar, a boa reversibilidade durante a intercalação e desintercalação, o baixo potencial de tensão (ocorre em uma faixa de potencial de 0 a 0,25 V com relação ao Li^0/Li^+), uma baixa perda de capacidade (SEI estável na primeira carga/descarga), além de uma boa capacidade energética (teórica) de 372 mAh/g. Dessa forma, ele atende a quase todos os requisitos para um bom material de ânodo (WURM et al., 2018; WARNER, 2019).

O material consiste em átomos de carbono ligados entre si em camadas hexagonais. Essas camadas têm excelente capacidade de empilhamento, sendo essa estrutura cristalina hexagonal repetida que diferencia o grafite de outras formas de carbono (AN et al., 2016). A Figura 10 demonstra o empacotamento atômico da intercalação de Li no grafite.

Figura 10 – Empacotamento atômico do grafite com Li intercalado



Fonte: Adaptado de Fu, Wu & Ree (2015).

2.3.3.3 Silício

O silício (Si) é um excelente e excepcional material anódico disponível para a próxima geração de baterias de íons de lítio, estando em desenvolvimento. Ele possui a maior capacidade energética (teórica), de 4200 mAh/g, e também está disponível a um custo bastante acessível, sendo abundante, e não apresentando riscos de segurança, além de apresentar baixo potencial (0,4 V) com relação a Li^0/Li^+ . No entanto, o obstáculo que limita a plena operação e comercialização de anodos inteiramente de Si é, principalmente, a grande variação de volume que ocorre durante o processo de intercalação e desintercalação dos íons de lítio. Ainda, pode ocasionar uma grande deformação estrutural pela fratura/reforma da partícula de Si, resultando em baixa eficiência e perda de capacidade, e encarecendo a mitigação desses problemas (NZEREOGU et al., 2022; HOUACHE et al., 2022).

Dessa forma, o Si é utilizado em alguns tipos de baterias em compostos de Si-grafite mais baratos, que usam menos de 10% de silício, e oferecem apenas pequenas melhorias de desempenho. A Panasonic tornou-se um dos primeiros fabricantes de células a usar ânodos compostos de Si-grafite no Tesla Model S 2015 e no Tesla 3 2017, e atualmente lidera diante de todas as outras empresas em depósitos e proteção de patentes (HOUACHE et al., 2022).

2.3.4 Eletrólito

De modo geral, os eletrólitos são substâncias responsáveis por transportar íons em meio aquoso. No caso das LIBs, devido à alta capacidade de carga e descarga, bem como ao lítio ativo quimicamente incorporado no material anódico, a formulação dos eletrólitos corresponde a mistura de um sal condutor com solventes orgânicos (CHEN et al., 2021). Nesse sentido, o eletrólito tem alta influência no desempenho da bateria, pois atua como um condutor que transporta os íons entre o cátodo e o ânodo da bateria, conforme ela vai sendo carregada ou descarregada (WANG et al., 2022).

2.3.4.1 Sal de lítio (LiPF_6)

No contexto das LIBs, o sal condutor que melhor atende aos requisitos para utilização é o hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6). Gores et al. (2011) destaca alguns critérios importantes para a formulação do eletrólito, tais como estabilidade térmica intrínseca, inércia química, estabilidade eletroquímica, alto número de transferência de íons Li^+ em soluções eletrolíticas e não toxicidade. Além disso, deve-se garantir a solubilidade do sal condutor em solventes apropriados.

Ressalta-se que o LiPF_6 possui algumas desvantagens, como a limitada estabilidade térmica e química e a sensibilidade à umidade. Por consequência, aditivos passaram a ser utilizados para compensar tais fraquezas, bem como modificar certas funções do eletrólito, principalmente relacionadas à sobrecarga da célula (XU, 2004).

2.3.4.2 Solventes orgânicos

Os solventes orgânicos são utilizados na formulação do eletrólito a fim de garantir características físicas e químicas adequadas, como permissividade dielétrica e momento dipolar (ROTHERMEL et al., 2018). Para tal, os solventes mais adequados e amplamente utilizados são carbonatos cíclicos, como o carbonato de etileno (EC) e carbonato de propileno (PC), bem como carbonatos de cadeia aberta, tais como carbonato de dimetil (DMC) e carbonato de etil metil (EMC) (STEHMANN et al., 2018). As principais propriedades dos solventes orgânicos citados podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades relevantes dos carbonatos orgânicos

| Carbonatos | EC | PC | DMC | EMC |
|--------------------------------|--|--|-------------------------------------|---|
| Fórmula | C ₃ H ₄ O ₃ | C ₄ H ₆ O ₃ | (CH ₃ O) ₂ CO | (C ₃ H ₈ O ₂)CO |
| Densidade (g/cm ³) | 1,3214 ^a | 1,2047 ^b | 1,071 | 1,007 |
| Viscosidade (cP) | 1,93 ^c | 2,53 | 0,59 | 0,66 |
| Massa molar (g/mol) | 88,06 | 102,09 | 90,08 | 104,10 |
| Ponto de fusão (°C) | 36,4 | -48,8 | 4,6 | -53 |

^aEm 39 °C; ^bEm 20 °C; ^cEm 40 °C.

Fonte: DING; XU & JOW (2000).

2.3.5 Separador

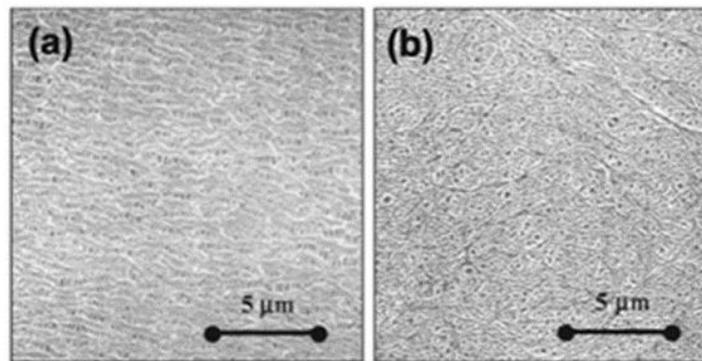
O separador, também conhecido como membrana condutora de íons (ICM), é um componente muito importante para a bateria de íons de lítio, pois consiste em uma película fina responsável pela separação física dos eletrodos. Dessa maneira, a membrana evita curtos-circuitos que podem ocorrer mediante contato entre ânodo e cátodo, mas deve ter porosidade suficiente para passagem dos íons de lítio (WARNER, 2019). Ou seja, precisa ser ionicamente condutora e eletricamente isolante.

Para a produção dos separadores são utilizados, principalmente, os polímeros polietileno (PE) e polipropileno (PP), podendo ou não ser revestidos com cerâmica (ZHU et al., 2018). Os filmes separadores têm entre 15 e 40 µm de espessura sendo formados por um processo de extrusão a seco ou à base de solvente úmido (WARNER, 2019).

Os separadores podem ser produzidos via extrusão a seco, que consiste no processo de produção do filme de polímero extrudado sem adição de solvente, com componente único. Esse processo resulta em um material de pequenos poros, porém com capacidade limitada para controlar o tamanho e a estrutura desses poros (DAHN & EHRLICH, 2011).

Também, é utilizada a extrusão a úmido, ou seja, quando o polímero é misturado com um plastificante antes de ser extrudado, o que permite maior controle do tamanho e estrutura dos poros do separador (YOSHINO, 2014). Nesse caso, é utilizado solvente para remover o plastificante após a formação do filme. A diferença na estrutura dos separadores pode ser observada na Figura 11, sendo a) o processo via extrusão a seco e b) extrusão a úmido.

Figura 11 – Tipos de separadores de poliolefinas



Fonte: Warner (2019).

2.3.6 Polímeros em LIBs

Os polímeros possuem aplicações na configuração das baterias, como é o caso dos separadores e outros materiais de invólucro. Nesse sentido, serão destacadas as principais propriedades apresentadas pelos polímeros presentes na composição LIBs, que irão reger as condições operacionais aplicadas em cada etapa do processo.

2.3.6.1 Polietileno (PE)

Conforme supracitado, o polietileno (PE) é um polímero que está presente entre os eletrodos, na forma de membrana separadora extremamente fina. O PE é um polímero flexível que contém fase cristalina e fase amorfa, com propriedades isolantes, alta tenacidade e flexibilidade (CANEVAROLO, 2006). A temperatura de transição vítrea do material, que corresponde a temperatura em que o polímero começa a apresentar um estado maleável, encontra-se entre 100 e 125 °C (COUTINHO et al., 2003).

2.3.6.2 Polipropileno (PP)

Com algumas propriedades semelhantes ao PE, o polipropileno (PP) possui alta tenacidade e resistência a solventes químicos, tais características são relevantes ao uso como separador. O PP tem temperatura de transição vítrea em, aproximadamente -20 °C, com isso é utilizado principalmente com revestimento de cerâmica, evitando deformações que podem causar baixo desempenho da bateria e até curto-circuito dentro da célula (WARNER, 2019).

2.3.6.3 Polietileno Tereftalato (PET)

O polietileno tereftalato (PET) é encontrado em materiais de invólucro e componentes eletrônicos da bateria, principalmente em conexões. Também, está sendo empregado para uma nova geração de separadores, na forma de tecido não tecido (POETZ et al., 2014), cuja temperatura de transição vítrea pode ser observada em 81 °C (CANEVAROLO, 2006). Destaca-se que o PET é amplamente utilizado em materiais descartáveis, portanto, é um dos polímeros mais reciclados.

2.3.7 Coletores de corrente

Materiais ativos de ânodo são revestidos em ambos os lados por folhas finas de Al no lado do cátodo (coletor de corrente do cátodo) e folhas de Cu no lado do ânodo (coletor de corrente do ânodo) (WERNER et al., 2022). Para assegurar a estabilidade do coletor de corrente dentro da bateria, a pureza de ambos deve ser superior a 98% (LI, 2022).

2.3.7.1 Alumínio

As folhas de alumínio com espessuras entre 10 e 20 μm são comumente empregadas como coletores de corrente para eletrodos catódicos em baterias de íons de lítio. De forma geral, as folhas devem ter alta condutividade, resistência e menor espessura para aumentar a capacidade da célula por unidade de massa e evitar quebra do material do eletrodo durante o revestimento. Por exemplo, seleciona-se em alguns casos AA1085 de alta condutividade (99,85% Al) e em outros casos, AA3003 de alta resistência (Al-1%Mn) (NAKANISHI, 2014). Além de ser utilizado como coletor de corrente do cátodo, o alumínio também é usado como material de revestimento para a maioria das células de bateria e nos materiais ativos, o alumínio é utilizado no cátodo de níquel-cobalto alumínio (WARNER, 2019).

2.3.7.2 Cobre

A folha de cobre é o coletor de corrente mais usado para baterias de íons de lítio por sua excelente condutividade elétrica. Contudo, o coletor de corrente de folha de cobre será corroído pelo eletrólito orgânico na bateria e formará uma camada superficial durante o carregamento e descarregamento de baterias de íons de lítio a longo prazo (CHEN et al., 2021). O uso de coletor de folha de Cu mais fino e mais leve pode aumentar diretamente a densidade de energia e

volume de LIBs (CHU & TUAN, 2017). Além da utilização do Cu como coletor de corrente do ânodo, ele é utilizado para fazer as interconexões de célula a célula, assim como para grande parte dos outros componentes eletrônicos e conectores da bateria (WARNER, 2019).

2.3.8 Outros materiais

2.3.8.1 Aglutinante (PVDF)

Os materiais aglutinantes são responsáveis por manter fixo as partículas de material ativo no eletrodo das baterias, para que se mantenha uma forte conexão entre os eletrodos, possuindo então um papel importante na manufaturabilidade da bateria. De forma ampla, pode se dizer que o aglutinante é a cola que mantém todo o material ativo conectado e evita que este material se separe. Esses materiais são normalmente inertes e devem ser flexíveis, insolúveis no eletrólito, eletroquimicamente e quimicamente estáveis e fáceis de serem aplicados nos eletrodos. Um material comum dos aglutinantes para ambos o cátodo e ânodo é o fluoreto de polivinilideno (PVDF), um fluoropolímero termoplástico (MICROMERITICS, 2017).

2.3.8.2 Sistema de gerenciamento da bateria (BMS)

Warner (2015) denomina o BMS como o “cérebro da bateria”, além de afirmar que ele é uma combinação de vários componentes, incluindo o anfitrião, também chamado de host, que é um PCB, ou circuito impresso, além de sensores e *software* que faz a união dos componentes e os faz funcionar. Por fim, também inclui os comutadores (*switches*), fusíveis, entre outros (WARNER, 2015).

O sistema de gerenciamento da bateria, da sigla em inglês BMS, funciona para proteger as células individuais da bateria e para aumentar o tempo de vida e número de ciclos da mesma. O sistema mede os parâmetros de voltagem, corrente e temperatura da bateria. Esse monitoramento permite uma previsão do estado de carga da bateria (SOC), que descreve o estado atual de carga da mesma comparado com a sua máxima capacidade, além do seu estado de vida (SOH), que também é uma comparação com uma bateria nova (DORN et al., 2018).

2.3.8.3 Isolantes

O invólucro do módulo protege os terminais da célula com o material refrigerante, que é um fluido térmico compatível (como etilenoglicol). Os módulos são envolvidos em uma

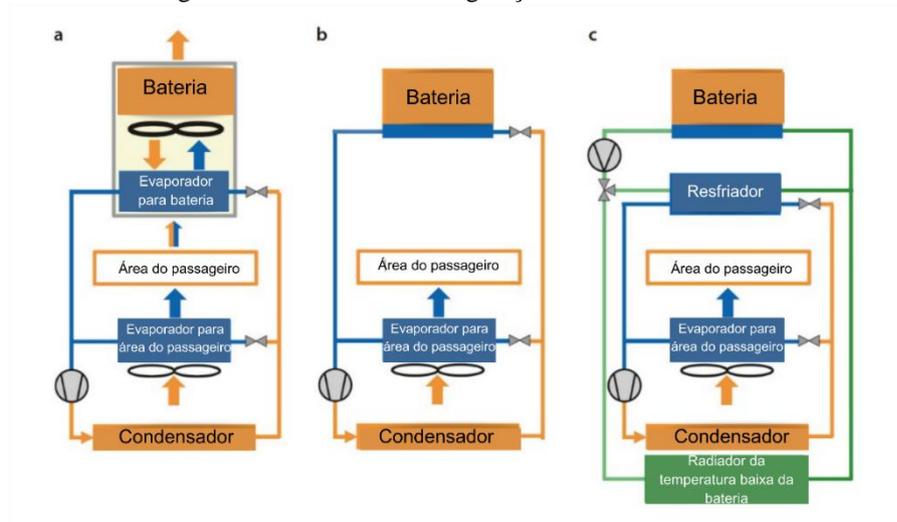
camisa protetora, feita de uma folha de alumínio em cada lado de um isolante leve de alta eficiência e de aproximadamente 10 mm de espessura. Geralmente o material refrigerante é empregado dentro deste invólucro, e passa por todo o veículo (incluindo o motor) para manter a temperatura dos componentes estáveis. O isolante tem o objetivo de desacelerar as interações entre a bateria com o ambiente externo. Quando a bateria é removida do veículo, o material refrigerante também é retirado, sobrando apenas o invólucro de alumínio para a reciclagem da bateria (PISTOIA, 2014).

2.3.8.4 Materiais refrigerantes

Para a refrigeração do sistema da bateria, existem 3 possíveis meios: a refrigeração a ar, a refrigeração por fluido refrigerante (etilenoglicol) diretamente no módulo, e a refrigeração por fluido refrigerante indiretamente (com radiador e conectado ao circuito de arrefecimento do carro). O primeiro é mais indicado para SUVs e demais veículos maiores, já que é necessário um amplo espaço de passagem de ar para garantir a troca térmica eficiente. Já os dois últimos são os meios mais compactos e flexíveis, diferenciando-os apenas na forma de contato do fluido com relação ao ambiente de troca térmica nos módulos da bateria. No meio indireto, utiliza-se uma placa refrigerante em dutos conectados a um chiller com o fluido refrigerante, utilizando um circuito secundário e um radiador interno na bateria. Já no meio direto, o fluido refrigerante é conectado com um evaporador compacto para uma placa de resfriamento da bateria, montada dentro desta, possuindo uma conexão termocondutora com as células do pacote. Assim, o calor necessário para evaporar o refrigerante é retirado das células da bateria, resfriando-as de forma muito eficaz (WIEBELT et al., 2018).

A refrigeração da bateria está conectada diretamente com os outros sistemas de arrefecimento do carro, utilizando acionamentos elétricos para a distribuição da potência do compressor e/ou chiller adequado ao arrefecimento necessário. O fluido refrigerante empregado em refrigeração direta e indireta geralmente é uma mistura de água em etilenoglicol (igualmente empregado em carros a combustão). Já com a utilização do ar, este passa pelos ambientes de troca térmica e é devolvido com a energia obtida ao ambiente (WIEBELT et al., 2018; ROE et al., 2022). Destaca-se também que ao retirar a bateria do veículo elétrico, o fluido refrigerante, seja ele qual for, também é retirado, não entrando na alimentação do processo de reciclagem. A Figura 12 demonstra um circuito para os 3 tipos de refrigeração, onde (a) é com um sistema a ar, (b) é um sistema com fluido térmico direto e (c) é um sistema com fluido térmico indireto.

Figura 12 – Sistemas de refrigeração utilizados em LIBs

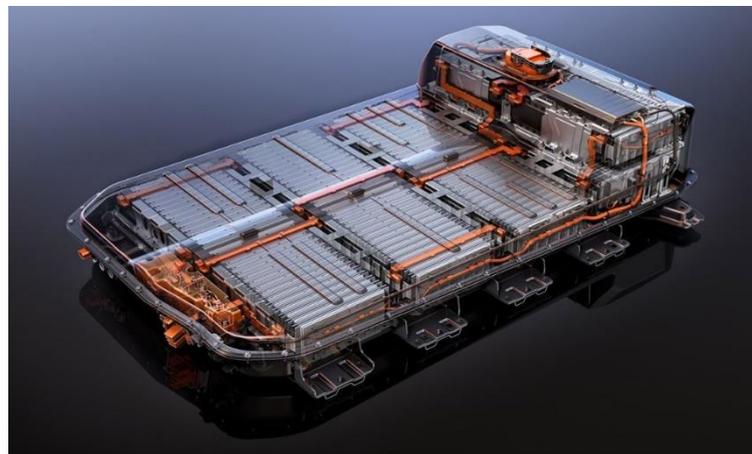


Fonte: Wiebelt et al. (2018).

2.4 DEFINIÇÕES DA MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima consiste principalmente de baterias usadas de EVs, porém não descartando a possibilidade do uso de baterias HEVs, PHEVs e CEVs, ou baterias de dispositivos eletrônicos menores. As baterias veiculares caracterizam-se por serem grandes e pesadas, possuindo alguns módulos em seu interior e várias células em cada módulo. Já as baterias de eletroeletrônicos portáteis menores consistem, em termos proporcionais, a apenas uma célula da bateria de um automóvel elétrico, fornecendo o máximo de energia possível de forma compacta para esses dispositivos (telefones celulares, *laptops*, tablets, etc) (LIU et al., 2022). A Figura 13 demonstra uma bateria veicular, base da matéria-prima proposta.

Figura 13 – Bateria de lítio veicular



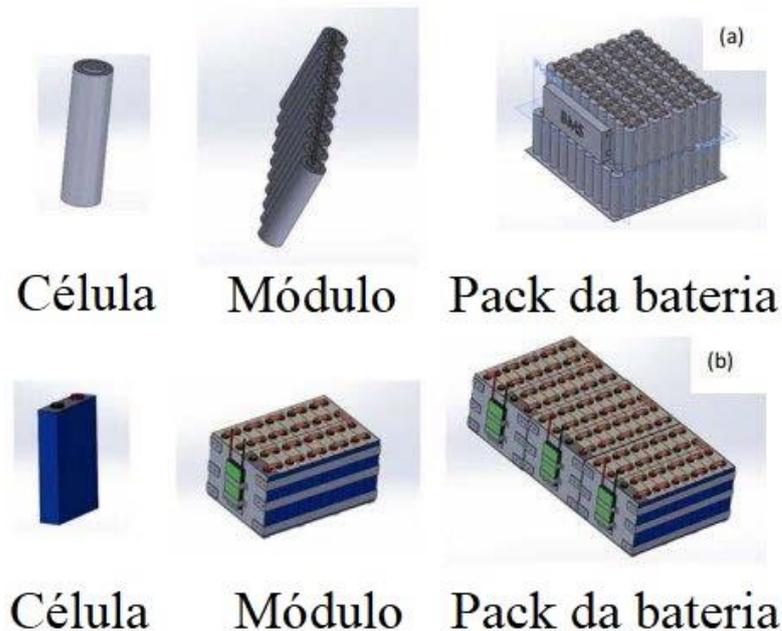
Fonte: Csere (2021).

2.4.1 Divisões da bateria

A bateria de íons de lítio veicular é uma combinação de células conectadas em série e em paralelo com o auxílio de conectores elétricos que servem para atender a requisitos específicos de corrente e tensão (PANDEY; PATNAIK & PATI, 2022). Em síntese, a bateria de íons de lítio pode ser dividida em três níveis. O nível mais abrangente consiste no sistema de bateria, que engloba os módulos de bateria. O nível seguinte se refere aos módulos, compostos por células individuais (terceiro nível) que concebem o armazenamento efetivo de energia (GERLITZ et al., 2021).

O design da bateria pode variar para diferentes fabricantes da indústria conforme a restrição de espaço e o fator de forma da célula necessária, tal como as tecnologias de fabricação disponíveis (PANDEY; PATNAIK & PATI, 2022). A Figura 14 apresenta dois designs típicos de bateria, em “a” com células cilíndricas e em “b” com células prismáticas.

Figura 14 – Baterias de células cilíndricas (A) e de células prismáticas (B)



Fonte: Adaptado de Pandey; Patnaik & Pati (2022).

De forma geral, as células de bateria de íons de lítio consistem em: ânodo, separador, cátodo, eletrólito, os coletores de corrente e de uma carcaça. Diferencia-se entre os tipos de célula: células cilíndricas, prismáticas e em bolsa. A estrutura de um módulo depende, principalmente, do tipo de célula utilizada. Contudo, podem ser identificados seis componentes comuns: célula de bateria, sistema de refrigeração, contator de célula, sistema de gerenciamento de bateria, fixador de células e carcaça para acomodar as células (GERLITZ et al., 2021).

Vale destacar que tais baterias são embaladas em recipientes hermeticamente fechados, para evitar que o eletrólito entre em contato com a atmosfera externa. O material utilizado na embalagem deve ser inerte e não participar de reações colaterais com outros componentes. As LIBs são usualmente vendidas em recipientes rígidos/semirrígidos, selados e tradicionalmente fabricados em alumínio fino, aço inoxidável, ou selos de plástico de alumínio. Os recipientes assumem diversas formas, como o da célula cilíndrica (FOREMAN et al., 2017).

2.4.2 Composição mássica da matéria-prima

Diferentes baterias possuem pequenas diferenças de composições dos materiais, desde o pacote externo até as células. De modo geral, é possível adotar composições mássicas generalizadas para as baterias, sabendo-se que boa parte da composição do sistema de bateria veicular consiste em componentes da célula (DIEKMANN & KWADE, 2018). As discrepâncias nos valores de composição estão diretamente relacionadas com as diferentes capacidades de armazenamento das baterias de diferentes veículos ou eletrônicos, além das diferentes tecnologias envolvidas nestas pelos fabricantes (como LG, Panasonic, Samsung, Sony, Bosch, etc). Como exemplo, alguns BEVs como o Tesla Model X, Tesla Roaster, Nissan Leaf, Tesla Model S e Renault Zoe possuem capacidades de armazenamento de 100, 200, 60, 75 e 60 kWh, com valores na faixa demonstrada (SANGUESA et al., 2021).

A composição adotada consiste nos dados fornecidos pelo modelo GREET® (modelo que avalia completamente os impactos de energia e emissão de tecnologias avançadas de veículos e novos combustíveis de transporte). Esse modelo GREET® (Gases de efeito estufa, emissões regulamentadas e uso de energia em tecnologias) avalia o ciclo de vida completo de componentes de transporte, avaliando várias combinações de veículos e combustíveis em uma base completa do ciclo do combustível e do ciclo do veículo (ARGONNE NATIONAL LABORATORY, 2021). Dessa forma, a composição provém de uma lista de materiais de LIBs para os EVs, incluindo HEVs, PHEVs e BEVs presentes no modelo GREET®. Essa lista é baseada na versão do modelo Battery Performance and Cost (BatPaC) v4.0 do Argonne National Laboratory, que atualiza os dados com base em visitas aos principais produtores de materiais do setor, a literatura e em relatórios técnicos. Essas atualizações representam as composições atuais dos materiais presentes em LIBs para aplicações de transporte e o estado da arte da produção industrial de baterias. Os principais parâmetros das baterias consideradas para a composição mássica estão descritos na Tabela 2. (DAI et al., 2018; WINJOBİ et al., 2020).

Tabela 2 – Propriedades da composição de LIBs conforme o modelo GREET®

| Propriedade | HEV | PHEV-split | PHEV-series | BEV |
|------------------------------------|------------|-------------------|--------------------|------------|
| Potência do pacote de bateria (kW) | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 120,0 |
| Autonomia do veículo (km) | N/A | 32,2 | 64,4 | 482,7 |
| Energia do pacote (kWh) | 2,8 | 7,1 | 14,3 | 70,6 |

Fonte: Adaptado de Winjobi et al. (2020).

Dentro das considerações anteriores, os valores de energia específica do pacote por tipo de cátodo para os diferentes veículos também são considerados para a composição total da bateria. A Tabela 3 demonstra as informações para os tipos de cátodos de BEVs (WINJOBI et al., 2020).

Tabela 3 – Energia específica do pacote para diferentes cátodos de EVs

| Veículo | Energia específica do pacote por tipo de cátodo (Wh/kg) | | | | | | |
|----------------|--|----------------|------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| | LMO | NMC 111 | LFP | NMC 532 | NMC 622 | NMC 811 | NCA |
| HEV | 2,276 | 2,337 | 1,584 | - | - | - | - |
| PHEV-split | 146,5 | 155,1 | 107,1 | - | - | - | - |
| PHEV-series | 153,7 | 173,7 | 128,0 | - | - | - | - |
| BEV | 184,4 | 214,8 | 174,1 | 224,7 | 240,7 | 247,9 | 250,9 |

Fonte: Adaptado de Winjobi et al. (2020).

Os dados da composição do material ativo do cátodo são bem definidos na literatura, justamente pela química do cátodo ser estabelecida. Os valores correspondem a porcentagem mássica e suas concentrações diferem pelo uso de uma razão molar para a sua química (PORZIO & SCOWN, 2021). Esses valores são demonstrados na Tabela 4 e essa porcentagem é considerada para determinar os elementos constituintes dentro da parcela de massa do material do cátodo ativo considerado pela lista de materiais do modelo GREET®.

Tabela 4 – Composição elementar do material ativo do cátodo

| Elemento | NMC 111 (%) | NMC 532 (%) | NMC 622 (%) | NMC 811 (%) | NCA (%) | LFP (%) | LMO (%) |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Li | 7,80 | 2,20 | 7,70 | 7,70 | 7,20 | 4,40 | 3,80 |
| Ni | 19,70 | 8,30 | 35,40 | 47,10 | 48,90 | - | - |
| Mn | 18,40 | 46,60 | 11,10 | 5,50 | - | - | 60,80 |
| Co | 19,80 | 33,40 | 11,90 | 5,90 | 9,20 | - | - |
| Al | - | - | - | - | 1,40 | - | - |
| Fe | - | - | - | - | - | 35,40 | - |
| P | - | - | - | - | - | 19,60 | - |
| O | 34,30 | 9,50 | 33,90 | 33,80 | 33,30 | 40,60 | 35,40 |
| Total | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Fonte: Porzio & Scown (2021).

Os valores de composição estão presentes na Tabela 5 conforme Winjobi et al. (2020), retirada da lista de materiais descrita anteriormente para o modelo GREET®.

Tabela 5 – Composição da matéria-prima para diferentes EVs e cátodos

(continua)

| Componentes da célula (kg) | HEV | | | PHEV-split | | | PHEV-series | | | BEV | | | | | | |
|--|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | LMO | NMC 111 | LFP | LMO | NMC 111 | LFP | LMO | NMC 111 | LFP | LMO | NMC 111 | LFP | NMC 532 | NMC 622 | NMC 811 | NCA |
| Material do cátodo ativo | 6,52 | 4,89 | 5,65 | 16,80 | 12,61 | 14,57 | 33,63 | 25,34 | 29,28 | 166,35 | 125,43 | 145,78 | 121,11 | 105,87 | 89,81 | 97,27 |
| Carbono negro | 0,14 | 0,10 | 0,12 | 0,35 | 0,26 | 0,30 | 0,70 | 0,53 | 0,61 | 3,47 | 2,61 | 3,04 | 2,52 | 2,21 | 4,99 | 2,03 |
| Grafite | 2,22 | 2,50 | 2,90 | 5,69 | 6,41 | 7,44 | 11,36 | 12,86 | 14,93 | 56,19 | 63,67 | 74,44 | 62,07 | 62,52 | 64,60 | 63,87 |
| Aglutinante (PVDF) | 0,18 | 0,23 | 0,18 | 0,47 | 0,60 | 0,46 | 0,93 | 1,20 | 0,91 | 4,61 | 5,96 | 4,56 | 3,79 | 3,48 | 6,31 | 3,33 |
| Cobre | 3,57 | 4,08 | 8,55 | 4,34 | 5,15 | 10,77 | 7,26 | 5,52 | 11,25 | 31,02 | 23,17 | 32,90 | 21,97 | 20,25 | 20,06 | 18,67 |
| Alumínio | 1,88 | 2,09 | 4,27 | 2,41 | 2,74 | 5,48 | 4,15 | 3,25 | 6,19 | 17,00 | 13,13 | 18,50 | 12,38 | 11,50 | 11,45 | 10,70 |
| Eletrólito: LiPF ₆ | 0,38 | 0,36 | 0,66 | 0,83 | 0,77 | 1,37 | 1,63 | 1,41 | 2,44 | 5,30 | 4,55 | 7,23 | 4,13 | 4,01 | 3,96 | 3,83 |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 1,05 | 1,00 | 1,85 | 2,33 | 2,16 | 3,83 | 4,55 | 3,94 | 6,82 | 14,80 | 12,70 | 20,19 | 11,53 | 11,19 | 11,05 | 10,70 |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 1,05 | 1,00 | 1,85 | 2,33 | 2,16 | 3,83 | 4,55 | 3,94 | 6,82 | 14,80 | 12,70 | 20,19 | 11,53 | 11,19 | 11,05 | 10,70 |
| Plástico: Polipropileno | 0,37 | 0,43 | 0,95 | 0,43 | 0,53 | 1,17 | 0,72 | 0,52 | 1,18 | 3,04 | 2,17 | 3,23 | 2,48 | 1,85 | 2,18 | 1,68 |
| Plástico: Polietileno | 0,09 | 0,10 | 0,23 | 0,10 | 0,12 | 0,28 | 0,16 | 0,11 | 0,27 | 0,68 | 0,47 | 0,72 | 0,56 | 0,40 | 0,48 | 0,36 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 0,07 | 0,06 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,14 | 0,19 | 0,17 | 0,24 | 0,70 | 0,62 | 0,82 | 0,58 | 0,55 | 0,56 | 0,53 |
| Subtotal: Célula | 17,5 | 16,86 | 27,29 | 36,16 | 33,6 | 49,64 | 69,84 | 58,79 | 80,96 | 317,95 | 267,21 | 331,57 | 254,63 | 235,02 | 226,49 | 223,67 |
| Componentes do módulo sem célula (kg) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cobre | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,25 | 0,3 | 0,32 | 0,39 | 0,43 | 0,48 | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| Alumínio | 0,76 | 0,74 | 1,10 | 1,86 | 1,77 | 2,55 | 3,53 | 3,12 | 4,38 | 13,94 | 12,48 | 16,13 | 11,76 | 11,32 | 11,42 | 10,94 |
| Plástico: Polietileno | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| Isolamento | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| Parte eletrônica | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 | 1,12 |
| Subtotal: Módulo sem célula | 0,98 | 0,96 | 1,32 | 2,09 | 1,99 | 2,78 | 4,19 | 3,85 | 5,13 | 15,68 | 14,27 | 17,99 | 13,54 | 13,10 | 13,20 | 12,74 |

(conclusão)

| | HEV | | PHEV-split | | | | PHEV-series | | | | BEV | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Componentes do pacote sem módulo (kg) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cobre | 0,43 | 0,44 | 0,49 | 0,45 | 0,49 | 0,53 | 0,26 | 0,32 | 0,35 | 0,08 | 0,09 | 0,10 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| Alumínio | 1,87 | 1,84 | 2,40 | 2,99 | 2,89 | 5,53 | 7,28 | 6,85 | 11,23 | 33,48 | 31,09 | 36,37 | 30,31 | 29,52 | 29,56 | 29,00 | 29,00 |
| Aço | 0,63 | 0,60 | 0,98 | 0,96 | 0,91 | 1,39 | 1,19 | 1,05 | 1,54 | 2,23 | 1,98 | 2,71 | 1,83 | 1,76 | 1,78 | 1,69 | 1,69 |
| Isolamento | 0,21 | 0,22 | 0,25 | 0,25 | 0,27 | 0,36 | 0,4 | 0,43 | 0,58 | 1,06 | 0,99 | 1,16 | 0,97 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,93 |
| Refrigerante | 1,03 | 1,02 | 1,34 | 1,89 | 1,86 | 2,38 | 3,25 | 3,7 | 4,35 | 7,92 | 8,58 | 10,94 | 8,50 | 8,65 | 8,47 | 8,97 | 8,97 |
| Parte eletrônica | 3,72 | 3,74 | 3,82 | 3,98 | 4,03 | 4,05 | 6,52 | 7,26 | 7,46 | 4,36 | 4,43 | 4,50 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,22 | 4,23 |
| Subtotal: Pack sem módulo | 7,89 | 7,86 | 9,28 | 10,52 | 10,45 | 14,25 | 18,9 | 19,6 | 25,5 | 49,14 | 47,16 | 55,79 | 45,91 | 45,18 | 45,06 | 44,90 | 44,90 |
| Total: Bateria | 26,37 | 25,68 | 37,89 | 48,77 | 46,04 | 66,67 | 92,93 | 82,24 | 111,59 | 382,77 | 328,64 | 405,35 | 314,09 | 293,30 | 284,75 | 281,31 | 281,31 |

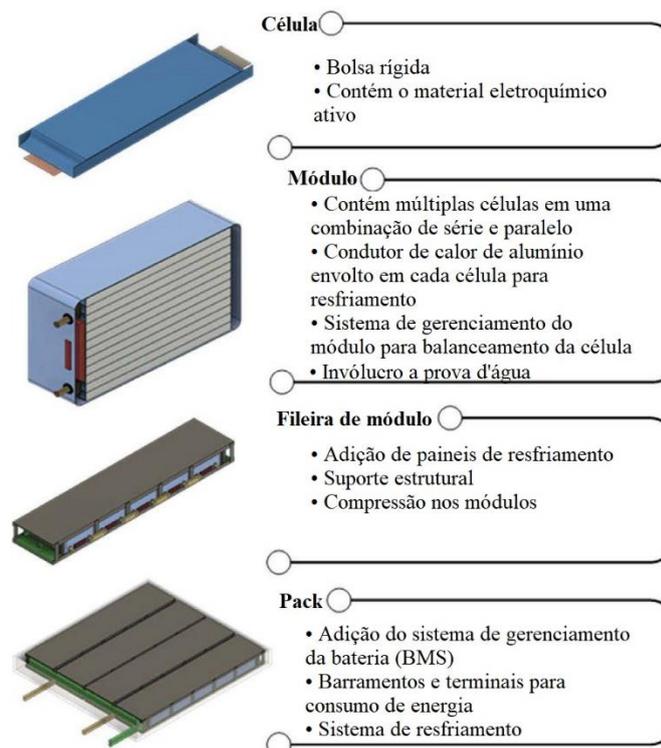
Fonte: Adaptado de Winjobi et al. (2020).

2.4.3 Dimensões das baterias a serem utilizadas no projeto proposto

Assim como a composição mássica dos materiais presentes na bateria, as dimensões de cada bateria com relação às suas diferentes aplicações também mudam. Essa mudança é significativa conforme o tipo de célula e módulo utilizado, porém, os tamanhos do pacote da bateria são razoavelmente semelhantes e proporcionais à massa da bateria. De acordo com Harper et al. (2019), por exemplo, a bateria de um Tesla Model S 85 possui 530 kg com dimensões de 2,83 x 1,77 x 0,127 metros (comprimento x largura x altura). Além disso, baterias de outros modelos de carros elétricos como de um BMW i3 e de um Nissan Leaf possuem em massa, respectivamente, cerca de 235 kg e 294 kg, e em dimensões, respectivamente, cerca de 1,66 x 0,964 x 0,265 e 1,57 x 1,188 x 0,259 metros.

Diante dessa variação nas dimensões da bateria, e dos arranjos e tipos de células, a principal consideração a ser feita é a utilização de uma base com relação ao tamanho para cada tipo de célula em específico. Assim, o *software* Battery Performance and Cost (BatPaC) v5.0 como atualização ao BatPaC v4.0 do Argonne National Laboratory, produz uma base para essas diferentes dimensões determinando o tamanho de baterias das baterias, supondo que elas sejam compostas de módulos contendo células prismáticas e rígidas (AHMED et al., 2022; (KNEHR et al., 2022)). A Figura 15 demonstra o design considerado.

Figura 15 – Design do pacote, módulo e células para as dimensões consideradas



Fonte: Adaptado de Ahmed et al. (2022).

Para fins de projeto de processo, a consideração estende-se apenas ao módulo e ao pacote, já que os processos de pré-tratamento exigem um dimensionamento de equipamentos e transportadores adequados ao tamanho destes. Já o módulo e suas células por serem diretamente cominuídos, o tamanho e a forma prismática rígida das células é irrelevante para o projeto. Dessa forma, os dados do BatPaC v5.0 consideram tamanhos médios para baterias com uma média de 20 células por módulo, bem como 5 módulos por linha com 4 linhas de módulos, totalizando assim 400 células e 20 módulos por pacote. As dimensões do módulo e da célula não consideram a espessura de elementos de construção externos (KNEHR et al, 2022; AHMED et al., 2022). A Tabela 6 demonstra as dimensões de uma bateria genérica.

Tabela 6 – Dimensões de uma bateria genérica com base no BatPaC v5.0

| Dimensão | Célula | Módulo | Pacote |
|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Comprimento (mm) | 303,00 | 311,00 | 2141,00 |
| Largura (mm) | 80,00 | 409,00 | 1324,00 |
| Altura (mm) | 20,00 | 82,00 | 122,00 |

Fonte: Adaptado de Knehr et al. (2022).

3 DEFINIÇÃO DE PRODUTO

3.1 DEFINIÇÃO DOS PRODUTOS A SEREM COMERCIALIZADOS

Segundo Accardo (2021), dentre as diversas tecnologias desenvolvidas para as baterias de carros elétricos o processo proposto tem por objetivo desenvolver uma rota de reciclagem de baterias que objetiva a produção de insumos para a produção de novas baterias do tipo NMC, estas são baterias em que seu cátodo é composto por uma estrutura molecular de Lítio (Li), Níquel (Ni), Manganês (Mn) e Cobalto (Co).

Além dos insumos para a confecção do catodo, o interesse da realização de processo proposto neste trabalho é de reaproveitamento da maior quantidade dos materiais de valor agregado composto da bateria, visando a obtenção do produto de forma eficiente, com alto rendimento e qualidade para o retorno ao fabricante a partir do material descartado. A composição entre as baterias NMC podem diferir pela sua razão molar, isto demanda um ajuste de razão para a composição desejada do produto (ACCARDO, 2021).

De acordo com Knehr et al. (2022), utilizando como fontes de matéria-prima as baterias NMC e baterias NCA, como também podendo ser utilizado no processo baterias de celulares de íons de Lítio, das quais podem estar presentes no processo com o mesmo objetivo de obtenção de material catódico para o NMC111, da qual se trata do NMC na razão de 0,33:0,33:0,33 em relação ao Lítio. Desse modo, o produto final almejado vai de encontro com os materiais de valor agregado, o catodo NMC111 de composição desejada, com o material anódico, grafite, como também em segundo plano a produção de óxidos de alumínio, ferro e cobre, e o tratamento dos efluentes do processo, como plásticos e outros materiais envolvidos.

Pode-se concluir que os principais componentes para o produto estão localizados dentro do módulo, constituído de material catódico e anódico, como também cabos, sistema de gerenciamento de bateria e materiais para o alojamento das células. As células da bateria representam 55% da sua composição total, assim, a expectativa da quantidade de produto segue como base esta porcentagem, das quais o produto final formado, em forma de pó, está pronto para a reutilização na produção de novas baterias NMC (DIEKMANN et al., 2018).

3.2 ANÁLISE DE MERCADO

3.2.1 Análise mundial dos minérios e produção de matérias-primas presentes nas baterias

A composição das baterias demanda de diferentes tipos de matérias-primas das quais, em sua maioria, são necessárias extrações de recursos naturais de diferentes partes do mundo. Com isto, a análise destas extrações se faz necessária para o entendimento dos produtos e sua inserção dentro do mercado consumidor.

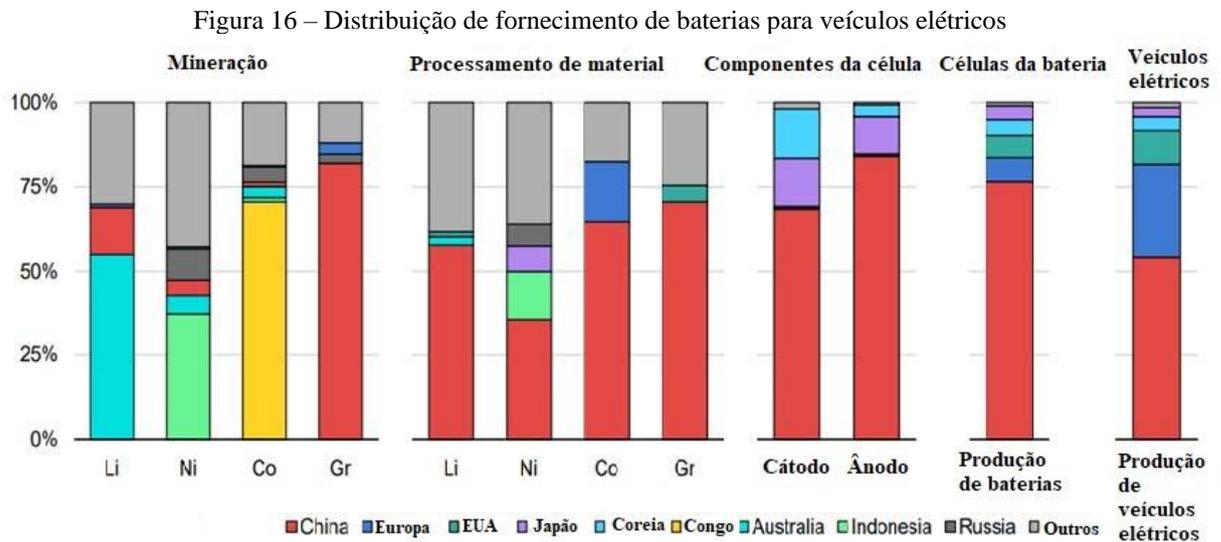
Atualmente a demanda de minérios para a produção de matérias-primas para as baterias é de maior volume e concentração na China, em vista que metade do crescimento global do mercado de carros elétricos em 2021 ocorreu neste país, onde foi registrado a venda de 3,3 milhões de carros elétricos, sendo maior que toda a venda global de EV em 2020. Outro fator importante a se considerar é a menor existência de normativas industriais chinesas, o que torna a produção com menor custo, porém maior impacto ambiental, além disso, a mão de obra barata facilita a instalação de empresas no país (IEA, 2022).

Com isso, a China produz três quartos da produção mundial de baterias de íons de lítio, com capacidade de produção de 70% de cátodos e 85% de ânodos, os principais componentes necessários para a produção das baterias, com expectativas de controle de 70% da capacidade de produção de baterias até 2030. Com a maior parte de recebimento de insumos de lítio, cobalto e capacidade de processamento e refino de grafite localizado nas indústrias chinesas, outros países europeus, que possuem mais de um quarto da montagem global de EV, estão à mercê do mercado chinês de produção, mesmo que estes apresentem 20% da produção de cobalto e entre outros minérios (IEA, 2022).

Os Estados Unidos apresentam uma cadeia menor de fornecimento de baterias, com apenas 10% da produção de EV e 7% da capacidade de produção de baterias. Outros países, como a Coreia do Sul e o Japão, apresentam consideráveis quotas da cadeia de abastecimento e processamento de matérias-primas, por sua produção altamente técnica de cátodos e ânodos, com a Coreia do Sul sendo responsável por 15% do material catódico global e o Japão responsável por 14% da produção do material catódico e 11% da produção do material anódico (IEA, 2022).

Estes países são abastecidos por empresas mineradoras operando dentro de países com grandes reservas de minérios, como Austrália, rica em reservas de níquel e lítio, Bolívia, com a maior reserva de lítio do mundo, Chile, com reservas de lítio, África do Sul, com grandes jazidas de manganês, além do principal local de mineração de Cobalto, que está localizado na

República Democrática do Congo, onde é concentrado 58% da produção mundial de Cobalto. A Figura 16 apresenta um pouco dos dados relacionados à distribuição geográfica global da cadeia de fornecimento das baterias EV.

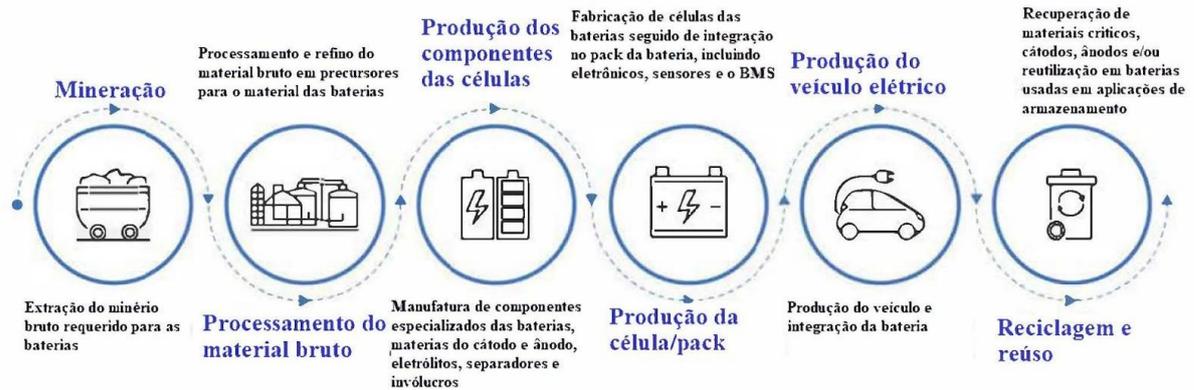


Alguns pontos a serem considerados é de que podemos observar o domínio chinês em relação aos outros países, como também a grande produção de níquel localizado na Indonésia, porém o seu fornecimento ainda não é focalizado na produção de baterias, pertencente em sua maioria para outras demandas de níquel. Os maiores produtores de níquel para baterias se concentram nos países da Rússia, Canadá e Austrália (IEA, 2020). Estes dados são baseados nas análises feitas pelos grupos EV Volumes, US Geological Survey (2022), Benchmark Mineral Intelligence e Bloomberg NEF.

O Brasil apresenta desenvolvimento na mineração de lítio visando se enquadrar neste novo cenário global, com empresas como a Companhia Brasileira de Lítio (CBL) e a AMG Brasil. Novas empresas como a Sigma Lithium também buscam interesse em desenvolver a mineração no país, a localização destas mineradoras e extração do lítio é realizada em pedreiras de pequeno e médio porte em Minas Gerais, como principal região no Vale do Jequitinhonha no nordeste do estado.

Em comparação a mineração a outra forma de obtenção de insumos é demonstrada na Figura 17. Neste sentido, a busca de polos industriais com normativas eficazes, mão de obra qualificada e barata é de interesse para um bom desenvolvimento de uma economia circular.

Figura 17 – Cadeia de fornecimento de baterias EV

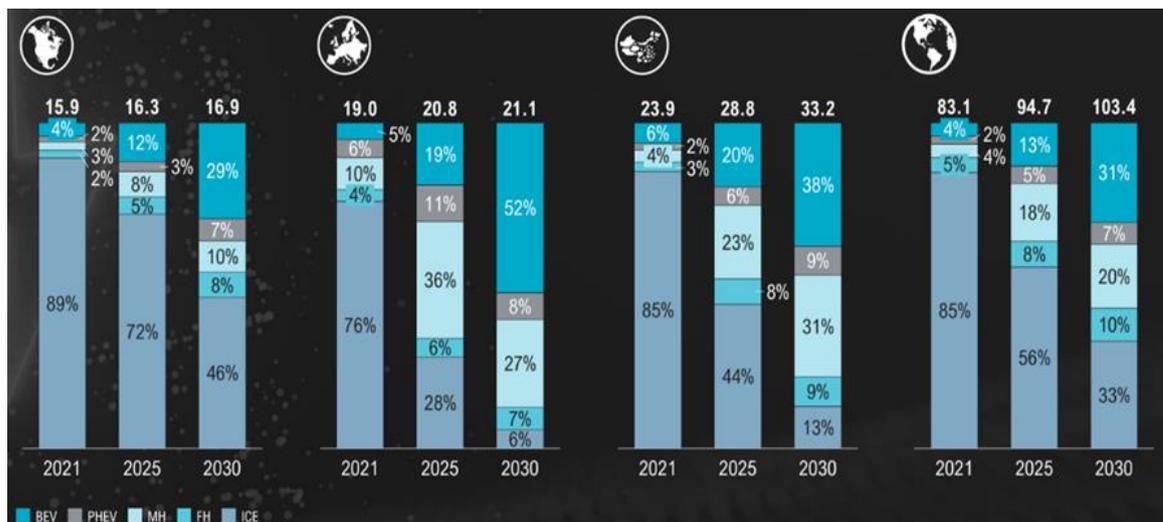


Fonte: Adaptado de IEA (2022).

3.2.2 Análise do mercado em relação aos produtos

De acordo com o produto em destaque, o cátodo do NMC 111, é de interesse observar como é estabelecido o mercado e suas projeções em relação a outras baterias de carros elétricos. Observando a Figura 18 pode-se ver uma projeção futura até o ano de 2030 da demanda de carros elétricos e suas variedades (BEV, PHEV e MH) em comparação conjunta de carros a motor de combustão (ICE) e movidos a hidrogênio líquido (FH) (BERGER, 2022).

Figura 18 – Expectativa de crescimento de 2021 a 2030 no mundo



Fonte: Berger (2022).

Nos gráficos apresentados de distribuição mundial, pode-se observar que se projeta uma média global de 30% dos carros de passeio utilizando apenas baterias elétricas, além de outros veículos que utilizam baterias elétricas como híbridos, diminuindo significativamente a utilização de veículos de combustão, com isto a existência de um aumento de produção de

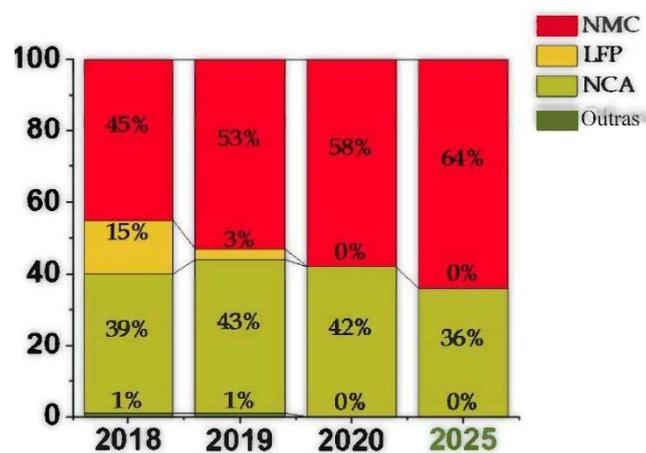
baterias e matérias-primas necessárias para sua construção além da necessidade de energia para o uso destes veículos.

De acordo com Roland Berger (2022), a recuperação dos materiais de baterias usadas demonstra que 95% pode ser recuperado dos materiais catódicos e anódicos, com alto grau de pureza, em pouco tempo comparado com a extração de minérios e em conjunto a menor custo de produção.

Com a necessidade de maior quantidade de matéria-prima, as normativas governamentais visam meios de economia circular para atender o seu consumo. Segundo a Comissão Europeia, em 2035 deve-se conter nas baterias elétricas no mínimo 20% do cobalto, 12% do níquel e 10% do lítio proveniente de processos de engenharia reversa de responsabilidade das empresas produtoras das baterias e de carros elétricos. Neste sentido, a busca de empresas focadas apenas no processo de reciclagem é de grande interesse das empresas automobilísticas, como Tesla, BMW, Volkswagen, como também das empresas de baterias, como LG, Samsung, Panasonic entre outras inúmeras empresas que realizam esses processos de produção (IEA, 2022).

A partir da Figura 19, observa-se também as partes dos mercados para cada bateria de carros elétricos comercializados atualmente, da qual apresenta grande expectativa de crescimento da utilização de baterias NMC e NCA até o ano de 2025. Contudo, deve-se considerar que ao longo dos anos a existência dos avanços tecnológicos podem apresentar novos tipos de baterias, sendo assim, o estudo de mercado, como também dos avanços tecnológicos é necessário para a manutenção do processo, otimização e modificações para se restabelecer dentro do mercado mundial. Uma das inovações esperadas é a utilização de baterias produzidas utilizando cátodos de lítio-enxofre (LSB) (SALGADO et al., 2021).

Figura 19 – Porcentagens em relação ao tipo de bateria presente no mercado



Fonte: Adaptado de Salgado et al. (2021).

O processo de uma economia circular vai além apenas da produção de matérias para as baterias, mas de outras aplicabilidades, já que os recursos necessários para a sua produção empregam diferentes tipos de elementos, assim sendo, a indústria de reciclagem abrange um grande mercado de possibilidades de venda, além de incentivos das empresas relacionadas, como o recebimento de baterias em seu final de vida e até financiamento para o seu processo produtivo (BERGER, 2022).

Seguindo esta lógica, o emprego de normativas de descarte correto, como os auxílios governamentais, segue de forma conjunta para um bom processo de economia circular, sendo assim, países como o Brasil, apresentam grandes potenciais e interesses da indústria pela sua mão de obra barata e também seus acordos comerciais, impulsionando o mercado internacional e possibilitando o desenvolvimento destas tecnologias nestes países.

3.3 AVALIAÇÃO DOS COMPETIDORES

De acordo com Velázquez-Martínez et al. (2019), é grande o número de tecnologias emergentes relatadas na literatura com o objetivo de recuperar componentes de baterias de íons de lítio descartadas. Portanto, as empresas listadas na Tabela 7 estão em fase de planta piloto, em processo de licenciamento, em fase de comercialização, ou já produziram múltiplas patentes.

As empresas aqui apresentadas podem não recuperar/produzir os mesmos componentes, por exemplo, o principal produto do processo Sumitomo-Sony é o óxido de cobalto (II) (CoO) com qualidade suficiente para ser usado na fabricação de baterias de íons de lítio, enquanto que, o processo desenvolvido pela empresa Accurec visa recuperar um precursor catódico Li_2CO_3 e uma liga Co-Ni-Mn (VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019). Contudo, ambas competem pela mesma matéria-prima, baterias de íons de lítio em fim de tempo de vida, para alimentarem seus processos produtivos e obterem seus respectivos produtos.

A Tabela 7 tem como parâmetro para a avaliação de companhias envolvidas na reciclagem de baterias o volume (t/ano) de baterias de íons de lítio processadas por determinado método, sendo ele hidro ou pirometalúrgico ou uma combinação dos dois métodos, ou se a empresa realiza apenas o pré-processamento das baterias. Além de conter sua localização e seu atual estado.

Tabela 7 – Companhias envolvidas na reciclagem de baterias de íons de lítio e volumes processados

| Companhia | Localização | Volume (toneladas/ano) | Método | Estado |
|------------------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|
| ABT | Fernley, NV, EUA | 20000 | Desconhecido | Planejado |
| Retriev (Toxco) | Trail, BC, CAN | 4500 | Hidro | Estabelecido |
| Li-Cycle | Gilbert, AZ, EUA | 10000 | Hidro | Planejado |
| Ganfeng Li | Sonora, MEX | Desconhecido | Desconhecido | Planejado |
| Li-Cycle | Tuscaloosa, AL, EUA | 10000 | Hidro | Planejado |
| Inmetco | Elwood, PA, EUA | 6000 | Piro | Estabelecido |
| Li-Cycle | Rochester, NY, EUA | 5000 | Hidro | Estabelecido |
| Li-Cycle | Kingston, ON, CAN | 5000 | Hidro | Estabelecido |
| Fenix | Whitehall, ING | 10000 | Hidro | Planejado |
| Valdi | Commentry, FRA | 20000 | Piro | Estabelecido |
| Umicore Valeas | Hoboken, BEL | 7000 | Combinação hidro/piro | Estabelecido |
| Recupyl | Grenoble, FRA | 110 | Hidro | Estabelecido |
| Accurec | Krefeld, ALE | 4000 | Combinação hidro/piro | Estabelecido |
| Glencore | Baar, SUI | 3000 | Combinação hidro/piro | Estabelecido |
| Redux | Offenbach, ALE | 50000 | Piro | Estabelecido |
| Northvolt | Frederikstad, NOR | 8000 | Desconhecido | Planejado |
| Fortum | Harjavalta, FIN | Desconhecido | Desconhecido | Planejado |
| Akkuser | Nivala, FIN | 4000 | Combinação hidro/piro | Estabelecido |
| Green Li-ion | Cingapura | Desconhecido | Desconhecido | Planejado |
| Brunp Recycling Technologies | Hunan, CN | 10000 | Combinação hidro/piro | Estabelecido |
| Taisen | Hunan, CN | 6000 | Hidro | Estabelecido |
| GEM | Jingmen, CN | 30000 | Hidro | Estabelecido |
| Guanghua Sci-Tech | Guangdong, CN | 12000 | Pré-processamento | Estabelecido |
| Gotion High-Tech | Hefei, CN | Desconhecido | Desconhecido | Planejado |
| Quzhou Huayou | Quzhou, CN | 40000 | Piro | Estabelecido |
| Tesla | Shangai, CN | Desconhecido | Desconhecido | Planejado |
| SungEel HiTech | Gunsan, COR | 8000 | Hidro | Estabelecido |
| Posco Hy Clean Metal | Gwangyan, COR | 12000 | Desconhecido | Planejado |
| JX Nippon Mining | Tsuruga, JAP | 5000 | Combinação hidro/piro | Estabelecido |
| Dowa Eco-System | JAP | 6500 | Piro | Estabelecido |
| Sumitomo/ Sony | Namie, JAP | 150 | Piro | Estabelecido |
| Envirostream | Melbourne, AUS | 3000 | Pré-processamento | Estabelecido |

Fonte: Adaptado de Baum, Bird, Yu & Ma (2022).

Pela Tabela 7, percebe-se a grande gama de empresas envolvidas na reciclagem de baterias de íons de lítio descartadas. Ainda existem outras, como a Ascend Elements (antiga Battery Resources) e a OnTo Technology, que despontam como tecnologias emergentes (VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019). O processo da Ascend Elements tem como um de seus principais objetivos a obtenção de materiais catódicos NMC a partir de LIBs descartadas, o que faz dela uma das principais competidoras, por utilizar da mesma matéria-prima e produzir o mesmo produto de interesse da REFVI Metal. De forma geral, as vantagens competitivas das outras empresas frente a REFVI Metal é o saber fazer das mesmas, por muitas já estarem estabelecidas e atuantes como a Umicore Valeas.

Ao nível nacional, a multinacional brasileira Tupy, a montadora BMW do Brasil e o Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica do Paraná se uniram em um projeto que visa desenvolver um projeto inédito de reciclagem de baterias de carros elétricos no Brasil. A Tupy é um grupo com fábricas em Joinville (SC) e Betim (MG), além de três subsidiárias no México e em Portugal, atuante na área de fundição e usinagem. Esta parceria recém-formada tem por objetivo buscar um processo mais sustentável do que o atualmente utilizado em vários países para recuperar minerais raros de baterias elétricas, tais como o lítio, o cobalto e o níquel que possuem alta pureza para que possam ser reutilizados na fabricação de novas baterias. Conforme Fernando Cestari de Rizzo, CEO da Tupy, a ideia é a criação de uma indústria nacional que possa, até mesmo, exportar tecnologia e serviços nessa área (ISTO É Dinheiro, 2022).

3.4 CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

O produto principal a ser comercializado consiste em um pó sinterizado de Li, Co, Mn e Ni, de coloração preta, utilizado como cátodo (NMC) para baterias de íons de lítio, este produto obtido é apresentado pela Figura 20.

Figura 20 – NMC em pó sinterizado



Fonte: SMM (2022).

Em formulação química, componentes como Ni, Mn e Co estão em uma razão molar de 0,33:0,33:0,33 para o Li, e estão inseridos na estrutura molecular $\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$, também pode-se apresentar em outras razões molares, como o NMC532, NMC622 e o NMC811 (WANG et al., 2021). O material possui uma densidade de 4770 kg/m^3 , e apresenta em generalidades uma distribuição granulométrica de D10, D50 e D90 de, respectivamente, $5,0 \mu\text{m}$, $10,5 \mu\text{m}$ e $20 \mu\text{m}$ (AL-SHAMMARI & FARHAD, 2022).

O produto obtido pela rota tecnológica escolhida de sinterização possui uma boa morfologia esférica, com uma capacidade de descarga na faixa de 160–200 Ah/kg. A qualidade do produto final depende da etapa de aglomeração mineral do produto em forma de cátodo (sinterização/calcinação). Além disso, o ajuste correto de razão faz com que o material tenha melhor agrupamento e qualidade para seu desempenho final. O efeito da temperatura e do tempo de sinterização influenciam diretamente na capacidade de descarga do produto, que é um indicador da capacidade de armazenamento da bateria (YANG, LEIL & XU, 2022; MALIK, CHAN & AZIMI, 2022).

Após a sinterização, o produto já apresenta sua forma em pó, pronto para passar por uma análise laboratorial caso necessário, para definir suas propriedades e composição, acertado de que esteja apto para ser embalado e transportado para ser comercializado. A intenção de venda do produto é para a produção de baterias de carros elétricos utilizando o cátodo NMC, mas também pode ser utilizado em outras aplicações onde existe a necessidade do uso do cátodo.

3.5 MODELO DE NEGÓCIOS

O Modelo de Negócios é um esquema utilizado para implementar a estratégia de uma empresa através das estruturas organizacionais, dos processos e dos sistemas. Ele pode ser melhor descrito por nove componentes básicos (segmentos de clientes, proposta de valor, canais, relacionamento com clientes, fontes de receita, recursos principais, atividades-chave, parcerias principais e estrutura de custos) que demonstram a lógica de como uma organização pretende gerar valor. Os nove componentes cobrem as quatro principais áreas de um negócio, sendo eles os clientes, a oferta, a infraestrutura e a viabilidade financeira (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011).

Figura 21 – Modelo de Negócios estilo Canvas

| Parcerias Principais | Atividades-Chave | Proposta de Valor | Relacionamento com Clientes | Segmento de Clientes |
|---|---|--|---|--|
| - Fornecedores de insumos; - Transportadoras. | - Produção de materiais catódicos NMC sinterizados fazendo uso de baterias de íons de lítio ao fim de sua vida útil como matéria-prima. | - Produção de materiais catódicos NMC sinterizados utilizando de baterias de íons de lítio descartadas como matéria-prima para a fabricação de novas baterias; | - Representação comercial; - Presença em feiras especializadas; - Criação do site; - Redes sociais; - Serviço de atendimento ao consumidor (SAC). | - B2B (<i>business to business</i>). |
| | Recursos Principais | - Diminuir a dependência da indústria por matéria-prima virgem. | Canais | |
| | - Matéria prima (baterias de íons de lítio descartadas); - Recursos necessários no processo de extração e obtenção do produto desejado; - Energia elétrica; - Utilidades; - Equipamentos; - Mão-de-obra especializada. | | - Site; - Telefone; - E-mail; - Representantes comerciais. | |
| Estrutura de Custos | | Fontes de Receita | | |
| - Custos fixos: salários, energia elétrica, licenças e manutenção dos equipamentos. - Custos variáveis: matérias-primas e transportes. - Custos gerais: marketing, treinamento e capacitação de colaboradores, pesquisa e desenvolvimento e investimentos para a melhoria contínua do processo. | | - Venda de materiais catódicos NMC sinterizados. | | |

Fonte: Autores (2022).

3.5.1 Segmentos de Clientes

O componente Segmentos de Clientes determina os diferentes grupos de pessoas ou organizações que uma certa empresa busca atingir e servir (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). O produto é vendido a outras empresas, logo, vendido na forma de B2B (*business to business*) que significa “negócio para negócio” em tradução literal, ou seja, comércio

estabelecido entre empresas, que utilizem os materiais catódicos NMC sinterizados obtidos a partir de baterias de íons de lítio descartadas para o fabrico de novas baterias.

3.5.2 Proposta de Valor

O componente Proposta de Valor descreve o pacote de produtos e serviços que geram valor para um determinado Segmento de Clientes (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). Desse modo, a fim de contribuir com um modelo de economia mais circular de forma a diminuir a dependência da indústria por matéria-prima virgem, a empresa aqui disposta tem como proposta de valor a produção de materiais catódicos NMC sinterizados utilizando de baterias de íons de lítio descartadas como matéria-prima destinados à fabricação de novas baterias.

3.5.3 Canais

O componente Canais detalha como uma empresa se comunica e atinge seus Segmentos de Clientes para entregar uma Proposta de Valor (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). Para tanto, a REFVI Metal contará com um site pelo qual serão divulgados produtos e informações para contato como e-mail e telefone, além de apresentar a organização e divulgar novidades. Ademais, haverá representação comercial para um maior contato com os clientes e prospecção de novos compradores por meio de visitas.

3.5.4 Relacionamento com Clientes

O componente Relacionamento com Clientes define os tipos de relação que uma empresa concebe com Segmentos de Clientes determinados (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). Este tópico se refere aos meios pelos quais a empresa conquistará e manterá a relação com os seus clientes. A permanência de clientes será realizada principalmente via representantes comerciais que atenderão às necessidades dos clientes para com a aquisição dos produtos, assim como para sanar dúvidas, receber críticas e sugestões e oferecer o suporte pós-compra. A conquista de novos clientes se dará por visitas a potenciais compradores e por presenças em feiras especializadas. Além disso, ocorrerá ampla divulgação da empresa e dos seus produtos via internet, tanto pelo site quanto por redes sociais, como o LinkedIn, onde se dará ênfase ao aspecto da economia circular promovida pelo empreendimento. Também haverá o serviço de atendimento ao consumidor (SAC) que poderá ser realizado via *e-mail* ou telefone.

3.5.5 Fontes de Receita

O componente Fontes de Receita retrata o dinheiro que uma empresa gera a partir de cada Segmento de Clientes (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). Em suma, corresponde aos meios pelos quais o empreendimento gerará lucro, sendo ele a venda de materiais catódicos NMC sinterizados e dos materiais obtidos a partir da desmontagem das baterias, como tampas, circuitos eletrônicos e parafusos, que serão vendidos em contêineres para outras recicladoras. Assim como, o grafite e outros componentes como os coletores de corrente de alumínio e de cobre triturados.

3.5.6 Recursos Principais

O componente Recursos Principais descreve os recursos julgados mais importantes para fazer com que o Modelo de Negócios seja funcional (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). São eles os recursos necessários à toda cadeia produtiva do produto em questão, dentre eles estão as baterias de íons de lítio descartadas utilizadas como matéria-prima, sendo elas provenientes das mais diversas fontes, como celulares, *laptops*, carros elétricos, patinetes elétricos, dentre outros, mas com o foco voltado para os carros elétricos, assim como todos os recursos necessários à extração dos componentes deste material para a produção do produto desejado. Outros recursos julgados essenciais são a energia elétrica e as utilidades do processo. Além disso, equipamentos e mão-de-obra especializada compõem os recursos principais.

3.5.7 Atividades-Chave

O componente Atividades-Chave define as ações mais essenciais que uma empresa deve fazer para que seu Modelo de Negócios funcione (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). As principais atividades exercidas referem-se à produção de materiais catódicos NMC sinterizados recorrendo a baterias de íons de lítio ao fim de sua vida útil como matéria-prima.

3.5.8 Parcerias Principais

O componente Parcerias Principais apresenta a rede de fornecedores e os parceiros que colocam o Modelo de Negócios em funcionamento (OSTERWALDER & PIGNEUR, 2011). As principais parcerias englobam os fornecedores de matérias-primas e demais insumos ao processo, e transportadoras. Busca-se criar parcerias com empresas que captem e

vendem/repassem baterias de íons de lítio descartadas, a exemplo das baterias de carros elétricos, têm-se as fabricantes de automóveis como possíveis fornecedoras e que são passíveis de estabelecerem parcerias, a exemplo do consórcio de economia circular dos Grupos Solvay e Veolia com o Grupo Renault para a reciclagem de metais de baterias de veículos elétricos (SINPROQUIM, 2021). Assim como a parceria já citada da Fundação Tupy com a BMW do Brasil. Outra parceria vista como chave são as transportadoras responsáveis pela distribuição do produto acabado.

De acordo com a lei brasileira n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, artigo 33, item II, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de pilhas e baterias são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante o retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos. Desse modo, a empresa aqui disposta estará apta a promover a logística reversa de baterias de íons de lítio descartadas das fabricantes das mesmas por meio da formação de parcerias como as já existentes e comentadas, de tal forma que os materiais gastos possam ser inclusive captados sem custo algum de compra do mesmo em vista da necessidade que as empresas teriam deste serviço para com cumprimento da legislação vigente.

3.5.9 Estrutura de Custos

O componente Estrutura de Custos mostra todos os custos envolvidos na operação de um Modelo de Negócios (OSTERWALDER; PIGNEUR, 2011). Envolve todos os custos para a operação do negócio, dentre eles estão os custos fixos e os custos variáveis. Dentre os custos fixos cabe citar os salários, a energia elétrica, as licenças e os custos com a manutenção dos equipamentos, enquanto que nos custos variáveis estão presentes principalmente as despesas com matérias-primas, que variam com a movimentação do mercado, e com transportes que variam conforme o fluxo da produção. Além disso, existem os gastos gerais, como os de marketing, treinamento e capacitação de colaboradores, pesquisa e desenvolvimento e investimentos para com a melhoria contínua do processo produtivo.

3.6 MATÉRIA-PRIMA NECESSÁRIA

As baterias dos tipos NMC e NCA, anteriormente exploradas, são as principais matérias-primas para o desenvolvimento do processo. Desde o recebimento, o material irá

passar por uma série de etapas a fim de separar seus os componentes e permitir que, ao final do processo, seja possível obter o material catódico NMC, a ser utilizado na produção de novas baterias. As demais matérias-primas necessárias ao projeto são de uso substancial e outras opcionais, de acordo com as características desejadas no produto final.

3.6.1 Carbonato de dimetil

O carbonato de dimetil (DMC) será utilizado como extrator no processo de separação entre o eletrólito e os demais componentes da célula. Por ser um dos solventes orgânicos presentes no eletrólito, o DMC tem afinidade com o material e será eficiente para diluição e transporte do mesmo. Nesse sentido, as principais características do extrator são os pontos de fusão e de ebulição iguais a 4,6 e 91 °C, respectivamente, e densidade igual a 1,071 g/cm³ a 25 °C (DING; XU; JOW, 2000).

3.6.2 Peróxido de hidrogênio

Nos processos de lixiviação, o peróxido de hidrogênio (H₂O₂) atua como agente redutor, favorecendo a formação dos sulfatos metálicos. Tratando-se de um ácido fraco de caráter corrosivo, o projeto irá atentar aos materiais adequados que devem ser utilizados na confecção de reatores e tubulações. A solução a ser adquirida, contendo 50% de H₂O₂, tem densidade igual a 1,1915 g/cm³ a 25°C (PEROXY BAHIA, 2013) e pontos de fusão e ebulição de -52 e 115 °C (MANCHESTER CHEMICAL, 1999).

3.6.3 Ácido sulfúrico

Também utilizado na etapa de lixiviação, o ácido sulfúrico (H₂SO₄) reduz o pH do meio, promovendo a liberação de íons H⁺ e SO₄²⁻. Sendo assim, os metais oxidados são complexados em sulfatos, possibilitando a continuidade do processo. O H₂SO₄ é comercializado em uma faixa de 95 a 97%, com densidade igual a 1,8302 g/cm³ a 20 °C e pontos de fusão e ebulição de 10,3 e 337 °C (MOSAIC, 2020).

3.6.4 Hidróxido de sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) é empregado nas etapas de precipitação, promovendo a alteração do pH do meio aquoso. Com isso, são formados hidróxidos metálicos que precipitam de acordo com a solubilidade, que dependem do pH e da temperatura de operação. O hidróxido de sódio é adquirido em forma de granulado sólido de coloração branca, tendo pontos de fusão e ebulição iguais a 318 e 1.390 °C, respectivamente (SIGMA-ALDRICH, 2010).

3.6.5 Sulfatos e carbonatos

Diferentes sulfatos e carbonatos serão adicionados ao processo, quando necessário, para ajuste de razão de acordo com as características desejadas no produto final. Sendo assim, na Tabela 8 estão descritas as principais características dos materiais a serem utilizados.

Tabela 8 – Propriedades físico-químicas a 25 °C

| Matéria-prima | Densidade (g/cm³) | Ponto de fusão (°C) | Ponto de ebulição (°C) |
|-------------------------|-------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Sulfato de cobalto (II) | 2,03 | 96,8 | 420 |
| Sulfato de níquel (II) | 2,07 | - | - |
| Sulfato de manganês | 3,25* | 700 | <850 |
| Carbonato de sódio | 2,53* | 854 | 1.600 |
| Carbonato de lítio | 2,11 | 618 | - |

*Em 20 °C.

Fonte: RESIMAPI (2011); SIGMA-ALDRICH (2010).

3.7 PREÇOS DOS COMPONENTES DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

De acordo com dados de Knehr et al. (2022), o custo dos seguintes tipos de bateria e suas respectivas composições, apenas para o material ativo, em dólares americanos e reais brasileiros (1 dólar equivalendo 5,25 reais, em 22 de setembro de 2022), está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores para diferentes tipos de material ativo e suas composições

| Abreviação | Composição | Custo [\$/kg] | Custo [R\$/kg] |
|-------------------|--|----------------------|-----------------------|
| NCA | $\text{LiNi}_{0,80}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$ | 26,00 | 136,52 |
| NMC333 | $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ | 25,50 | 133,89 |
| NMC532 | $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,3}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ | 24,00 | 126,02 |
| NMC622 | $\text{LiNi}_{0,6}\text{Mn}_{0,2}\text{Co}_{0,2}\text{O}_2$ | 25,00 | 131,27 |
| NMC811 | $\text{LiNi}_{0,8}\text{Mn}_{0,1}\text{Co}_{0,1}\text{O}_2$ | 26,00 | 136,52 |

Fonte: (Knehr et al., 2022).

Uma tabela com todos os valores da bateria dispostos separadamente, além de um valor total para cada tipo de bateria, encontra-se na Tabela 10. Na tabela, a maioria dos itens estão apresentados com unidades por quilograma e por metro quadrado em dólares americanos. Portanto, o preço total também é mostrado desta forma, para 1 quilograma ou 1 m².

Tabela 10 – Valores para diferentes tipos de bateria

(continua)

| Eletrodo positivo | Unidade | Material | NMC111 | NMC811 | NCA | NMC532 | NMC622 |
|---|-------------------|------------------------------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|
| Material ativo | \$/kg | - | 25,50 | 26,00 | 26,00 | 24,00 | 25,00 |
| Condutor aditivo | \$/kg | Carbono preto | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 7,00 |
| Aglutinante | \$/kg | PVDF | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 |
| Solvente do aglutinante | \$/kg | - | 2,70 | 2,70 | 2,70 | 2,70 | 2,70 |
| Eletrodo negativo | | | | | | | |
| Material ativo | \$/kg | - | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| Condutor aditivo | \$/kg | - | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 7,00 |
| Aglutinante | \$/kg | Genérico | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| Solvente do aglutinante | \$/kg | - | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Componentes adicionais | | | | | | | |
| Folha do coletor de corrente positivo | \$/m ² | Al | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Folha do coletor de corrente negativo | \$/m ² | Cu | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| Separadores | \$/m ² | - | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,90 |
| Eletrólito | \$/L | - | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 | 10,00 |
| Célula | | | | | | | |
| Terminal positivo | \$/kg | Al | 2,41 | 2,41 | 2,41 | 2,41 | 2,41 |
| Terminal negativo | \$/kg | Cu | 8,64 | 8,64 | 8,64 | 8,64 | 8,64 |
| Container da célula | \$/kg | Polietileno-Al-Polipropileno | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| Condutor de calor | \$/kg | Al | 2,41 | 2,41 | 2,41 | 2,41 | 2,41 |
| Módulo | | | | | | | |
| Módulo de gerenciamento do sistema (MMS) | \$ | - | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |

(conclusão)

| Eletrodo positivo | Unidade | Material | NMC111 | NMC811 | NCA | NMC532 | NMC622 |
|----------------------------------|-------------------|-----------------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|
| Interconector de células | \$/kg | Cu | 8,72 | 8,72 | 8,72 | 8,72 | 8,72 |
| Painel interconector | \$/kg | Polipropileno | 2,30 | 2,30 | 2,30 | 2,30 | 2,30 |
| Terminal do módulo | \$/kg | Cu | 8,64 | 8,64 | 8,64 | 8,64 | 8,64 |
| Materiais do módulo | \$/kg | Aço | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 2,40 | 2,40 |
| Pack | | | | | | | |
| Organizador dos packs | \$/kg | Al | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,33 | 1,33 |
| Almofada entre os módulos | \$/kg | Elastômero | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Interconector dos módulos | \$/kg | Cu | 8,84 | 8,84 | 8,84 | 8,84 | 8,84 |
| Barramentos | \$/kg | Cu | 8,68 | 8,68 | 8,68 | 8,68 | 8,68 |
| Painéis de resfriamento | \$/kg | Aço | 2,80 | 2,80 | 2,80 | 2,80 | 2,80 |
| Tubos de resfriamento | \$/kg | Aço inoxidável | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 | 8,00 |
| Terminais do pack | \$/kg | Cu | 8,88 | 8,88 | 8,88 | 8,88 | 8,88 |
| Protetor de aço | \$/kg | Aço | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 | 1,40 |
| Protetor de alumínio | \$/kg | Al | 2,81 | 2,81 | 2,81 | 2,81 | 2,81 |
| Isolantes | \$/m ² | - | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 | 3,00 |
| TOTAL | | | 176,24 | 177,24 | 177,24 | 175,24 | 176,24 |

Fonte: Knehr et al. (2022).

4 DEFINIÇÕES DO PROCESSO

4.1 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

4.1.1 Etapas de pré-tratamento

4.1.1.1 Descarregamento

As baterias são descarregadas antes da etapa de desmontagem manual para garantir a segurança do colaborador, eliminando o risco de choques elétricos, além de que as faíscas têm a possibilidade de ocasionar a ignição de compostos orgânicos voláteis durante o processo de cominuição, podendo causar incêndios (NEUMANN et al., 2022).

O objetivo da etapa de descarregamento é reduzir a tensão residual das baterias de íons de lítio para uma faixa segura ($<0,6$ V). As baterias de íons de lítio descartadas exibem uma grande quantidade de tensão residual. Logo, para garantir a segurança de pessoas e de equipamentos, tais baterias devem ser descarregadas para garantir que a tensão esteja dentro da faixa segura (ZHANG, 2022). Para o descarregamento de baterias, são apresentadas as seguintes técnicas comuns: descarregamento elétrico, salmoura ou solução salina, processo criogênico e processo térmico.

4.1.1.1.1 Descarregamento por aterramento elétrico

No descarregamento elétrico, as baterias descartadas são conectadas a um resistor em um circuito fechado para liberar a eletricidade remanescente. O descarregamento elétrico apresenta dificuldade operacional e risco de segurança relativamente baixo. Por este método, também existe a possibilidade de recolher a eletricidade reciclada para compor o custo de capital (HU & XU, 2021).

4.1.1.1.2 Salmoura ou solução salina

O método mais utilizado para descarregar baterias de íons de lítio é a imersão em solução salina. As soluções salinas mais comumente usadas incluem soluções de cloreto de sódio, sulfato de sódio e hidróxido de sódio. Das soluções mencionadas, a imersão em solução de cloreto de sódio é o método mais aplicado, logo, o mais comum (ZHANG, 2022).

Tal método envolve uma taxa de descarregamento extremamente baixa e geralmente são necessárias mais de 24 h para atingir uma tensão residual inferior a 1 V. Ademais, íons cloreto são de difícil remoção e podem ser introduzidos na solução de lixiviação, o que pode afetar negativamente as etapas subsequentes de descontaminação e recuperação do produto. Por outro lado, o uso de NaOH pode induzir a corrosão do revestimento de alumínio (ZHANG, 2022). Para este caso, o desmonte das baterias favorece a eficiência de descarregamento das mesmas, porém isto representa um risco em potencial (HU & XU, 2021).

Independentemente do processo de descarregamento definido, as células das baterias descartadas podem possuir vazamentos. Tais vazamentos, tem o potencial de contaminar o eletrólito utilizado no processo de descarregamento, podendo, assim, a bateria reagir com a solução eletrolítica gerando efluentes altamente poluentes e gases de escape durante o descarregamento. Embora as áreas dos vazamentos possam ser detectadas por medidores de corrente ou tensão, onde a energia é distribuída de forma desigual, ainda é potencialmente perigoso para o operador devido à sobrecarga. Ressalta-se que a gestão das águas residuais nocivas e gases de escape gerados durante o descarregamento é uma dificuldade encontrada na reciclagem de baterias de íons de lítio descartadas que utilizam de salmouras ou soluções salinas no processo de descarregamento das baterias (ZHANG, 2022; HU; XU, 2021).

4.1.1.1.3 Processo criogênico

O tratamento criogênico é um método em que as baterias de íons de lítio são expostas a temperaturas em torno de -200 °C, logo, a mobilidade iônica diminui de forma significativa evitando reações exotérmicas. Em suma, o nitrogênio líquido é usado para solidificar o eletrólito e diminuir a reatividade dos componentes ativos da bateria. Isso também reduz a chance de combustão e explosão durante o processo de desmontagem. De qualquer forma, a escalabilidade do processamento criogênico é limitada, pois consome uma quantidade consideravelmente alta de energia para manter a baixa temperatura, resultando em custos altos (WERNER, PEUKER & MÜTZE, 2020; HU & XU, 2021).

4.1.1.1.4 Processo térmico

Por meio do processamento térmico, a célula será solta e fácil de desembalar. Como exemplo de pré-tratamento térmico. Lee e Rhee (2003) trataram amostras de baterias de íons

de lítio de LCO em um forno mufla a 150 °C por 1 h. Em seguida, as amostras foram desmontadas com o auxílio de um moinho de alta velocidade.

Contudo, se a célula não tiver sido totalmente descarregada, pode ocorrer fuga térmica. Além disso, é relatado que o eletrólito é irreversivelmente danificado e que se tem a liberação de gás nocivo. Por meio deste processo é possível degradar a cola e remover componentes voláteis de forma simultânea, porém o eletrólito não poderá ser recuperado e ocorre a produção de HF (HU & XU, 2021).

4.1.1.2 Desmontagem

4.1.1.2.1 Desmontagem manual

A desmontagem de sistemas de baterias de íons de lítio para aplicações automotivas é um processo complexo, logo, demorado e custoso, devido a uma ampla variedade de projetos de baterias, componentes flexíveis como cabos e perigos potenciais causados por alta tensão e produtos químicos contidos nas células da bateria. Todos esses fatores devem ser considerados ao planejar o(s) processo(s) de desmontagem e as estações de trabalho apropriadas (WEGENER et al., 2014). Em decorrência das muitas variantes de produtos e a inexistência de padrões no projeto de baterias, além de que os projetos detalhados das baterias geralmente não estão disponíveis para o reciclador, as baterias de carros elétricos são desmontadas manualmente (CHEN et al., 2015).

Em geral, existem dois tipos diferentes de sistemas de baterias automotivas. Os sistemas de bateria para veículos totalmente elétricos e os sistemas de baterias de veículos híbridos. A construção geral de ambos os tipos é semelhante. As células da bateria são montadas em módulos/pilhas e conectadas com condutores. Essas pilhas são então conectadas às linhas ou diretamente às baterias. De forma conjunta com os componentes para aquecimento/refrigeração, o sistema de gerenciamento da bateria e o *display* da bateria são colocados em uma caixa isolada e formam, com os eletrônicos de energia, o sistema de bateria (WEGENER et al., 2014).

Em seus estudos, Wegener *et al.* (2014) desenvolveu uma metodologia para a desmontagem de um sistema de bateria tendo como material de estudo o sistema de bateria do Audi Q5 Híbrido, considerando a desmontagem do nível do sistema até o nível do módulo/pilha. A desmontagem apresentada é realizada totalmente de forma manual com a ajuda de

ferramentas manuais simples, como diferentes chaves de fenda para diferentes tipos de parafuso utilizados nas juntas.

Em suma, de acordo com Chen et al. (2015), existem 6 passos básicos necessários para a desmontagem de um sistema de bateria. Sendo eles:

1. Remoção da tampa;
2. Corte das conexões mecânicas entre os componentes do sistema (módulos e eletrônicos) e a base da bateria;
3. Remoção das conexões mecânicas entre os componentes do sistema (módulos e eletrônicos) e a base da bateria;
4. Remoção dos componentes eletrônicos;
5. Remoção dos módulos da bateria;
6. Desmontagem dos módulos da bateria e remoção das células da bateria.

É salientado que, no projeto dos postos de trabalho são exigidas medidas de proteção adequadas ao trabalhador e ao meio ambiente como ferramentas isoladas eletricamente, luvas, calçados e cobertura de piso, para situações em que a bateria ainda apresente alguma carga. Outro risco de segurança vem do eletrólito nas células da bateria, como no caso de uma célula ser danificada durante a desmontagem, expondo o eletrólito que pode causar incêndio ou liberar gases tóxicos. Logo, os postos de trabalho devem estar equipados com um sistema de ventilação adequado, extintores de incêndio (químico seco ou dióxido de carbono), kits de emergência, máscaras de gás e uma unidade de extração (WEGENER et al., 2014).

4.1.1.2.2 Desmontagem automatizada

Para recuperar elementos valiosos de materiais ativos de cátodo, as baterias devem ser separadas e trituradas, e o principal desafio é garantir a desmontagem automatizada, segura e eficaz, especialmente para o grande número de baterias esperadas para aparecer no futuro (ZHANG, 2022). A colaboração homem-robô é um conceito promissor para desmontagem, especialmente devido à natureza complexa e imprevisível da desmontagem de baterias de carros elétricos (HELLMUTH et al., 2021). Por outro lado, a desmontagem totalmente automatizada é inviável de ser implementada agora, devido às muitas variantes de baterias e o volume relativamente pequeno de cada variante (CHEN et al., 2015). É ressaltado que o custo com robótica e implementação de *softwares* sofisticados para a operação dos robôs é alto, inviabilizando o uso de robôs agora.

4.1.1.3 Redução de tamanho: moagem

A operação unitária da redução de tamanho ou cominuição de sólidos por britadores e moinhos é uma operação industrial muito importante que envolve muitos aspectos da tecnologia de pó (AUSTIN & TRASS, 1997). Os materiais são submetidos às devidas tensões, tais tensões resultam na deformação ou fratura do material, ou seja, ocorre a redução do tamanho de unidades sólidas grandes em unidades de menor tamanho (KUMAR & YEDHU KRISHNAN, 2020). Os britadores são máquinas que efetuam fragmentação grosseira, enquanto que os moinhos são máquinas que fornecem produtos finos (GOMIDE, 1983).

A fragmentação de sólidos visa, na grande maioria dos casos, aumentar a área externa para tornar mais rápido o processamento de sólidos. Com frequência, o objetivo mais importante da moagem é favorecer a mistura íntima de dois ou mais sólidos. O produto será tanto mais uniforme quanto menor for o tamanho das partículas a serem misturadas. Assim, quando é necessário um alto índice de homogeneização, a moagem fina do material se torna essencial (GOMIDE, 1983). Existem muitos tipos de máquinas para redução de tamanho, e quase todos os métodos de quebrar em pedaços que se possa pensar foram incorporados em um britador ou moinho (AUSTIN & TRASS, 1997).

A moagem pode ocorrer tanto por via úmida quanto por via seca. Por exemplo, alguns dispositivos, como moinhos de bolas, aceitam entradas de matéria seca ou úmida, como no caso de pastas. Na prática, verifica-se que um tamanho mais fino pode ser obtido por moagem úmida do que por moagem a seco (GREEN & SOUTHARD, 2019).

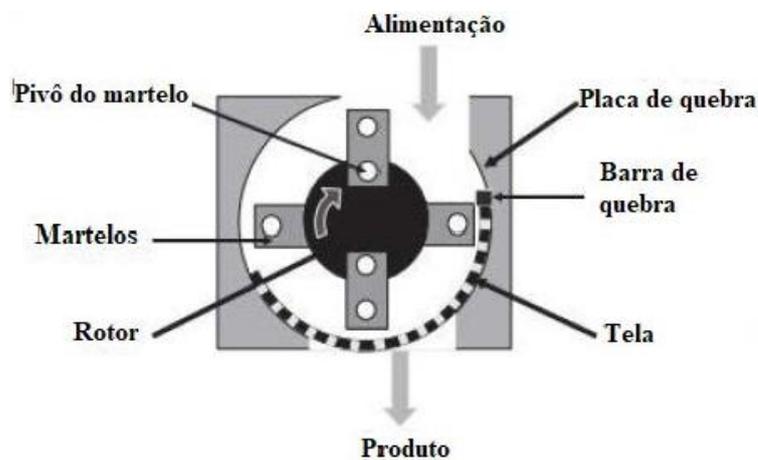
Com relação às baterias de íons de lítio, a moagem tem como objetivo primário a remoção dos materiais de revestimento das folhas metálicas coletoras de corrente usando tensão de impacto, cisalhamento e/ou dobra. Tais modos de estresse mecânico levam à cominuição seletiva dos materiais de revestimento frágeis de um lado e a deformação das folhas de metal dúctil pelo outro. Um objetivo secundário da moagem é a deformação seletiva e compactação das folhas coletoras na forma de partículas esféricas compactadas (WERNER et al., 2022).

O terceiro objetivo da moagem é o refinamento da fração de massa negra formada, ou seja, a redução do seu tamanho, liberando os materiais ativos do ânodo do ligante restante para maior eficiência de separação na separação física posterior ou nos processos de refino hidrometalúrgicos. Intensidades de alta tensão por cisalhamento de compressão e impacto são aplicadas para gerar tamanhos de partículas na faixa de 5-20 μm . A moagem é realizada principalmente por moinhos de impacto rotativo horizontais como os moinhos de martelo. Dificilmente, a moagem é realizada por moinhos de impacto verticais (WERNER et al., 2022).

4.1.1.3.1 Moinho de martelos

A redução de tamanho no moinho de martelos é realizada por martelos capazes de girar em torno de um eixo. O material inserido no moinho é destruído pela colisão com os martelos e as paredes do próprio moinho. Ele conta com uma grade ou tela na parte inferior por meio da qual o material cai após ter sido suficientemente reduzido. Ajusta-se o tamanho do produto alterando o tamanho das grades/telas e alongando ou encurtando os braços do martelo (KASPER, JUCHNESKI & VEIT, 2015). A Figura 22 apresenta um exemplo de moinho de martelos.

Figura 22 – Moinho de martelos

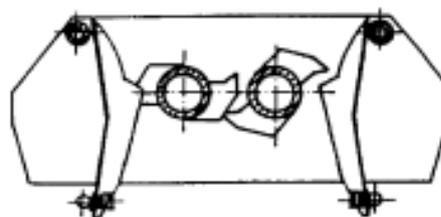


Fonte: Adaptado de Shi et al. (2003).

4.1.1.3.2 Shredders

Shredders (trituradores) são máquinas capazes de lidar com uma ampla variedade de materiais, como papel, sucata de alumínio, baterias de chumbo, sucata eletrônica, dentre outros. Os trituradores rotativos, por exemplo, são equipamentos que atuam em baixas velocidades (SCHUBERT & BERNOTAT, 2004). A Figura 23 apresenta um exemplo de triturador rotativo.

Figura 23 – Triturador rotativo



Fonte: Schubert & Bernotat (2004).

Cada cortador de rotação contrária tem ganchos que arrastam o material a ser triturado para baixo. O tamanho das partículas é controlado principalmente por dois fatores: largura do cortador e número de ganchos em cada cortador. Para o controle do tamanho dos particulados, peneiramento e múltiplas passagens pelo triturador podem ser precisos (HAYES, 2021).

4.1.2 Operações com o eletrólito

Um eletrólito pode ser visto como um componente inerte na bateria e deve demonstrar estabilidade contra a superfície do cátodo e do ânodo (sem alteração química e propício a processos Faradaicos). Geralmente, para atender os critérios mínimos, eles devem apresentar as seguintes características: ser um bom condutor iônico e isolante eletrônico (transporte fácil de Li^+), ter baixa degradabilidade por processos eletroquímicos, ser inerte a outros componentes da célula, ser termicamente estável (ponto de fusão e de ebulição fora das faixas de trabalho da bateria), ter baixa toxicidade, ser baseado em química sustentável (baixo impacto no processamento) e ter baixo custo. A maioria dos eletrólitos usados em baterias de íons de lítio comerciais são soluções não aquosas, nas quais o sal de hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6) está dissolvido em misturas de carbonatos orgânicos de: carbonato de etileno (EC), dimetilcarbonato (DMC), carbonato de propileno (PC), carbonato de dietila (DEC) e/ou carbonato de etil metil (EMC) (LI et al., 2016).

4.1.2.1 Extração líquido-líquido

De modo geral, um sistema de extração líquido-líquido é composto por três componentes: o soluto (material a ser extraído), o transportador (ou agente de extração), e o solvente (que deve ter uma baixa solubilidade no transportador). O líquido rico em transportador que sai do extrator é referido como a fase de refinado, e o líquido rico em solvente que sai do extrator é a fase de extrato. O solvente pode ser a fase dispersa ou a fase contínua, e o tipo de equipamento utilizado pode determinar qual fase deve ser dispersa na outra fase (COUPER et al., 2012).

Para o eletrólito, o objetivo da extração é a recuperação dos componentes eletrolíticos, garantindo um teor aceitável de fluoreto em etapas subsequentes. Para a extração líquido-líquido do eletrólito com uma extração por solvente, o agente de extração (que é o transportador), é misturado com o solvente (sendo considerado os carbonatos orgânicos e o sal eletrolítico presentes no sólido cominuído), e o soluto (que é o sal eletrolítico). O soluto então

é transferido para a fase do transportador, liberando a fase sólida não solúvel para processos subsequentes com a diminuição da concentração do soluto. Posteriormente, o material sólido é seco com o objetivo de evaporar o agente de extração (geralmente um orgânico leve com ponto de ebulição baixo) remanescente, e sem o soluto. Assim, apenas pequenas concentrações do sal condutor permanecem no material da bateria que é transferida para os processos mecânicos, hidro e pirometalúrgicos, para recuperar os compostos de valor metálico (HAAS et al., 2018).

Segundo Haas et al. (2018), a extração do eletrólito com solventes presentes nas LIBs permite: mais segurança aos processos seguintes (remoção de sais condutores tóxicos e produtos de decomposição), evitar a formação de uma atmosfera explosiva nas etapas subsequentes (solventes), recuperar os compostos de valor do eletrólito e os revestimentos dos eletrodos. Ainda segundo o autor, alguns tipos de transportadores (ou agentes de extração) podem ser utilizados, como o etanol, acetona, acetonitrila e o DMC, sendo o último o de melhor eficiência para a extração do íon salino.

4.1.2.2 Secagem

A operação de secagem de materiais sólidos particulados, pastas e suspensões representa uma parte importante de diversos processos. Uma combinação de calor, gás e agitação é essencial para a operação, sendo está dividida em dois modos: direta ou indireta. No método de secagem direta (secagem por convecção), o produto é colocado em contato direto com o meio de secagem, que pode ser gás quente ou ar (leito fluidizado). Grandes quantidades de gás são necessárias para a transferência da energia necessária. No método de secagem indireta (condução ou secagem por contato), o produto úmido (úmido em solvente orgânico) é separado do meio de secagem. A unidade de secagem pode consistir de um rotor formando a superfície de aquecimento de contato indireto montado em um invólucro estacionário ou rotativo. O método indireto utiliza vapor saturado ou superaquecido, resultando em baixo consumo de energia e mínimo impacto ambiental (MURI, 2019).

Para a aplicação na reciclagem de baterias de íons de lítio, é uma opção interessante para a retirada do eletrólito presente no meio particulado. Os fragmentos de baterias secas facilitam o manuseio em todas as etapas de reciclagem, pois o material úmido adere às paredes do equipamento, aumentando problemas de limpeza e de transporte entre as operações de reciclagem. Além disso, em processos físicos de separação, os materiais úmidos aderem e dificultam a separação de diferentes componentes, e também podem ocasionar problemas de

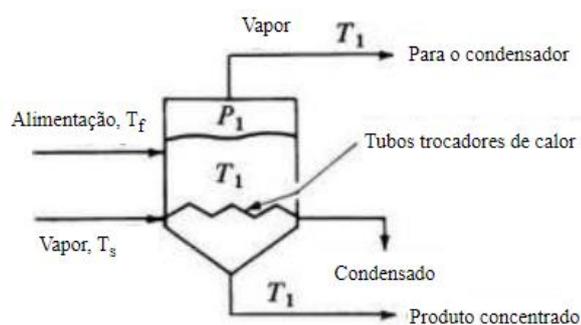
segurança, já que o material úmido pode formar uma atmosfera explosiva, resultando no aumento dos custos do equipamento para proteção contra explosão (STEHMANN et al., 2018).

De acordo com Stehmann et al. (2018), efeitos como temperaturas mais altas aumentam a secagem e oferecem uma maior taxa de secagem ao eletrólito, sendo necessárias para remover componentes de alto ponto de ebulição. Porém, essas altas temperaturas podem levar à decomposição do sal condutor e aumentar a demanda de energia. Já os efeitos de redução de pressão diminuem a temperatura de secagem necessária (redução do ponto de ebulição do eletrólito).

4.1.2.3 Evaporação

Na evaporação, o calor é adicionado a uma solução para vaporizar o solvente. Geralmente, o calor é fornecido pela condensação de um vapor em um dos lados de uma superfície metálica, com o líquido em evaporação do outro lado. O tipo de equipamento utilizado depende principalmente da configuração da superfície de transferência de calor e dos meios empregados para promover a agitação ou circulação do líquido. A evaporação tem como objetivos concentrar uma solução, reduzindo custos, conservando a solução e/ou removendo o solvente de uma solução (GEANKOPLIS, 2018). A transferência de calor é o fator mais importante no projeto de um evaporador, já que a superfície de aquecimento representa a maior parte do custo do mesmo (GREEN & SOUTHARD, 2019). Os evaporadores de simples efeito são utilizados quando a capacidade necessária é pequena, o vapor é barato, o material é tão corrosivo que são necessários materiais de construção muito caros ou o vapor está tão contaminado que não pode ser reutilizado (GEANKOPLIS, 2018). A Figura 24 apresenta um diagrama simplificado de um evaporador de simples efeito.

Figura 24 – Evaporador de simples efeito



Fonte: Adaptado de Geankoplis (2018).

4.1.3 Transporte de sólidos

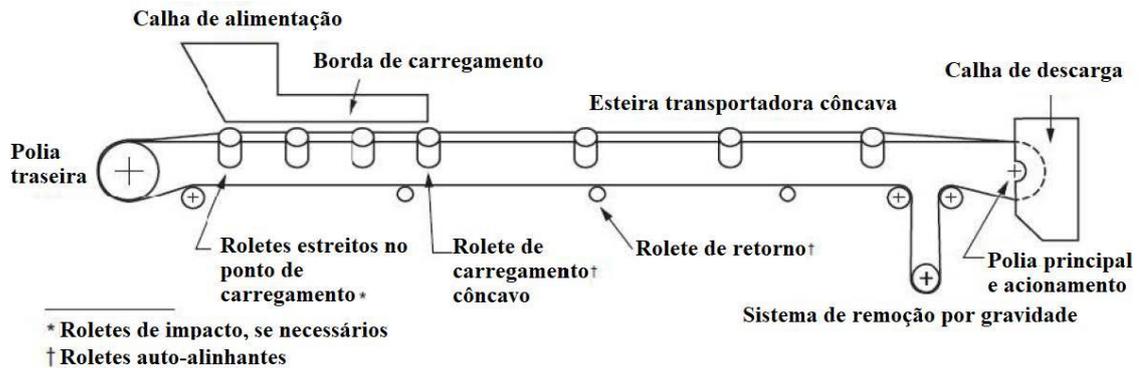
Os sólidos precisam ser movidos por vários motivos, entre eles a descarga de matérias-primas sólidas em reatores ou operações distintas, transferência de sólidos de um secador para uma classificação de sólidos, unidades de redução de tamanho da partícula ou diretamente para o armazenamento e carregamento de recipientes ou módulos de saída (HIPPLE, 2017).

4.1.3.1 Transportadores de correia

Os transportadores de correia são muito utilizados no transporte de materiais sólidos. Eles são constituídos por uma esteira contínua, apoiada em roletes e acionada por uma ou mais polias rotativas, possuindo vários outros componentes (se necessário). O sistema é carregado em uma extremidade e descarregado na outra extremidade. As roldanas que suportam a parte da correia que transporta a carga e se deslocam da cauda até a cabeça são chamadas de roldanas de transporte. Os transportadores podem ser projetados para operar em quase qualquer ambiente, sendo capazes de transportar até 40.000 t/h em velocidades de até 10 m/s (NELSON & RICHINS, 2019; ASPAUGH, 2008).

Esse método de transporte de sólidos possui algumas vantagens como: baixo custo de instalar e operar, alta segurança, confiabilidade e versatilidade. Embora existam vários tipos de transportadores de correia, o transportador de correia em forma de calha é de longe o mais utilizado, sendo muito versátil e podendo transportar uma grande variedade de materiais em distâncias curtas ou longas. Os custos anuais de operação para esse tipo de transporte são estimados em 2% do custo de aquisição do equipamento (estrutura e acionamento) mais 5% do custo da correia (NELSON & RICHINS, 2019). A Figura 25 demonstra o modelo do transportador.

Figura 25 – Transportador de sólidos de correia transportadora



Fonte: Adaptado de Nelson & Richins (2019).

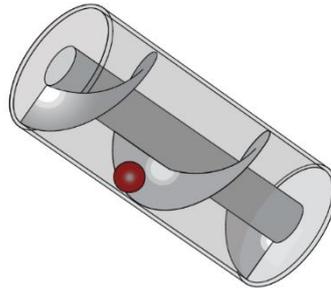
4.1.3.2 Transportador de correia vertical: elevador

Os elevadores consistem em um transportador de correia vertical, sendo anexados a corrente recipientes espaçados uniformemente para a elevação do material. A maioria das unidades são completamente fechadas, existindo vários projetos de elevador usados para manusear materiais com diferentes propriedades. Esses projetos variam em seu método de carregamento, descarregamento e no formato e layout das caçambas. Os elevadores de caçamba são mais adequados para manusear materiais finos, porém com outros materiais, outros tipos de granulometria também podem ser manuseados com o tipo adequado de transportador (FAYED & SKOCIR, 1997).

4.1.3.3 Transportadores helicoidais

Os transportadores helicoidais são dispositivos tubulares com um parafuso helicoidal giratório interno que move o sólido de um lugar para outro. As variáveis de projeto incluem: a velocidade do parafuso, folga da parede entre o parafuso e a parede, fluxo de transporte, necessidades de resfriamento ou aquecimento na camisa do transportador helicoidal, e questões abrasivas do mecanismo de transporte. Se o sólido possuir um potencial significativo de produção de poeira e outros riscos, pode haver sistemas de segurança, inertização e monitoramento, sendo esta a principal vantagem desse transportador. Porém, o consumo de energia de um transportador helicoidal dependerá de várias propriedades do sistema, incluindo o diâmetro do túnel cilíndrico e do parafuso. Os custos também serão afetados pela densidade de sólidos, a quantidade de rotações da rosca e o ângulo de inclinação (MILLS, 2016; HIPPLE, 2017). A Figura 26 demonstra o princípio rotativo helicoidal do transportador.

Figura 26 – Transportador helicoidal



Fonte: Hipple (2017).

4.1.4 Separação e classificação física

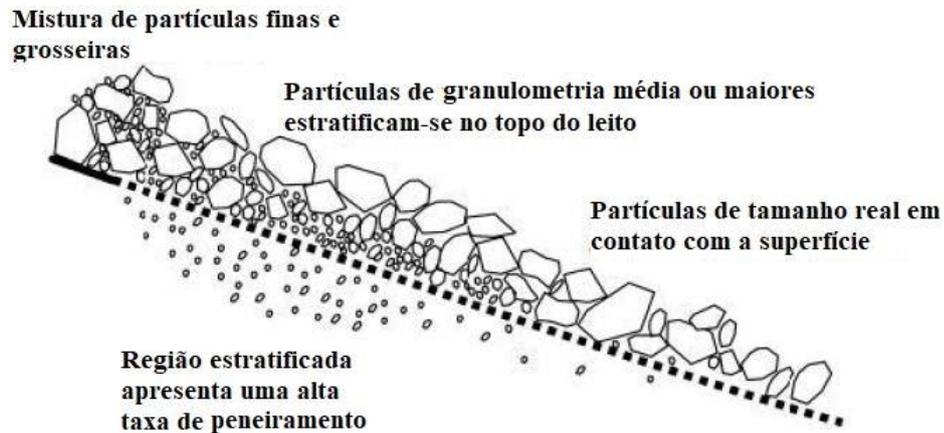
O processamento mecânico inclui as etapas de classificação granulométrica, separação por gravidade, separação magnética, separação eletrostática, entre outras. Em geral, os métodos físicos são mais eficientes em termos energéticos e economicamente mais acessíveis do que os métodos térmicos, químicos e metalúrgicos. Esse processamento se tornou indispensável devido ao número crescente de LIBs descartadas, principalmente pelo desmantelamento de todos os componentes não ser uma opção a longo prazo devido às dificuldades da industrialização em larga escala. Assim, etapas de separação física são alternativas devido à sua simplicidade, eficiência, flexibilidade, escalabilidade e alto rendimento (WERNER et al., 2022).

4.1.4.1 Peneiramento vibratório e/ou rotativo

Uma das formas mais simples e mais utilizada para separação de partículas com diferentes granulometrias se dá através de peneiras. Essas consistem de superfícies perfuradas sobre as quais as partículas são removidas, e as partículas menores passam pela peneira de acordo com sua granulometria. Os principais equipamentos utilizados para peneiramento são peneiras vibratórias, peneiras rotativas e máquinas vibratórias com injeção de ar, sendo a primeira a mais comum. As peneiras vibratórias são as máquinas de peneiramento mais importantes e versáteis para aplicações de processamento mineral. Elas possuem uma superfície de peneiramento retangular com alimentação e descarga nas extremidades opostas, podendo realizar separações de tamanho de 300 mm até 45 μ m. Em sistemas de várias superfícies de peneiramento, a alimentação é introduzida na peneira grossa superior, com diminuição sucessiva do espaço caindo para dimensões inferiores de peneira, produzindo assim uma

variedade de frações de tamanho a partir de uma única peneira (WILLS & FINCH, 2016; WERNER et al., 2022). A Figura 27 demonstra o princípio de operação das peneiras vibratórias.

Figura 27 – Princípio de operação das peneiras vibratórias.



Fonte: Adaptado de Wills & Finch (2016).

Já o peneiramento rotativo confere um movimento giratório e vertical combinado, sendo usado para aplicações de peneiramento fino, úmido ou seco, para partículas de até 40 μm . Os componentes básicos consistem em um ninho de peneiras apoiados em uma mesa que é montada em molas sobre uma base, com um motor responsável por produzir o movimento giratório horizontal. O movimento vertical é transmitido pelos pesos inferiores, que balançam a massa móvel em torno de seu centro de gravidade, produzindo um movimento circular de inclinação para a peneira, e os pesos superiores produzindo o movimento giratório horizontal. As peneiras rotativas, ou trommel, geralmente são configuradas para produzir frações de vários tamanhos, sendo usados normalmente em aplicações de baixa capacidade (WILLS & FINCH, 2016).

Na reciclagem de LIBs, a peneiração é comumente utilizada para separar os materiais de revestimento dos eletrodos (material ativo) dos demais componentes. Assim, partículas grossas como as do material do invólucro externo, separador e plásticos, bem como folhas coletoras de corrente parcialmente ou totalmente limpas, são retidas acima da peneira, enquanto partículas finas são separadas abaixo. A peneiração requer material seco em relação aos solventes orgânicos remanescentes do eletrólito da bateria, e o tamanho do corte influencia especialmente a recuperação de materiais de revestimento e o volume de impurezas como cobre e alumínio das folhas coletoras (WERNER et al., 2022).

4.1.4.2 Separadores e classificadores gravimétricos

Classificadores gravitacionais são mais adequados para classificação mais grosseira e são frequentemente usados como equipamento de desidratação. As partículas são classificadas pela diferença de suas velocidades de sedimentação ou posições de queda. Eles podem ser categorizados em dois grandes grupos, dependendo da direção do fluxo da corrente de transporte: fluxo horizontal (classificação de sedimentação) e fluxo oposto (classificação de contra-fluxo). O tamanho de partículas empregadas nesses classificadores é geralmente maior que cerca de 100 μm . Eles são simples de operar e têm baixos requisitos de energia, mas o custo do equipamento é maior em comparação com os ciclones e possuem geralmente baixa capacidade (YOSHIDA & FUKUI, 2020; WILLS & FINCH, 2016).

4.1.4.2.1 Separação centrífuga

A taxa de sedimentação de partículas suspensas em uma corrente de gás pode ser aumentada se forem empregadas forças centrífugas. No separador de ciclone, por exemplo, o gás é introduzido tangencialmente em um recipiente cilíndrico e o gás é retirado através de uma saída central na parte superior. Os sólidos são lançados para fora contra a parede cilíndrica do recipiente, e então se afastam da entrada de gás, sendo coletados na base cônica. Este tipo de separador é muito eficaz, sendo o separador mais comumente usados (CHHABRA & BASAVARAJ, 2019).

Para a aplicação na reciclagem de LIBs, a gravidade é insuficiente para separar eficientemente o revestimento de alta densidade (cobre), do revestimento de baixa densidade (alumínio) e da mistura de pós, devido aos pequenos tamanhos de partículas desses materiais. Portanto, o campo de força centrífuga é usado em aplicações úmidas ou secas. A separação centrífuga em ar ou água é comumente usada no processamento de recursos primários, mas também pode ser aplicada na separação dos pós reciclados (WERNER et al., 2022).

4.1.4.2.2 Outros tipos de separadores

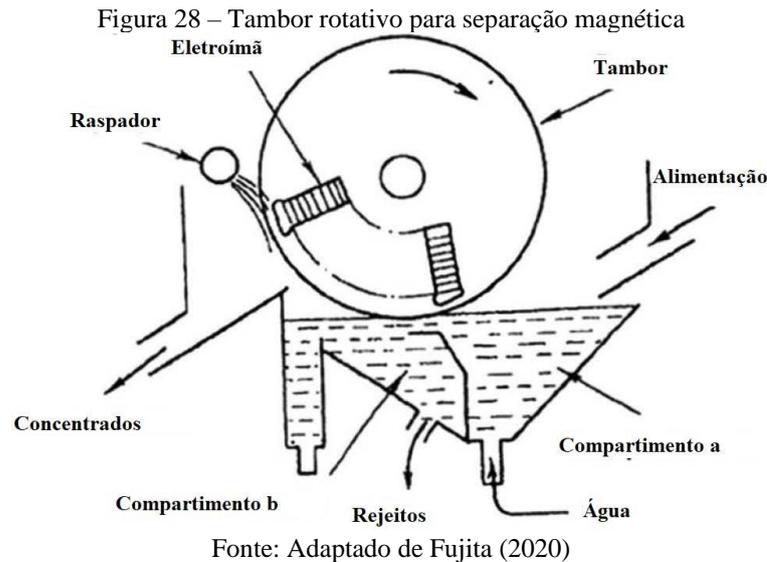
Os ciclones promovem um movimento em espiral dentro do corpo do dispositivo, podendo ser usados como classificadores destinados a separar partículas finas em um fluido. A classificação com ciclones é geralmente reservada para a separação de partículas com base no tamanho. De modo geral, os classificadores de ciclone podem tratar alimentações secas ou alimentações úmidas (FLINTOFF & KNORR, 2019; WILLS & FINCH, 2016). Também pode-

se citar a separação por leito fluidizado, que é um processo em que o material pode ser separado por meio de um tubo vertical por onde o fluido passa em uma velocidade controlada e as partículas menores ou menos densas são transportadas na corrente de fluido enquanto as partículas grandes descem contra a corrente ascendente (COULSON & RICHARDSON 'S, 2019; WILLS & FINCH, 2016). E por último, os leitos em zigue-zague consistem em um tubo vertical projetado em forma de zigue-zague com um fluxo de ar de baixo para cima da mesma forma que um leito fluidizado, porém com mudanças de direções no leito para deixar a separação mais intensa (WERNER et al., 2022; KAYA, 2019).

4.1.4.3 Separação magnética

A principal aplicação dos separadores magnéticos é na remoção de impurezas fortemente magnéticas (como ferro residual), ou a concentração de um componente valioso fortemente magnético. O princípio básico da separação magnética baseia-se na diferença de momentos magnéticos dos materiais, possuindo diferentes forças na presença de campos magnéticos. O uso deste princípio é simples em misturas onde se sabe que existe um componente magnético, no qual o material pode ser separado usando eletroímãs elétricos ou ímãs permanentes fortes, sendo o processo geralmente binário e resultando em separações de alta eficiência (IRANMANESH & HULLIGER, 2017; YAVUZ et al., 2008).

Geralmente são usados tambores rotativos com ímãs fixos em seu interior, girando em contato com as partículas flutuantes ou suspensas no compartimento. Em seguida, as partículas magnéticas são removidas à medida que são atraídas e capturadas na superfície do tambor pela força magnética. Partículas não magnéticas são transportadas para o próximo compartimento (FUJITA, 2020). A Figura 28 apresenta um tambor rotativo para a separação magnética.



4.1.4.4 Separação eletrostática

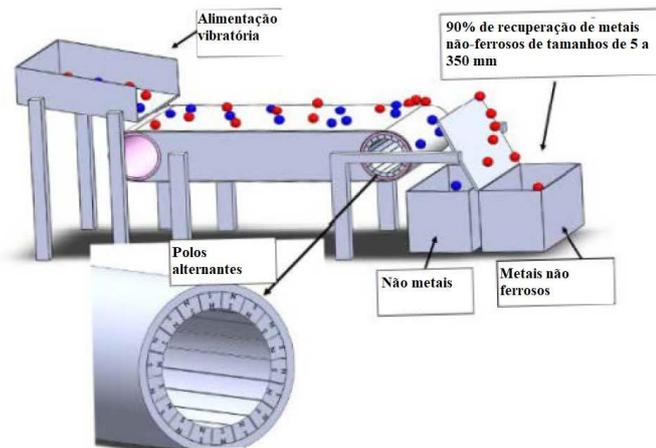
A separação eletrostática baseia-se na diferença de condutividade elétrica das partículas sólidas ou pelas suas características de triboeletricidade, e é indicada para a separação de materiais com grande diferença de condutividade. Existem três processos na separação de partículas pelo uso de força eletrostática: separação por corrente parasita, separação por efeito corona e separação triboelétrica. Esses processos dependem fortemente da umidade relativa, sendo essa a principal desvantagem da utilização dessas operações. Se a umidade é adsorvida na superfície de uma partícula de material isolante, a condutividade elétrica aparente da partícula pode aumentar e ocasionar distúrbios ao processo (TANOUE & MASUDA, 2020).

4.1.4.4.1 Separação por corrente parasita

A separação por correntes parasitas é utilizada para a recuperação de metais não ferrosos de misturas de materiais cujas frações magnéticas são removidas previamente por um separador magnético. Depois que a separação magnética removeu a fração ferrosa de um fluxo de material, a etapa de processamento mais comum a ocorrer em seguida é a separação por correntes parasitas. O mecanismo funciona expondo partículas condutoras não ferrosas a um campo magnético variável no tempo, que dá origem a correntes elétricas ao longo de seus volumes (FUJITA, 2020). O movimento relativo entre a corrente e o campo magnético dá origem a uma força, chamada força de Lorentz, que subsequentemente desvia as partículas de sucata não ferrosa para longe da parte não metálica. O processo tende a funcionar bem na extração de partículas de alumínio, cobre, latão e zinco, podendo ser feito com um rendimento

de muitas toneladas por hora. É possível recuperar até 90% de material não ferroso utilizando essa técnica de separação (SMITH, NAGEL & RAJAMANI, 2019). A Figura 29 demonstra o esquema de funcionamento de um separador por corrente parasita.

Figura 29 – Esquema de funcionamento de um separador por corrente parasita

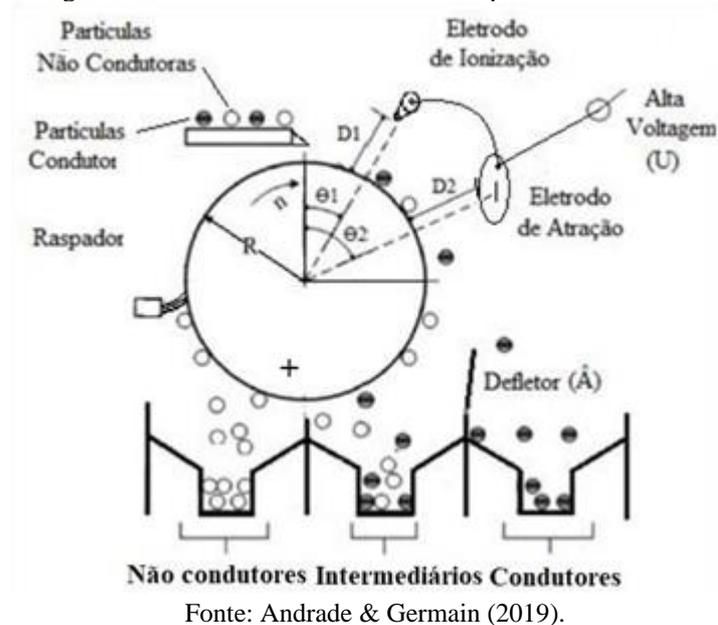


Fonte: Adaptado de Smith, Nagel & Rajamani (2019).

4.1.4.4.2 Separação por efeito corona

O princípio da separação por efeito corona consiste na aplicação de uma alta voltagem de forma que ocorra a ionização do gás redor do metal, e então os íons negativos são acelerados para a superfície aterrada do equipamento (indicado pelo símbolo “+” na Figura 30). Todas as partículas são carregadas negativamente pelo gás ionizado. Porém, as partículas condutoras assim que entram em contato com o rolo são rapidamente descarregadas, ficando carregadas positivamente e assim são atraídas pelo eletrodo de atração. Já as partículas dielétricas mesmo em contato com o rolo positivamente carregado, não conseguem conduzir a carga para o rolo e assim ficam aderidas ao rolo (TANOUE & MASUDA, 2020). Os separadores podem ser dimensionados e projetados utilizando apenas um rolo separador. Dessa forma, quando perdem carga suficiente, as partículas condutoras seguem uma trajetória normal para longe do rolo, com base na velocidade transmitida, o que caracteriza a separação. As partículas não condutoras são retiradas por uma escova, pois tendem a não perder sua carga (SILVEIRA et al., 2017). A Figura 30 demonstra o funcionamento de um rolo separador eletrostático de alta voltagem.

Figura 30 – Funcionamento de um rolo separador eletrostático



4.1.4.4.3 Separação triboelétrica

A separação triboelétrica depende da tendência de certos materiais em trocar elétrons durante o contato entre si (fricção), de modo que um componente fique carregado negativamente enquanto o outro fique carregado positivamente. O processo de carregamento depende de muitos fatores, como velocidade de contato, temperatura e, principalmente, condições atmosféricas predominantes (umidade). As vantagens técnicas da separação triboelétrica incluem fácil operação, baixo consumo de energia e de água, e pouco uso de produtos químicos. No entanto, o processo é pouco compreendido, o que dificulta a seleção de parâmetros de processo, além de ser altamente sensível às diferenças de propriedades dos materiais processados (SILVEIRA et al., 2018; MIRKOWSKA et al., 2016; ANDRADE & GERMAIN, 2019).

4.1.5 Processos hidrometalúrgicos

O processo de extração de metais utilizando soluções aquosas é definido como recuperação hidrometalúrgica. O processo inclui extração de metais valiosos de matérias-primas residuais por meio de lixiviação em solução aquosa, purificação de soluções aquosas contendo metais valiosos, entre outros. Em particular, a recuperação hidrometalúrgica de baterias de íons de lítio refere-se à extração e reciclagem de metais estratégicos, como Li, Ni, Co e Mn, dependendo das várias propriedades de metais relevantes em solução. Ela se tornou

gradualmente a principal abordagem na indústria de reciclagem de materiais metálicos não-ferrosos, devido à sua aplicabilidade universal e sua natureza econômica. Atualmente, mais de 80% dos resíduos de baterias de íons de lítio, por exemplo, são recuperados hidrometalurgicamente (ZHANG, 2022).

As grandes vantagens da hidrometalurgia como processo de recuperação de metais são: o baixo consumo energético na extração (pouco ou nenhum combustível é necessário), a possibilidade de tratar uma variedade de matérias-primas, a necessidade de equipamentos relativamente simples e baratos (baixo custo capital), aplicação a uma alta faixa escalável de recuperação (larga ou pequena escala) e a fácil regeneração dos reagentes utilizados. Porém, os processos hidrometalúrgicos sofrem duas desvantagens principais: em temperatura ambiente ou moderada, a taxa de produção é moderadamente lenta em comparação com outros métodos de extração, e a utilização de matérias-primas enxutas e complexas geram grandes volumes de soluções diluídas, que exigem grande espaço para manuseio e assim, gerando problemas de tratamento/descarte dos efluentes (SHAMSUDDIN, 2021).

4.1.5.1 Lixiviação de metais

A lixiviação realiza a tarefa de dissolver o metal presente em um material ou concentrado, geralmente por uma solução aquosa do agente lixivante. Em uma situação ideal, a lixiviação dá origem a duas frações: uma é o material sem grande valor agregado, que é livre de minerais valiosos (resíduo, impurezas, etc), enquanto a outra é a solução carregada de metais que é separada posteriormente. A eficiência de lixiviação está diretamente relacionada ao tipo e concentração do agente lixivante. Pode-se concluir também que a concentração de íon hidrogênio (valor do pH) está diretamente relacionado à eficiência de lixiviação. As condições gerais que favorecem a dissolução podem ser derivadas de dados termodinâmicos, apresentados em Diagramas de Pourbaix para diferentes metais (GUPTA, 2003; WANG & GUO, 2019).

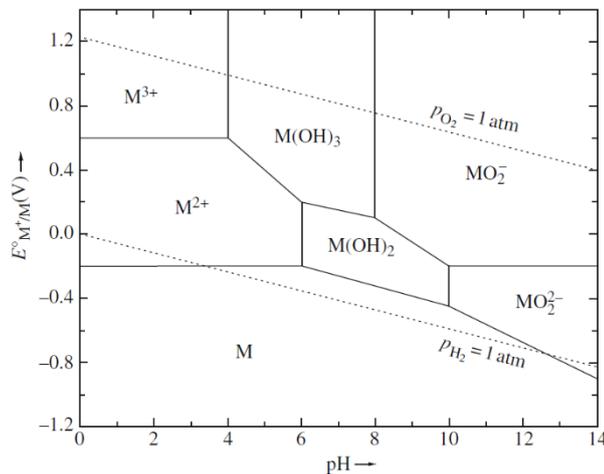
Essas considerações termodinâmicas são importantes na lixiviação, pois fornecem orientação básica na escolha da combinação de reagentes e suas concentrações. Sendo assim, algumas condições importantes são consideradas para determinar o lixivante apropriado para uma determinada matéria-prima, sendo: o pH da solução, o tipo de oxidante/redutor e o papel dos ligantes complexantes. Os três fatores podem ser adequadamente avaliados utilizando os diagramas de Pourbaix, no qual as coordenadas do diagrama são: o potencial de redução do sistema (E^0), que é estimado com referência ao eletrodo de hidrogênio em condições padrões de pressão de 1 atm em volts, e o pH da solução. Ele é dividido em quadrantes aos quais

demonstram o estado do metal na condição do sistema. Porém, o diagrama não fornece informações sobre a cinética das reações e sobre o estado do sistema (GUPTA, 2003; GUPTA & MUKHERJEE, 1990).

O processo pode ser realizado com soluções ácidas ou básicas, em condições oxidantes, neutras ou mesmo redutoras. As condições particulares escolhidas para a lixiviação são regidas, principalmente, pela natureza do material a ser tratado e pelo grau de seletividade exigido no processo de lixiviação, podendo dissolver certos compostos metálicos de uma matéria-prima (oxidação), deixar outros não atacados (imunes), ou convertê-los em espécies sólidas insolúveis que podem ser separadas (passivação). Considerado um metal M em equilíbrio com seus próprios íons divalentes (M^{2+}) ou trivalentes (M^{3+}) em solução, o potencial padrão de redução (E^0) pode ser determinado considerando as semirreações descritas nas Equações 4 e 5. As fases de um metal M em um diagrama de Pourbaix é demonstrado na Figura 31 (SHAMSUDDIN, 2021).



Figura 31 – Fases de equilíbrio de um metal M em um diagrama de Pourbaix



Fonte: Shamsuddin (2021).

4.1.5.1.1 Lixiviação ácida inorgânica

A lixiviação com ácidos inorgânicos é um método viável que tem sido muito utilizado. Alguns tipos de ácidos fortes, como ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3) e ácido clorídrico (HCl) são os agentes lixiviantes mais comuns para a lixiviação dos componentes de LIBs recicláveis. A lixiviação com ácidos inorgânicos se mostra viável e eficaz, fornecendo

alta eficiência de lixiviação e alta taxa de recuperação dos metais, além de serem reagentes relativamente baratos. No entanto, valores de pH muito baixos durante a lixiviação podem levar a um desgaste mais rápido (corrosão) do equipamento usado, além de possuírem desvantagens como a emissão de poluentes secundários (liberação de gases e geração de efluentes), e complexidades nas etapas de separação (WANG & GUO, 2019; URBANSKA, 2020).

4.1.5.1.2 Lixiviação ácida orgânica

A lixiviação ácida orgânica é similar ao processo de lixiviação ácida inorgânica, utilizando a interação entre íons H^+ e íons metálicos em meio ácido. Ela possui o foco na redução dos poluentes tóxicos causados pela lixiviação inorgânica, objetivando manter uma alta eficiência de recuperação. Alguns dos principais ácidos utilizados como agentes de lixiviação orgânicos são o ácido cítrico, ácido oxálico, ácido málico e ácido acético. Apesar dos ácidos orgânicos serem mais fracos que os inorgânicos, eles são considerados fortes agentes quelantes (complexantes) com menores riscos de impactos ambientais, e também são fortemente redutores, o que permite a lixiviação sem a adição de agentes redutores. Além disso, o processo possui menor taxa de poluição secundária, impedimento da corrosão dos equipamentos, lixiviação seletiva dos metais, etc. (CHOI, DE SOUZA & GUPTA, 2022; GOLMOHAMMADZADEH, FARAJI & RASHCHI, 2018; ZHANG, 2022).

De acordo com Zhang (2022), os ácidos orgânicos possuem importantes e principais desvantagens com relação aos ácidos inorgânicos. Uma dessas desvantagens refere-se aos aspectos econômicos, no qual o preço dos ácidos orgânicos é extremamente alto sendo, geralmente, 5 a 20 vezes o preço dos ácidos inorgânicos. Além disso, as taxas de lixiviação dos ácidos orgânicos são mais baixas em comparação com as taxas dos ácidos inorgânicos, e a relação sólido-líquido é uma desvantagem fundamental do processo de lixiviação por requerer uma relação sólido-líquido mais baixa, resultando na necessidade de uma grande quantidade de solução e, conseqüentemente, diluindo ainda mais os metais presentes.

4.1.5.1.3 Lixiviação alcalina

Ao contrário da lixiviação com ácidos inorgânicos e orgânicos, a lixiviação alcalina ocorre através da interação entre íons hidróxido e íons metálicos em soluções alcalinas. A lixiviação alcalina pode ser empregada na separação da folha de alumínio que está presente nos materiais catódicos, podendo separar o material ativo em fase sólida (permanecem em estado

sólido em pH alcalino, ocasionado pela passivação dos metais catódicos), enquanto a folha de alumínio catódica é dissolvida na solução alcalina. Após a lixiviação, os resíduos sólidos da filtração devem ser calcinados para remover o aglutinante e o agente condutor. Este método possui as vantagens de possuir uma alta eficiência de separação e um baixo custo. No entanto, são produzidos resíduos líquidos alcalinos e H_2 durante a reação, o que pode causar riscos à segurança (OU & WANG, 2022; CHOI, DE SOUZA & GUPTA, 2022).

4.1.5.1.4 Lixiviação eletroquímica

A lixiviação eletroquímica é uma lixiviação que altera não só o pH da solução, mas também o potencial externo da solução. Atualmente, os sistemas eletroquímicos em solução aquosa são mais usados pela sua fácil operação e baixa complexidade dos equipamentos. Para a reciclagem de LIBs, o material catódico (matéria-prima) é geralmente usado como ânodo, e materiais inertes (grafite e platina) são usados como cátodo. Esse ânodo (cátodo da bateria reciclada) sofre oxidação sob a ação de um potencial externo, enquanto o cátodo (material inerte) sofre redução e libera H_2 . Os eletrólitos podem ser neutros (solução de cloreto de sódio) ou ácidos (solução de sulfato de amônio). Os elementos Fe, Ni, Co, Mn e Al continuam aderidos ao ânodo, separando em solução o Li e outras impurezas metálicas. A recuperação eletroquímica necessita de uma alta eficiência de corrente elétrica (gasto energético) e ainda está em desenvolvimento operacional, porém possui condições operacionais simples, podendo ser controlada pela magnitude do potencial aplicado (ZHANG, 2022; DIAZ et al., 2020).

4.1.5.1.5 Biolixiviação

Biolixiviação refere-se ao processo de solubilização de cátions metálicos de materiais insolúveis. É definida como a dissolução de óxidos metálicos com metabólitos microbianos em resíduos sólidos no meio lixiviante como cátions metálicos. O método de biolixiviação escolhido afeta a recuperação do metal, porém outros fatores também afetam fortemente o processo de biolixiviação, como: o tipo de microrganismo, pH, tamanho de partícula, densidade, potencial redox e concentrações de CO_2 e O_2 (NASERI et al., 2022). Em geral, dois mecanismos significativos são usados na biolixiviação microbiana: mecanismo direto (contato da matéria-prima com o micro-organismo) e indireto (matéria-prima sem contato com o micro-organismo). A biolixiviação tem excelente potencial para fins industriais, porém melhores

métodos de separação seletiva dos metais após a solubilização ainda estão em desenvolvimento (NASERI et al., 2022; ASGHARI et al., 2013; BRIERLEY & BRIERLEY, 2019).

4.1.5.2 Separação

Os metais dissolvidos na lixiviação precisam ser separados para a obtenção de produtos purificados, ou no estado desejado. Resíduos sólidos, incluindo compostos precipitados formados, podem ser removidos ou recuperados utilizando técnicas de separação sólido-líquido. A separação dos íons metálicos é baseada em diferenças nas propriedades termodinâmicas de cada metal, sendo comumente separados usando extração por solvente, troca iônica e precipitação. Já o método de adsorção é menos utilizado (CHEN et al., 2019; FREE, 2022).

4.1.5.2.1 Extração por solventes

A extração por solvente (ou extração líquido-líquido) é uma rota eficaz para a separação de metais lixiviados. A fase orgânica é deixada em contato com uma fase aquosa contendo o metal dissolvido ou o complexo do íon metálico, sendo as fases aquosa e orgânica imiscíveis entre si. Diferentes produtos orgânicos com grupos funcionais específicos são usados como extratantes, sendo esses misturados com diluentes específicos e reagentes modificantes para formar o sistema de extração. Os diluentes são necessários para facilitar o bombeamento, processamento e sedimentação do extrator, que é muitas vezes viscoso e difícil de gerenciar. O diluente também ajuda a distribuir o extrator de forma mais eficaz nas gotículas da fase orgânica. A extração do solvente é realizada usando um misturador, dispersando a fase orgânica na fase aquosa em pequenas gotículas, melhorando a cinética de extração (FREE, 2022; CHEN et al., 2019).

Extratores comumente disponíveis para o processo com lixiviados de LIBs usadas são Cyanex 272, D2EHPA, PC-88A, P507 e Acorga M5640. A extração por solvente possui as vantagens de ser um método bem estabelecido de separação e purificação, possuindo uma excelente separação, baixo consumo de energia e alta pureza e seletividade do produto recuperado. Porém, suas principais desvantagens são o alto preço dos solventes e o alto risco ambiental, prejudicando o meio ambiente (águas residuais e gases) e à saúde humana (toxicidade) (OU & WANG, 2022; DALINI et al., 2020).

4.1.5.2.2 Adsorção

A adsorção é um método tradicional de separação e recuperação de metais na indústria metalúrgica e química. A adsorção seletiva separa o lítio usando uma peneira molecular para absorver o lítio dissolvido. Essas peneiras são adsorventes inorgânicos extremamente seletivos para o lítio em uma solução contendo lítio, e originam-se da tecnologia usada para extraí-lo de soluções de processamento natural, como salmouras de lítio. Como o lítio é o menor íon metálico dentre os presentes na solução, as peneiras permitem a seletividade dos seus íons, sendo um método simples que permite baixa contaminação e garantindo altas taxas de recuperação, não requerendo equipamentos adicionais (CHEN et al., 2019; BAE & KIM, 2021). No entanto, as peneiras moleculares são muito caras e requerem um processo de lixiviação adicional para separar o lítio combinado com o adsorvente, ocasionando mais um volume de ácido e base adicional (CHEN et al., 2019; BAE & KIM, 2021).

4.1.5.2.3 Troca iônica

Na troca iônica, basicamente há uma reação de troca entre os íons na solução e os de carga semelhante na resina quando os dois são postos em contato. Ela é realizada em duas etapas definidas como: sorção e eluição. Na primeira, a solução contendo íons de interesse é passada por uma coluna preenchida com grãos de uma resina apropriada. Durante o movimento descendente na coluna, os íons de mesma carga que os da resina são adsorvidos (sorvidos) pela resina e a solução esgotada flui para fora da coluna. Na segunda, os íons retidos pela resina são recuperados por percolação de um solvente adequado (água, solução ácida ou alcalina) através do leito. O líquido eluído da coluna contém os íons desejados, assim, a eluição é apenas o inverso da sorção. Muitas vezes, o leito de resina é regenerado durante a eluição. Processos de troca iônica podem ser usados em situações onde as concentrações iônicas de metal lixiviado são baixas (ppm) (SHAMSUDDIN, 2021, KERN, 2019; DALINI et al. 2020).

4.1.5.2.4 Precipitação seletiva

O processo de precipitação química separa e recupera íons metálicos pela adição de ânions específicos, que se combinam com os cátions alvo para formar precipitados de baixa solubilidade na solução de lixiviante. Muitos íons metálicos bivalentes são solúveis em níveis de pH baixo e intermediário. Esta diferença de solubilidades em função do pH facilita as separações. No processo de reciclagem de LIBs usadas, os precipitantes frequentemente

aplicados são NaOH, Na₂CO₃ e H₂C₂O₄. Ao contrário de outros métodos, a precipitação é mais simples de operar e possui melhores taxas de recuperação, mas o consumo de reagentes químicos permanece considerável e a pureza do produto é suscetível a impurezas (OU & WANG, 2022; FREE, 2022).

Na precipitação de compostos pouco solúveis, a principal característica quantitativa da solubilidade é o produto de solubilidade. Um composto pouco solúvel precipita até atingir o equilíbrio entre o sal produzido e seus íons na solução, pela adição de compostos químicos reagentes. Devido à tendência de alguns dos metais serem co-precipitados com os sais metálicos, o controle da precipitação dos metais é dificultado. Consequentemente, é difícil precipitar apenas um íon em uma faixa de pH pequena. Apesar disso, suas grandes vantagens são o baixo custo de operação, baixo consumo de energia, e segurança do processo (DALINI et al. 2020; HAVLÍK, 2008).

4.1.6 Separações sólido-líquido

As operações sólido-líquido geralmente não são consideradas uma operação de alta tecnologia, sendo apenas a natureza e o dimensionamento dos equipamentos que dependem dos valores econômicos, das proporções das fases e de certas propriedades físicas que influenciam no processo. São processos muito utilizados com o objetivo de: recuperar e retirar sólidos valiosos de soluções aquosas, recuperar e limpar o líquido, separar as duas fases uma da outra antes de reciclar/reutilizar ambas e de separar as duas fases por razões ambientais para descarte de uma ou outra (COUPER, 2005; SVAROVSKY, 2000)

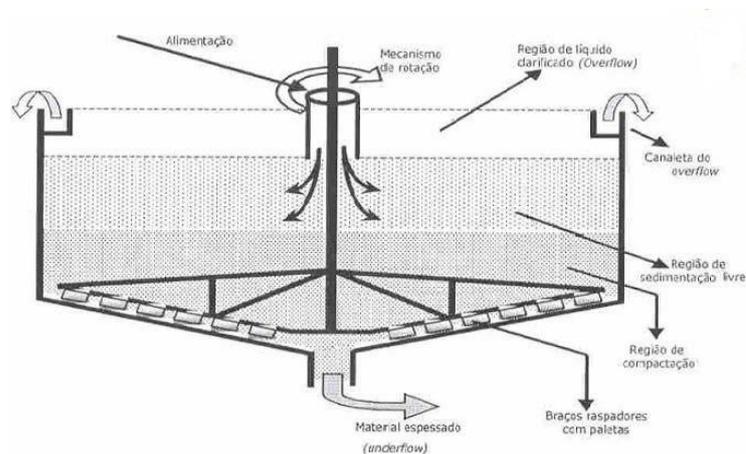
4.1.6.1 Sedimentação

A sedimentação com os espessantes por gravidade representa uma classe de separadores sólido-líquido, onde as forças gravitacionais são usadas para aumentar a concentração de uma suspensão através da sedimentação para produzir um lodo espessado, e um líquido clarificado. As taxas de sedimentação são frequentemente aumentadas artificialmente pela adição de coagulantes ou floculantes (relativamente caros). O plano de área da seção transversal de um espessante controla o tempo disponível para sedimentação (capacidade de clarificação). A profundidade física de um separador controla o tempo de espessamento do lodo (capacidade de espessamento). Espessantes e clarificadores podem ser projetados para operar em modo

descontínuo ou contínuo, embora a maioria das operações comerciais utilize o último (TARLETON & WAKEMAN, 2007).

Com a sedimentação, a única força motriz é a diferença de gravidade específica entre as fases. A diferença aparente pode ser aumentada aplicando uma força centrífuga ou aumentando a massa de partículas individuais através da floculação. A sedimentação é um processo que desde o início pode ter fatores limitantes que estão além do controle do projeto. Os sistemas de sedimentação, por outro lado, tendem a ser baratos e são ideais para operação contínua e automática (PIERSON, 2000). A Figura 32 demonstra o design de um clarificador utilizado na mineração.

Figura 32 – Design de um espessador circular industrial



Fonte: Schoenbrunn et al. (2019).

4.1.6.2 Filtração

A filtração pode ser definida como a separação de sólidos de líquidos pela passagem de uma suspensão através de um meio permeável que retém as partículas, como visto na Figura 33. Para obter o fluxo de fluido através do meio filtrante, uma queda de pressão deve ser aplicada através do meio, existindo quatro tipos de força motriz: gravidade, vácuo, pressão e centrífuga. Muitos tipos de filtros estão disponíveis, e são classificados como: filtros de vácuo, filtros de pressão, filtros de pré-revestimento, filtros rotativos e filtros de profundidade, sendo usados em toda a indústria de metais em uma série de métodos de etapas tradicionais, e outras etapas mais específicas ou exclusivas do processo (TARLETON & WAKEMAN, 2007; SVAROVSKY, 2000). A Figura 33 demonstra um esquema simples de um meio filtrante.

Figura 33 – Esquema de um filtro simples



Fonte: Adaptado de Svarovsky (2000).

A filtração proporciona uma quantidade grande de opções para o dimensionamento e projeto, uma vez que depende de uma membrana, escolhida de modo a reter as partículas que devem ser separadas, e mecanismos que facilitem esse processo. Os sistemas de filtração, no entanto, são muito menos adequados para produção contínua, às vezes nem mesmo para produção automática, e tendem a ser mais caros por volume tratado do que outros sistemas (MEADOWS, 2019; PIERSON, 2000).

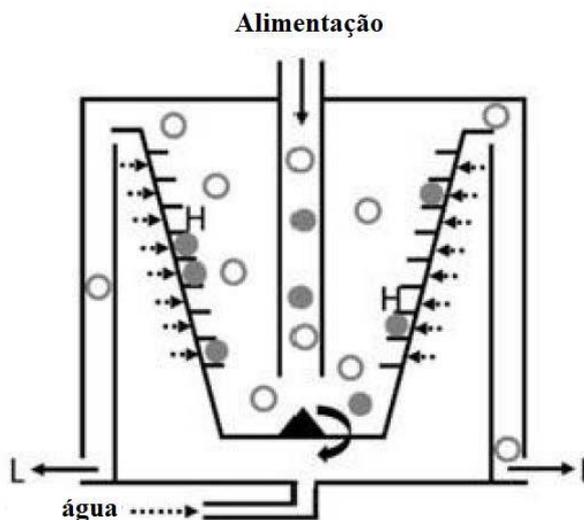
4.1.6.3 Centrifugação

A centrifugação é um processo mecânico que utiliza um campo de força centrífuga aplicado para separar os componentes de uma mistura de acordo com a densidade e/ou tamanho de partícula. Essas forças são aplicadas para acelerar a sedimentação de partículas dentro de equipamentos rotativos, e assim, existindo várias aplicações para esse processo, efetuando separações em várias formas de configurações. Algumas vantagens desse processo incluem altas taxas de separação, possibilidade de obter separações que não são viáveis no campo gravitacional, e uma redução substancial do tamanho do equipamento usado para esse fim, consequentemente reduzindo custos. Geralmente são aplicáveis dentro de processos de filtração, sedimentação, entre outros (TAULBEE & MAROTO-VALER, 2000; TARLETON & WAKEMAN; CHHABRA, BASAVARAJ, 2019).

A separação centrífuga é comumente usada no processamento de recursos primários, mas também pode ser aplicada na separação de componentes recicláveis de LIBs. Os separadores consistem em um recipiente cilíndrico-cônico, que gira em alta velocidade em torno de um eixo horizontal ou vertical. As partículas de alta densidade são depositadas na parede externa do vaso, sendo a descarga de material realizada de forma descontínua. As partículas de baixa densidade são retiradas com jatos de água. É geralmente usado para misturas

de materiais em que os componentes pesados representam menos de 1% em massa (WERNER et al., 2022). A Figura 34 demonstra a operação descrita.

Figura 34 – Centrífuga aplicável a reciclagem de LIBs



Fonte: Adaptado de Werner et al. (2022).

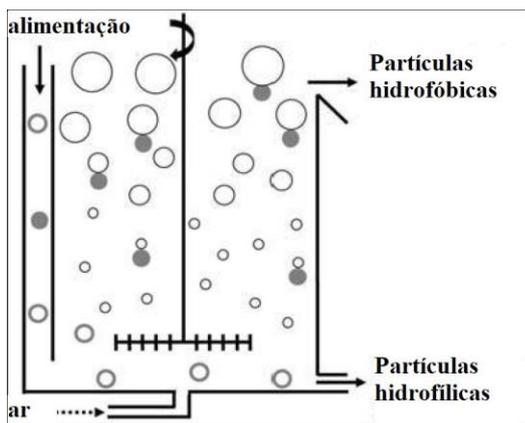
4.1.6.4 Flotação

A flotação é um processo de separação contínua aplicada em larga escala, onde os sólidos em suspensão são removidos através de sua ligação preferencial a bolhas de ar, misturando as bolhas com a mistura sólido-líquido na base de uma coluna e subindo através do líquido com sólidos presos às suas superfícies. No topo da coluna as bolhas geralmente formam uma espuma (carga de sólidos), sendo removidas mecanicamente. A flotação pode ser aplicada a suspensões finas, e oferece uma alternativa viável à sedimentação, porque pode operar com taxas de transbordamento muito mais altas e usar equipamentos menores e mais compactos de menor custo de capital (mas maior custo operacional). Esse processo depende da fixação de partículas e da geração de bolhas, sendo a ligação bolha-partícula a etapa de controle na flotação (TARLETON & WAKEMAN, 2007; SVAROVSKY, 2000).

Como a maioria dos sólidos são hidrofílicos, muitas vezes é necessário adicionar continuamente agentes ativos de superfície à alimentação para promover a hidrofobicidade ajudando na fixação das partículas às bolhas. A flotação encontrou muito uso na recuperação seletiva de metais em misturas, sendo utilizada principalmente em faixas de tamanho de partículas entre 50 e 500 μm . No contexto da reciclagem de LIBs, apenas a flotação por espuma é interessante para os materiais ativos que são refinados. Em princípio, o grafite é naturalmente hidrofóbico e pode ser recuperado na espuma (topo da coluna), enquanto o revestimento do

cátodo é hidrofílico e permanece como resíduo de flotação. No entanto, as propriedades gerais da superfície das partículas são fortemente influenciadas pelas propriedades químicas e estruturais do material catódico (aditivos remanescentes do eletrodo) (TARLETON & WAKEMAN, 2007; WERNER et al., 2022). A Figura 35 exemplifica o modelo referido.

Figura 35 – Modelo de flotação por espuma



Fonte: Adaptado de Werner et al. (2022).

4.1.7 Processos pirometalúrgicos

A pirometalurgia refere-se principalmente a área da metalurgia que envolve o tratamento térmico de minerais, minérios e concentrados, para recuperar metais valiosos. As rotas pirometalúrgicas para reciclar LIBs descartadas consistem em duas abordagens principais: regeneração de materiais de eletrodos ou reparos de cristais através de um processo de tratamento térmico, e conversão dos componentes em metais puros e/ou ligas líquidas a uma temperatura superior a 1000 °C. Além dos dois processos pirometalúrgicos citados, a pirólise também pode ser utilizada como pré-tratamento para a retirada de componentes indesejados dos componentes (YIN & XING, 2019).

De modo geral, os processos pirometalúrgicos possuem as vantagens de: possuir uma operação simples e um fluxo curto de processo, não possuir exigência de grandes insumos e possuir uma alta eficiência de produção. Porém, as principais e decisivas desvantagens são: a não comumente recuperação de Li e Mn diretamente, o alto consumo de energia, a baixa eficiência de recuperação dos componentes, e a alta emissão de gases residuais acarretando alto custo de tratamento deste. Os principais desafios para esse método são a redução no consumo de energia, com a redução da poluição devido a emissões gasosas e dos riscos ambientais ocasionados (ZHOU et al., 2020).

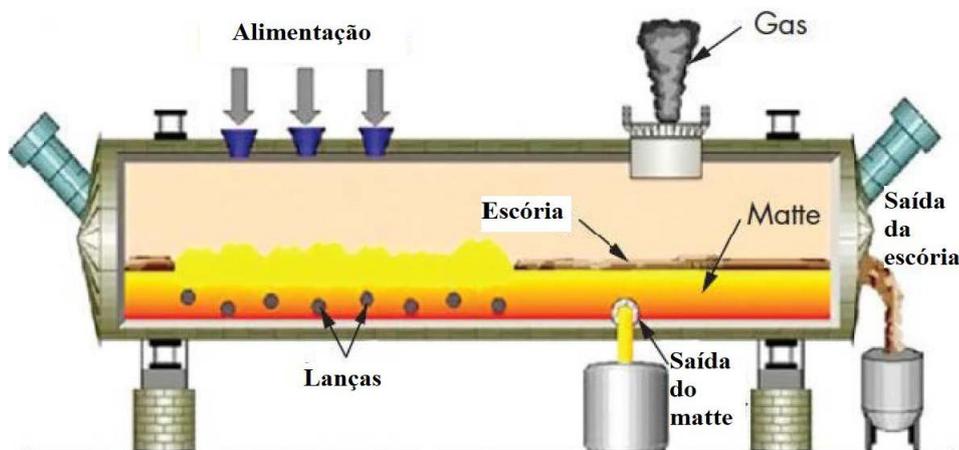
4.1.7.1 Pré-tratamento por incineração e/ou pirólise

O processo de incineração envolve a queima de componentes orgânicos em temperaturas superiores na presença de ar ou oxigênio, sendo as coberturas plásticas e todos os compostos orgânicos incinerados em temperaturas acima de 600 °C. Embora a incineração e a pirólise sejam métodos semelhantes, pois todos envolvem conversão termoquímica, são processos diferentes: a pirólise é o tratamento térmico na ausência de ar ou oxigênio, e a incineração envolve a queima na presença de excesso de ar. Na pirólise o processo é realizado com o aquecimento em temperaturas moderadas (200 a 500°C), facilitando a decomposição térmica de compostos orgânicos em produtos de baixo peso molecular, para uso como combustíveis ou como insumos para a indústria química. Na aplicação de reciclagem de LIBs descartadas, a pirólise também pode ser usada na desativação de baterias com qualquer energia elétrica residual, e o material ativo catódico permanece como um resíduo sólido, que é então processado durante as etapas de reciclagem subsequentes (MAKUZA et al., 2021; ZHOU et al., 2020).

4.1.7.2 Separação por fundição

A maioria das instalações industriais pirometalúrgicas utilizam técnicas nas quais as LIBs usadas são fundidas a altas temperaturas (1000 °C), colocando-os diretamente em um forno (Figura 36). Assim, os componentes plásticos, eletrólitos e carbonáceos contidos nas LIBs descartadas são decompostos, e metais valiosos (Co, Ni, Mn, Cu, etc.) são coletados em ligas fundidas. Este método como meio tradicional de beneficiamento mineral é de simples implementação, adaptável a diversas matérias-primas e possui alta capacidade produtiva. No entanto, este processo resulta em uma alta perda de metal e baixa eficiência geral de recuperação. Além disso, a liga acabada requer purificação adicional e também, principalmente, a recuperação baseada nesse método pode levar a um aumento considerável nas emissões de gases de efeito estufa e de consumo de energia (ZHANG, 2022).

Figura 36 – Demonstração de um forno de fundição

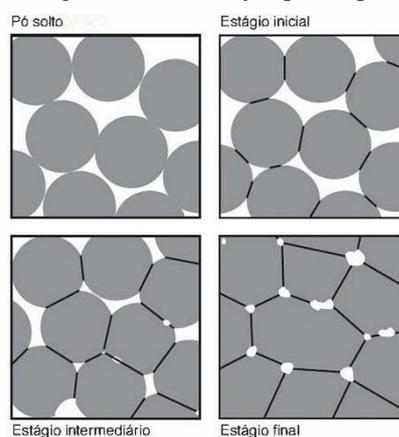


Fonte: Adaptado de Mackey & George-Kennedy (2019).

4.1.8 Processos metalúrgicos do pó

A metalurgia do pó (MP) é uma tecnologia de conformação de metais que utiliza pós (metálicos ou cerâmicos) como matérias-primas que são conformados em uma forma e dimensão específica, e posteriormente sinterizados em alta temperatura. A sinterização é uma das etapas mais importantes do processo, e a temperatura de sinterização está abaixo da temperatura de fusão do constituinte primário da mistura de pós utilizada. Isso significa que durante a sinterização, algumas fases líquidas podem estar presentes (fase líquida transitória ou permanente), mas sempre em quantidade minoritária entre os componentes do material alvo (TORRALBA, 2014). A Figura 37 ilustra os estágios da densificação e união da estrutura durante o processo.

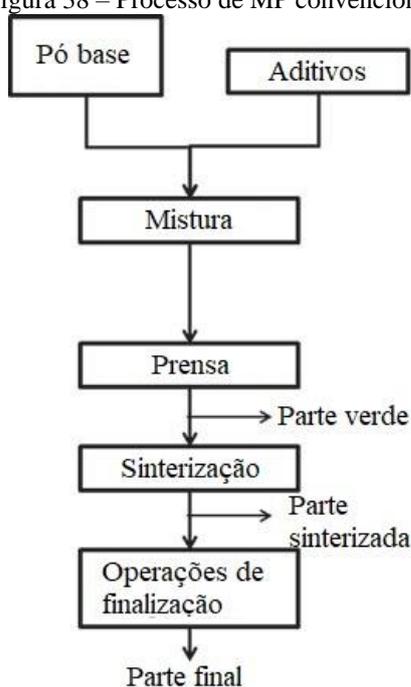
Figura 37 – Estágios da densificação para o processo de MP



Fonte: Adaptado de Fang (2010).

O processo MP geralmente consiste em quatro etapas básicas: fabricação do pó, mistura do pó, compactação e sinterização. Às vezes, uma combinação de pressão e temperatura é aplicada simultaneamente para melhorar a densidade final (e, como consequência, as propriedades finais). Porém, a compactação é geralmente realizada à temperatura ambiente, e o processo de sinterização a temperatura elevada é geralmente realizado à pressão atmosférica (TORRALBA, 2014; CAMPBELL, 2013). Um processo de MP típico neste nicho tecnológico segue o caminho descrito na Figura 38.

Figura 38 – Processo de MP convencional



Fonte: Adaptado de Torralba (2014).

A MP apresenta as seguintes vantagens: possuir altas taxas de produção, processar formas e produtos complexos, e ter a possibilidade de operar com uma grande gama de composições e propriedades. Porém, as desvantagens da MP incluem: possuir propriedades de resistência inferiores a outros processos, ter alto custo de ferramentas e materiais, algumas limitações de tamanho e forma do material, mudanças dimensionais durante a sinterização, variações de densidade e alguns riscos de saúde e segurança (CAMPBELL, 2013).

A etapa de MP é crucial para a qualidade final do material ativo do cátodo, NMC. De acordo com Wang et al. (2021) a capacidade de controlar o tamanho e a forma dos poros, o tamanho e a forma das partículas, a área de superfície e a densidade dos materiais do eletrodo é significativa na otimização do desempenho da LIB. O desempenho desta é caracterizado pelo armazenamento de energia, também conhecido como capacidade, e pela entrega de corrente,

também conhecida como carregamento ou potência. As características de energia e potência são definidas pelo tamanho das partículas nos eletrodos: partículas menores aumentam a área de superfície, aumentando assim a capacidade máxima, porém partículas muito finas diminuem a potência.

Isso se explica, pois uma área de superfície elevada reduz a distância de difusão dentro dos eletrodos e ajuda a facilitar a troca iônica entre o eletrodo e o eletrólito, melhorando a eficiência das reações eletroquímicas. Por outro lado, diminuir muito o tamanho das partículas diminui a presença de eletrólitos que preenchem os vazios. Essa diminuição do tamanho das partículas reduz os vazios entre as partículas, diminuindo assim o teor de eletrólito nessas, e pouco eletrólito reduz a mobilidade iônica e afeta o desempenho de potência (WANG et al., 2021).

4.1.8.1 Preparação do precipitado: esmagamento mecânico

Em geral, preparar pós de hidróxidos ou óxidos metálicos significa transformar os compostos que estão em estado sólido, para granulometrias inferiores. Esses hidróxidos ou óxidos metálicos no estado sólido podem ser transformados em pós por simples esmagamento mecânico com moinhos (LIU & CHEN, 2014).

4.1.8.2 Compactação

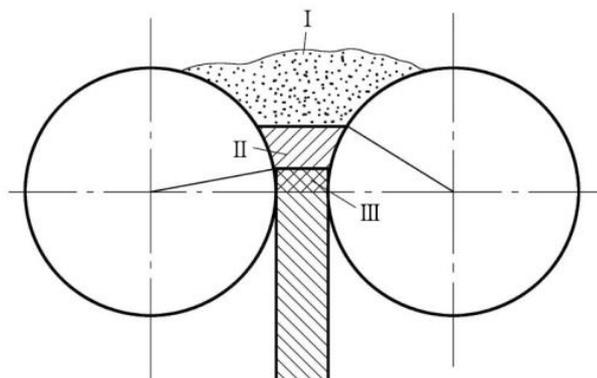
A compactação de pós de precipitados metálicos tem as seguintes funções principais: para consolidar o pó na forma desejada, transmitir as dimensões finais desejadas com a devida consideração a quaisquer alterações dimensionais resultantes da sinterização, conferir o nível e o tipo de porosidade desejados, e conferir resistência adequada para manuseio posterior (UPADHYAYA, 1997).

4.1.8.2.1 Compactação por rolos

Na compactação por rolo ou laminação de pó, a tecnologia de laminação convencional é usada para compactar um pó à temperatura ambiente em uma tira porosa (60 a 90% do teórico). Os rolos do moinho podem ser dispostos verticalmente ou horizontalmente, e o pó pode ser alimentado por gravidade no espaço de dois rolos. A tira flexível entra em um forno de sinterização seguida por rolos a quente para completar a densificação até a densidade teórica

(CAMPBELL, 2013; UPADHYAYA, 1997). A Figura 39 demonstra um compactador de rolos vertical.

Figura 39 – Compactador de rolos vertical



Fonte: Liu & Chen (2014).

4.1.8.2.2 Compactação por prensagem

Tubos e chapas porosas podem ser feitos por prensagem, e o principal equipamento necessário para este processo é uma máquina de prensagem. Durante a moldagem, os aditivos requisitam as seguintes características: a viscosidade adequada para atingir a resistência necessária, lubrificação para a desmoldagem, capacidade de formação de poros, estar no estado líquido ou sólido com baixo ponto de fusão, não reação com os pós e ausência de danos aos componentes da instalação na atmosfera. Dependendo de suas funções na moldagem, os aditivos podem ser lubrificantes, aglutinantes, agentes formadores de poros ou plastificantes. Os lubrificantes de uso geral são óleo, glicerina, vaselina, estearato, sulfato, óxido e grafite (LIU & CHEN, 2014).

4.1.8.3 Calcinação/Sinterização

A sinterização é uma técnica de processamento usada para produzir materiais e componentes com densidade controlada a partir de pós metálicos e/ou cerâmicos por meio da aplicação de energia térmica. A sinterização pode ser realizada em um forno descontínuo ou contínuo: no modo descontínuo, um lote de peças passa por todo o ciclo de sinterização, já em um modo contínuo, peças se movem pelas zonas do forno a uma velocidade lenta e constante, possuindo quatro áreas distintas: a área de pré-aquecimento e queima, a área de sinterização, a área de resfriamento lento, e a área de resfriamento final (Figura 40) (CAMPBELL, 2013).

Figura 40 – Forno contínuo de sinterização



Fonte: Adaptado de Campbell (2013).

Já a calcinação é um processo de tratamento térmico para materiais sólidos que envolvem decomposição térmica, transição de fase ou remoção da substância volátil na ausência, ou suprimento limitado de ar, ou oxigênio. No processo de metalurgia, a calcinação é um método comum para processar minerais que podem ser decompostos para gerar um composto desejável. Por exemplo, a maioria dos óxidos pode ser preparada calcinando minerais de carbonato no ar, conforme descrito na Equação 6 (YING & XING, 2019).

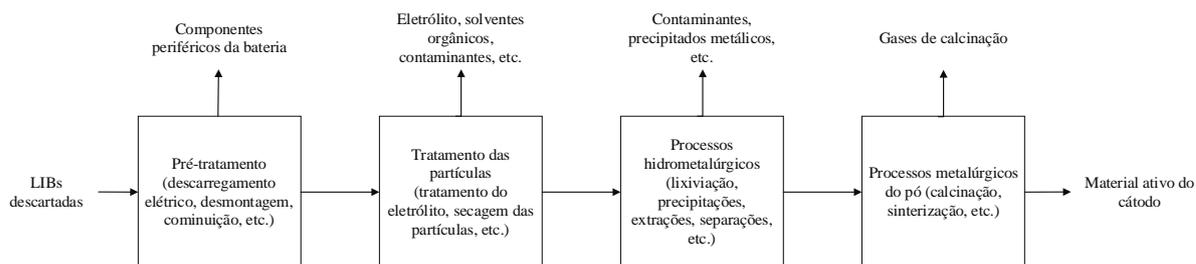


Dessa forma, os princípios de calcinação e sinterização são aplicados em paralelo, apesar das suas pequenas diferenças que envolvem apenas o objetivo do tratamento térmico. Assim, a calcinação/sinterização é aplicada em paralelo no tratamento de precipitados. O estudo de Sa et al. (2015) obteve por sinterização/calcinação em 900 °C por 12 horas do Li_2CO_3 com hidróxidos metálicos de Ni, Mn e Co, o cátodo ativo NMC 111, o qual estava bem cristalizado, denso, e de boa morfologia esférica (CHEN et al., 2019).

4.2 ESCOLHA DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS

A Figura 41 demonstra o diagrama abrangente do processo, destacando as etapas básicas. Esse diagrama considera as escolhas das tecnologias utilizadas no processo de forma ampla, sem detalhamento.

Figura 41 - Diagrama abrangente do processo



Fonte: Autores (2023).

Considerando as tecnologias disponíveis, apresentadas no item 4.1, o processo é desenvolvido buscando maior produtividade, menor consumo energético e otimização dos recursos. Desse modo, definiu-se que após o recebimento a bateria de íons de lítio passa por um processo de descarregamento elétrico manual, tendo em vista o baixo risco operacional e a viabilidade econômica da operação. Com isso, a desmontagem manual da bateria pode ser feita com segurança, sem oferecer riscos aos funcionários e atendendo aos diversos modelos de bateria disponíveis no mercado (CHEN et al., 2022). Ademais, ambas as etapas são feitas de forma manual, com base na disponibilidade de mão-de-obra para este fim.

O pré-tratamento da bateria encerra-se com a moagem, que se dá via triturador para partículas intermediárias, garantindo a cominuição dos diferentes materiais encontrados no interior das baterias, possibilitando as demais etapas do projeto. Sendo assim, o triturador do tipo *shredder* é adequado ao processo, pois permite sua execução em atmosfera isolada, sem riscos aos operadores e ao meio ambiente pela liberação de gases tóxicos.

Após a cominuição, é realizada uma extração líquido-líquido para recuperar os componentes eletrolíticos e garantir a segurança dos processos seguintes, na qual o dimetil carbonato (DMC) é utilizado como solvente. Logo, obtém-se um extrato composto pela solução não aquosa de eletrólito e solvente, que parte para tratamento mediante evaporação, a fim de separar as fases leve e pesada, com reciclo de DMC e possibilidade de comercializar os demais compostos do eletrólito. O extrato passa por centrifugação e secagem, garantindo a retirada total do eletrólito e do solvente, que também passam por tratamento para recuperação (HAAS et al., 2018).

Na sequência, o material cominuído passa por peneiramento, pois o processo é simples e garante a separação dos componentes desejados. Portanto, o material ativo segue no processo e a peneira retém os polímeros, materiais ferrosos, alumínio e cobre. Os materiais ferrosos são retirados da mistura via separação magnética, posteriormente, alumínio e cobre são separados

dos polímeros através de separação eletrostática. Ambos os processos são bastante seletivos e adequados para uso neste caso.

O material peneirado, composto pelo cátodo, ânodo e demais contaminantes, passa pelo processo de flotação, com intuito de separar os componentes hidrofóbicos. Com isso, o grafite (hidrofóbico) é facilmente recuperado por flotação e os demais materiais (hidrofílicos) seguem no processo. A partir de então, realiza-se a lixiviação ácida para formação de sulfatos metálicos. Para tal, são adicionados peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico, que promovem alta taxa de recuperação dos metais e são reagentes economicamente viáveis para o projeto. Na sequência, foi definida uma separação sólido-líquido através de filtração simples, em que os sulfatos são separados dos contaminantes não metálicos (SVAROVSKY, 2000).

Após, é realizada uma precipitação seletiva, com pH ajustado entre 3 e 5, em que é adicionado como precipitante hidróxido de sódio. Como comentado anteriormente, a diferença de solubilidade em função do pH torna a separação mais simples de ser realizada (FREE, 2022). São precipitados hidróxido de alumínio e hidróxido de ferro (III), enquanto os sulfatos de cobalto, manganês, níquel, lítio, cobre e sódio permanecem em solução.

Através de uma separação sólido-líquido, é realizada a separação dos hidróxidos precipitados dos sais. Os hidróxidos metálicos que foram precipitados não são de interesse do processo e, através deste método de separação, são eliminados do processo. Os sais em solução passam por uma nova precipitação seletiva, com um pH ajustado entre 5 e 7, novamente com adição de hidróxido de sódio. Precipita-se hidróxido de cobre, enquanto os sulfatos de cobalto, manganês, níquel, lítio e sódio permanecem em solução. O precipitado é removido do processo através de uma nova filtração.

As razões obtidas dos sais que se encontram em solução podem variar dependendo da matéria-prima utilizada no início do processo. Para a realização de um ajuste da razão molar da solução lixiviada, podem ser adicionados, se necessário, sulfatos de níquel, manganês e cobalto, para a obtenção de uma razão 1:1:1, referentes à NMC111.

A seguir, uma nova precipitação seletiva é realizada, com ajuste de pH entre 10 e 13, novamente adicionando-se hidróxido de sódio, precipitando-se hidróxidos de manganês, níquel e cobalto, permanecendo em solução sulfato de lítio e sulfato de sódio. Os hidróxidos precipitados são separados dos sais em solução por uma separação sólido-líquido e armazenados. Posteriormente, ocorre um processo de precipitação dos sulfatos, através da adição de carbonato de sódio na solução, a uma temperatura de aproximadamente 40 °C, para precipitar carbonato de lítio, enquanto o sulfato de sódio permanece em solução. O sulfato de

sódio remanescente diluído em solução pode ser tratado como um efluente, que irá passar por um tratamento.

O carbonato de lítio úmido, precipitado anteriormente, é armazenado, até que se tenha um acúmulo dessa substância, principalmente devido à sinterização, um processo demorado que é discutido a seguir. Os hidróxidos metálicos de manganês, níquel e cobalto, também são armazenados pela mesma razão. O carbonato de lítio e os hidróxidos metálicos passam separadamente por um processo de cominuição em um moinho de martelos, com o objetivo de transformar todo o sólido, que se encontra até então em partículas pequenas, em pó. Após, o carbonato de lítio e os hidróxidos metálicos são misturados, além de ser feito um novo ajuste de razão de lítio, níquel, manganês e cobalto.

A mistura já ajustada passa por um homogeneizador, em que é obtido o Li_2CO_3 e $\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z(\text{OH})_2$. Essas substâncias passam por uma compactação por rolos, para que se tenha uma compactação do pó obtido anteriormente, com o objetivo de obtenção de dimensões desejadas para o pó que é sinterizado. A tira porosa utilizada na compactação entra no forno de sinterização, um processo que utiliza energia térmica, a mistura é primeiramente calcinada a $450\text{ }^\circ\text{C}$ por 4-6h e depois sinterizada a $750\text{-}850\text{ }^\circ\text{C}$ por 15-20h. Através da sinterização, obtém-se o produto alvo do processo, $\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{O}_2$.

4.3 ESCALA DE PRODUÇÃO

Larouche et al. (2020) afirma que em 2016, a capacidade de reciclagem de baterias de íons de lítio foi de 94 mil toneladas. Neste mesmo ano, 500 mil toneladas de baterias de íons de lítio foram vendidas, ou seja, a taxa de reciclagem foi de apenas 19%. Em 2024, é projetado que essa taxa diminua para 9%, com 264 mil toneladas sendo recicladas de um total de 3 milhões de toneladas de baterias de íons de lítio vendidas (LAROUCHE et al., 2020). Esse declínio da taxa de baterias recicladas demonstra que há espaço no mercado para que novas empresas se estabeleçam no ramo. De acordo com Richa et al. (2014), estima-se que no ano de 2040, 340 mil toneladas de baterias de íons de lítio por ano vão estar disponíveis para reciclagem. Para estas projeções, considera-se que o tempo de vida de uma bateria de íons de lítio é de 2 a 10 anos (ZHAN et al., 2018).

Observando-se a Tabela 7 que exhibe a capacidade de reciclagem de empresas concorrentes, é visto que a quantidade de toneladas de baterias de íons de lítio recicladas pode variar dependendo do porte da empresa, sendo, em média, 11 mil toneladas por ano. Sabe-se que atualmente, a frota de veículos elétricos no Brasil ainda representa uma fatia muito pequena

do mercado automobilístico. Portanto, para suprir a necessidade de produção da empresa, além de serem recicladas baterias provenientes de carros elétricos, deseja-se também inicialmente reciclar baterias de *smartphones* e *laptops*, estas que estão amplamente disponíveis no mercado e podem ser facilmente adaptadas ao modelo de reciclagem utilizado. A REFVI Metal, baseando-se nas projeções futuras e também na capacidade atual de empresas concorrentes, projetando-se também um cenário mais pessimista em seus primeiros anos, devido aos motivos dispostos anteriormente, deseja reciclar 3350 toneladas anuais de baterias de íons de lítio, o que corresponde a 10 toneladas por dia de baterias de íons de lítio.

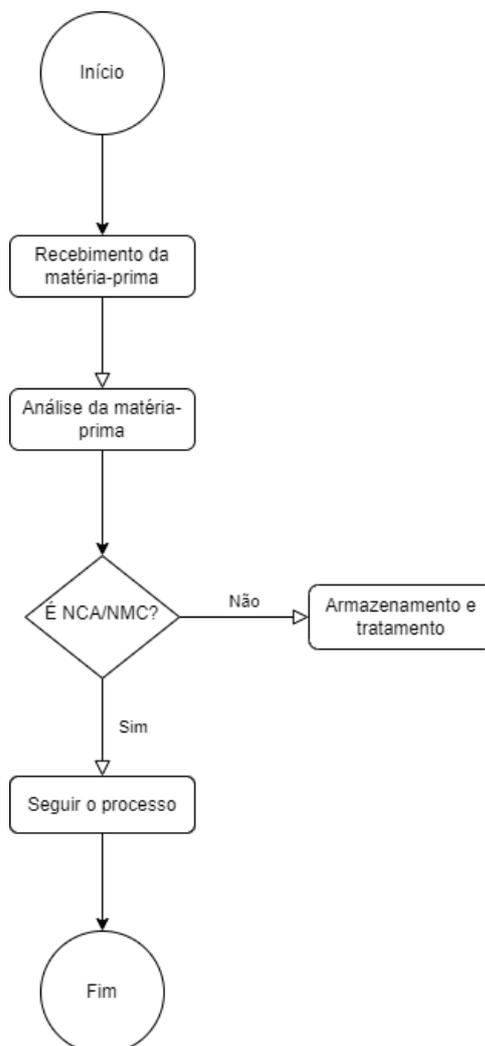
4.4 TEMPO DE OPERAÇÃO

A empresa irá operar durante 335 dias do ano, durante as 24 horas do dia, devido ao longo tempo estimado para alguns dos processos realizados na mesma. Esse horário será dividido em três turnos de 8 horas cada. De acordo com a NBR 5462, é necessária a manutenção preventiva dos equipamentos em intervalos predeterminados, para que se reduza a chance de falha ou a degradação do funcionamento dos mesmos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). Para isso, serão reservados os outros 30 dias do ano, divididos em duas paradas, cada uma de 15 dias a cada 6 meses.

4.5 NECESSIDADES LABORATORIAIS

Para o recebimento da matéria-prima, segue-se um fluxograma básico, conforme a Figura 42, que descreve como o funcionário deve operar ao receber cada remessa de baterias. Para identificação do tipo de bateria, seja ela NMC/NCA ou não, é utilizado um equipamento de fluorescência de raios-X.

Figura 42 – Fluxograma de recebimento da matéria-prima



Fonte: Autores (2022).

Segundo Moura et al. (2021), a técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), com uso de equipamento portátil, traz vantagens como simplicidade, baixo custo, não necessita pré-tratamento da amostra, redução do número de etapas, informações espectrais relativamente simples com mínima interferência espectral, exatidão, precisão, capacidade de analisar amostras de pequenas dimensões, rapidez na análise, além de não intervenção, dependendo do método a ser aplicado.

Um feixe de raios-X com energia suficiente para impactar os elétrons nas camadas internas dos átomos em uma amostra é criado por um tubo de raios-X dentro do analisador portátil, conforme Figura 43. O feixe é então emitido a partir da extremidade frontal do analisador de FRX portátil. O feixe então interage com os átomos na amostra, deslocando elétrons das camadas orbitais internas do átomo. Esse deslocamento ocorre como resultado da diferença de energia entre o feixe primário de raios-X emitido pelo analisador e a energia de

ligação que mantém os elétrons em suas órbitas adequadas; o deslocamento acontece quando a energia do feixe é maior que a energia de ligação dos elétrons com os quais ele interage (BRUKER, 2022).

Figura 43 – FRX portátil



Fonte: Adaptado de Olympus (2013).

Quanto mais longe estiverem do núcleo do átomo, mais alta o nível orbital de um elétron. Portanto, um elétron libera energia quando cai de uma camada de elétrons mais alta para uma camada de elétrons mais próxima do núcleo. A quantidade de energia perdida é equivalente à diferença de energia entre as duas camadas de elétrons, que é determinada pela distância entre elas. A distância entre as duas camadas orbitais é única para cada elemento, como mencionado acima. A energia liberada pode ser usada para identificar o elemento de onde emana, pois, a quantidade de energia emitida no processo de fluorescência é única para cada elemento. As energias fluorescentes individuais detectadas são específicas para os elementos que estão presentes na amostra. Para determinar a quantidade de cada elemento presente, a proporção em que aparecem as energias individuais pode ser calculada pelo instrumento ou por outro *software* (BRUKER, 2022).

A vantagem particular do FRX é a capacidade da técnica de realizar medições analíticas *in situ* para onde o analisador FRX portátil é levado e colocado em contato direto com o item de teste. Uma medição analítica é realizada e o resultado fica imediatamente disponível para o operador (THOMPSON, 2009). Todo o processo de fluorescência pode ocorrer em pequenas frações de segundo. O tempo real necessário para uma medição dependerá da natureza da

amostra e dos níveis de interesse. Níveis de alta porcentagem levarão alguns segundos, enquanto níveis de parte por milhão levarão alguns minutos (BRUKER, 2022).

Além do uso do FRX portátil para análise das baterias recebidas é necessária uma estrutura laboratorial para análise de outras matérias-primas utilizadas ao longo do processo. Neste sentido, o laboratório deve ser equipado com vidrarias, bancadas, sistemas de segurança, equipamentos e reagentes laboratoriais para realizar análises como titulação, medição de condutividade e de pH, com o objetivo de determinar e garantir a qualidade da matéria-prima recebida pelos fornecedores.

Se faz necessário também a análise dos produtos para determinação da qualidade do processo, para acompanhamento e sinalização caso exista a necessidade de modificações no processo, falhas e também para garantir com dados analíticos a composição e qualidade do produto final.

Além da estrutura laboratorial a técnica de espectroscopia com plasma indutivamente acoplado (ICP) se torna uma ótima opção para tal análise de produto, servindo para detectar diversos elementos em uma amostra, abrangendo grande parte dos elementos químicos da tabela periódica. Por via da detecção, medição e análise da radiação eletromagnética (luz) a qual é absorvida ou emitida a partir dos átomos, ou íons dos elementos de interesse na amostra, dos quais provém informações quantitativas derivadas da quantidade de radiação absorvida, ou emitida detectadas por um espectrômetro e as qualitativas obtidas a partir dos comprimentos de onda das mesmas (CAZES, 2005).

Existem dois tipos de equipamentos para ICP, a espectroscopia com plasma indutivamente acoplado de emissão ótica (ICP-OES) e a espectroscopia com plasma indutivamente acoplado de massa (ICP-MS), ambos apresentados na Figura 44.

Figura 44 – Equipamento Agilent 5900 ICP-OES (esq.) e Agilent 7900 ICP-MS (dir.)



Fonte: Agilent Technologies (2022).

Comparando com outras técnicas analíticas, as vantagens são o processamento de grande número de amostras, a possibilidade de determinação de vários elementos e melhores limites de detecção para elementos refratários.

Outra técnica com possibilidade de utilização para o processo e com vantagem de poder ser usada por meios terceirizados sem a necessidade de aquisição é a técnica analítica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), equipamento observado na Figura 45.

Figura 45 - Thermo Scientific Apreo 2 SEM



Fonte: Altmann (2022).

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por

linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente (DEDAVID, 2007).

Assim, por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra e recolhido pelo detector para modular o brilho do monitor, permitindo a observação. A maioria dos instrumentos utiliza como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido, operando numa faixa de tensões de aceleração de 1 a 50 kV, em seguida focalizado por uma série de lentes. Quando o feixe primário incide na amostra, parte dos elétrons difunde-se e constitui um volume de interação cuja forma depende principalmente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. Neste volume, os elétrons e as ondas eletromagnéticas produzidos são utilizados para formar as imagens ou para efetuar análises físico-químicas (DEDAVID, 2007).

Para a detecção, é necessário que as resultantes da interação do feixe eletrônico com a amostra retornem à superfície da amostra e daí atingirem o detector. A profundidade máxima de detecção, portanto, a resolução espacial, depende da energia com que as partículas ou raios atingem o detector, ou são capturadas pelo mesmo. A imagem formada a partir do sinal captado pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação do sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra (DEDAVID, 2007).

Por meio de envio de amostras semanais ou mensais para empresa terceirizadas para realizar a análise via MEV é possível garantir a qualidade do produto para a comercialização, pelo método que é utilizado pela análise.

4.6 LOCALIZAÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL

Considerando toda a cadeia produtiva de produtos que utilizam as baterias de íons de lítio como parte integrante e indispensável de seus produtos, tais como celulares, *laptops*, carros elétricos e patinetes elétricos. Sabe-se que o seu consumo é maior em grandes centros urbanos, onde existe um maior contingente de pessoas e as novidades tecnológicas chegam com maior velocidade. Para o caso dos carros elétricos, por mais lento que esteja sendo o seu uso em solo nacional, as expectativas sobre o crescimento da frota no Brasil são bem otimistas e o mesmo está ocorrendo nas grandes capitais. Tal crescimento é incentivado por iniciativas como a oferta de isenção do IPVA para donos de carros elétricos e híbridos nos estados do Rio Grande do Sul,

Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Piauí, Maranhão e Ceará (PERONI, 2021).

Ademais, ocorrem iniciativas até mesmo por parte das grandes montadoras em estabelecerem postos de carregamento, por exemplo. Desse modo, para facilitar o acesso a um grande volume de baterias de íons de lítio descartadas, pretende-se estabelecer a empresa próxima a um grande centro urbano, onde as baterias de íons de lítio descartadas poderão ser facilmente coletadas e utilizadas como matéria-prima para o processo aqui descrito.

Fatores climáticos como temperatura ambiente pouco influenciam no processo, tendo em vista que as temperaturas necessárias para determinadas operações serão supridas de forma artificial. Baseado no Modelo de Negócios, em especial ao atendimento do item de “Parcerias Principais”, é de interesse da empresa estar localizada próxima às fabricantes de baterias de íons de lítio, a exemplo das gigas fábricas de carros elétricos, visando firmar parcerias e obter a matéria-prima necessária de forma facilitada. Os efluentes gerados merecem atenção, logo, deve-se analisar a necessidade de aterros sanitários ou de barragens de rejeitos, por exemplo.

Quanto à mão-de-obra, é imprescindível a contratação de profissionais qualificados, tendo em vista a complexidade do processo produtivo e do produto gerado, assim como o surgimento de novas profissões, considerando o crescimento do mercado de baterias de íons de lítio, tendo como principal referência o ramo automobilístico, logo, estar próximo às instituições de ensino, como universidades, é de grande valor para a empresa.

Fatores gerais como renda, educação e saúde, que podem ser mensurados por meio do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), são interessantes para o item de considerações da comunidade, que terá um peso a respeito da escolha da localização da empresa. Além disso, a segurança é outro fator a ser considerado dentro deste item.

Os sistemas modais disponíveis também possuem peso quanto à escolha da localização, é importante para a empresa estar próxima de rodovias e de outros modais de transporte além do rodoviário, como o duto viário para o fornecimento de gás à empresa, para a operação da caldeira, e do hidrovíario para acesso ao mercado internacional por meio dos portos.

Por fim, regiões que ofereçam incentivos fiscais e possuam políticas favoráveis para novas empresas possuem grande peso na escolha da localização da empresa. Com as características descritas anteriormente, foram selecionados dois municípios para a análise e posterior escolha do que mais se adéque às necessidades descritas, sendo eles o município de Campinas no estado de São Paulo e o de Contagem no estado de Minas Gerais. Para auxiliar na escolha da localização do empreendimento, têm-se os Quadros 1 e 2, que elencam fatores importantes, como alguns já comentados, com diferentes pesos para a escolha do município

onde a empresa será instalada, a escala vai de 1 a 5, sendo 1 igual a “influencia pouco” e 5 igual a “influencia muito”, o município escolhido será aquele que apresentar maior pontuação.

Quadro 1 – Pontuação de Campinas (SP)

| Item | Descrição | Peso na decisão Campinas - SP | | | | |
|-----------------|--|----------------------------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Localização do mercado consumidor | | | | X | |
| 2 | Localização da matéria prima | | | | | X |
| 3 | Transporte de matérias primas e produtos acabados (distribuição) | | | | | X |
| 4 | Disponibilidade de mão de obra (especializada ou não) | | | | | X |
| 5 | Disponibilidade de utilidades (água, combustível, energia elétrica, ...) | | | | | X |
| 6 | Disponibilidade de área adequada para instalação | | | | X | |
| 7 | Impacto ambiental, incluindo a eliminação de efluentes | | | | X | |
| 8 | Considerações da comunidade local (saúde, educação, P&D, ...) | | | | X | |
| 9 | Condições Climáticas | | | X | | |
| 10 | Política, considerações econômicas e estratégicas | | | | X | |
| 11 | Incentivos fiscais (Municipal, Estadual, Regional) | | | | X | |
| 12 | Presença de possíveis empresas parceiras | | | | | X |
| Pontuação Total | | 52 | | | | |

Fonte: Autores (2022).

Quadro 2 – Pontuação de Contagem (MG)

| Item | Descrição | Peso na decisão Contagem - MG | | | | |
|-----------------|--|----------------------------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Localização do mercado consumidor | | | X | | |
| 2 | Localização da matéria prima | | | | X | |
| 3 | Transporte de matérias primas e produtos acabados (distribuição) | | | | X | |
| 4 | Disponibilidade de mão de obra (especializada ou não) | | | | | X |
| 5 | Disponibilidade de utilidades (água, combustível, energia elétrica, ...) | | | | | X |
| 6 | Disponibilidade de área adequada para instalação | | | | X | |
| 7 | Impacto ambiental, incluindo a eliminação de efluentes | | | | X | |
| 8 | Considerações da comunidade local (saúde, educação, P&D, ...) | | | X | | |
| 9 | Condições Climáticas | | | X | | |
| 10 | Política, considerações econômicas e estratégicas | | | | X | |
| 11 | Incentivos fiscais (Municipal, Estadual, Regional) | | | | X | |
| 12 | Presença de possíveis empresas parceiras | | | | X | |
| Pontuação Total | | 47 | | | | |

Fonte: Autores (2022).

4.6.1 Unidade industrial em Campinas

Campinas é um município brasileiro do interior do estado de São Paulo, na região Sudeste do país, distante 99 km a noroeste da capital estadual (São Paulo), que possui uma área territorial de 794.571 km² (2021) com uma população estimada em 1.223.237 pessoas (2021), o IDH de Campinas é de 0,805 (2010), o que é considerado alto (IBGE, 2022).

Tendo em vista o cumprimento do item do Modelo de Negócios de principais parcerias, tem-se como exemplo a montadora chinesa Great Wall Motors (GWM) que anunciou recentemente que comprou a planta da antiga fábrica da Mercedes-Benz em Iracemápolis (SP) para a produção de veículos elétricos e híbridos da sua linha de SUVs e picapes (G1, 2022). A distância entre a cidade de Iracemápolis e Campinas é de 69 km de condução, tal trajeto é realizado por meio de rodovias a exemplo da Rodovia dos Bandeirantes. Portanto, vê-se nesta empresa, assim como em outras, a possibilidade de criação de parcerias no município e arredores.

Com relação ao suprimento de gás natural necessário ao processo, existe a proximidade para com o Gasoduto Bolívia-Brasil no município de Campinas. Ademais, tem-se a presença de grandes instituições de ensino no município, a exemplo da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

Outra vantagem da escolha do empreendimento em Campinas é de que o mesmo fica a uma distância relativamente curta (189 km) do maior porto do país, o Porto de Santos, quando comparado ao município de Contagem, localizado longe do litoral. Dessa forma, o acesso ao mercado internacional por meio do porto é facilitado.

Quanto ao item de incentivos fiscais, Campinas é pioneira na criação da “Lei da Inovação”, a Lei n.º 16.165/2021, que cria um sistema de inovação para estimular, organizar e apoiar uma rede qualificada, com ações para potencializar o desenvolvimento de empresas e *startups*. Em suma, o município vai incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de produtos, serviços e processos inovadores em empresas, *startups* e entidades de direito privado sem fins lucrativos (SANTOS, 2022).

4.6.2 Unidade industrial em Contagem

Contagem é um município brasileiro do estado de Minas Gerais, na região Sudeste do país, pertencente à região metropolitana da capital mineira Belo Horizonte, que possui uma área

territorial de 194.746 km² (2021) com uma população estimada em 673.849 pessoas (2021). O IDH de Contagem é de 0,756 (2010), o que é considerado médio (IBGE, 2022).

O município é favorecido em alguns fatores, como em relação ao ensino superior, pela sua localização geográfica próxima à capital Belo Horizonte, que conta com instituições de ensino de renome como a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

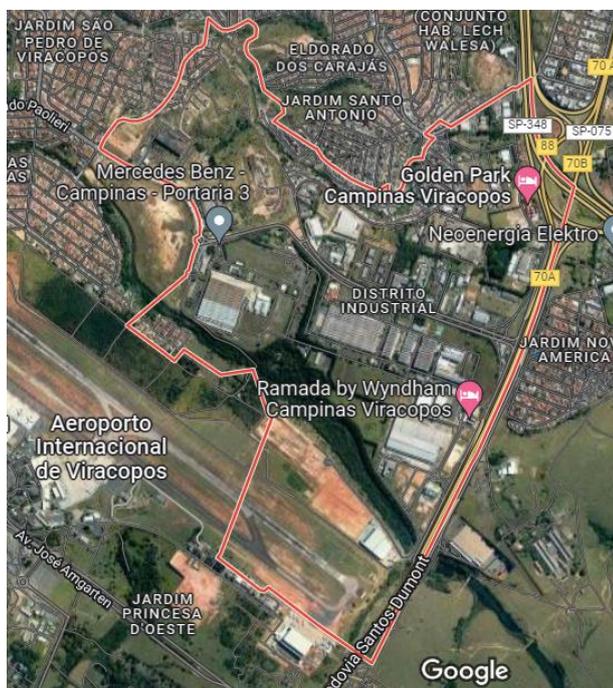
Em comparação com Campinas, no item de “parcerias principais” do Modelo de Negócios, tem-se planejado para o município de Nova Lima, também região metropolitana de Belo Horizonte, a construção da primeira giga fábrica para carros elétricos e baterias no Brasil, projeto este encabeçado pela Bravo Motor Company em parceria com a Rockwell Automation. A parceria visa construir um complexo voltado para a mobilidade elétrica, chamado provisoriamente de *Colossus Cluster*, que terá um investimento inicial de US\$ 4 bilhões (AMARAL, 2022). Tal como no exemplo citado para a cidade de Campinas, aqui tem-se um caso de uma empresa com a qual pode-se firmar parcerias, assim como para com outras empresas do município e proximidades.

Segundo a Prefeitura de Contagem (2022), esforços contínuos são feitos pelo município para atrair empresas e investimentos, melhorar o ambiente de negócios, desenvolver iniciativas e oportunizar a criação de novos negócios e a expansão dos já estabelecidos na cidade. Desta forma, foi criada a Política de Inovação e Apoio ao Setor Produtivo de Contagem, instituída pela Lei Complementar n.º 268 de 6 de novembro de 2018, que permite que parte dos valores que seriam recolhidos ao município de impostos como IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano), ISSQN (Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza) e ITBI (Imposto de Transmissão de Bens Imóveis) sejam revertidos pelas empresas em projetos de inovação, modernização e expansão de suas atividades, acelerando assim o crescimento da economia, da geração de empregos e renda, para beneficiar toda a sociedade. Além disso, a Companhia de Gás de Minas Gerais (Gasmig) possui um gasoduto na região metropolitana de Belo Horizonte, compreendendo em parte o município de Contagem.

Por fim, escolheu-se Campinas como o município para localização da unidade industrial, tal escolha foi embasada nos aspectos qualitativos discutidos e apresentados de forma resumida nos Quadros 1 e 2 onde foram pontuados, ambos os municípios apresentaram fatores muito interessantes para o estabelecimento do empreendimento. Contudo, por uma pequena diferença no somatório de pontos e de maiores possibilidades da firmação de parcerias no município de Campinas, considerado um aspecto crucial para alavancar o processo aqui disposto, optou-se por este município. Além disso, por estar melhor localizada quanto a matéria-prima e apresentar rotas de distribuição mais eficientes como escoamento marítimo com relação

às de Contagem, o empreendimento será instalado na região que compreende o distrito industrial de Campinas, como demonstrado pela Figura 46.

Figura 46 – Distrito Industrial de Campinas (SP)



Fonte: Google Mapas (2022).

4.7 EXIGÊNCIAS LEGAIS

4.7.1 Registro de CNPJ

O Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica (CNPJ) é administrado pela Receita Federal. De acordo com a Instrução Normativa nº 1863 da Receita Federal, de 2018, todas as entidades domiciliadas no território nacional estão obrigadas a se inscreverem no CNPJ antes do início de suas atividades. Para isso, devem ser preenchidos e entregues ao Rede Nacional para a Simplificação do Registro e da Legalização de Empresas e Negócios (Redesim) os seguintes documentos: Ficha Cadastral da Pessoa Jurídica (FCPJ), QSA (Quadro de Sócios e Administradores), que é preenchido com a qualificação da Tabela de Natureza Jurídica e Qualificação dos Integrantes, Ficha Específica do Convenente e Ficha de Beneficiários Finais.

4.7.2 Licenciamento Ambiental

De acordo com a Lei Federal 6.938, de 1981, o Licenciamento Ambiental é obrigatório em todo o território nacional para qualquer atividade efetivamente ou potencialmente poluidora (BRASIL, 1981). Caso alguma empresa opere sem a Licença Ambiental estará sujeita às sanções da Lei Federal 9.605, de 1998, que se refere à crimes ambientais (BRASIL, 1998). No estado de São Paulo, de acordo com o Decreto Estadual n° 47.400, de 2002, é a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) a responsável pelo licenciamento ambiental de atividades (SÃO PAULO, 2015).

Conforme Feitosa et al. (2004), o processo de licença ambiental é constituído por três licenças, a Licença Prévia (LP), a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO). A Licença Prévia define todos os aspectos referentes ao controle ambiental da empresa, como a determinação se o local de instalação da mesma é adequado. Para isso, podem ser realizados estudos de impacto ambiental pelas autoridades adequadas de cada estado. A LP é a primeira etapa do licenciamento. A Licença de Instalação é solicitada após a obtenção da LP e autoriza o início da construção do empreendimento. Por fim, a Licença de Operação autoriza o funcionamento da empresa, após a verificação do cumprimento do que consta nas outras duas licenças. Deve ser buscado uma LO após a empresa já estar edificada e a sua renovação deve ser feita até 120 dias antes do seu vencimento.

Na Resolução n.º 237/97 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estão descritos os prazos de validade de acordo com cada tipo de licença. Nesta resolução, é informado que o órgão ambiental competente estabelecerá os prazos de validade de cada tipo de licença, especificando-os no respectivo documento. O prazo de validade da Licença Prévia (LP) deverá ser, no mínimo, o estabelecido pelo cronograma do projeto apresentado pelo empreendimento, não podendo ser superior a 5 anos. O prazo de validade da Licença de Instalação (LI) deverá ser, no mínimo, o estabelecido pelo cronograma de instalação do empreendimento, não podendo ser superior a 6 anos. Além disso, o prazo de validade da Licença de Operação (LO) deverá considerar os planos de controle ambiental e será de, no mínimo, 4 anos e, no máximo, 10 anos (BRASIL, 1997).

4.7.3 Alvará de Funcionamento

O alvará de funcionamento comprova que uma determinada empresa pode exercer suas atividades na cidade em que foi solicitado. Segundo o Decreto n° 17.313, da Prefeitura de Campinas (2011), para se obter um alvará de funcionamento, são necessários os seguintes documentos: requerimento de alvará de uso, CNPJ e Contrato Social, cópias dos documentos

pessoais do requerente, Declarações de Conformidade e Uso do imóvel, fotos do imóvel, vistoria do Corpo de Bombeiros, contrato de locação do imóvel, termo de declaração da Sanasa, que demonstra que o local está apto quanto ao sistema de água e esgoto, Licença de Operação da CETESB e as taxas pagas com os devidos comprovantes (CAMPINAS, 2011).

4.7.4 Política Nacional de Resíduos Sólidos

A Lei Nacional nº 12.305, de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Objetiva-se nesta Lei a proteção da qualidade ambiental e da saúde pública, um estímulo à adoção de padrões sustentáveis, adoção e aprimoramento de tecnologias limpas para a minimização dos impactos ambientais, redução de volume e periculosidade de resíduos perigosos, o incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista a viabilização do uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados, a prioridade em aquisições governamentais para produtos reciclados e recicláveis, entre outros.

Na Lei consta que, na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, tem-se uma preferência para a não geração dos mesmos, seguido por uma redução, reutilização, reciclagem, e, em último caso, tratamento destes resíduos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Dentre a classificação de resíduos sólidos quanto à origem, destaca-se, no caso da REFVI Metal, os industriais, ou seja, gerados nos processos produtivos e instalações industriais.

4.7.5 Normas Regulamentadoras

A Norma Regulamentadora nº 5 dispõe sobre a Comissão Interna de Prevenção de Acidentes, chamada também de CIPA (BRASIL, 2021). A CIPA tem como objetivo prevenir acidentes de trabalho e doenças relacionadas ao mesmo. Essa comissão de funcionários é eleita por votação dentro da empresa. Esta comissão então passa por um período de treinamento e após, busca encontrar problemas e soluções para os mesmos, como, por exemplo, a elaboração de um mapa de riscos da empresa, executando as melhorias necessárias. Todas as empresas com mais de 20 funcionários são obrigadas a ter uma CIPA (BRASIL, 2021). Como a empresa a ser constituída, denominada REFVI Metal, vai possuir 148 funcionários, a ser especificado na análise econômica, precisa, portanto, de 4 membros efetivos da CIPA e 3 suplentes.

O uso de equipamentos de proteção individual é previsto na Norma Regulamentadora nº 6. A norma diz que é de obrigação da empresa fornecer o equipamento necessário, exigir o

uso deste equipamento e substituir o mesmo quando necessário, como, por exemplo, após o seu vencimento. O empregado, portanto, deve utilizar o equipamento necessário, conservá-lo e cumprir com o que for pedido pelo empregador quanto ao seu uso. Alguns equipamentos utilizados são: capacete, óculos, vestimentas adequadas, luvas, botas e protetor auricular, entre outros (BRASIL, 2018). Esta norma tem grande importância na empresa, especialmente no uso de máscaras que possam proteger os funcionários dos solventes e produtos químicos utilizados no processo.

A Norma Regulamentadora nº 23 delibera sobre proteção contra incêndios. É afirmado na norma que os locais de trabalho precisam de saídas suficientes para que o local possa ser evacuado com agilidade, caso ocorram emergências. Estas saídas precisam de sinalização clara ou sinal luminoso que facilite a sua visualização. Além disso, o empregador deve informar todos os funcionários sobre equipamentos que combatem incêndios, procedimentos para evacuação do local de trabalho e alarmes de incêndio existentes no ambiente (BRASIL, 2011).

De acordo com a Norma Regulamentadora nº 25, que trata de resíduos industriais, é dever da empresa a busca por uma minimização da geração de resíduos, sendo que os resíduos sólidos e líquidos devem ser coletados, acondicionados, armazenados e transportados de forma adequada, além de terem uma destinação final correta dada pela empresa (BRASIL, 2011).

5 PROJETO DO PROCESSO

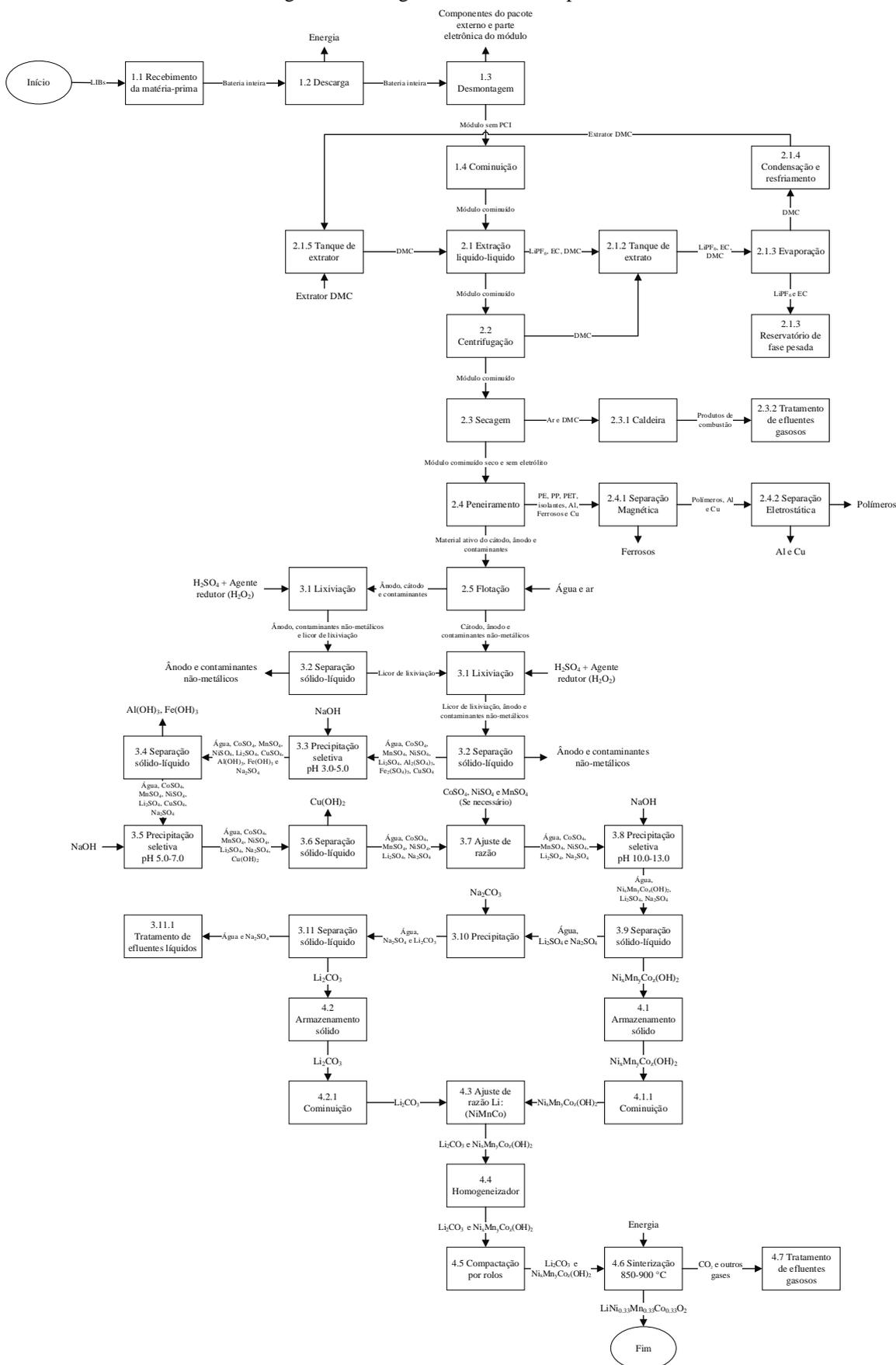
O projeto do processo seguirá, em parte, as rotas tecnológicas desenvolvidas por Morin et al. (2021) e Wang et al. (2021), aos quais desenvolveram processos de reciclagem de LIBs por diferentes rotas tecnológicas. O projeto considera as ideias e os dados desenvolvidos pelas duas rotas, porém adaptando-as para as perspectivas da matéria-prima considerada no atual projeto, e desenvolvendo necessidades adicionais e detalhamentos importantes não previstos nas patentes. Além disso, o projeto se baseia no uso de baterias de carros elétricos como matéria-prima principal, e com isso é possível abranger outros tipos de baterias menores (dispositivos eletrônicos, veículos menores, etc.), já que baterias menores tendem a ser células ou módulos de uma bateria veicular.

A composição da matéria-prima proveniente de diferentes tecnologias, além de dados sobre a composição química, características físicas das diferentes baterias, e valores monetários por componente, são obtidos do *software* Battery Performance and Cost Model (BatPaC v5.0), e pelo modelo GREET® com sua lista de materiais, sendo estes, de autoria e direitos reservados ao Argonne National Laboratory (ANL) do Departamento de Energias dos Estados Unidos. A licença acadêmica do *software* foi concedida pelo Dr. Shabbir Ahmed, em contato direto por e-mail, para o uso no presente projeto de rota tecnológica. O *software* também foi encaminhado junto com seu manual, que considera características importantes para a construção dos dados presentes no *software*, o qual também foi disponibilizado no contato. As publicações acerca do modelo GREET® foram encontradas em buscas relacionadas ao tema em publicações recentes e atualizadas do ANL em sua página oficial.

5.1 DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO

O diagrama de blocos do processo é apresentado na Figura 47. Em sequência, serão descritas as operações envolvidas em cada etapa.

Figura 47 – Diagrama de blocos do processo

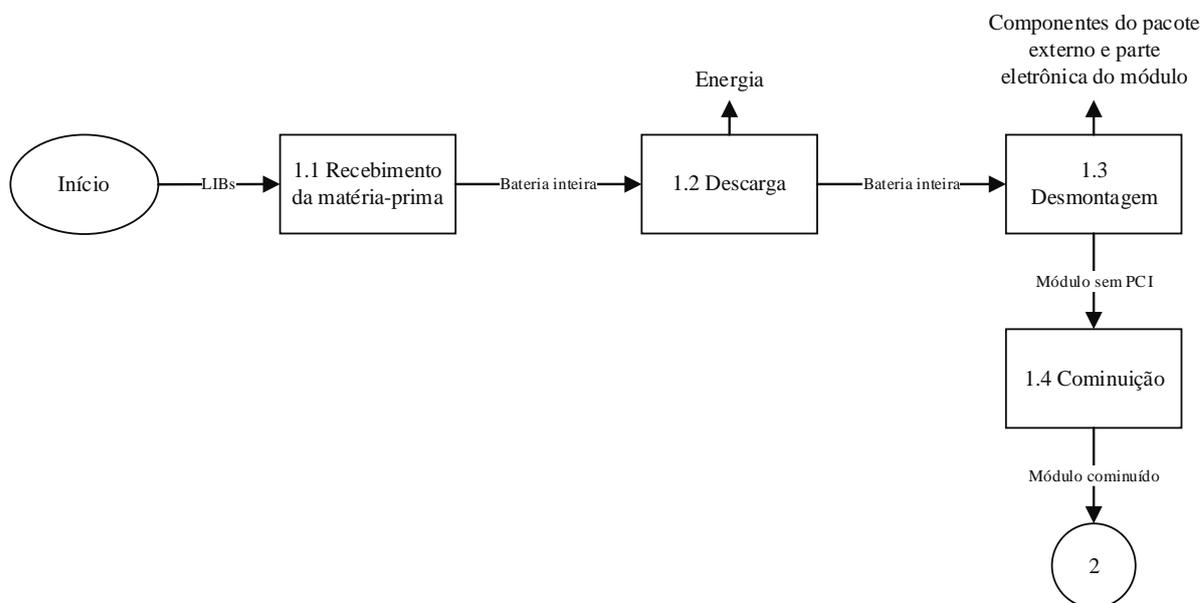


Fonte: Autores (2022).

5.1.1 Etapa de pré-tratamento

O diagrama de blocos da etapa do pré-tratamento pode ser visualizado na Figura 48.

Figura 48 – Diagrama de blocos do pré-tratamento



Fonte: Autores (2022).

5.1.1.1 Recebimento da matéria-prima

O processo inicia com o recebimento da matéria-prima, consistindo de baterias descartadas de veículos elétricos, veículos híbridos ou componentes eletrônicos menores. As baterias de veículos elétricos caracterizam-se por serem grandes e pesadas, considerando as dimensões e o peso descrito na definição da matéria-prima conforme a composição e os tamanhos considerados. Dessa forma, é necessário o uso de máquinas transportadoras, como guindastes de ponte rolante (Figura 49) para o transporte das baterias dos caminhões até o estoque, para posterior encaminhamento à etapa de descarregamento, e esteiras para a movimentação dessa matéria-prima até as etapas de desmontagem e de cominuição, pelo seu volume e massa. Ademais, quando necessário, uma empilhadeira estará à disposição para uso.

Figura 49 – Guindaste de ponte rolante



Fonte: hmn.wiki (2022).

5.1.1.2 Descarregamento

Após o recebimento da matéria-prima com adequação ao estoque e posterior transporte até uma esteira transportadora apropriada, as baterias são conectadas eletricamente para o descarregamento da energia elétrica residual. Isso é feito de modo manual por funcionários com os devidos EPIs isolantes através da esteira, com conectores para os pinos de conexão elétrica da bateria com os polos inversos, ocasionando assim a retirada da energia.

Seguindo este princípio de funcionamento, a etapa de descarregamento pode ser realizada através do equipamento EA-ELR-9500-30 fornecido pela EPS Stromversorgung GmbH (Figura 50). A tensão máxima de entrada é de 500 V com uma corrente máxima de descarga limitada a 30 A ou 3,5 kW. São suportados quatro modos de controle: CC (corrente constante), CV (voltagem constante), CP (potência constante) e CR (resistência constante). Tal equipamento permite a recuperação de energia, logo, a energia retirada pode ser introduzida em fontes de abastecimento locais e públicas. O dispositivo pode ser regulado usando um painel de toque ou por *software* próprio do equipamento. A eficiência na tensão ou potência máxima de entrada é de 94,5% (HAUCK & KURRAT, 2018).

Figura 50 – Carga ajustável eletronicamente para descarregamento de módulos



Fonte: Hauck & Kurrat (2018).

5.1.1.3 Desmontagem

As baterias são desmontadas manualmente por funcionários com o auxílio de ferramentas isoladas eletricamente para a retirada dos módulos presentes, as ferramentas devem ser de fácil acesso e identificação dentro da estação de trabalho, removendo partes externas como a tampa e diferentes tipos de parafusos utilizados nas juntas. As partes desmontadas devem ser separadas em quatro categorias: eletrônicos, metais ferrosos, módulos da bateria e materiais residuais (WEGENER et al., 2014). Como exemplo, a Figura 51 apresenta a desmontagem de baterias de tração na *Umicore Battery Recycling*. Na parte debaixo da figura, da esquerda para a direita, observa-se a carcaça de alumínio, placa de circuito impresso, porcas e parafusos, coletores de corrente de cobre, cabeamento, plásticos e módulos.

Figura 51 – Componentes da bateria pós-desmontagem

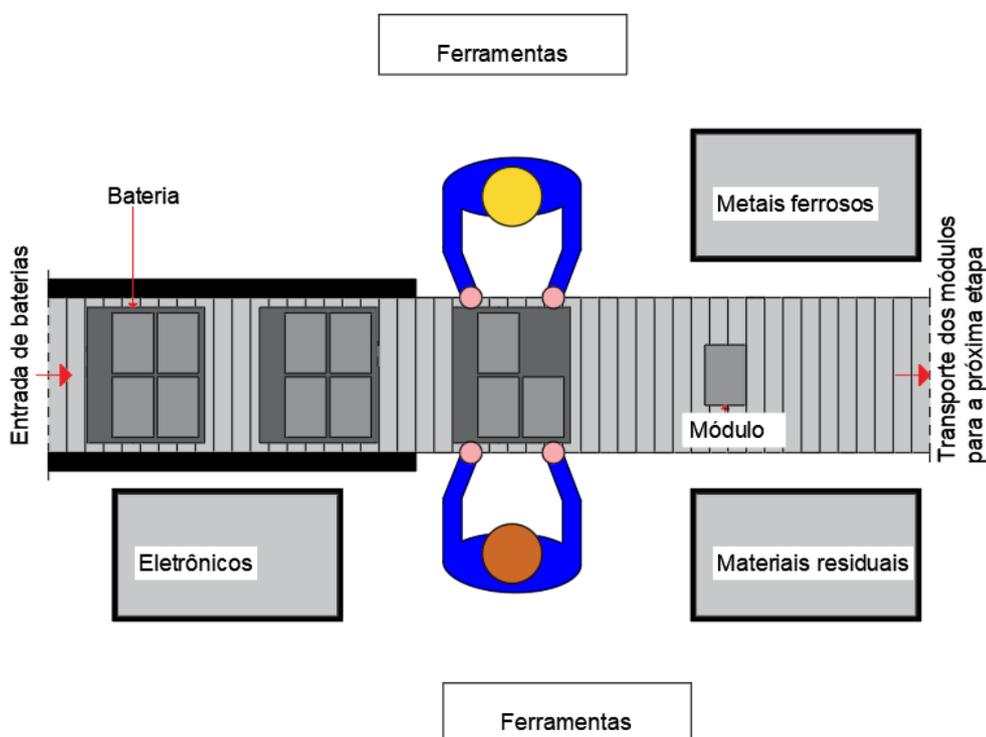


Fonte: Elwert, et al. (2015).

Com relação às ferramentas utilizadas na desmontagem, reforça-se que as mesmas são simples como chaves de fenda para diferentes tipos de abertura e alicates, a fim de evitar lesões por esforço repetitivo os funcionários encarregados pela desmontagem terão ferramentas pneumáticas à sua disposição, como parafusadeiras pneumáticas para a retirada de parafusos.

Na estação de desmontagem, é necessário o uso de EPIs, a existência de extintores de incêndio, kits de emergência e equipamentos para a medição de energia elétrica residual, como o multímetro, garantindo a segurança na abertura da bateria. Um sistema de exaustão deve ser instalado no local, protegendo o funcionário de possíveis vazamentos de gases. Após os módulos da bateria serem separados, os mesmos são encaminhados por esteiras para a etapa de cominuição grosseira. A Figura 52 apresenta esquematicamente o *layout* proposto da estação de trabalho da desmontagem.

Figura 52 – Estação de trabalho da etapa de desmontagem



Fonte: Autores (2022).

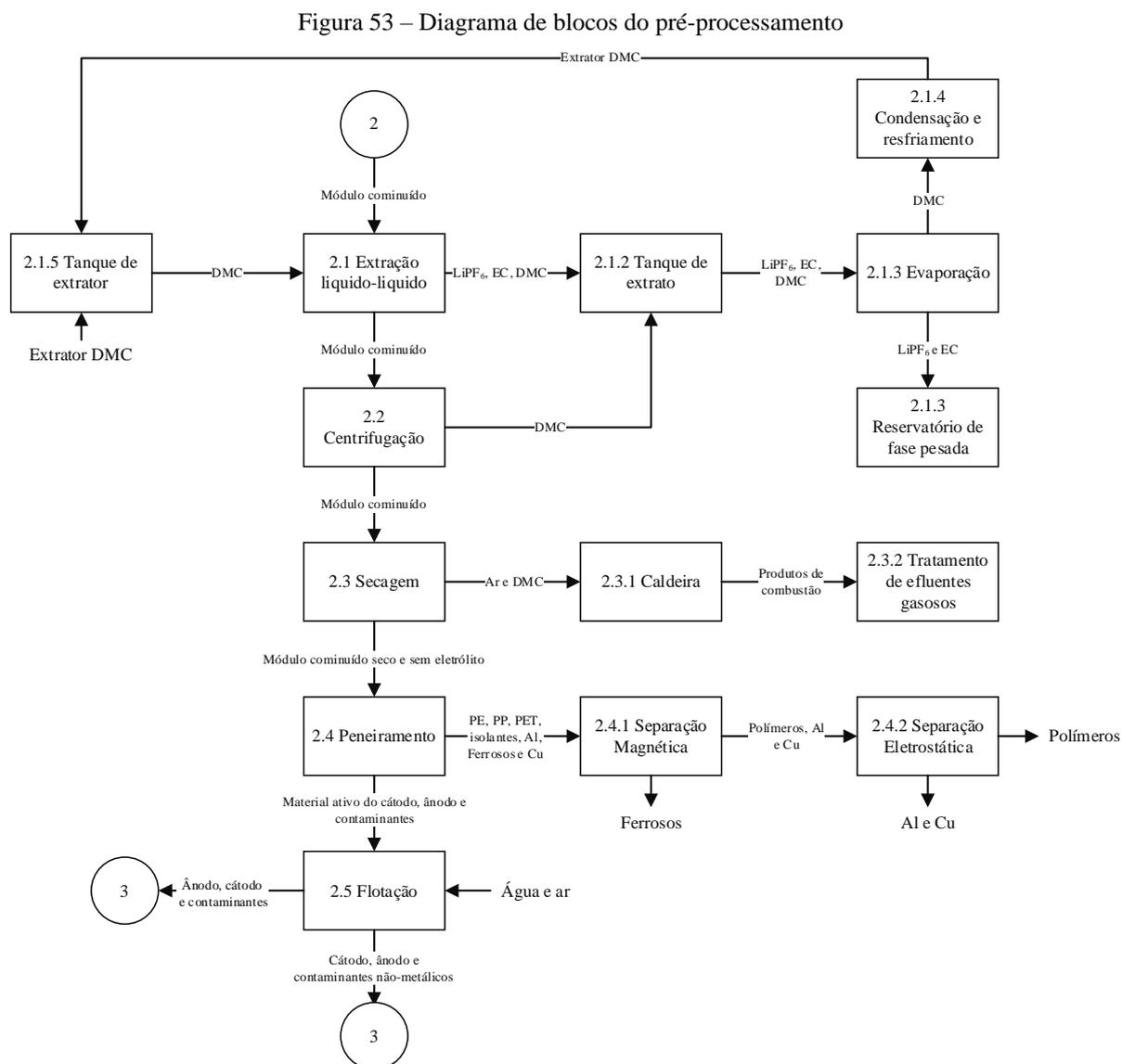
5.1.1.4 Cominuição

Nessa etapa, os módulos são cominuídos por trituradores (*shredders*) para partículas intermediárias. Esses equipamentos devem ser isolados da atmosfera fabril, pois os componentes orgânicos do eletrólito são altamente voláteis, e podem poluir o ar atmosférico, além de oferecerem riscos de explosão e serem tóxicos. O processamento deve garantir partículas entre 5 a 10 mm, e pode ser realizado continuamente com a conexão adequada a um transportador de sólidos em túnel em um *layout* vertical com a ajuda da gravidade, isolando as partículas da atmosfera também no transporte, e garantindo o transporte da fase líquida. Além

disso, é necessário um certo fluxo de gás inerte para garantir a estabilização do material no triturador, podendo ser utilizado N_2 ou CO_2 (MORIN et al., 2021).

5.1.2 Etapas de pré-processamento

O diagrama de blocos da etapa do pré-processamento pode ser visualizado na Figura 53.



Fonte: Autores (2022).

5.1.2.1 Extração líquido-líquido

Após a cominuição, uma extração líquido-líquido deve ser feita a fim de diluir e transportar os solventes orgânicos e o sal de lítio ($LiPF_6$) do eletrólito. O extrator a ser usado

consiste em um dos componentes do eletrólito, o DMC, e por isso foi escolhido por ser o extrator, o qual se mostra eficiente na diluição dos componentes, baseado no estudo da rota tecnológica do projeto LithoRec. A operação segue os conceitos definidos na patente de Morin et al. (2021), seguindo os dados de eficiência da rota tecnológica do projeto LithoRec, já que o primeiro autor não destaca dados de eficiência em seu projeto e apenas apresenta a operação de modo qualitativo. Além disso, os diagramas de equilíbrio para os componentes não foram encontrados na literatura, dificultando assim as condições de cálculo.

Dessa forma, a descrição do projeto LithoRec por Haas et al. (2018) considera os cálculos para a extração líquido-líquido com o objetivo de manter a concentração de LiPF_6 no particulado em, no máximo, 0,007 g por kg de bateria, utilizando o solvente DMC como extrator. A melhor condição obtida foi em temperaturas de 20 °C, com relação de kg de solvente por kg de sólido em 10:1 em agitação de 50 rpm. O número de estágios para a condição objetiva foi de 5, em um tempo de extração de 30 minutos por estágio. Os solventes presentes, com o sal, são diluídos no DMC adicionado pelas suas afinidades de operação. A Tabela 11 demonstra a eficiência de remoção do LiPF_6 do material cominuído.

Tabela 11 – Eficiência de remoção do LiPF_6 do material cominuído (L:S de 10)

| Relação de solvente (kg de solvente/kg de sólidos) | Estágio | Eficiência (%) |
|---|----------------|-----------------------|
| 10 | 1 | 89,93 |
| | 2 | 90,31 |
| | 3 | 79,51 |
| | 4 | 79,31 |
| | 5 | 86,67 |

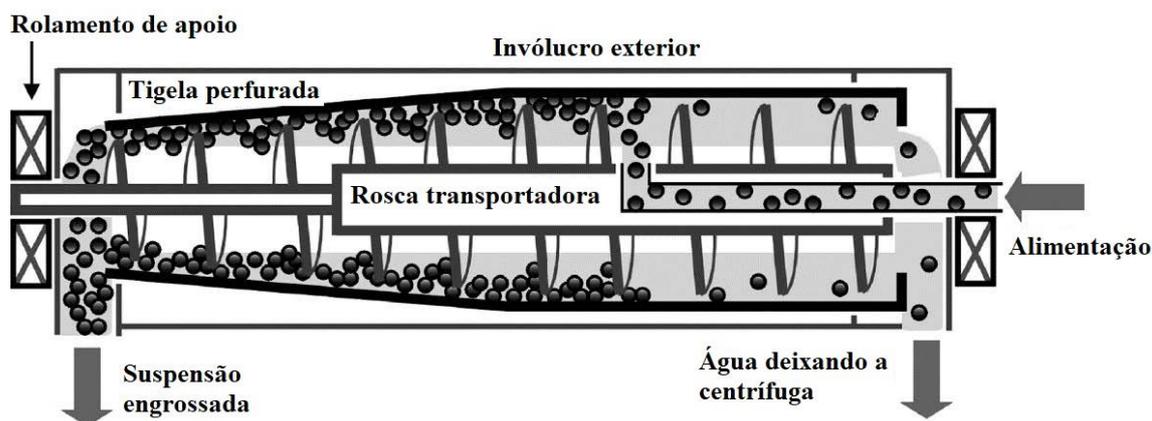
Fonte: Adaptado de Haas et al. (2018).

5.1.2.2 Centrifugação

O uso da centrifugação serve para eliminar parte do extrator remanescente após a extração líquido-líquido e assim, economiza-se energia na etapa de secagem. A operação emprega forças centrífugas para acelerar a sedimentação de partículas (ou gotículas de líquido) dentro de equipamentos rotativos. Diferentes tipos de centrífugas estão disponíveis para diferentes tipos de teor sólido-líquido. As centrífugas de tigela sólida (ou decantador de rolo) são as mais recomendadas para conteúdos com teor de líquido entre 4 e 40% em massa, operando em concentração de sólidos intermediárias ou altas. A centrifugação pode ser adaptada para uso com substâncias tóxicas, inflamáveis e voláteis, o que é aplicável ao DMC.

O objetivo da centrifugação é retirar pelo menos 95% de todo líquido remanescente presente na mistura sólido-líquida. A Figura 54 demonstra a operação de uma centrífuga de tigela sólida horizontal, onde os sólidos concentrados saem de um lado, e o líquido concentrado sai de outro (TARLETON & WAKEMAN, 2007; COUPER et al., 2005).

Figura 54 – Centrífuga de tigela sólida horizontal



Fonte: Tarleton & Wakeman (2007).

5.1.2.3 Secagem

As partículas cominuídas são secas em um túnel de secagem conectado com o transportador de sólidos em túnel, para a retirada do DMC remanescente nas partículas. Essa secagem deve ser feita com ar em temperaturas de 80 e 90 °C por um tempo adequado, até que todo componente úmido tenha sido retirado. É necessário um mínimo de 80 °C para remover a maioria do solvente, e um máximo de 120 °C, pois, a partir disso, a temperatura altera a fase dos materiais de revestimento nas lâminas coletoras, e decompõe polímeros presentes, influenciando no processo de separação com peneiramento subsequente. O ar residual deve ser tratado a fim de descontaminar a massa de solventes presente neste, podendo ser utilizado um condensador para retirar boa parte do que é evaporado, e um lavador de gases para descontaminar o ar. Se a concentração de flúor e outros contaminantes estiverem com uma concentração baixíssima (ppb) na corrente, pode-se utilizar também como combustível para a caldeira por meio de sua queima, juntamente com um sistema de lavagem de gases. As partículas secas são transportadas por esteiras abertas até o peneiramento (WERNER et al., 2022).

5.1.2.4 Peneiramento

O material cominuído é alimentado a peneira vibratória para separar parte dos pós catódicos e anódicos do material remanescente. Os sólidos residuais composto por partículas maiores como a folha de alumínio e cobre, bem como plásticos, são retirados em frações superiores da peneira e encaminhados para as etapas de separação magnética e, posteriormente, separação eletrostática. Enquanto partículas do ânodo e do cátodo contaminadas por partículas de menor tamanho das impurezas não interessantes seguem para o processo após passarem por um tamanho de abertura da peneira de 250 μm (60 mesh) (VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ et al., 2019). Os materiais anódicos e catódicos provenientes das baterias de íons de lítio trituradas consistem de uma fração fina inferior a 200 μm (ZHAN, OLDENBURG & PAN, 2018). Supõe-se que as peneiras sejam equipamentos ideais de separação, ou seja, não ocorre a retenção de material nas aberturas e nenhum material é perdido devido à vibração e/ou trepidação das peneiras.

5.1.2.4.1 Separação magnética

Nessa etapa, as partículas secas compostas principalmente por alumínio, cobre, materiais ferrosos e polímeros provenientes da peneira são alimentadas ao separador magnético com o objetivo de remover os materiais ferrosos. A alimentação é feita continuamente através do separador de tambor rotativo, aos quais as partículas fortemente magnéticas são separadas em um compartimento em que são acumuladas para sua retirada do processo, e as partículas fracamente magnéticas e não magnéticas são transferidas para a etapa seguinte de separação eletrostática, como as partículas do alumínio, do cobre e dos polímeros.

5.1.2.4.2 Separação eletrostática

A separação eletrostática recebe o material advindo da separação magnética que consiste basicamente de impurezas não-condutivas e/ou pouco condutivas ao processo, em suma, fragmentos de alumínio, cobre e polímeros. A alimentação é feita pela esteira utilizando o princípio da separação por corrente parasita, formando duas frações: a de materiais pouco ou não condutivos, e a de materiais com maior condutividade.

De acordo com Bertuol et al. (2017), para amostras de baterias do tipo LCO, teve-se para as variáveis analisadas, como as melhores condições de operação para o separador eletrostático, uma velocidade de rotação do rolo de 20 rpm, voltagem do eletrodo de 25 kV,

distância eletrostática do eletrodo de 6 cm e ângulo de inclinação do defletor de 0°. Tais condições propiciaram o recolhimento de uma fração de materiais condutivos contendo 98,98% em peso de materiais metálicos e uma fração de materiais não condutivos contendo 99,60% em peso de polímeros.

Com a utilização da etapa de separação magnética que antecede a presente etapa, espera-se uma separação ainda mais eficiente entre os materiais condutivos e não condutivos. Assim, é possível separar o alumínio e o cobre dos polímeros. Estes materiais serão vendidos a outras instalações que realizem o seu processamento.

5.1.2.5 Flotação

De acordo com Zhan, Oldenburg e Pan (2018), grafite é naturalmente hidrofóbico, enquanto materiais catódicos como o LiCoO_2 são hidrofílicos. Com isso, os autores realizaram experimentos de flotação por espuma com uma variedade de baterias de íons de lítio novas e descartadas usando querosene como coletor, o coletor é uma substância química que se fixa seletivamente à superfície do material desejado aumentando sua hidrofobicidade, e metil isobutil carbinol (MIBC) como espumador demonstrando que mais de 90% dos materiais anódicos flutuaram em camadas de espuma, enquanto 10-30% dos materiais catódicos flutuaram. Análises termogravimétricas mostraram que a presença de ligantes e aditivos condutores dentro dos materiais catódicos liberados das camadas dos eletrodos podem ter sido os responsáveis pela flutuabilidade parcial dos materiais catódicos.

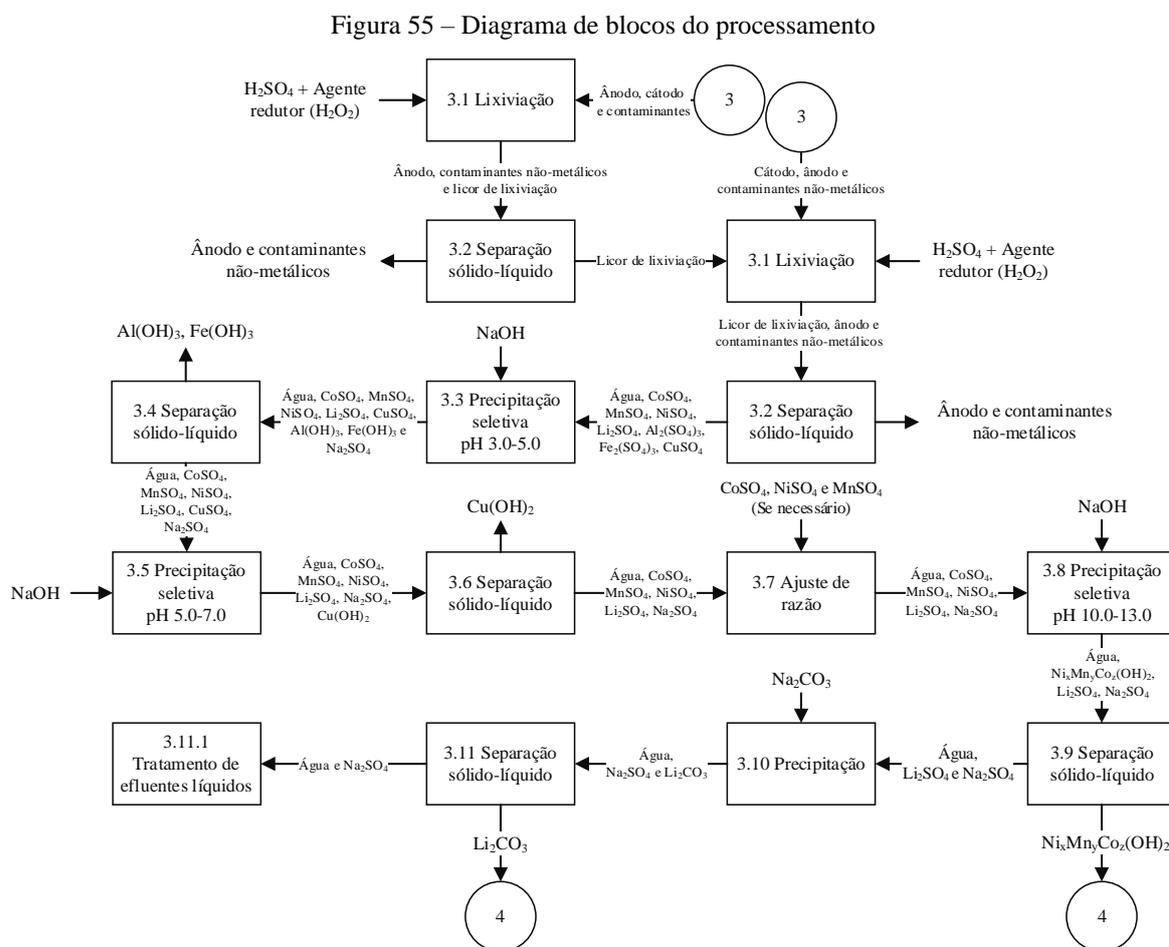
De forma geral, para as baterias de íons de lítio descartadas, 80%-97% dos materiais anódicos flutuaram em 4 minutos após o início da aeração, enquanto a fração de materiais catódicos que flutuaram variou de 8,8% a 35,0% para as amostras pesquisadas, considerando uma aeração de 100% e uma agitação de 1500 rpm em um flotador por ar dissolvido modelo Denver D-12, não apresentando informações acerca das vazões de ar e diâmetros das bolhas utilizadas (ZHAN, OLDENBURG & PAN, 2018). Em experimentos semelhantes, Salces et al. (2022) utilizou uma taxa de fluxo de ar de 5 L/min.

Ademais, a quantidade utilizada de querosene foi de 2 kg/t de materiais finos de bateria, sendo adicionado de forma constante na entrada de líquido, e permanecendo nos processos seguintes (pela baixíssima concentração), até o tratamento dos efluentes. O beneficiamento de materiais finos de bateria usando a flotação por espuma é economicamente viável em uma produção em grande escala. O custo operacional é estimado em US\$ 4,40 por tonelada métrica seca de materiais finos de bateria com base em dados de limpeza industrial de carvão fino

(ZHAN, OLDENBURG & PAN, 2018). Além disso, a flotação com água de processo não apresenta impacto significativo na recuperação e teor dos produtos da flotação, o que sugere a viabilidade da recirculação da água na flotação de massa negra (SALCES et al., 2022). No presente projeto, utilizou-se um flotor por ar induzido para realizar a aeração, não necessitando do fornecimento externo de ar, como por meio de compressores, com um motor instalado de 150 kW para realizar esta operação, como apresentado no Apêndice A, seção A.2.2.16.

5.1.3 Etapas de processamento

O diagrama de blocos da etapa do processamento pode ser visualizado na Figura 55.



Fonte: Autores (2022).

5.1.3.1 Lixiviação

Um tanque de lixiviação deve ser utilizado para a alimentação dos componentes separados pelo flutador. O processo deve ocorrer em uma lixiviação inorgânica ácida, utilizando uma composição necessária para a estequiometria da reação com os metais e um excesso de aproximadamente 15% em massa de H_2SO_4 para a redução do pH. O H_2O_2 como agente redutor deve estar composto no líquido em cerca de 15% em massa. A reação precisa ocorrer entre 70 a 80 °C por pelo menos 3 horas, para a passagem aos processos posteriores. Além disso, o sistema de reação precisa considerar a aeração ocasionada pela reação de lixiviação (liberação de O_2) (MORIN et al., 2021; WANG et al., 2021).

O pH pode ser calculado diretamente com relação à concentração de íons H^+ em solução (Equação 7). Dessa forma, o equilíbrio iônico da água pode ser dado pela Equação 8, ao qual estabelece um equilíbrio entre íons H^+ e OH^- , e assim, quando a concentração de um dos dois íons é maior que a do outro, o pH se torna alcalino ($[H^+] < [OH^-]$) ou ácido ($[H^+] > [OH^-]$). Já quando a concentração é igual entre os íons, o pH é neutro ($[H^+] = [OH^-]$). Assim, a constante de equilíbrio da água é dada pela Equação 9 (GUPTA, 2003).

$$pH = -\log ([H^+]) \quad (7)$$



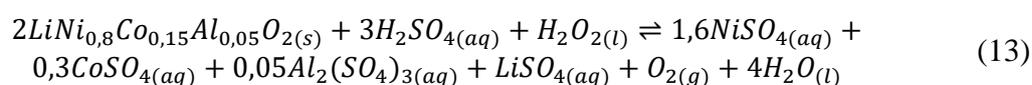
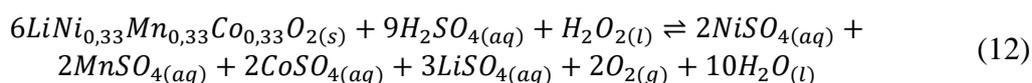
$$K_w = [H^+][OH^-] = 10^{-14} \quad (9)$$

A dissociação do ácido sulfúrico segue dois passos importantes descritos por (PAVLOV, 2022), liberando seus íons H^+ e SO_4^{2-} para a solução, reduzindo o pH da solução e oxidando o meio, bem como complexando os compostos oxidados no meio aquoso em sulfatos. As Equações 10 e 11 demonstram o mecanismo de dissociação do ácido.

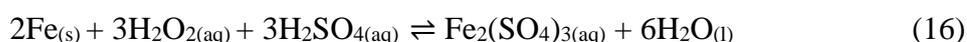
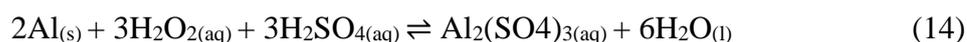


Para as reações com dissolução dos metais, a solubilidade de compostos iônicos deve ser considerada em meio aquoso, supondo que estes compostos sofram dissociação ou associação eletrolítica. Por isso, os metais dissolvidos (na forma de íons) se encontram na forma associada/dissociada no meio com íons de sulfato que, por sua vez, são resultantes da dissociação iônica do ácido sulfúrico (MOLDOVEANU & DAVID, 2015; LARSON, 1970).

Assim, a Equação 12 demonstra a reação geral balanceada para a lixiviação do material ativo proveniente de cátodos NMC 111 (OR et al., 2019; HO & CHEN, 2018; SASTRE, 2021; BENJAMASUTIN & PROMPHAN, 2020; SCHIAVI et al., 2021; DIAZ et al., 2020; JENSEN, 2019). A Equação 13 demonstra a reação balanceada para a lixiviação do material ativo proveniente de cátodos NCA (MUZAYANHA et al., 2019; JUMARI et al., 2020; JUMARI & APRILIYANI et al., 2020).



Para os contaminantes de Al, Cu e Ferrosos, as Equações 14 (ZOU et al., 2021; CHERNYAEV et al., 2021), 15 (YANG et al., 2011; VEGLIO et al., 2013; ZOU et al., 2021) e 16 (SILVA et al., 2020), respectivamente, demonstram a reação balanceada para a lixiviação. De forma geral, a eficiência da lixiviação de contaminantes de Cu, Al e Fe pode ser desprezível, uma vez que o objetivo é separá-los de alguma forma dos metais do cátodo. Logo, a não solubilidade do Cu, Al e Fe no processo de lixiviação não possui impactos na eficiência do processo, já que as partículas desses metais que permanecerem sólidas serão separadas por um processo de separação sólido-líquido logo após a lixiviação.



Para reações com dados cinéticos do processo de lixiviação encontrados na literatura, é possível utilizar o modelo de núcleo de encolhimento, ou o modelo de reação química convencional (Arrhenius) para estimar os parâmetros. O processo de lixiviação dos materiais catódicos, por exemplo, pode ser considerado um processo heterogêneo sólido-líquido, incluindo transferência de massa, difusão de íons e reações químicas de superfície. Portanto, com base no modelo de núcleo de encolhimento, a taxa de lixiviação pode ser assumida como controlada pela transferência de massa do filme líquido (Equação 17), pela reação química na superfície (Equação 18) ou pela difusão da camada residual (Equação 19). Os dados cinéticos de lixiviação também se ajustam bem ao modelo controlado de reação química de superfície,

sendo considerada para energias de ativação altas (40 kJ/mol) considerando a equação de Arrhenius (Equação 20), e assim é possível definir a cinética com a equação de Avrami (Equação 21) (WANG & GUO, 2019; HE et al., 2017; ZHANG et al., 2015).

$$X = k_1 * t \quad (17)$$

$$1 - (1 - X)^{1/3} = k_2 * t \quad (18)$$

$$1 - 3 * (1 - X)^{2/3} + 2 * (1 - X) = k_3 * t \quad (19)$$

Onde:

X: é a eficiência de lixiviação

t: tempo de lixiviação

k₁, k₂ e k₃: constantes da taxa de reação

$$\ln k = -Ea/R * T + \ln A \quad (20)$$

$$-\ln(1 - X) = k * t^n \quad (21)$$

Onde:

Ea: é a energia de ativação (J/mol)

R: constante dos gases ideais (J/mol.K)

A: fator pré-exponencial

T: temperatura (K)

n: parâmetro equacional (geralmente 3 pela dimensionalidade da ocorrência da reação)

k: constante de velocidade da reação ($k = A * e^{(Ea/RT)}$)

Para reações oxirredutoras que não foram encontrados dados cinéticos, é possível estabelecer sua previsibilidade com relação à equação de Nernst para a determinação do potencial da célula em um diagrama de Pourbaix. Essa equação, no que lhe concerne, é derivada diretamente da equação da variação da energia livre de Gibbs, ao qual determina a espontaneidade ou não espontaneidade de uma reação. Dessa forma, quando a energia livre de Gibbs for negativa a reação é espontânea ($\Delta G < 0$, sentido dos produtos), já quando ela for igual a zero a reação está em equilíbrio ($\Delta G = 0$) e quando esta for positiva a reação é não espontânea ($\Delta G > 0$, sentido dos reagentes). A Equação 22 demonstra a equação da variação da energia livre de Gibbs em aspectos termodinâmicos, e sua relação com a variação do potencial de redução da reação. A Equação 23 demonstra a equação da energia livre de Gibbs relacionando-o com o

potencial químico dos componentes das reações. Desta, a equação de Nernst (24) provém com a relação demonstrada na Equação 22 (GUPTA, 2003; PANERO, 2009; GREEN & SOUTHARD, 2019).

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S = -n * F * \Delta E_c \quad (22)$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + R * T * \ln(K) \quad (23)$$

$$\Delta E_c = \Delta E_c^\circ - (R * T / n * F) * \ln(K) \quad (24)$$

Onde:

K: é a atividade dos produtos pela atividade dos reagentes ($K=a^p/a^r$)

n: é o número de elétrons trocados por átomo para a reação

F: constante de Faraday

ΔE_c : variação do potencial da célula ($\Delta E_c = E_{\text{oxidação}} + E_{\text{redução}} = E_{\text{ânodo}} - E_{\text{cátodo}}$)

ΔE_c° : variação do potencial da célula em condições padrão

ΔG : variação da energia livre de Gibbs

ΔG° : variação da energia livre de Gibbs em condição padrão

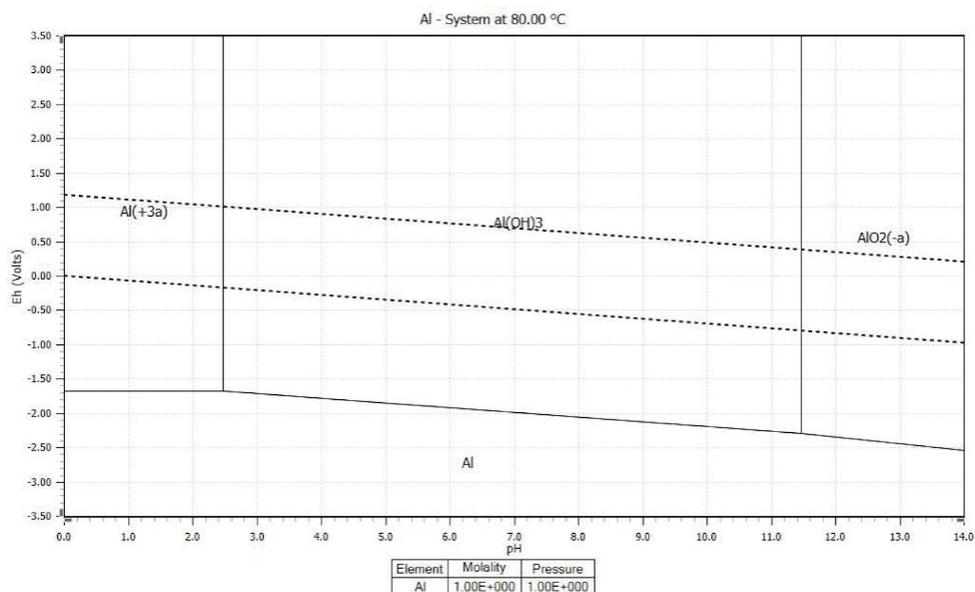
ΔH : variação da entalpia

ΔS : variação da entropia

T: temperatura

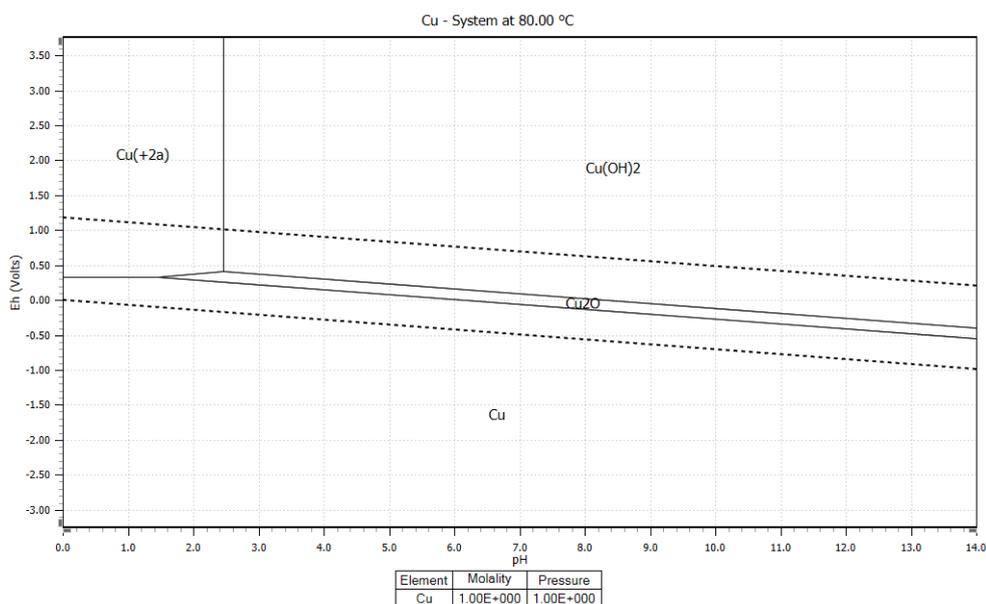
Ressalta-se que apesar de ser uma consideração definida para estimar a reatividade dos compostos metálicos sem dados cinéticos, o diagrama de Pourbaix e as equações de energia de Gibbs, bem como o potencial de redução não fornecem dados cinéticos, e apenas uma previsibilidade do que ocorre com os metais. Dessa forma, os diagramas de Pourbaix para metais, sem dados cinéticos, podem ser vistos nas Figuras 56 e 57 para o Al e Cu, respectivamente, considerando as entradas de concentração de ácido definidas. Os diagramas são gerados pelo *software* HSC Chemistry® para condições de 80 °C, concentração padrão de 1,00 M e 1,00 bar.

Figura 56 – Diagrama de Pourbaix para o Al com condições de lixiviação



Fonte: Software HSC Chemistry®.

Figura 57 – Diagrama de Pourbaix para o Cu com condições de lixiviação



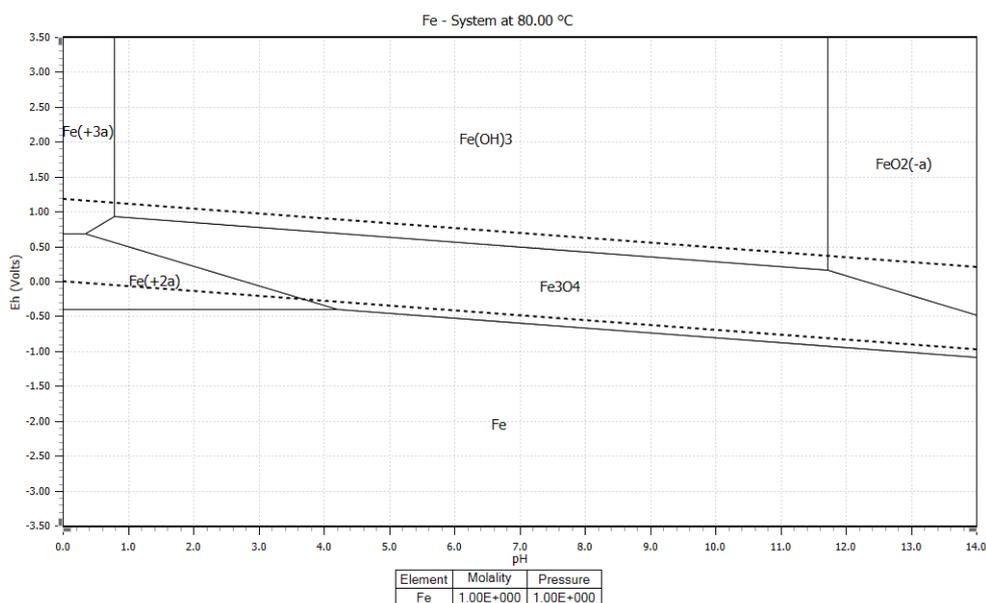
Fonte: Software HSC Chemistry®.

Percebe-se pelas Figuras 56 e 57 que as zonas de solubilização do Al e do Cu para Al^{3+} e Cu^{2+} estão em pH abaixo de 2,50 e potenciais acima de 0,40 V, demonstrando a característica de lixiviação destes em meio ácido. Para a passivação (ou precipitação), estão nas áreas de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ e $\text{Al}(\text{OH})_3$, que são zonas com valores de pH e potencial em sobreposição, analisando os dois diagramas em paralelo. Teoricamente isso indica que em um pH acima de 2,50 e abaixo de 11,50, e com um potencial acima de 0,50 V e abaixo de 3,50 V é possível precipitar o Cu e

o Al presentes em solução como íons (Al^{3+} e Cu^{2+} , demonstrado como $\text{Al}(+3a)$ e $\text{Cu}(+2a)$ no gráfico, respectivamente), em $\text{Cu}(\text{OH})_2$ e $\text{Al}(\text{OH})_3$.

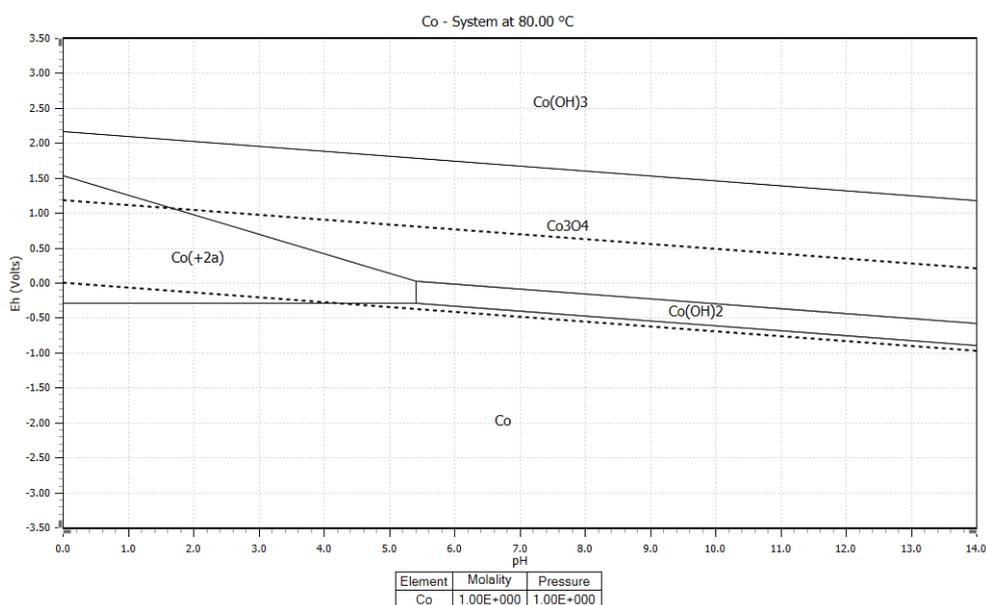
Para os componentes metálicos preditos por dados cinéticos, os diagramas de Pourbaix são demonstrados pelas Figuras 58, 59, 60, 61 e 62 para os dados de concentração definidos na lixiviação.

Figura 58 – Diagrama de Pourbaix para o Fe com condições de lixiviação



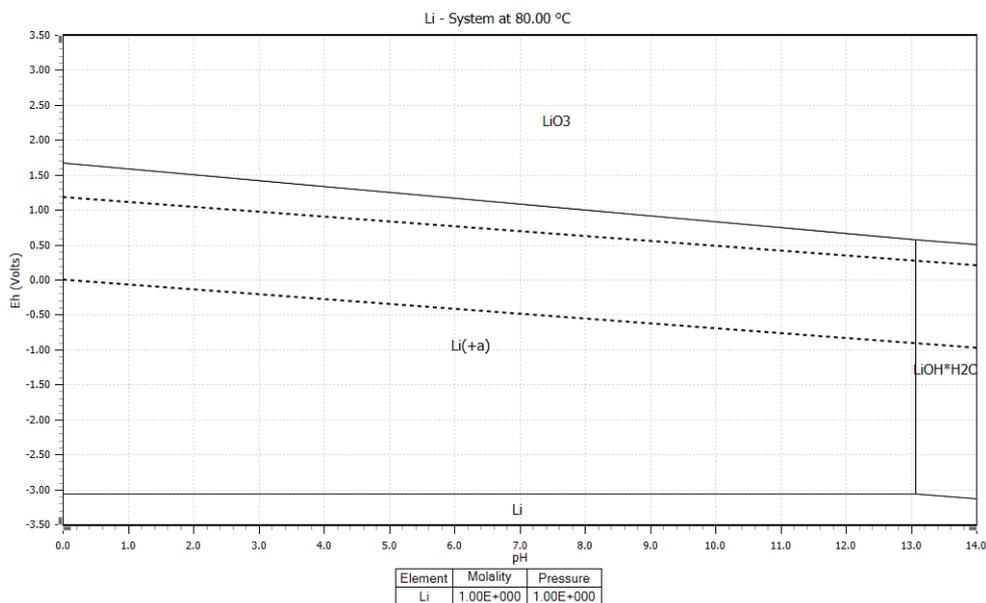
Fonte: Software HSC Chemistry®.

Figura 59 – Diagrama de Pourbaix para o Co com condições de lixiviação



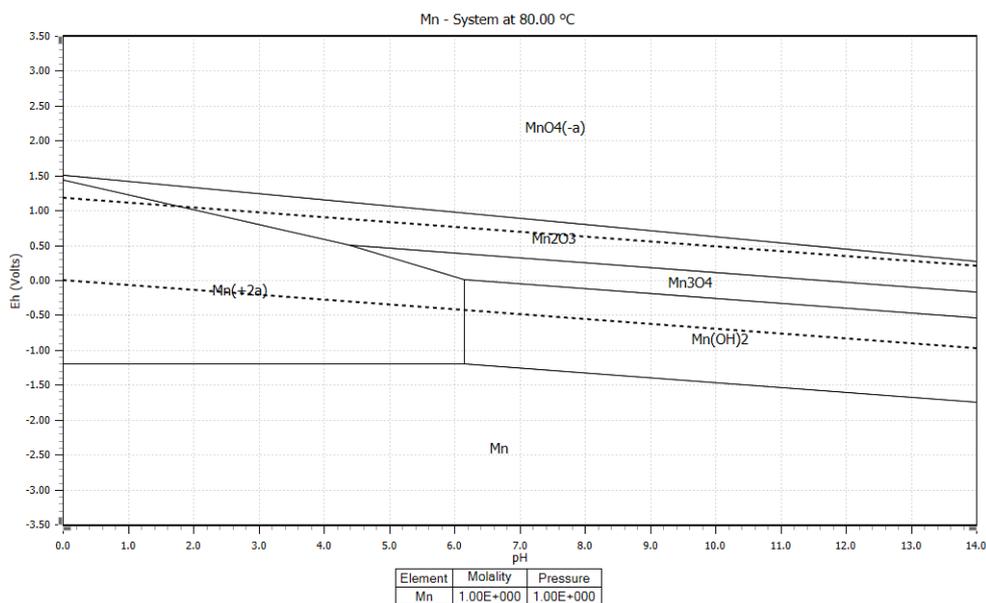
Fonte: Software HSC Chemistry®.

Figura 60 – Diagrama de Pourbaix para o Li com condições de lixiviação



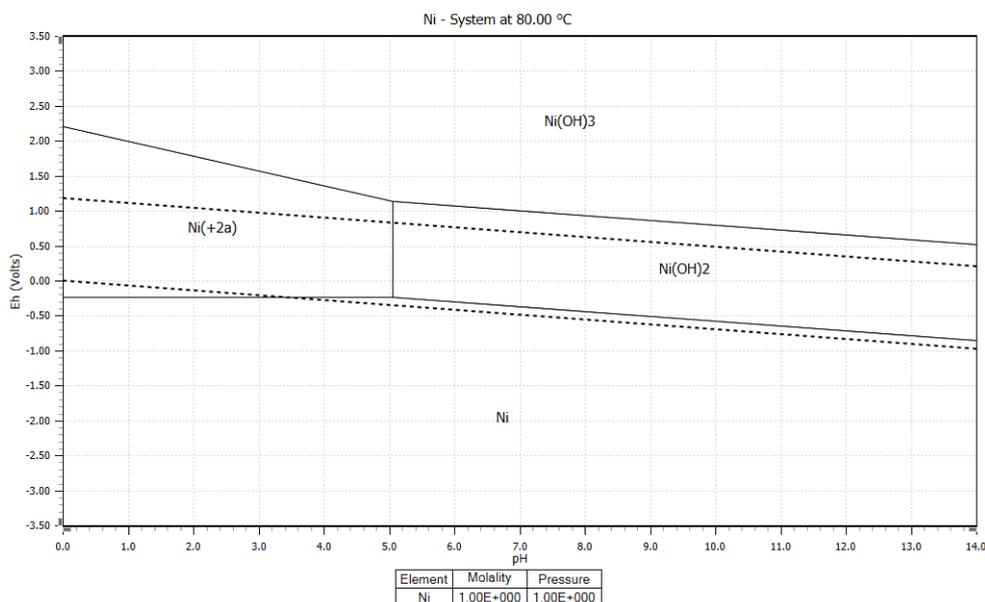
Fonte: Software HSC Chemistry®.

Figura 61 – Diagrama de Pourbaix para o Mn com condições de lixiviação



Fonte: Software HSC Chemistry®.

Figura 62 – Diagrama de Pourbaix para o Ni com condições de lixiviação



Fonte: *Software* HSC Chemistry®.

Pela Figura 58, percebe-se que a solubilização do Fe em meio ácido para Fe^{2+} ou Fe^{3+} se dá em pH abaixo de 1,00 e potenciais acima de -0,25 V. Para a precipitação do Fe contaminante como $\text{Fe}(\text{OH})_3$ está em potenciais mais altos (acima de 1,00 V) e pH entre 1,00 e 12,00. Isso não permite que ele tenha uma facilidade de precipitação em potenciais mais baixos, a menos que a precipitação ocorra como Fe_3O_4 . Porém, espera-se que a contaminação de Fe seja nula em todas as etapas considerando a composição da bateria, e a separação prévia dos componentes.

Pela Figura 59, 60, 61 e 62, observa-se que a solubilização conjunta dos metais para Li^+ , Co^{2+} , Ni^{2+} e Mn^{2+} ocorre em pH abaixo de 5,00 e potenciais entre -0,25 V e 1,50 V. É possível observar também que a co-precipitação do Ni^{2+} , Co^{2+} e Mn^{2+} como $\text{Ni}(\text{OH})_2$, $\text{Co}(\text{OH})_2$ e $\text{Mn}(\text{OH})_2$ ocorre principalmente acima do pH de 5,50 e com uma faixa pequena de potencial (entre -0,25 V e 0,25 V, variando conforme o pH). É importante destacar que essa co-precipitação deve ocorrer abaixo do pH de precipitação do Li^+ em solução como LiOH (ou Li_2CO_3), e por isso, abaixo de 13,00 conforme Figura 60. Nas condições desejadas e descritas pelo diagrama, é possível estimar como as reações eletroquímicas ocorrem. Destaca-se que outros mecanismos e reações paralelas podem ocorrer, caso perturbações no sistema sejam efetuadas (como variação de pressão, concentração e temperatura), ocasionando mudanças nas áreas de solubilização, passivação e imunidade dos diagramas de Pourbaix de cada metal.

5.1.3.2 Separação sólido-líquido

Após a lixiviação ácida, o líquido formado passa por uma separação de impurezas sólidas não-metálicas, como grafite e plásticos residuais contaminantes, pela não separação total destes no processo de flotação. Essas impurezas podem ser vendidas para empresas parceiras, ou reprocessadas em processos futuros com foco na recuperação de grafite de alta pureza. Pela baixa concentração destes no meio, é possível aplicar uma simples filtração. Assim, a solução filtrada é encaminhada para os processos de precipitação seletiva livre de sólidos residuais, que poderiam ocasionar contaminação dos precipitados (WANG et al., 2021; MORIN et al., 2021).

5.1.3.3 Precipitação seletiva do Al e Ferrosos

A precipitação com hidróxido de sódio envolve a contribuição das espécies aniônicas (OH^-) no meio aquoso em interação com as espécies catiônicas de metais (M^+), na formação de um composto metálico que, devido à sua baixa solubilidade no meio, precipita rapidamente e é separado na forma de hidróxido. Assim, um hidróxido metálico em equilíbrio com água se dissocia parcialmente em íons como disposto na Equação 25 (ou o contrário no sentido do equilíbrio), e a constante do produto de solubilidade (K_{ps}) relaciona esse equilíbrio de solubilidade e o pH, conforme a Equação 26, para a formação do hidróxido metálico e/ou a dissociação deste em íons (GUPTA, 2003; ZOU et al., 2013).



$$K_{sp} = [M^+]^m [OH^-]^n \quad (26)$$

De acordo com Zou et al. (2013) as impurezas de Al e Fe podem ser separadas sem nenhum problema com a precipitação seletiva, já que a concentração mínima destes se dá em um pH final de 4,49. A Tabela 12 demonstra dados de K_{ps} , concentrações máximas e mínimas e o pH inicial e final para estas. Esses pHs finais e iniciais para cada tipo de hidróxido leva em consideração a concentração máxima (C_{max}) e concentração mínima (C_{min}), respectivamente, para cada íon metálico em solução considerando diferentes hidróxidos metálicos. Se a concentração de um íon metálico for máxima, o pH de precipitação deste no meio é mínimo, ocasionado pela variação da solubilidade no meio e facilitando a reação (cristalização) do precipitado. O contrário também acontece para uma concentração mínima, já que o íon metálico está muito diluído no meio, dificultando a cristalização. Isso se refere diretamente com as

Equações 25 e 26, considerando um K_{ps} constante para as condições de temperatura e pressão escolhidas. É fato que esses valores variam com relação às diferentes fontes.

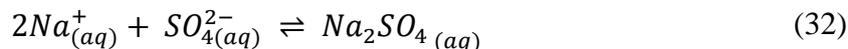
Tabela 12 – Dados de solubilidade para hidróxidos metálicos em T padrão de 25 °C

| Composto | K_{ps} | C_{max} (M) | C_{min} (M) | pH inicial | pH final |
|---------------------|----------|---------------|---------------|------------|----------|
| Fe(OH) ₃ | 2,79E-39 | 1,000 | 1,00E-05 | 1,149 | 2,815 |
| Al(OH) ₃ | 3,00E-30 | - | 1,00E-05 | - | 4,490 |
| Cu(OH) ₂ | 2,00E-20 | - | 1,00E-05 | - | 6,650 |
| Ni(OH) ₂ | 5,48E-15 | 2,667 | 1,00E-05 | 5,156 | 8,869 |
| Co(OH) ₂ | 5,92E-15 | 2,667 | 1,00E-05 | 6,673 | 9,386 |
| Mn(OH) ₂ | 2,00E-13 | 3,200 | 1,00E-05 | 7,398 | 10,151 |
| Fe(OH) ₂ | 4,87E-17 | 1,000 | 1,00E-05 | 5,844 | 8,344 |

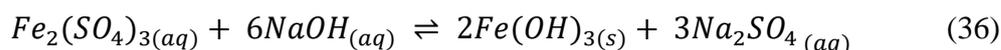
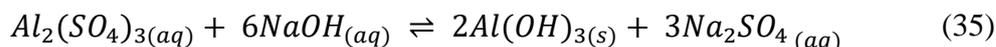
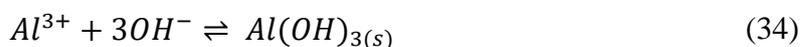
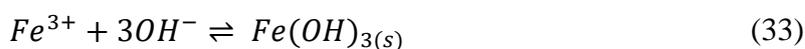
Fonte: Adaptado de Zou et al. (2013).

E justamente por isso, a precipitação seletiva do alumínio e do ferro se dá antes da precipitação do cobre e de outros metais, pelas características de associação em hidróxido destes em um meio razoavelmente ácido e redutor. Dessa forma, adiciona-se NaOH até a estabilização do pH entre 3,5 e 5 com uma agitação constante, e distribuição homogênea da base para a não co-precipitação de outros metais indesejados. A precipitação dos hidróxidos (Fe(OH)₃ e Al(OH)₃) se dá em até 2 horas em uma temperatura de 40°C a 80 °C, e o sulfato de sódio como subproduto da reação permanece solúvel no meio aquoso (Na₂SO₄) (MORIN et al., 2021; WANG et al., 2021). De acordo com a Equação 27 proveniente de Burgot (2012), uma base BOH (B sendo Na, K, etc.) ioniza-se em solução aquosa formando íons OH⁻ e B⁺, e a Equação 28 aplica o princípio para o NaOH consoante Bamfort (2005). Assim, a dissociação heterolítica ocorre em sulfatos metálicos (como sais), conforme a Equação 29 em meio aquoso, desenvolvendo íons de cátions e ânions dos sais metálicos, como visto na Equação 30 e 31 (FARRAR, 2003). Dessa forma, o sódio como cátion dissociado da base reage com os ânions de sulfatos livres no meio segundo a Equação 32 (BAMFORT, 2005).



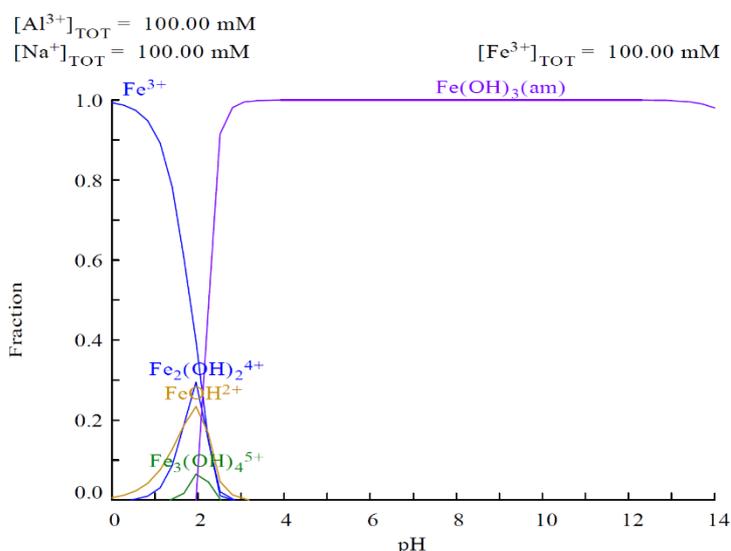


As Equações 35 e 36 demonstram as reações gerais para a transformação dos sulfatos de alumínio e de ferro em hidróxidos de alumínio e de ferro, segundo o *software* HSC Chemistry®, e considerando as reações parciais para os íons metálicos dissociados em solução como definido por Ma et al. (2020) para a formação dos hidróxidos, presente nas Equações 33 e 34.

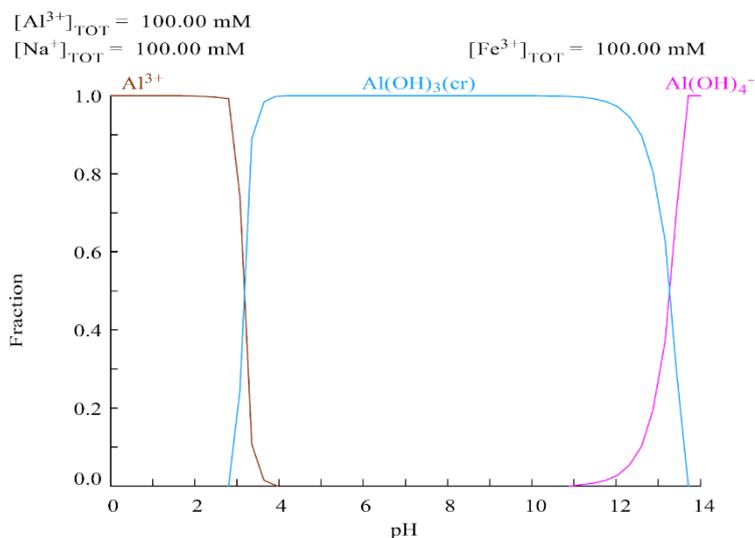


As Figuras 63 e 64 demonstram a faixa de precipitação dos hidróxidos de Fe^{3+} e Al^{3+} , respectivamente, baseado no *software* Medusa® com relação à diferença de pH, em temperatura padrão de 25 °C. Os precipitados de Fe e Al podem ser retirados com uma possível pequena contaminação de Cu, já que é um processo de difícil controle.

Figura 63 – Faixa de precipitação do $Fe(OH)_3$



Fonte: *Software* Medusa®.

Figura 64 – Faixa de precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ 

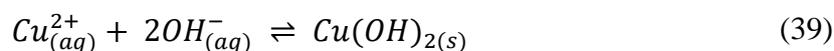
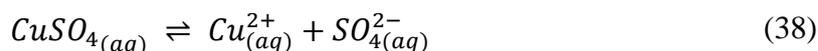
Fonte: *Software Medusa*®.

5.1.3.4 Separação sólido-líquido

Pelo hidróxido de alumínio e de ferro serem produtos insolúveis em água, é possível recuperá-los por filtração, já que os grânulos estão em baixíssimas concentrações.

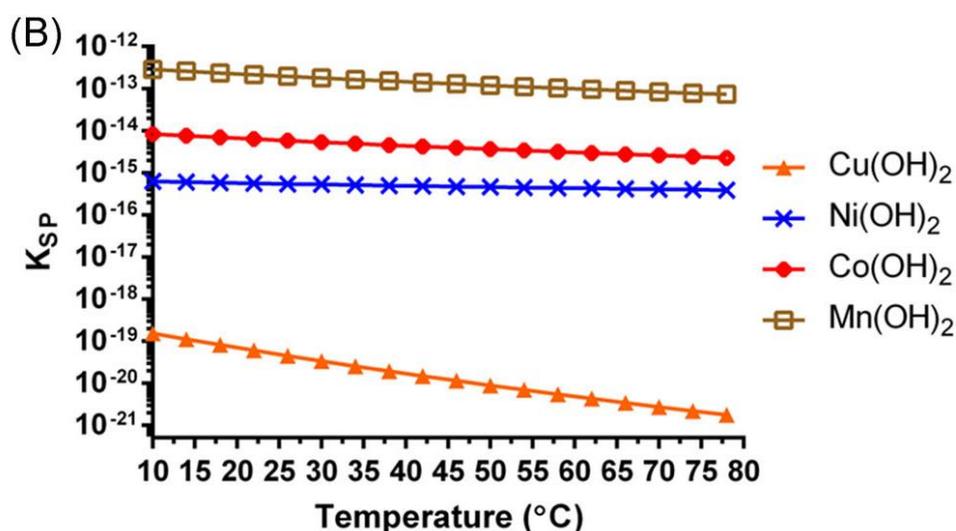
5.1.3.5 Precipitação seletiva do Cu

A precipitação do Cu se dá pelos mesmos mecanismos do hidróxido visto no tópico 5.1.3.3, porém, por estar em um estado divalente, a dissociação iônica do sulfato de cobre se dá por meio do mecanismo de reação da Equação 37, demonstrada no estudo de Larson (1970), e assim aplicável ao Cu conforme a reação da Equação 38. Dessa forma, a associação dos íons OH^- provenientes do NaOH dissociado se dá pela Equação 39 demonstrada por Nie et al. (2013), e a reação geral para a transformação do sulfato de cobre em hidróxido se dá pela Equação 40, segundo o *software* HSC Chemistry.



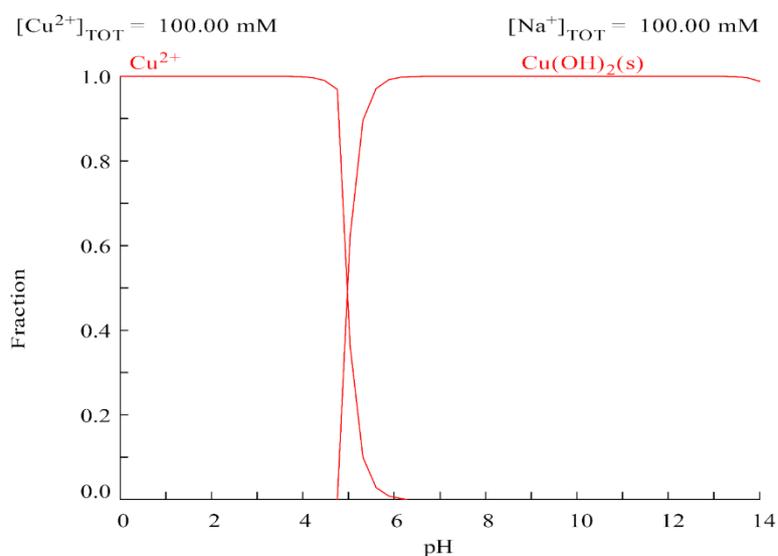
A precipitação seletiva do cobre ocorre em um meio levemente ácido, e altamente redutor. Adiciona-se NaOH até a estabilização do pH entre 5,0 e 7,0 com agitação constante nos mesmos métodos da precipitação do Al e Fe. Para o Cu é essencial uma temperatura de aproximadamente 80 °C para uma separação mais eficiente, uma vez que o K_{ps} é diminuído com o aumento da temperatura para o $\text{Cu}(\text{OH})_2$, e assim diminuindo o pH final de sua precipitação até concentrações mínimas. A Figura 65 demonstra essa alteração. Apesar disso, uma pequena parcela da contaminação residual do Cu (após os processos físicos) permanece na solução para a co-precipitação dos hidróxidos de interesse. Porém, essa contaminação residual é irrelevante e pode ser desconsiderada (WANG et al., 2021; OR et al., 2019).

Figura 65 – Alteração do K_{ps} do hidróxido de Cu com relação aos hidróxidos de Ni, Co e Mn com diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado de Or et al. (2019).

A Figura 66 reforça a faixa de precipitação do $\text{Cu}(\text{OH})_2$ pelo *software* Medusa® para diferentes faixas de pH em temperatura padrão de 25 °C (que não define exclusivamente a ocorrência em temperaturas de 80 °C).

Figura 66 – Faixa de precipitação do $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 

Fonte: *Software Medusa®*.

5.1.3.6 Separação sólido-líquido

O precipitado $\text{Cu}(\text{OH})_2$ pode ser separado por filtração pela baixa concentração de íons Cu^{2+} antes da precipitação, e conseqüentemente, menor formação de cristais $\text{Cu}(\text{OH})_2$ na etapa de precipitação. Isso ocorre, pois espera-se que boa parte desse metal (presente em sua maioria no coletor de corrente do ânodo) seja separado por métodos físicos, como o peneiramento, antes mesmo das etapas hidrometalúrgicas. Assim, pouca ou nenhuma contaminação desse metal em processos subsequentes será observada e, além disso, a filtração terá uma baixa taxa de saturação, já que a concentração do $\text{Cu}(\text{OH})_2$ também será baixa.

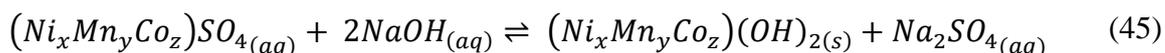
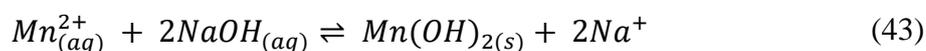
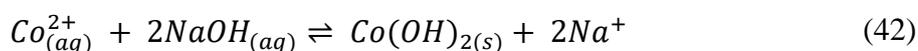
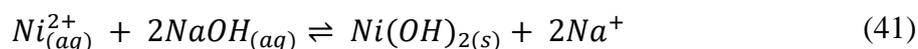
5.1.3.7 Ajuste de razão

Após a retirada de todas as impurezas influenciáveis na purificação dos metais de interesse, o ajuste da razão entre os componentes através da verificação da concentração de cada metal Ni, Mn e Co no meio será necessária, já que a alimentação considera cátodos com alto teor de Ni (como o NCA), desequilibrando a razão para o produto de interesse. Por isso, adicionam-se os sulfatos dos metais virgens até a relação 1:1:1 ser observada.

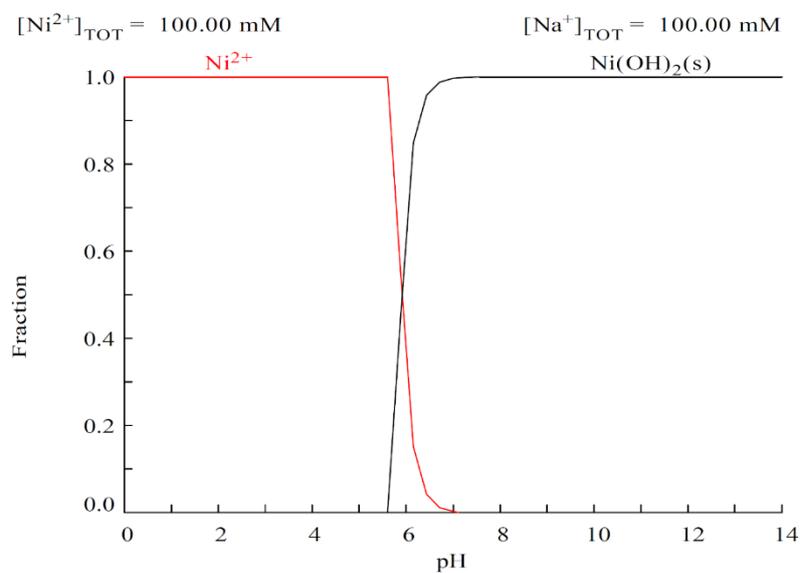
5.1.3.8 Precipitação seletiva do Ni, Mn e Co

A precipitação dos metais de interesse se dá pelos mesmos mecanismos definidos para os demais metais, com a dissociação dos sulfatos metálicos (Equação 37) e a reação do

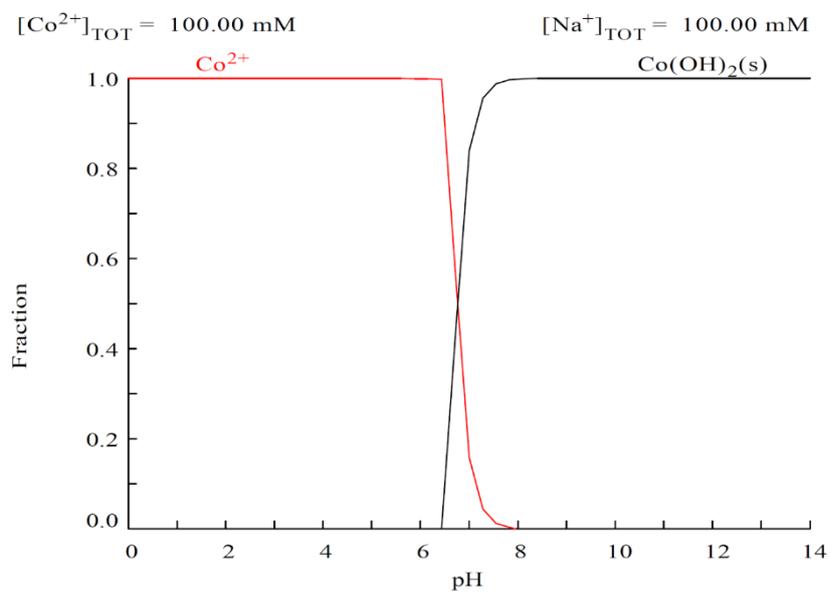
hidróxido com o metal para a formação dos hidróxidos metálicos. Na forma sólida, os metais formam um hidróxido sólido agregado, na forma de $Ni_xCo_yMn_z(OH)_2$, sendo esse agregado ajustado com a razão definida para os metais de transição do material catódico, direcionado para as etapas calcinativas. As reações individuais são vistas nas Equações 41, 42 e 43, e a associação dos íons SO_4^{2-} com os íons de Na^+ são vistos na Equação 44 (GRATZ et al., 2014; NIE et al., 2013). De forma geral, a etapa ocorre conforme a Equação 45, demonstrada na patente de CHOW et al. (2019).



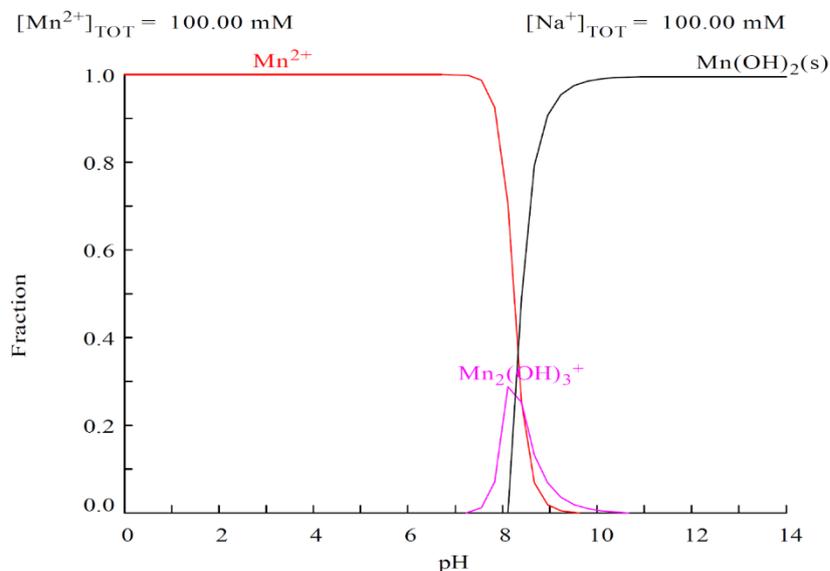
Para a precipitação, adiciona-se NaOH até a estabilização do pH entre 10 e 13, para uma precipitação final dos componentes em um pH máximo de 11,0. Também, é necessária uma agitação constante para que não ocorra co-precipitação do Li, e uma temperatura contínua entre 40 e 80 °C (WANG et al., 2021). Assim, os gráficos para a faixa de precipitação dos diferentes hidróxidos podem ser vistos nas Figuras 67, 68 e 69 para o Ni, Co e Mn, respectivamente, de acordo com o *software* Medusa®.

Figura 67 – Faixa de precipitação do Ni(OH)_2 

Fonte: Software Medusa®.

Figura 68 – Faixa de precipitação do Co(OH)_2 

Fonte: Software Medusa®.

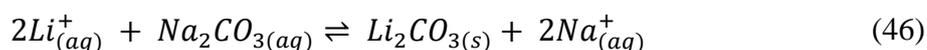
Figura 69 – Faixa de precipitação do Mn(OH)_2 

5.1.3.9 Separação sólido-líquido

Os hidróxidos dos metais precipitados podem ser separados por filtração continuamente para a retirada total dos hidróxidos. Posteriormente eles podem ser transportados até um armazenamento sólido.

5.1.3.10 Precipitação do Li

O sulfato de lítio remanescente na solução aquosa pode ser precipitado adicionando-se um carbonato em solução na forma de Na_2CO_3 . O processo deve ser feito a $40\text{ }^\circ\text{C}$ para a produção do carbonato de lítio (Li_2CO_3) e do subproduto de sulfato de sódio. É possível que nessa etapa reste uma grande quantidade de solução, por isso deve-se ter cuidado nos processos anteriores para a não adição exacerbada de reagentes muito diluídos, pois influencia na separação final do lítio (WANG et al., 2021; MORIN et al., 2021). A reação se dá pela dissociação do sulfato de lítio (como o de outros metais, visto anteriormente) e pela reação dos íons de lítio dissociados com o Na_2CO_3 , formando assim o Li_2CO_3 , como pode ser visto na Equação 46 (SASTRE, 2021). O mecanismo com o Na^+ é repetido nessa etapa, como demonstrado em etapas de precipitações anteriores.



Uma etapa subsequente de lavagem da solução final pode ser feita para a melhor eficiência do processo de carbonatação do lítio. Assim, um reciclo pode ser estabelecido com base na necessidade do processo. Após isso, a solução restante descartada pode ser tratada com uma neutralização até o pH neutro, e o tratamento de efluentes adequado para o subproduto principal proveniente da etapa, o Na_2SO_4 , pode ser feito com uma cristalização para a obtenção deste em alta pureza (MORIN et al., 2021; PENG et al., 2019).

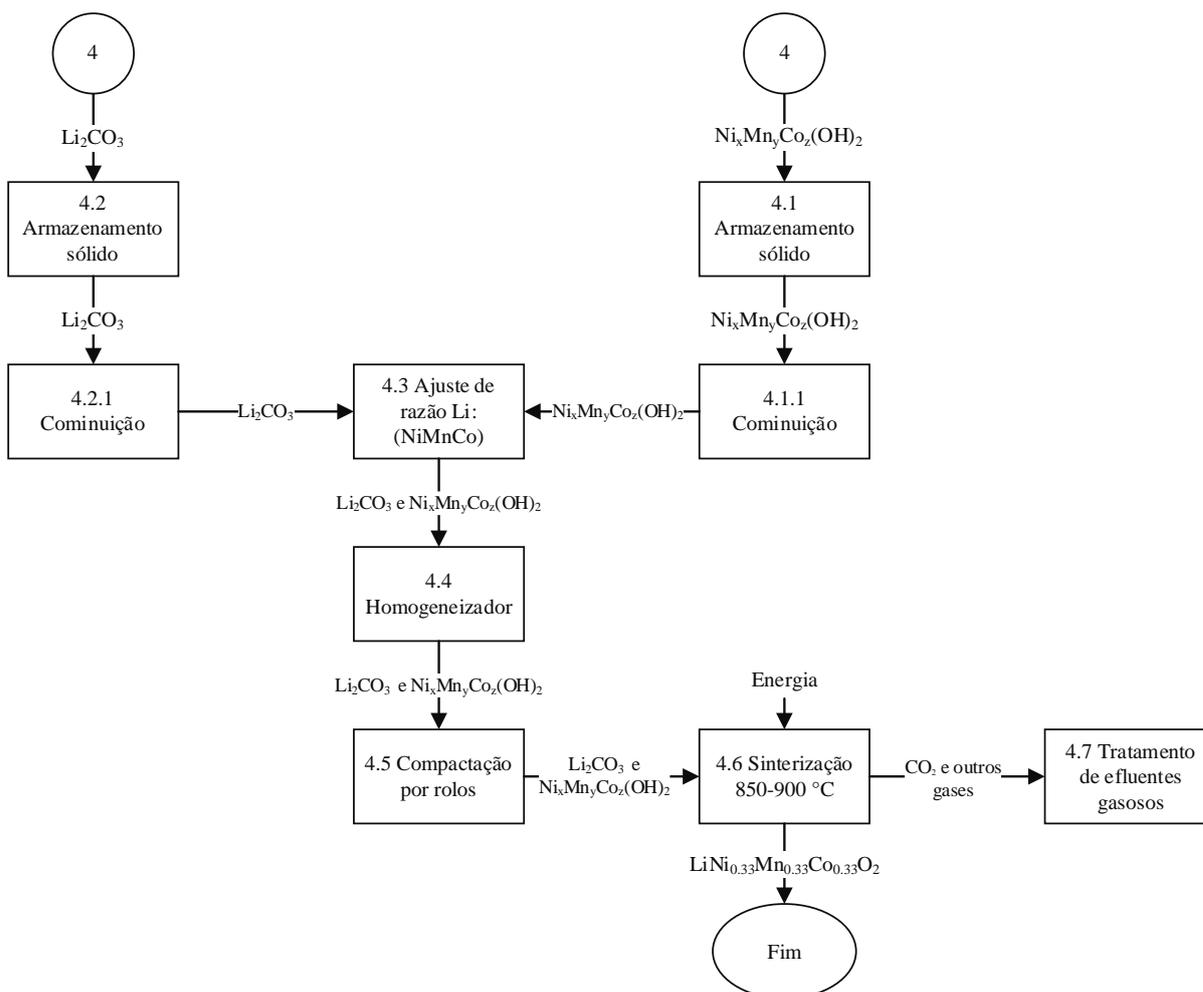
5.1.3.11 Separação sólido-líquido

A separação do Li_2CO_3 pode ser feita por filtração, retirando um sólido precipitado e mantendo a solução com o sulfato de sódio solubilizado para processos de tratamento. É importante manter a temperatura em $40\text{ }^\circ\text{C}$, pela maior solubilidade do sulfato de sódio nessa condição, e assim, diminuindo-se as chances da cristalização do componente. Dessa forma, a solução líquida é enviada ao processo de tratamento de efluentes e o Li_2CO_3 pode ser armazenado para posterior processamento.

5.1.4 Etapas de acabamento do produto

O diagrama de blocos da etapa do acabamento do produto pode ser visualizado na Figura 70, encerrando o processo produtivo.

Figura 70 – Diagrama de blocos do acabamento do produto



Fonte: Autores (2022).

5.1.4.1 Armazenamento sólido do Li_2CO_3

O Li_2CO_3 é armazenado até que se tenha uma quantidade suficiente que possa ser liberada para as etapas seguintes do processo a fim de se obter o produto final na proporção desejada.

5.1.4.1.1 Cominuição

Ambas as etapas referentes à cominuição têm como função transformar os precipitados, tanto o carbonato de lítio quanto os hidróxidos de Ni, Co e Mn, em pós. Como os precipitados tratam de partículas pequenas, os pós destes materiais serão gerados a partir de moinhos de martelo.

5.1.4.2 Armazenamento sólido do $\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}(\text{OH})_2$

Nesta etapa, os hidróxidos de Ni, Co e Mn nas proporções desejadas são armazenados antes de seguirem adiante no processo.

5.1.4.3 Ajuste de razão dos precipitados

Ao misturar $\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}(\text{OH})_2$ e Li_2CO_3 para sintetizar $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$, ressalta-se que a quantidade molar de Li_2CO_3 é crítica. Dessa forma, o lítio molar deve estar em excesso para compensar a perda de lítio durante a sinterização (SA, 2015). Dessa forma, opta-se pelo uso de um excesso de 5% de Li_2CO_3 (WANG et al., 2021).

5.1.4.4 Homogeneização

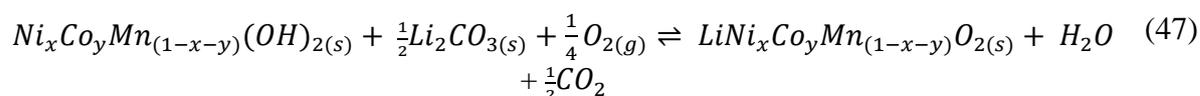
Deve ser feito para a melhor distribuição dos componentes, garantindo que os hidróxidos não fiquem concentrados em uma só parte da mistura, o mesmo valendo para o carbonato de lítio. A distribuição influencia diretamente na eficiência da produção do material ativo, já que o produto deve estar bem distribuído em suas proporções no cátodo. Para tal operação será usado misturadores, como os de pás. A homogeneização não é realizada conjuntamente com a moagem para se ter um maior controle das razões do produto final que se deseja obter e por uma questão de organização espacial do arranjo industrial. Assim, controlando separadamente a entrada dos componentes a serem misturados.

5.1.4.5 Compactação por rolos

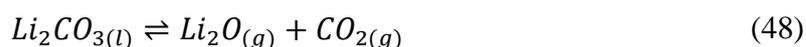
Após a homogeneização, os sólidos são passados continuamente por um compactador por rolos a fim de garantir uma boa distribuição em lâminas do produto, ajudando assim na sinterização. As partículas pré-compactadas adquirem uma forma unida, diminuindo a porosidade entre elas e garantindo uma maior eficiência na etapa de tratamento térmico. A lâmina pode ser adicionada constantemente em uma esteira e transportada diretamente para a etapa de calcinação/sinterização.

5.1.4.6 Calcinação/Sinterização

Os precursores $Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}(OH)_2$ obtidos do processo de co-precipitação após serem misturados com o Li_2CO_3 , também precipitado, mas com o uso de um excesso do mesmo de 5%, passam pelo processo de sinterização em um forno de sinterização na sequência da etapa de compactação por rolos para obter o material catódico $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$, como mostra a Equação 47 válida para diferentes proporções de Ni, Co e Mn do produto de interesse (SASTRE, 2021; WANG et al., 2021).



A mistura é inicialmente calcinada a 450 °C por 4-6h e depois sinterizada a 750-850 °C por 15-20h em meio aerado para obter o pó de $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ pronto para ser utilizado na fabricação de novas baterias de íons de lítio (SASTRE, 2021; WANG et al., 2021). Uma condição importante a ser considerada na etapa de sinterização é a reação de excesso de Li_2CO_3 , que só acontece após 723 °C pelo ponto de ebulição do Li_2CO_3 , já que a reação só acontece em estado líquido. A Equação 48 define essa semirreação importante a ser considerada, já que o excesso de Li_2CO_3 oferece condições de formação de Li_2O , que é o componente interessante de excesso de Li para o material ativo do cátodo (SHI et al., 2020). O pó de $LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$ será embalado em *big bags* para sua comercialização, juntamente com o excesso de Li_2O .



6 FLUXOGRAMA DETALHADO DO PROCESSO

O fluxograma detalhado do processo consiste em um fluxograma de processo (PFD) dividido em quatro principais áreas conforme a sequência apresentada para o processo produtivo no diagrama de blocos. Esse fluxograma encontra-se de forma completa no Apêndice E. A área 100 compreende o recebimento, armazenamento e pré-tratamento da matéria-prima, a área 200 corresponde às etapas de pré-processamento, a área 300 às etapas de processamento e a área 400 às etapas de acabamento do produto, todas descritas e detalhadas anteriormente.

A entrada de baterias de íons de lítio consideradas no processo para a realização dos cálculos compreende as baterias dos veículos totalmente elétricos ou BEVs, cuja composição foi apresentada na Tabela 5, para os tipos de NMC 111 e NCA em porcentagens de entrada estabelecidas em 80% de NMC 111 e 20% de NCA. Ressalta-se que o processo na totalidade é muito versátil aceitando diferentes tipos de LIBs quanto ao seu material catódico, as escolhas realizadas para a reciclagem destes dois tipos explicam-se pela sua maior aplicabilidade atualmente e que permanecerá em um futuro próximo como apresentado pela “Análise de Mercado”. Os resultados para os balanços de massa e de energia, assim como o dimensionamento dos equipamentos envolvidos no processo, são apresentados aqui. Maiores detalhes a respeito dos cálculos envolvendo os balanços e os dimensionamentos estão apresentados no Apêndice A.

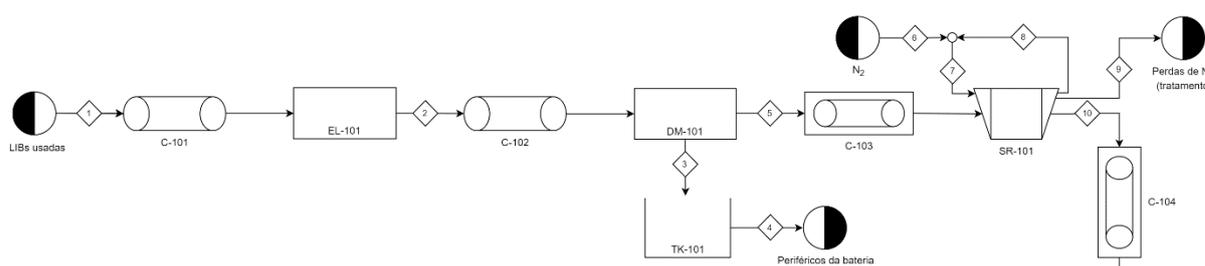
A identificação dos equipamentos segue a seguinte convenção “XX-YYY A/B”, em que “XX” são as letras de identificação do equipamento, “Y” é a área designada dentro da planta, “ZZ” é a designação numérica para cada item em uma classe de equipamento e “A/B” identifica unidades paralelas ou unidades de *backup* não mostradas em um PFD (TURTON, 2018). Os balanços de massa e de energia, além dos dimensionamentos, constam em seus respectivos apêndices.

6.1 ÁREA 100

A Área 100 consiste na etapa de pré-tratamento do projeto, consistindo de etapas de preparo da matéria-prima para o processamento. Nessa etapa, as baterias de íons de lítio são recebidas e recebem uma análise do seu atual estado para a verificação de possíveis riscos de segurança, vazamentos, etc. Assegura-se que é uma etapa de qualidade e expedição, que necessita de análise regular e deve-se, portanto, ser disposta de equipamentos de proteção individual (EPIs), proteção especial contra incêndio com sistemas de contenção especial para

baterias de íons de lítio, e de sistemas de captação de possíveis produtos químicos contaminantes. Após as etapas importantes de recebimento, são armazenadas em depósito e movimentadas conforme o fluxo do processo para a etapa de descarregamento das mesmas. Essa movimentação deve ser feita com o auxílio de guindastes de ponte rolante, e de empilhadeiras, englobando uma estrutura que seja organizada para o fluxo desde o recebimento e armazenamento das baterias, até a movimentação nas esteiras. Uma visão geral da Área 100 encontra-se na Figura 71.

Figura 71 – Área 100



Fonte: Autores (2023).

6.1.1 Descarregamento das baterias de íons de lítio (EL-101)

Nesta etapa, as baterias de íons de lítio não sofrem nenhum tipo de transformação, as mesmas permanecem inteiras sem a retirada de componentes, elas apenas são descarregadas a um nível seguro para posterior desmontagem manual (<0,6 V). O equipamento utilizado no descarregamento está apresentado na Figura 50, como já mencionado, consegue recuperar energia. Logo, a energia retirada pode ser introduzida em fontes de abastecimento locais e públicas, garantindo uma pequena economia em gastos com energia. O equipamento EA-ELR-9500-30 retira a corrente elétrica com 95% de eficiência, com a função de recuperação de energia convertendo a energia fornecida pela bateria em uma corrente senoidal síncrona trifásica de operação industrial (HAUCK & KURRAT, 2018).

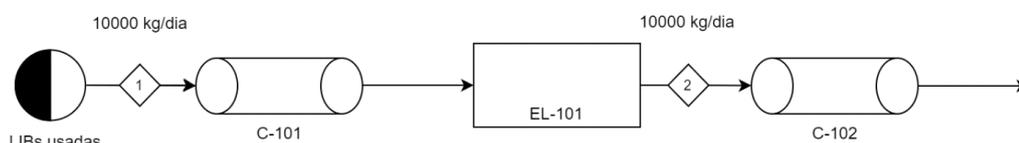
Com um sistema elétrico que deve ser projetado, o dispositivo alimenta a energia para uma rede externa, eliminando a dissipação de calor que pode ocorrer ao mínimo, e economizando em custos com energia. A ideia central da operação é possibilitar dispositivos de proteção de rede (com inversores, quadro elétrico, tomadas e cabos especiais, etc), que podem supervisionar a realimentação de energia na rede pública, com o objetivo de obter segurança adicional de pessoas e equipamentos. O dispositivo de descarregamento possui uma função de desligamento simples em caso de problemas no cabo de conexão à rede. O dispositivo

também supervisiona a tensão e desliga automaticamente os estágios de energia, caso os limites de carga sejam excedidos (HAUCK & KURRAT, 2018).

Para a operação industrial, o processo EL-101 utiliza o dispositivo mencionado para o descarregamento das baterias em uma linha de descarregamento com esteira, considerando a corrente 1. Ao longo da esteira, os funcionários especializados utilizam os aparelhamentos para a conexão do dispositivo com a bateria, e o processo possui o controle pelo software do sistema de descarregamento do dispositivo com painéis de toque espalhados pela linha. Todo o uso de EPIs, como: protetores faciais, luvas isolantes até 1000 V, tapete isolante e roupas especiais, devem ser considerados para a segurança do processo. Após o descarregamento elétrico, são retiradas as conexões elétricas entre a bateria e o dispositivo, e a bateria segue para a linha de desmontagem manual com a corrente 2.

A esteira da linha EL-101 foi dimensionada com um comprimento de 4,00 m por uma largura de 3,00 m, com uma potência requisitada de 11,15 kW. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.1.1 para o balanço de massa e A.2.1.2 para o dimensionamento e cálculos energéticos. O descarregamento encontra-se na Figura 72.

Figura 72 – Descarregamento EL-101

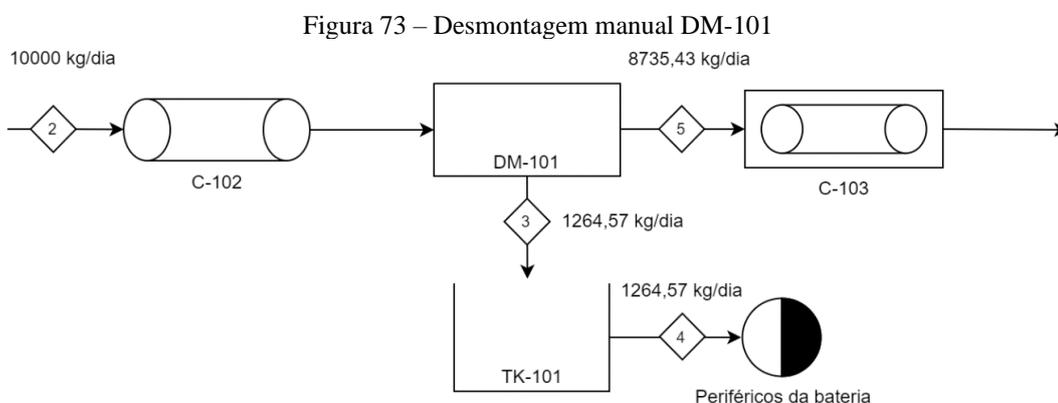


Fonte: Autores (2023).

6.1.2 Desmontagem manual (DM-101)

As baterias recebidas do EL-101 pela corrente 2 são direcionadas diretamente para a linha de desmontagem manual (DM-101) por meio de esteiras. A proposta de layout é demonstrada na Figura 52, e a desmontagem é feita até o nível de módulo. Toda a operação se dá manualmente com os operadores utilizando ferramentas básicas elétricas e/ou pneumáticas. Tendo-se como referência a Tabela 5, a etapa DM-101 remove os componentes externos ao módulo (pacote) e a parte eletrônica do módulo (que é externa ao módulo). Esses componentes removidos devem ser separados de forma grosseira seletivamente, e a parte eletrônica e periféricos ao módulo são armazenados em recipientes de coleta rotineira (TK-101A, TK-101B e TK-101C). Esses materiais podem ser vendidos para outras unidades de processamento e reciclagem de materiais.

Os módulos da bateria seguem para etapas posteriores através de uma nova esteira contínua conectada e após a linha DM-101, indicado pela corrente 5. A desmontagem grosseira dos periféricos garante um processamento dos materiais de interesse livres de contaminantes. Dessa forma, considera-se apenas os módulos sem sua parte eletrônica nos balanços seguintes para os processamentos adicionais. A esteira da linha DM-101 foi dimensionada com um comprimento de 8,00 m por uma largura de 3,00 m) com requisitos de potência de 11,82 kW. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.1.2 para o balanço de massa e A.2.1.4 para o dimensionamento e cálculos energéticos. A desmontagem manual encontra-se na Figura 73.



Fonte: Autores (2023).

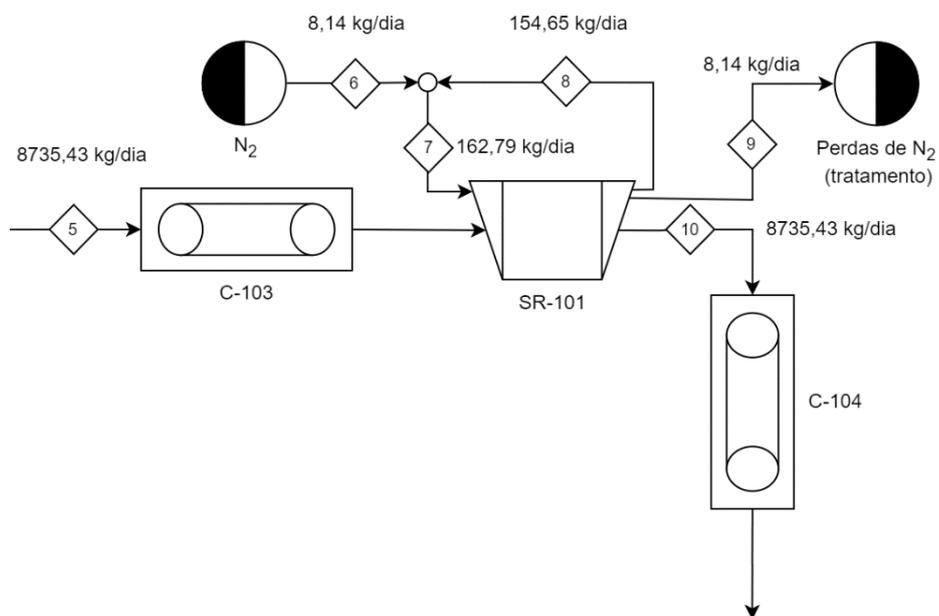
6.1.3 Moinho rotoshredder (SR-101)

Os módulos provenientes da linha DM-101 chegam até o moinho rotoshredder por meio de esteiras, indicado pela corrente 5. Nesta etapa, os módulos são cominuídos até partículas entre 5 a 10 mm, considerando a existência de partículas que são menores que essa granulometria, como os pós-catódicos. Considera-se que não há nenhuma perda de material nesta moagem, visto que o moinho é fechado e nenhum material é acumulado em alguma região dentro do próprio equipamento. Para manter o sistema inerte a possíveis fagulhas considerando possíveis cargas residuais, N_2 é adicionado ao compartimento de moagem pela corrente 7, e recirculado pela corrente 8. As perdas e recomposição de N_2 são indicados pelas correntes 9 e 6, respectivamente. O material cominuído é encaminhado pela esteira helicoidal da corrente 10 para etapas de extração do $LiPF_6$.

O modelo proposto de moinho é o Rotoshredder RS 3218, ou similar, que se encontra no Anexo A. O compartimento da câmara de moagem foi dimensionado com uma altura de entrada de 0,50 m por um comprimento de 1,00 m. Para a moagem, obteve-se requisitos de

potência de 220,68 kW. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.1.4 para o balanço de massa e A.2.1.7 para o dimensionamento e cálculos energéticos. O moinho encontra-se na Figura 74.

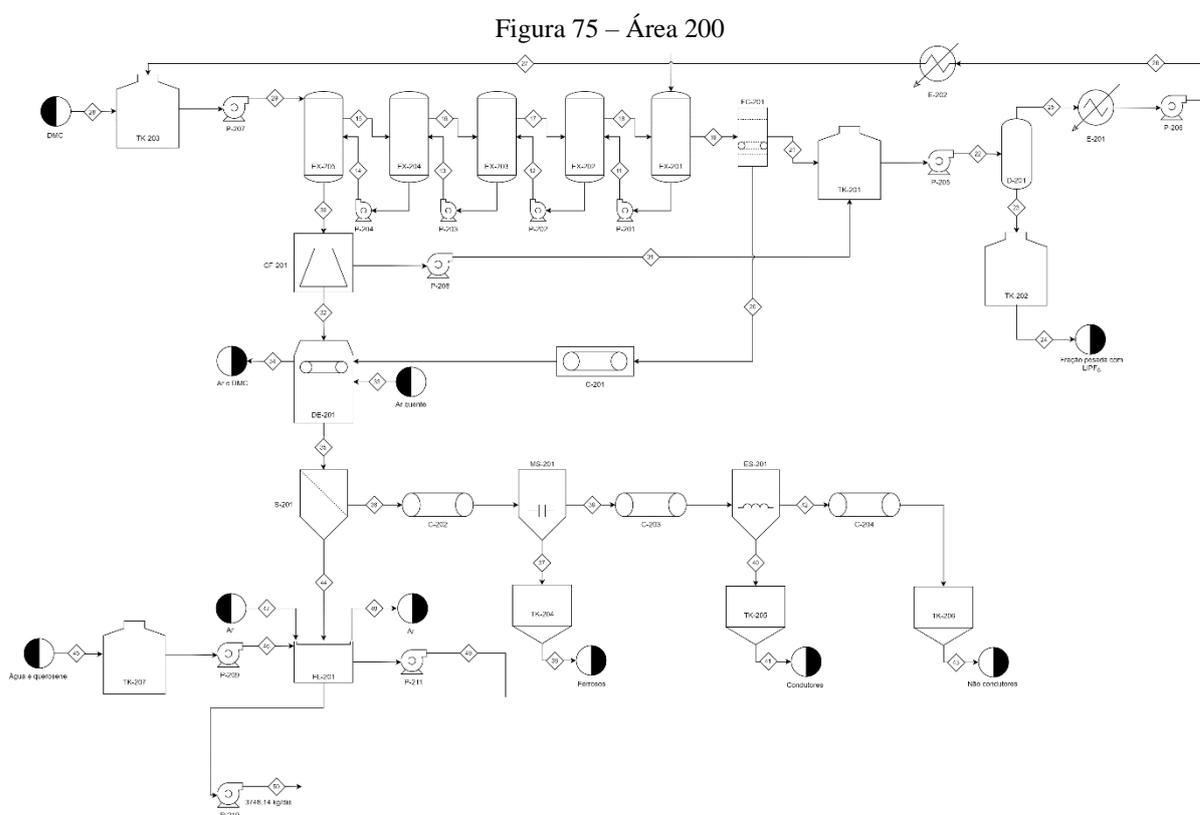
Figura 74 – Moinho SR-101



Fonte: Autores (2023).

6.2 ÁREA 200

A Área 200 consiste na etapa de pré-processamento do projeto, consistindo de operações de retirada de componentes prejudiciais e/ou contaminantes para o processo principal. Essa etapa provém a retirada do eletrólito, bem como a secagem da pasta para a separação física de componentes não desejáveis nas etapas posteriores. Uma visão geral da Área 200 encontra-se na Figura 75.



Fonte: Autores (2023).

6.2.1 Extratores de sal LiPF_6 (EX-201 até EX-205)

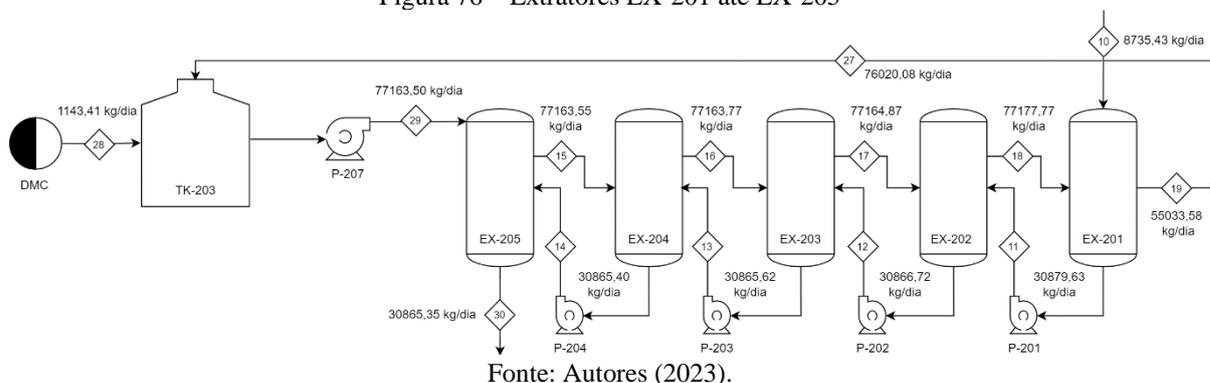
O material cominuído é recebido do transportador helicoidal pela corrente 10 no primeiro estágio de extração (EX-201). O misturador dilui e extrai o LiPF_6 , para minimizar problemas em processos de secagem e demais operações. O EX-201 recebe um reciclo em contracorrente do solvente extrator DMC na corrente 18, que já existe nos componentes da bateria, mas que se considera diferente do componente extrator pela localização da sua entrada. Uma parte considerável do solvente (30%) é reciclado do EX-201 com a pasta para outros

extratores na corrente 11, e uma parcela de sólidos não sedimentáveis (com densidade menor que o do meio líquido) são carregados com a corrente líquida extraída pela corrente 18.

O segundo estágio de separação (EX-202) juntamente com o terceiro, quarto e quinto estágio (EX-203, EX-204 e EX-205, respectivamente) possuem uma operação similar ao EX-201. A retirada de LiPF_6 é gradual, seguindo os valores de eficiência da Tabela 11, e por isso os valores em massa de LiPF_6 remanescente podem ser praticamente desprezíveis nos balanços de massa parciais para cada extrator. As correntes são recirculadas em contra-corrente com a pasta sólida sendo transportada pelas correntes inferiores, e as correntes líquidas contendo o DMC e o LiPF_6 extraído pelas correntes superiores. O fluxo de pasta sólida final é representado pela corrente 30, e é encaminhado para a centrífuga (CF-201). O EX-205 recebe o reciclo de DMC purificado pelos processos anteriores, pela corrente 29.

Os equipamentos extratores escolhidos são do tipo Mixer-Settler, ou similar, conforme demonstrado no Anexo B. Para os extratores, obteve-se requisitos de energia de mistura de 0,51 kW para o EX-201 e 0,73 kW para o EX-202, EX-203 e EX-204, e sem energia de mistura para o EX-205. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.1, A.1.2.9, A.1.2.10, A.1.2.11 e A.1.2.12 para o balanço de massa, e A.2.2.1, A.2.2.7 e A.2.2.8 para o dimensionamento e cálculos energéticos. Os extratores encontram-se na Figura 76.

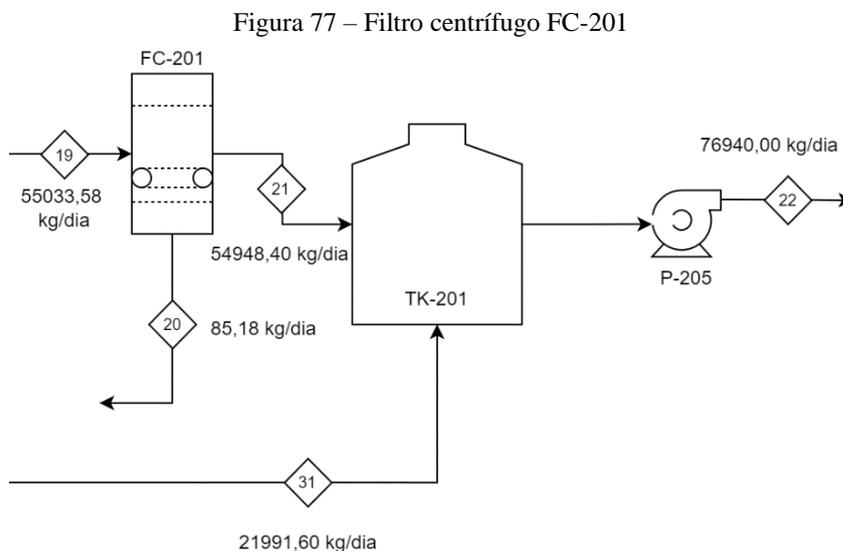
Figura 76 – Extratores EX-201 até EX-205



6.2.2 Filtro centrífugo (FC-201)

Um filtro centrífugo modelo HF 1300.1 (Anexo C), ou similar, opera logo após os extratores, recebendo a corrente de número 19 do extrator EX-201 e enviando a corrente 21 ao tanque TK-201, contendo o eletrólito conforme o balanço de massa presente no Apêndice A, item A.1.2.2 para o FC-201, e item A.1.2.3 para o TK-201. Os cálculos energéticos e dimensionamentos estão no Apêndice A, tópico A.2.2.2 para o FC-201, e A.2.2.4 para o TK-201. O TK-201 também recebe, através da corrente 31, o DMC proveniente da centrífuga CF-

201, o qual é posteriormente enviado ao evaporador. O filtro centrífugo encontra-se na Figura 77.



Fonte: Autores (2023).

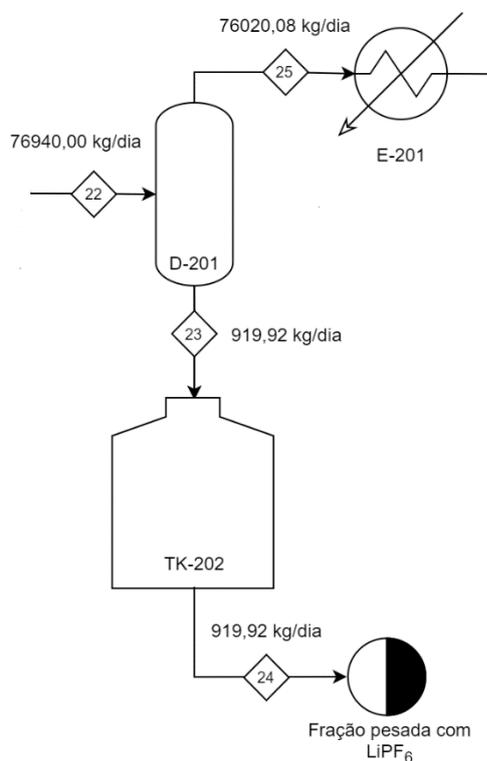
6.2.3 Evaporador de reciclagem do DMC (D-201)

O líquido que entra no TK-201 é bombeado para o evaporador de reciclagem do DMC (D-201), e a composição líquida de DMC, EC e LiPF₆ deve ser aquecida para a separação parcial e/ou total do DMC. A operação do evaporador deve consistir em condições adequadas para a purificação do DMC para o reciclo no processo de extração do eletrólito, considerando a entrada de vapor com contato indireto com o líquido a ser separado, para as trocas térmicas necessárias.

O evaporador de modelo RFE-500 (Anexo D), ou similar, recebe a corrente 22, vinda do tanque de armazenamento TK-201, contendo o LiPF₆ extraído e principalmente DMC (com um pouco de EC), conforme a Figura 78. Após, envia o DMC que foi separado pelo D-201 para trocadores de calor (E-201 e E-202) pelas correntes 25 e 26. A fração pesada contendo o LiPF₆, DMC e EC é enviada a um tanque de armazenamento (TK-202), da separação no D-201, pela corrente 23, e deste para venda para reprocessamento pela corrente 24.

A área de troca térmica dimensionada de 3,00 m² consegue suprir a demanda de calor para a evaporação do DMC, considerando uma demanda energética de 404,33 kW. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.4 para o balanço de massa e A.2.2.3 para o dimensionamento e cálculos energéticos, e a Figura 78 representa o evaporador D-201.

Figura 78 – Evaporador D-201

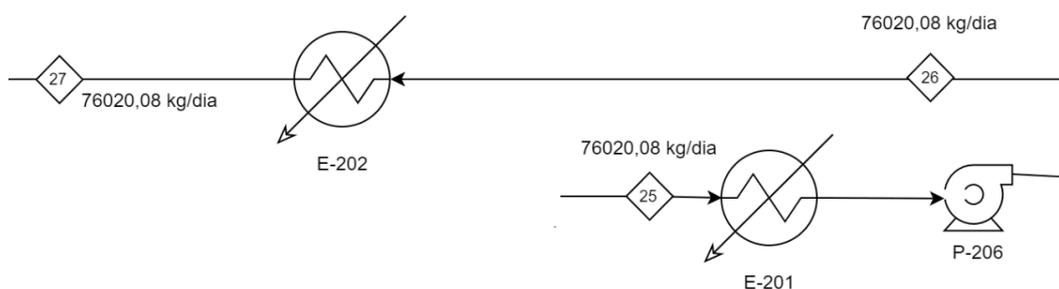


Fonte: Autores (2023).

6.2.4 Trocadores de calor para o DMC (E-201 e E-202)

O condensador (E-201) condensa a vazão de vapor de DMC recebida pela corrente 25 e encaminha para o resfriador pela corrente 26. O E-201 requisita de uma área de troca térmica de 134,07 m². O resfriador (E-202) recebe a vazão líquida de DMC pela corrente 26, e encaminha ao tanque de armazenamento TK-203, consoante à corrente 27, para que o solvente de extração passe novamente pelos extratores na corrente 29. O E-202 requisita de uma área de troca térmica de 40,31 m². O tanque TK-203 também recebe DMC da corrente 28, e encaminha o DMC reciclado para o processo de extração no EX-205. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.6, A.1.2.7 e A.1.2.8 para o balanço de massa do EX-201, EX-202 e TK-203, respectivamente, e A.2.2.5, A.2.2.6 e A.2.2.4 para o dimensionamento e cálculos energéticos do EX-201, EX-202 e TK-203. Os trocadores de calor encontram-se na Figura 79.

Figura 79 – Trocadores de calor E-201 e E-202

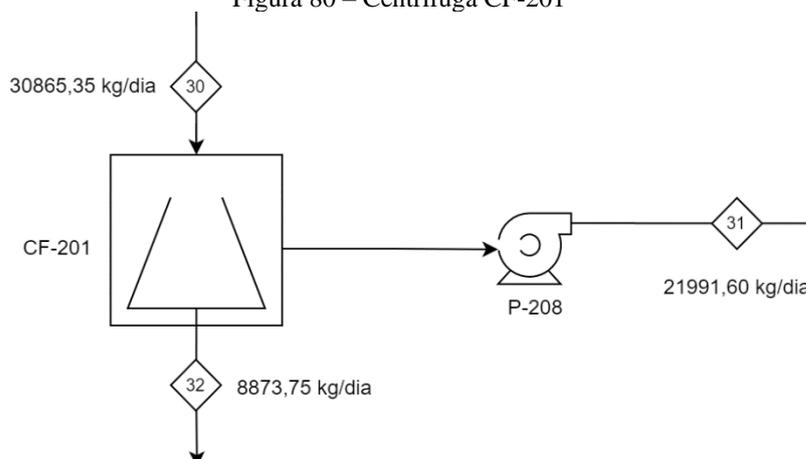


Fonte: Autores (2023).

6.2.5 Centrífuga (CF-201)

A centrífuga (CF-201) separa boa parte do DMC carregado com os sólidos, e assim é possível recuperar muito solvente que pode ser reciclado também nas extrações. A centrífuga CF-201 de modelo DZ 300, ou similar, conforme Anexo E, recebe a corrente 30 do extrator EX-205, contendo DMC, materiais da célula e do cátodo ativo. Após, envia boa parte do DMC para o TK-201, através da corrente 31, e o resto do material citado anteriormente vai ao secador DE-201, pela corrente 32, conforme Figura 80. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.2.13 para o balanço de massa, e A.2.2.9 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

Figura 80 – Centrífuga CF-201



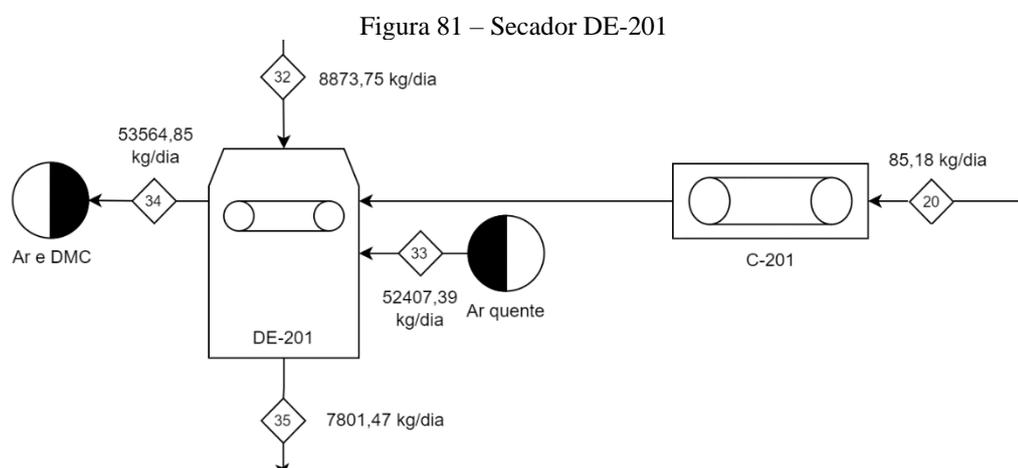
Fonte: Autores (2023).

6.2.6 Secador (DE-201)

O secador de modelo HB 800, ou similar, conforme Anexo F, opera continuamente e recebe as correntes 32 e 20, da CF-201 e do FC-201, respectivamente, sendo que a corrente 20 contém apenas uma pequena quantidade de polímeros (polietileno e polipropileno), já a corrente

32 contém materiais diversos, que passam para a peneira vibratória através da corrente 35 após a secagem do DMC. A corrente 33 adiciona ar quente ao secador, e a corrente 34 envia o ar quente que sai carregado com DMC, que se destina a caldeira para a combustão do solvente residual. A corrente com 34 possui uma contaminação com concentração de 186,70 ppb de compostos fluorídricos (LiPF_6), que pode ser mitigada com um lavador de gases após a combustão na caldeira.

O secador necessita de uma vazão de ar quente de 0,61 kg/s e uma área de troca térmica de 12,12 m². Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.14 para o balanço de massa, e A.2.2.10 para o dimensionamento e cálculos energéticos. A Figura 81 representa o secador DE-201.



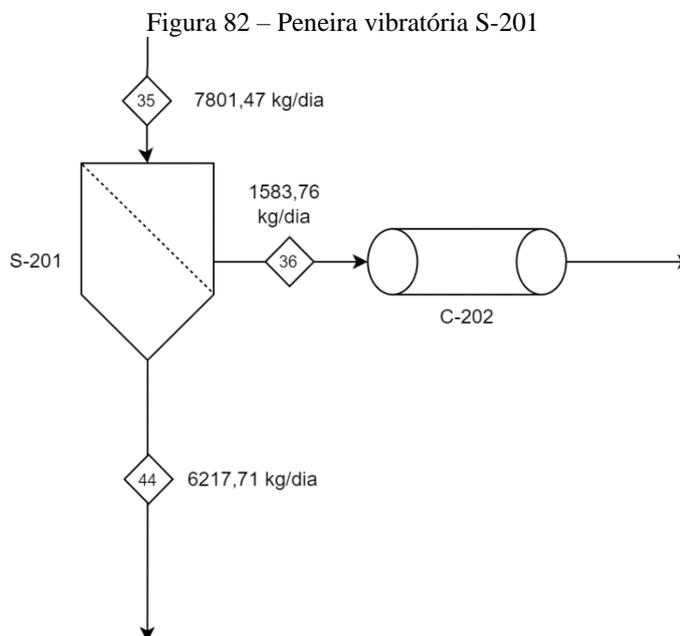
Fonte: Autores (2023).

6.2.7 Peneira vibratória (S-201)

Após a etapa de secagem descrita, o material seco é encaminhado pela corrente 35 para uma peneira vibratória (S-201) modelo conforme apresentado no Anexo G. Como descrito, as partículas maiores e intermediárias, como a folha de alumínio e cobre, além de plásticos, são retiradas em aberturas maiores da peneira e levadas para as etapas de separação magnética e separação eletrostática pela corrente 36. As partículas do ânodo e do cátodo com possíveis impurezas, como pequenas partículas de plásticos, seguem para o processo pela corrente 44 ao passarem por uma abertura de peneira de 60 mesh.

Tanto os materiais anódicos e catódicos provenientes das baterias de íons de lítio trituradas, consistem de uma fração fina inferior a 200 μm , garantindo uma alta eficiência desta etapa que opera como ideal, sem perdas. A dimensão da peneira foi encontrada para que um diâmetro circular de 0,56 m atende os requisitos do processo. Os cálculos e informações

adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.15 para o balanço de massa, e A.2.2.11 para o dimensionamento e cálculos energéticos. A peneira vibratória encontra-se na Figura 82.

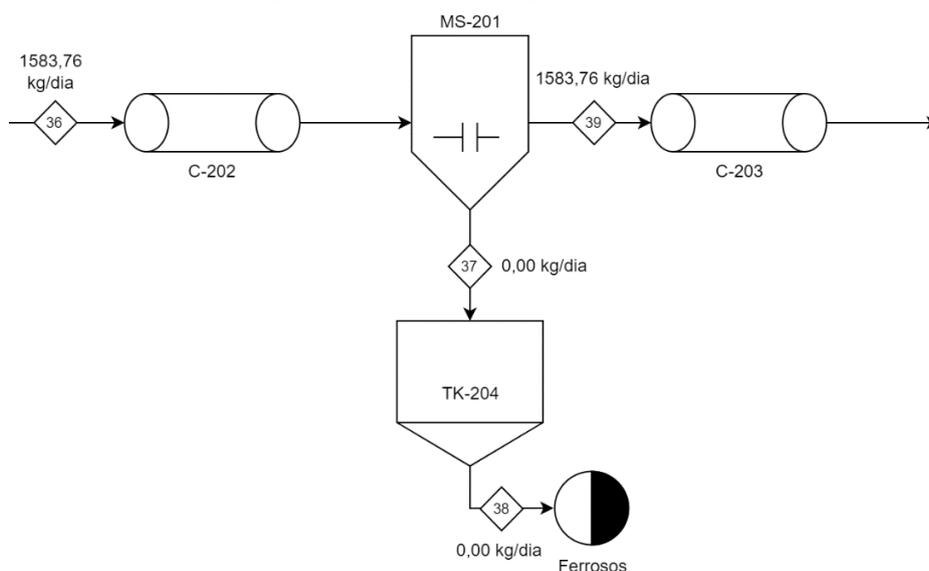


Fonte: Autores (2023).

6.2.8 Separador magnético (MS-201)

O separador magnético é de modelo BC-50/100-H ou similar, presente no Anexo H. Na Figura 83, encontram-se as entradas e saídas do equipamento. A corrente 36 adentra o equipamento principalmente com alumínio e cobre. A saída pela corrente 37 representa os materiais ferrosos, que no processo atual não existem. Caso existissem, seriam enviados ao tanque TK-204. Já a saída pela corrente 39 envia os materiais ao separador eletrostático. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.16 para o balanço de massa, e A.2.2.13 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

Figura 83 – Separador magnético MS-201

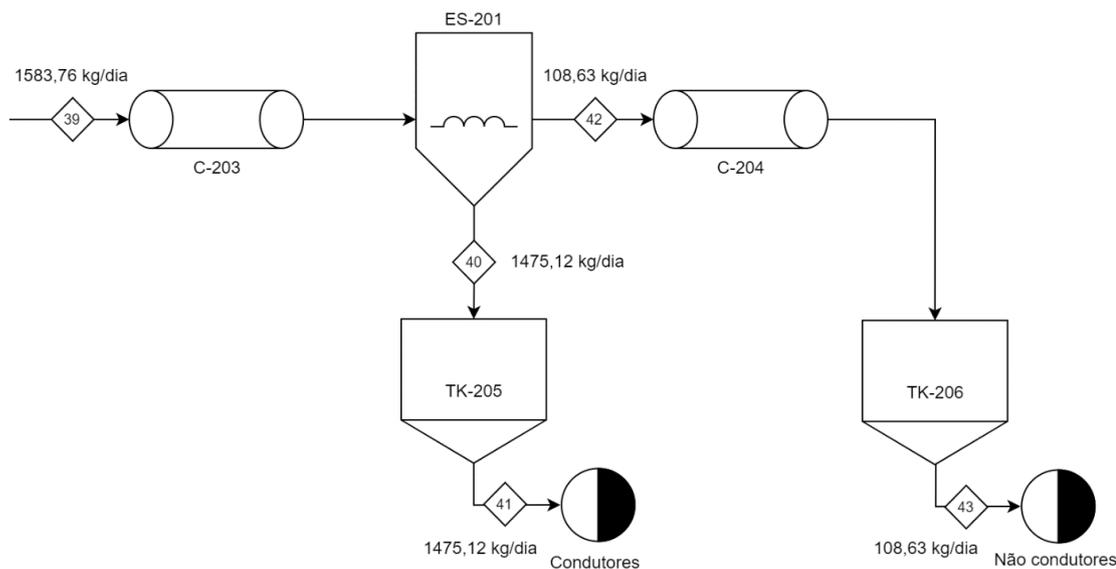


Fonte: Autores (2023).

6.2.9 Separador eletrostático (ES-201)

O separador eletrostático modelo EBC-T-27/200, ou similar, presente no Anexo I, é operado com uma eficiência de separação considerada de quase 100% entre os materiais de Al e Cu dos polímeros, tendo em vista os resultados experimentais apresentados anteriormente e as condições de operação, além do equipamento utilizado. O material proveniente do separador magnético (alumínio, cobre, entre outros) entra pela corrente 39. Na saída pela corrente 42 têm-se principalmente polímeros, que não são condutores, enviados ao tanque TK-206. Na saída pela corrente 40 tem-se principalmente cobre e alumínio, materiais condutores enviados ao tanque TK-205. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.17 para o balanço de massa, e A.2.2.13 para o dimensionamento e cálculos energéticos. O separador eletrostático encontra-se na Figura 84.

Figura 84 – Separador eletrostático ES-201

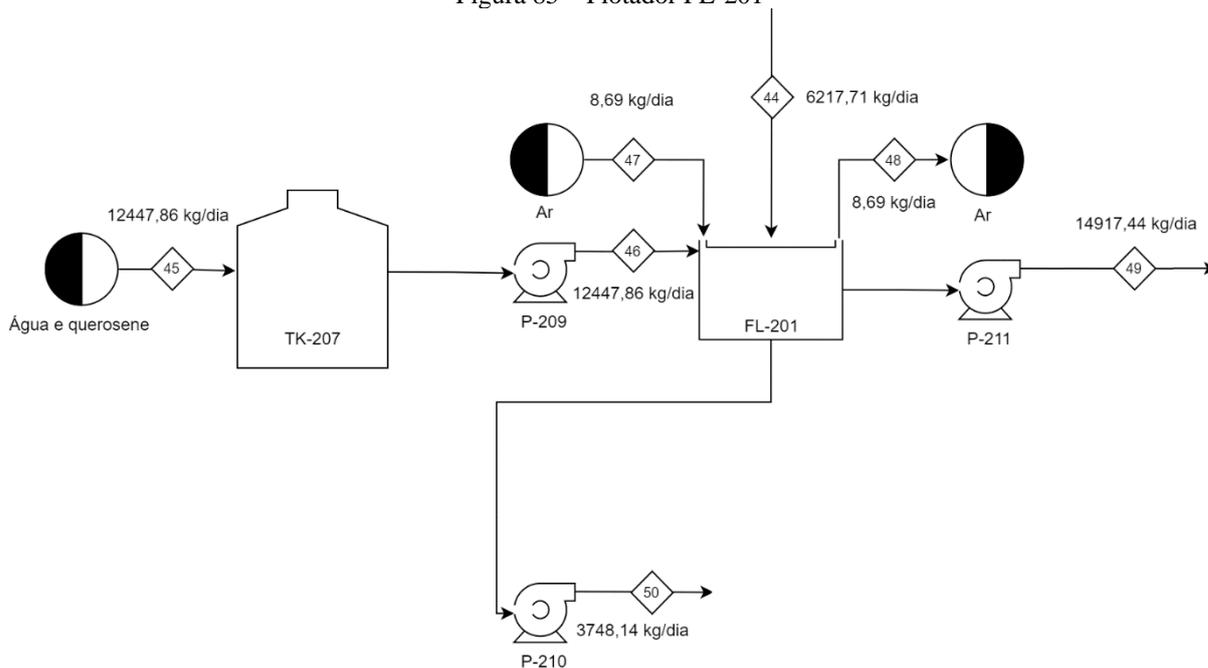


Fonte: Autores (2023).

6.2.10 Flotador (FL-201)

A máquina de flotação SmartCell[®], ou similar, conforme Anexo J, recebe os materiais peneirados pela corrente 44. Para ajudar na flotação do grafite, a corrente de entrada 46 injeta água e querosene que adentram ao processo, através do tanque TK-207, e a corrente 47 injeta ar que serve para formar as bolhas da flotação, gerada por uma turbina. A água sai pela corrente 49 em direção ao reator R-302, juntamente aos materiais diversos com menor teor de materiais hidrofóbicos. Uma pequena quantidade de água sai pela corrente 50, com boa parte dos materiais hidrofóbicos e com o querosene previamente utilizado, conforme Figura 85. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.2.19 para o balanço de massa, e A.2.2.16 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

Figura 85 – Flotador FL-201

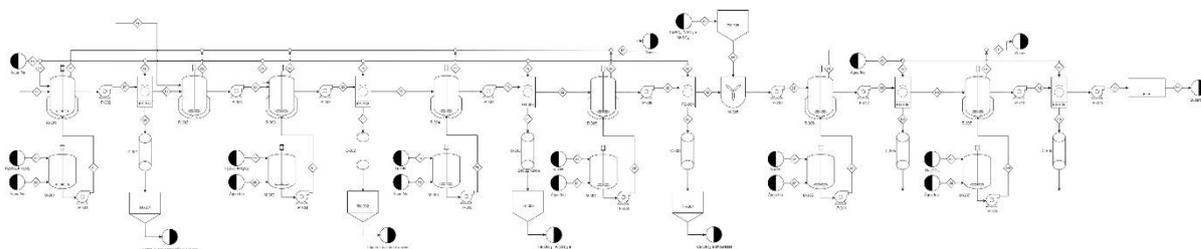


Fonte: Autores (2023).

6.3 ÁREA 300

A Área 300 corresponde a etapa de processamento das partículas pré-processadas na Área 200. Essa área se trata dos processos hidrometalúrgicos envolvidos para o refino do material de interesse para o acabamento final a partir das partículas pré-processadas. Essas partículas estão com uma concentração menor e/ou desconsiderável de contaminantes que poderiam ocasionar problemas na etapa. Uma visão geral da área 300 é encontrada na Figura 86.

Figura 86 – Área 300



Fonte: Autores (2023).

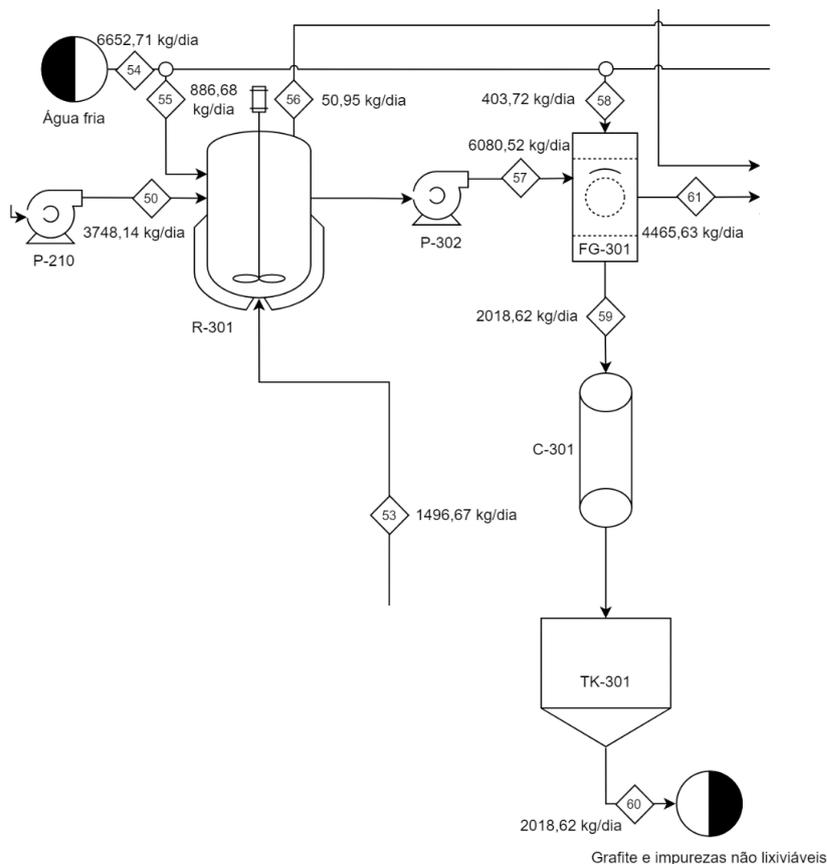
6.3.1 Reatores de lixiviação (R-301, R-302 e R-303)

Os três primeiros reatores da área 300 são destinados à lixiviação, de modelo SJ3X3.15, ou similar, encontrado no Anexo K. Os reatores possuem aquecimento para aumentos de temperatura, e operam continuamente. Ácido sulfúrico (H_2SO_4) é o agente lixivante para a lixiviação ácida com pH baixo, e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é o agente redutor. A operação de lixiviação utiliza uma temperatura de 80 °C a pressão atmosférica, com concentração sólido/líquido de 120 kg de sólidos por m^3 de solução. Os metais que adentram aos mesmos são transformados em sulfatos metálicos e solubilizados, e a reação libera uma quantidade significativa e O_2 .

O reator de lixiviação R-301 recebe a corrente 50 de materiais hidrofóbicos com contaminantes catódicos do FL-201. H_2SO_4 6,00 M com H_2O_2 em excesso de 30% ao requisitado estequiometricamente são adicionados pela corrente 53, provenientes do M-301, para manter a concentração de H_2SO_4 no R-301 em 2,00 M. Isso leva em consideração a diluição ocasionada pela água pela corrente 55, para melhores rendimentos da lixiviação e solubilização dos componentes considerando a condição de concentração. O O_2 sai pela corrente 56, e o licor de lixiviação com materiais hidrofóbicos não-metálicos são encaminhados para o FG-301 pela corrente 57. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.1 para o balanço de massa, e A.2.3.1 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

O filtro rotativo a vácuo (FG-301), modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L, recebe a corrente 57 e separa as impurezas não lixiviáveis do licor de lixiviação. As impurezas não lixiviáveis são retidas e lavadas com água adicionada pela corrente 58 no filtro rotatório, e encaminhadas para o TK-301 pela corrente 59 com a esteira C-301. Do TK-301, essas impurezas seguem para venda para reprocessamento pela corrente 60. O licor de lixiviação segue para o R-302 pela corrente 61, com um volume adicional pequeno de água proveniente da lavagem do filtrado. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, nos itens A.1.3.3 e A.1.3.21 para o balanço de massa do FG-301 e TK-301, respectivamente, e A.2.3.8 e A.2.3.9 para o dimensionamento e cálculos energéticos do FG-301 e TK-301, respectivamente. A Figura 87 representa o reator de lixiviação R-303 e o filtro gravitacional FG-301.

Figura 87 – Reator de lixiviação R-301 e filtro gravitacional FG-301



Fonte: Autores (2023).

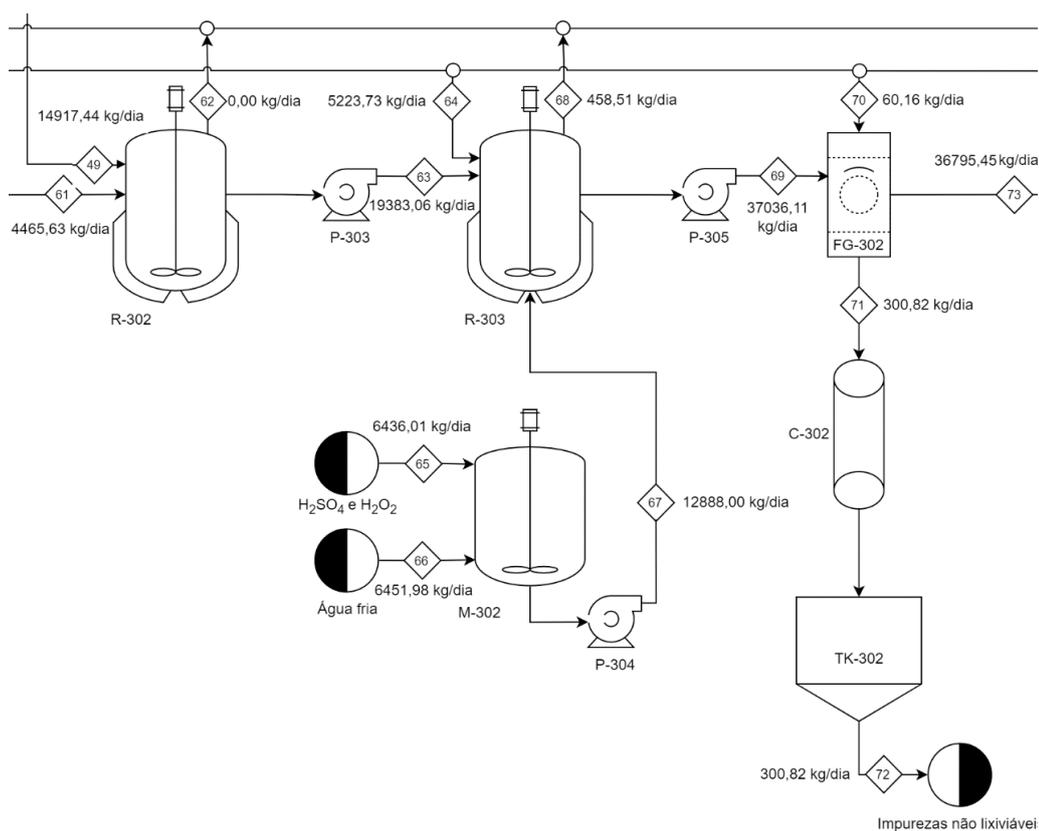
O R-302 recebe a corrente 61 com o licor de lixiviação a 80 °C do FG-301 e a corrente 49 com os materiais hidrofílicos e água a 25°C do FL-201. O R-302 não considera reações, mas apenas a mistura das correntes apesar de ser possível obter uma pré-solubilização dos materiais. Para isso, tem-se a corrente 62 para possíveis alívios de pressão ocasionados pela possibilidade de formação de O₂, e o licor em equilíbrio térmico com sólidos ainda não solubilizados, é bombeado pela corrente 63 para o R-303. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.4 para o balanço de massa, e A.2.3.1 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

Já o R-303 recebe a corrente 63 a aproximadamente 38,32 °C para a lixiviação dos sólidos ainda não solubilizados. H₂SO₄ 6,00 M, com H₂O₂ em excesso de 30% ao requisitado estequiometricamente, são adicionados pela corrente 67 provenientes do M-302, para manter a concentração de H₂SO₄ no R-303 em 2,00 M. A corrente 64 adiciona água de diluição para o processo. Já a corrente 68 libera o O₂ produzido pela reação, e o licor de lixiviação juntamente com uma contaminação de sólidos não lixiviáveis é bombeada pela corrente 69 para o filtro rotativo a vácuo (FG-302). Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A,

no item A.1.3.5 para o balanço de massa, e A.2.3.1 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

O filtro rotativo a vácuo (FG-302), modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L, recebe a corrente 69 e separa as impurezas não lixiviáveis do licor de lixiviação. As impurezas não lixiviáveis são retidas e lavadas com água adicionada pela corrente 70 no filtro rotatório, e encaminhadas para o TK-302 pela corrente 71 com a esteira C-302. Do TK-302, essas impurezas seguem para venda para reprocessamento pela corrente 72. O licor de lixiviação segue para o R-304 pela corrente 73. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.7 para o balanço de massa do FG-302, e A.2.3.8 para o dimensionamento e cálculos energéticos do FG-302. A Figura 88 representa os reatores de lixiviação R-302 e R-303, o misturador M-302 e o filtro gravitacional FG-302.

Figura 88 – Reatores de lixiviação R-302 e R-303



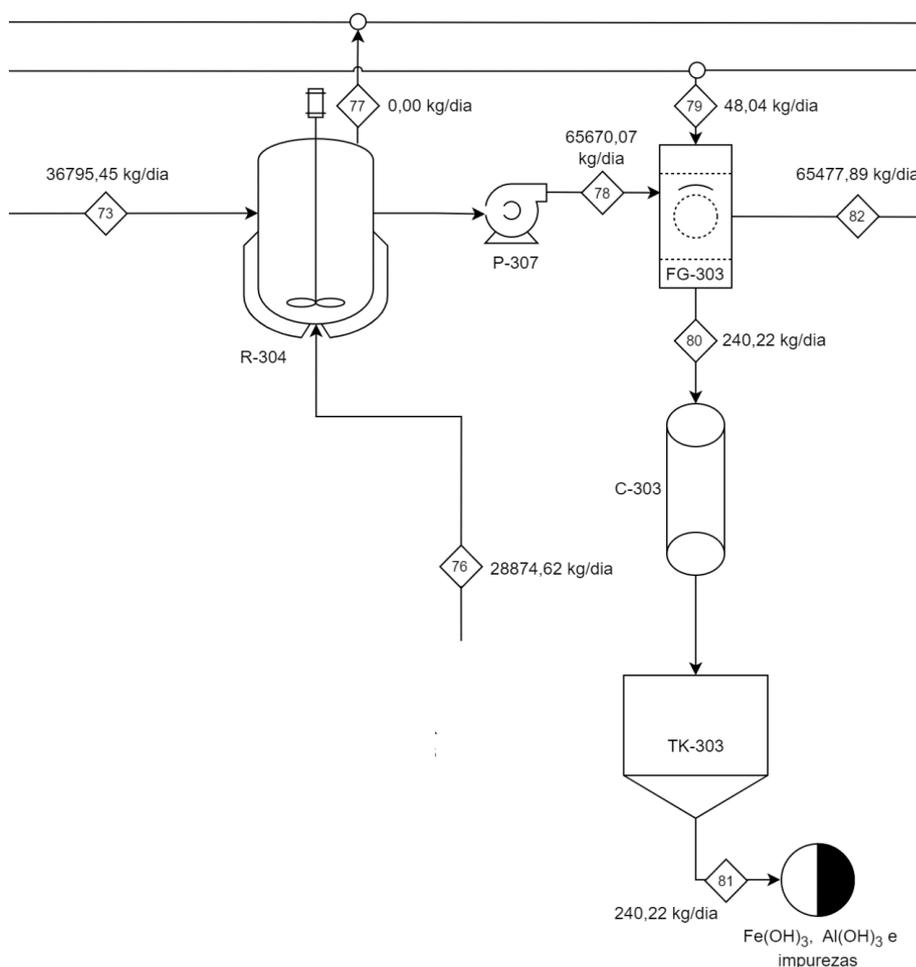
Fonte: Autores (2023).

6.3.2 Reatores de precipitação de metais contaminantes (R-304 e R-305)

Os reatores de precipitação de metais contaminantes (R-304 e R-305) são destinados à precipitação, e são de modelo SJ3X3.15, ou similar, como encontrado no Anexo K. Os reatores

possuem aquecimento já que as operações de precipitação utilizam uma temperatura de 80 °C a pressão atmosférica, e operam continuamente. O licor de lixiviação que adentra o mesmo contém sulfatos metálicos contaminantes que são transformados em hidróxidos metálicos, cristalizando-os e insolubilizando no meio aquoso. No R-304, o licor de lixiviação entra pela corrente 73 e o hidróxido de sódio (NaOH) diluído é adicionado pela corrente 76 para o aumento do pH. Para esse aumento, reage-se continuamente o excesso de H_2SO_4 no meio com o NaOH 0,40 M adicionado para o controle da operação em pH 4,00. O sulfato de alumínio (Al_2SO_4) é transformado em hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), e o excesso de H_2SO_4 forma H_2O . Como subproduto, as reações formam Na_2SO_4 que permanece solúvel no meio. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.8 para o balanço de massa do FG-302, e A.2.3.3 para o dimensionamento e cálculos energéticos do R-304. A Figura 89 representa o reator de precipitação R-304 e o filtro gravitacional FG-303.

Figura 89 – Reator de precipitação R-304 e filtro gravitacional FG-303



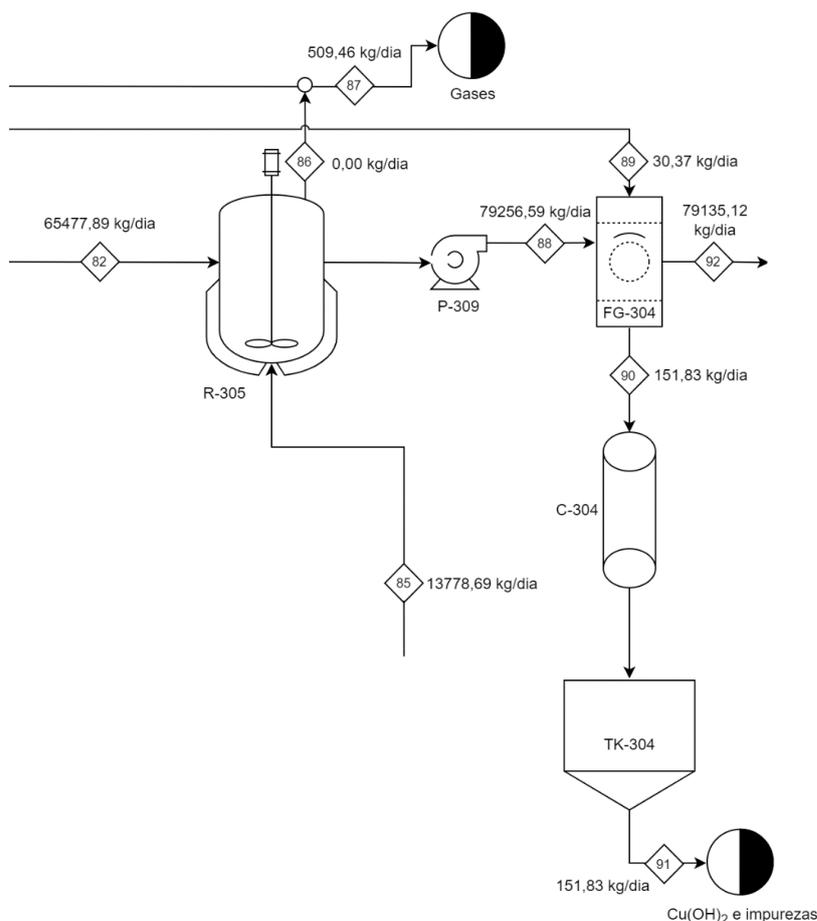
Fonte: Autores (2023).

A solução com o sólido precipitado é bombeada continuamente pela corrente 78 até o filtro rotativo a vácuo (FG-303), e um alívio de pressão consiste na corrente 77 para possíveis gases formados. O FG-303, modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L, recebe a corrente 78, juntamente com uma pequena corrente 79 de lavagem dos sólidos precipitados. Os sólidos são destinados ao TK-303 pela corrente 80 com a esteira C-303, e encaminhados na venda para reprocessamento pela corrente 81. O licor com metais solúveis são mantidos na corrente 82 líquida. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.10 para o balanço de massa, e A.2.3.8 para o dimensionamento e cálculos energéticos do FG-303.

No R-305, o licor entra pela corrente 82 e o hidróxido de sódio diluído (NaOH) a 0,10 M é adicionado pela corrente 85 para o aumento do pH. Para esse aumento, reage-se continuamente o pequeno excesso de H_2SO_4 adicionado no meio com o NaOH para o controle da operação em pH 5,50. O sulfato de cobre ($CuSO_4$) é transformado em hidróxido de cobre ($Cu(OH)_2$) e Na_2SO_4 , e o excesso de H_2SO_4 forma H_2O e Na_2SO_4 . A solução com o sólido precipitado é bombeada continuamente pela corrente 88 até o filtro rotativo a vácuo (FG-304), e um alívio de pressão consiste na corrente 86 para possíveis gases formados. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.11 para o balanço de massa, e A.2.3.3 para o dimensionamento e cálculos energéticos do R-305.

O FG-304, modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L, recebe a corrente 88, juntamente com uma pequena corrente 89 de lavagem dos sólidos precipitados. Os sólidos são destinados ao TK-304 pela corrente 90 com a esteira C-304 e deste para a venda com fins de reprocessamento com a corrente 91. O licor com metais solúveis são mantidos na corrente 92 líquida. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.13 para o balanço de massa, e A.2.3.8 para o dimensionamento e cálculos energéticos do FG-304. O reator de precipitação R-304 e o filtro gravitacional FG-304 estão representados pela Figura 90.

Figura 90 – Reator de precipitação R-304 e filtro gravitacional FG-304

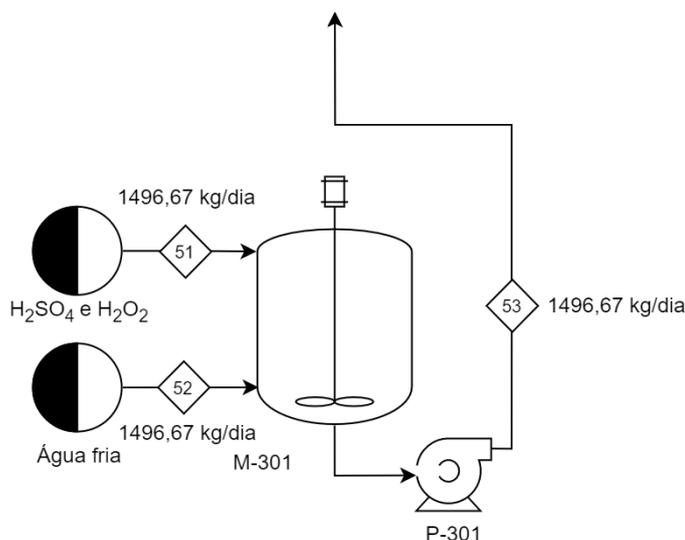


Fonte: Autores (2023).

6.3.3 Misturadores ácidos (M-301 e M-302)

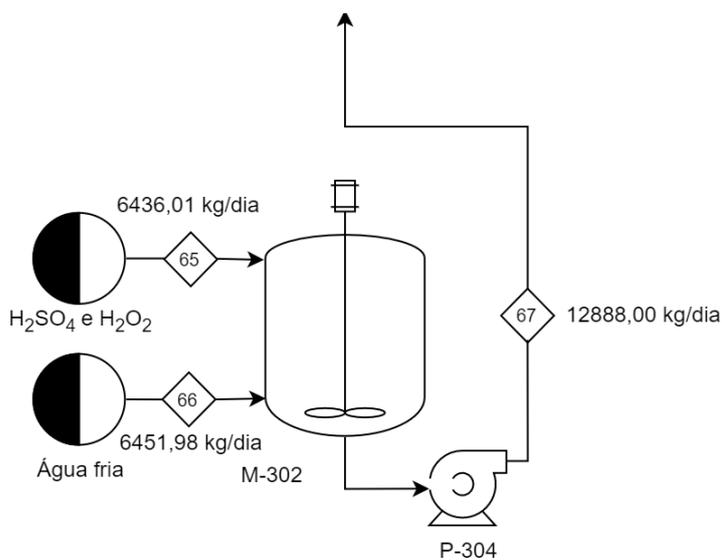
Os misturadores ácidos (M-301 e M-302) preparam a solução ácida de lixiviação, e são de modelo SJ3X3.15, ou similar, como encontrado no Anexo K. O H₂SO₄ e o H₂O₂ concentrados são adicionados e diluídos nestes para concentração desejada, conforme o requisito dos reatores. A reação de diluição do ácido libera calor, e uma camisa de arrefecimento com água fria deve ser contida nos mesmos. O M-301 recebe os componentes para diluição pela corrente 51 e água fria pela corrente 52, e envia a solução ácida 6,00 M para o R-301 pela corrente 53. Já o M-302 recebe os componentes pela corrente 65 e a água fria pela corrente 66, e envia a solução ácida 6,00 M para o R-302 pela corrente 67. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.2 para o balanço de massa, e A.2.3.2 para o dimensionamento e cálculos energéticos do M-301 e M-302, representados pelas Figuras 91 e 92, respectivamente.

Figura 91 – Misturador ácido M-301



Fonte: Autores (2023).

Figura 92 – Misturador ácido M-302



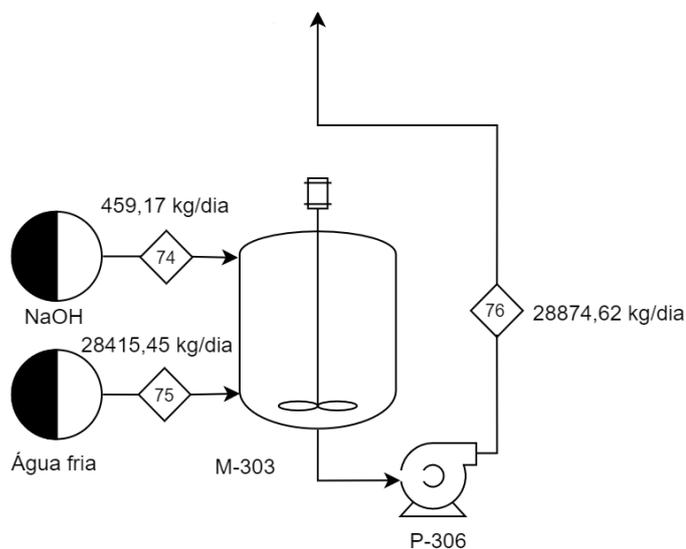
Fonte: Autores (2023).

6.3.4 Misturadores básicos de hidróxido (M-303, M-304 e M-306)

Os misturadores básicos de hidróxido (M-303, M-304 e M-306), de modelo SJ3X3.15, ou similar, como encontrado no Anexo K, diluem o NaOH. A reação de diluição da base libera calor, e uma camisa de arrefecimento com água fria deve ser contida nos mesmos. O hidróxido é introduzido no M-303, M-304 e M-306 pelas correntes 74, 83 e 96, respectivamente, para a diluição com água fria pelas correntes 75, 84 e 97, respectivamente. A concentração desejada de NaOH nos misturadores é em 0,40 M, 0,10 M e 3,00 M, respectivamente. A solução diluída é bombeada para os reatores de precipitação R-304, R-305 e R-306, através das correntes 76,

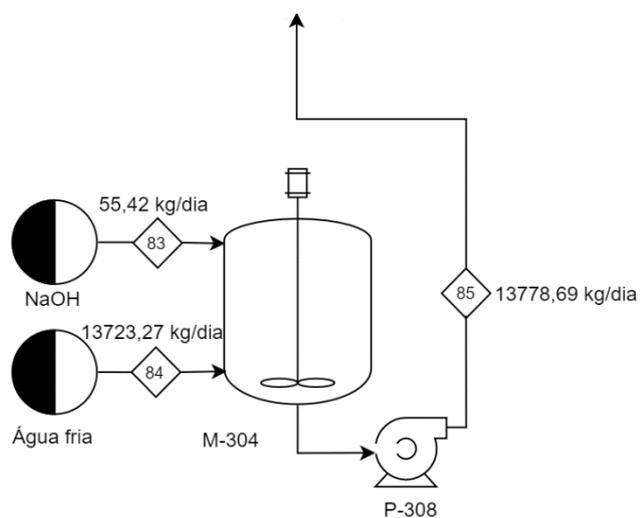
85 e 98, respectivamente. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.12 para o balanço de massa, e A.2.3.4 para o dimensionamento e cálculos energéticos do M-303, M-304 e M-306, presentes nas Figuras 93, 94 e 95, respectivamente.

Figura 93 – Misturador básico M-303



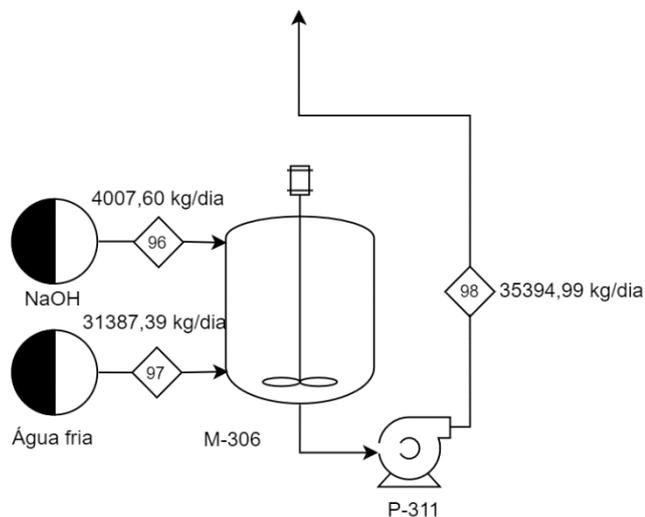
Fonte: Autores (2023).

Figura 94 – Misturador básico M-304



Fonte: Autores (2023).

Figura 95 – Misturador básico M-306

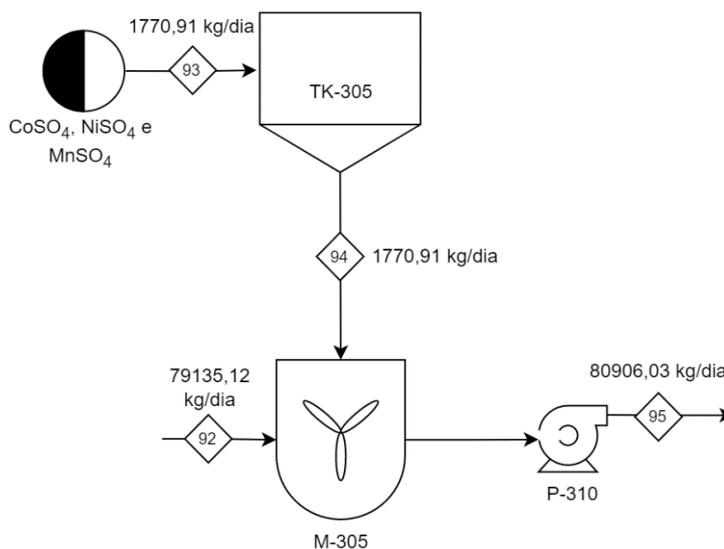


Fonte: Autores (2023).

6.3.5 Misturador de sulfatos (M-305)

O misturador de sulfatos (M-305) de modelo SJ3X3.15, ou similar, como encontrado no Anexo K e na Figura 96, recebe uma quantidade considerável de água e sulfatos solubilizados através da corrente 92, proveniente do filtro gravitacional FG-304. Também recebe sulfatos de manganês e cobalto através da corrente 94 do TK-305, que por sua vez é alimentado pela corrente 93. O objetivo do M-305 está no ajuste de razão que define a relação entre os 3 metais de transição para o componente catódico. Após a mistura e diluição contínua, a solução líquida é bombeada para o reator de precipitação R-306 pela corrente 95. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.14 para o balanço de massa, e A.2.3.5 para o dimensionamento e cálculos energéticos do M-305.

Figura 96 – Misturador de sulfatos M-305



Fonte: Autores (2023).

6.3.6 Reatores de precipitação dos componentes para produto ativo (R-306 e R-307)

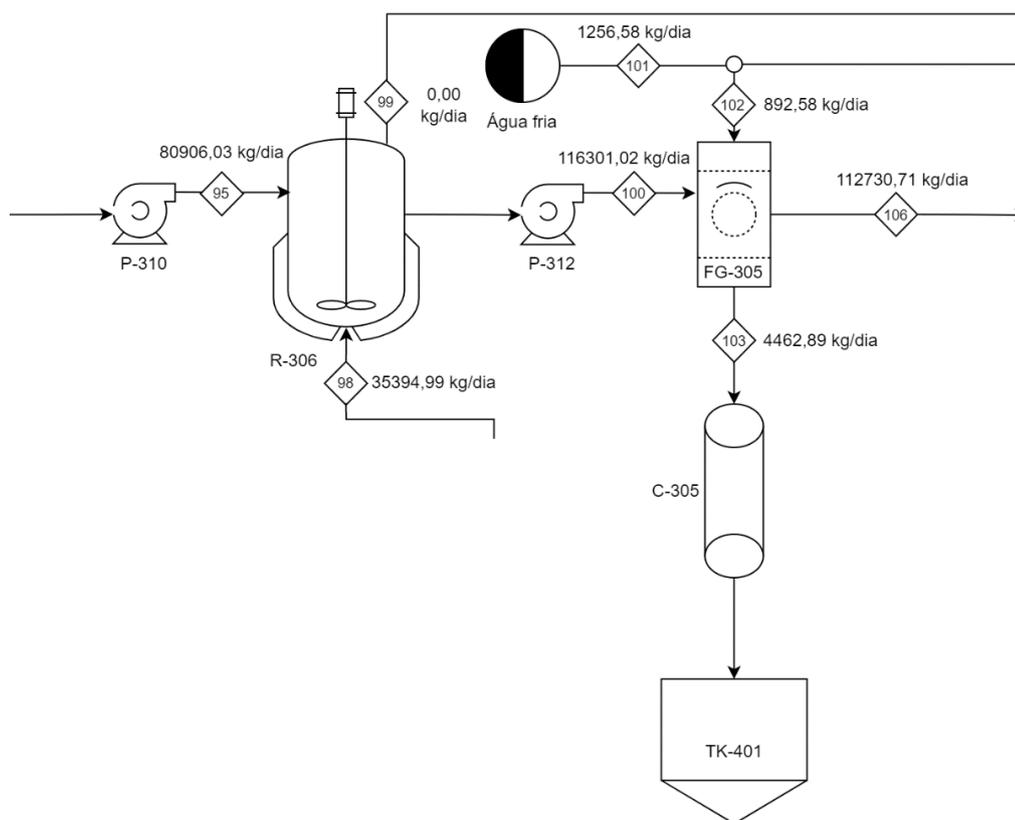
Os reatores de precipitação de metais dos componentes para o produto ativo (R-306 e R-307) são de modelo SJ3X3.15, ou similar, como encontrado no Anexo K. Os reatores possuem aquecimento e resfriamento, já que a operação possui variação de temperatura entre ambos. O reator de precipitação de hidróxido dos metais de transição (R-306) utiliza uma temperatura de 80 °C a pressão atmosférica, e opera continuamente. Já o reator de precipitação (R-307) do carbonato de lítio Li_2CO_3 opera em temperatura de 40 °C a pressão atmosfera, continuamente.

No R-306, a solução com sulfatos metálicos solubilizados entra pela corrente 95 e o hidróxido de sódio (NaOH) diluído é adicionado pela corrente 98 para o aumento do pH. Para isso, adiciona-se continuamente no meio NaOH 3,00 M para o controle da operação em pH 11,00. A reação deve ocorrer com uma mistura homogênea no R-306 para a não ocorrência de precipitações indesejadas. Os metais de transição para o material catódico são precipitados, na forma de hidróxido ($\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z(\text{OH})_2$). A corrente 99 representa uma saída para possíveis alívios de pressão por formação de gases. A solução remanescente com o precipitado é bombeada para o filtro rotativo a vácuo (FG-305) pela corrente 100. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.15 para o balanço de massa, e A.2.3.3 para o dimensionamento e cálculos energéticos do R-306.

O FG-305, modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L e na Figura 97, recebe a corrente 100, juntamente com uma pequena corrente 102 de lavagem dos sólidos precipitados.

Os sólidos são destinados ao TK-401 pela corrente 103 com a esteira C-305. A solução remanescente contendo principalmente Na_2SO_4 e Li_2SO_4 são mantidos na corrente 106 líquida, e bombeada até o R-307. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.17 para o balanço de massa, e A.2.3.8 para o dimensionamento e cálculos energéticos do FG-305. A Figura 97 representa o reator de precipitação R-306 e o filtro gravitacional FG-305.

Figura 97 – Reator de precipitação R-306 e filtro gravitacional FG-305

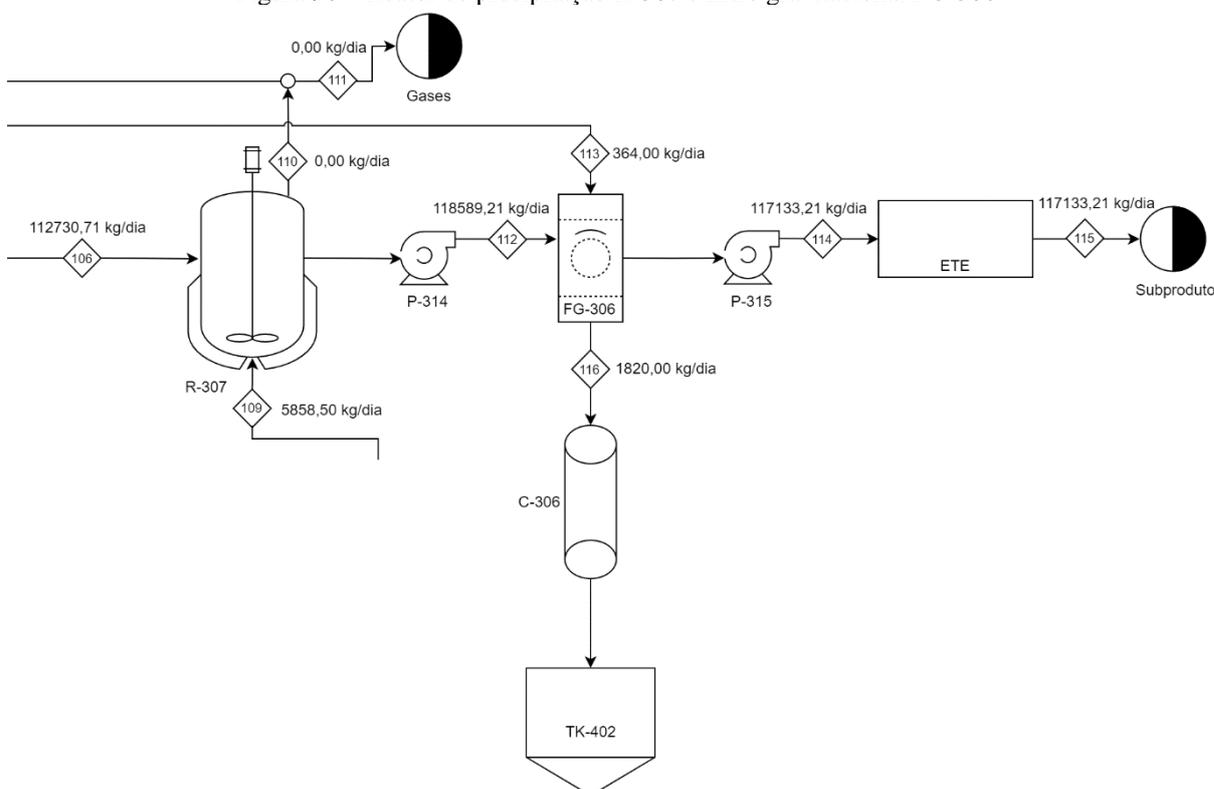


Fonte: Autores (2023).

O reator R-307 recebe a corrente 106 a 80°C com o Li_2SO_4 para a reação com carbonato de sódio (Na_2CO_3) para a precipitação de Li_2CO_3 . O a solução no R-307 necessita de resfriamento para 40°C , e água fria é passada pelo trocador de calor do reator para tal. O Na_2CO_3 é diluído no M-307 com água fria até a concentração de 5,00 M, e é adicionado ao R-307 pela corrente 109. Com a reação, a solução remanescente juntamente com os cristais de Li_2CO_3 são bombeados para o filtro rotativo a vácuo (FG-306) pela corrente 112. Um alívio de gases é descrito pela corrente 110, considerando possíveis formações gasosas. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.18 para o balanço de massa, e A.2.3.6 para o dimensionamento e cálculos energéticos do R-307.

O FG-306, modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L e na Figura 98, recebe a corrente 112, juntamente com uma pequena corrente 113 de lavagem dos sólidos precipitados. Os sólidos são destinados ao TK-402 pela corrente 116 com a esteira C-306. A solução remanescente contendo principalmente Na_2SO_4 é mantida na corrente 114 líquida, e bombeada até a estação de tratamento de efluentes (ETE), para valorização do Na_2SO_4 como subproduto. Após o tratamento, a corrente 115 define a saída de subprodutos conforme soluções adequadas (cristalização, tratamento de contaminantes, etc.). Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item A.1.3.20 para o balanço de massa, e A.2.3.8 para o dimensionamento e cálculos energéticos do FG-305. O reator de precipitação R-307 e o filtro gravitacional FG-306 estão representados pela Figura 98.

Figura 98 – Reator de precipitação R-307 e filtro gravitacional FG-306



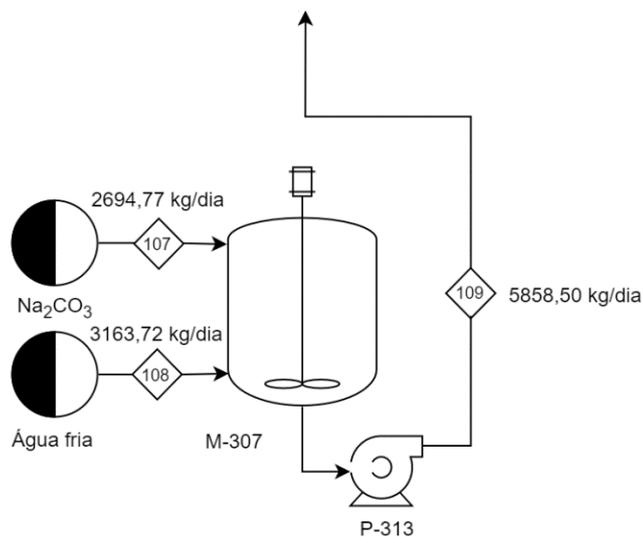
Fonte: Autores (2023).

6.3.7 Misturador de carbonato (M-307)

O misturador de carbonato (M-307) de modelo SJ3X3.15, ou similar, como encontrado no Anexo K, possui a função de diluir o Na_2CO_3 adicionado até a concentração de 5,00 M. A corrente 107 adiciona o Na_2CO_3 , e a corrente 108 adiciona a água fria de diluição. O misturador possui camisa térmica para controle de temperatura. A solução é bombeada para o R-307 pela corrente 109. Os cálculos e informações adicionais encontram-se no Apêndice A, no item

A.1.3.19 para o balanço de massa, e A.2.3.7 para o dimensionamento e cálculos energéticos do M-307. O misturador de carbonato M-307 encontra-se na Figura 99.

Figura 99 – Misturador de carbonato M-307

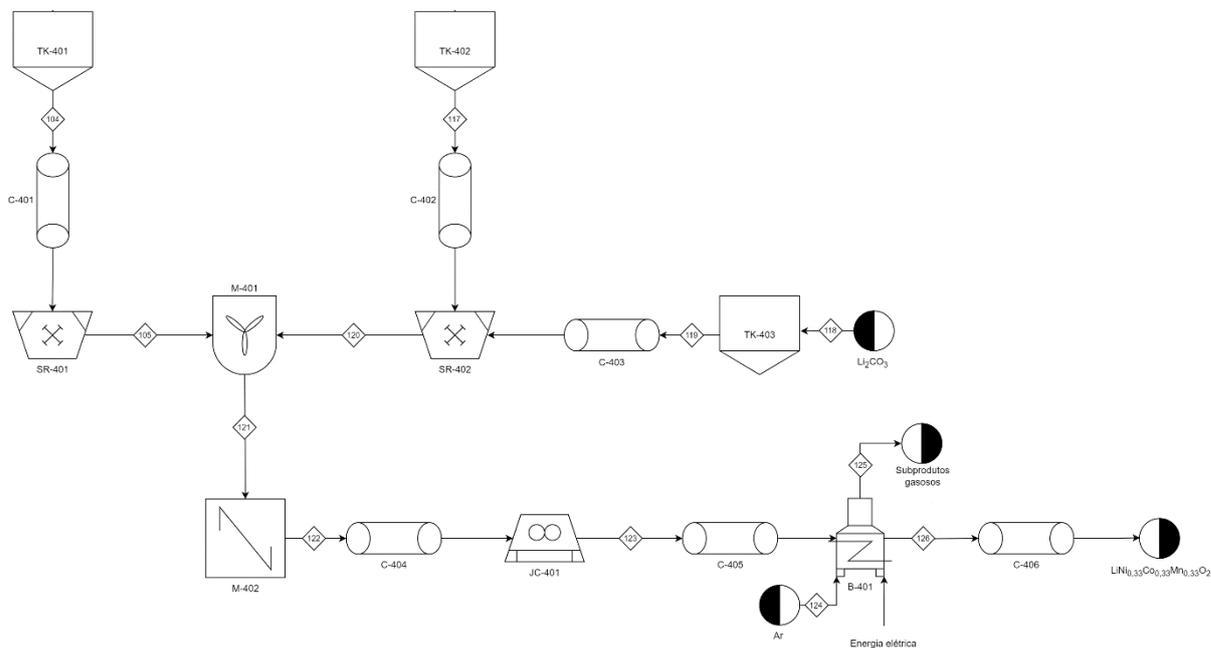


Fonte: Autores (2023).

6.4 ÁREA 400

A Área 400 consiste na etapa de acabamento do projeto, ao qual o produto final é produzido com alto grau de pureza. A área consiste em processos de metalurgia do pó, ao qual confere as propriedades essenciais para o material ativo. É importante destacar que essas propriedades dependem também diretamente dos ajustes de razão e do refino de todas as outras etapas. Uma visão geral da área 400 é encontrada na Figura 100.

Figura 100 - Área 400



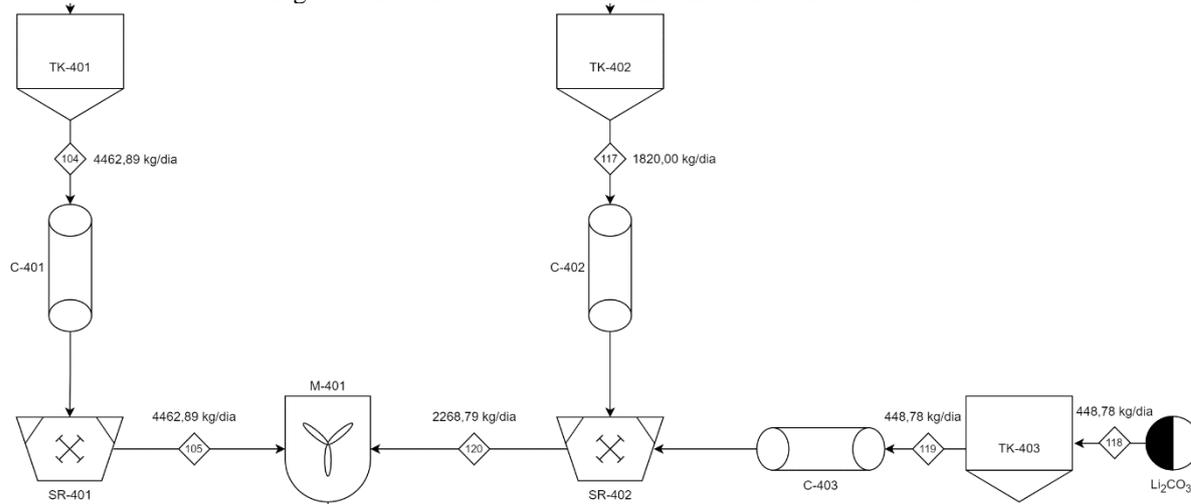
Fonte: Autores (2023).

6.4.1 Cominuição e homogeneização (SR-401, SR-402, M-401 e M-402)

Do filtro FG-305 e FG-306, o TK-401 e TK-402, respectivamente, recebem o $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z(\text{OH})_2$ e Li_2CO_3 para a formulação $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ pelas correntes 103 e 118, respectivamente. Os sólidos seguem para a cominuição do $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z(\text{OH})_2$ (SR-401) e do Li_2CO_3 (SR-402) por meio das correntes 104 e 117 com as esteiras C-401 e C402, respectivamente. A cominuição acontece diminuindo a granulometria dos materiais separadamente, para melhor ajuste nas etapas finais. O SR-402 recebe um ajuste de Li_2CO_3 pela corrente 119 com a esteira C-403, proveniente do TK-403 que por sua vez é alimentado pela corrente 118. É mantido e ajustado o mesmo em excesso de 5% (molar) com relação ao $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z(\text{OH})_2$.

Os cálculos e informações adicionais do TK-401, TK-402 e TK-403 encontram-se no Apêndice A, no item A.1.4.1, para o balanço de massa, e A.2.4.1 para o dimensionamento e cálculos energéticos. Os cálculos e informações adicionais do SR-401 e SR-402 encontram-se no Apêndice A, no item A.1.4.2 para o balanço de massa, e A.2.4.3 para o dimensionamento e cálculos energéticos. A Figura 101 representa o misturador M-401 e os moinhos SR-401 e SR-402.

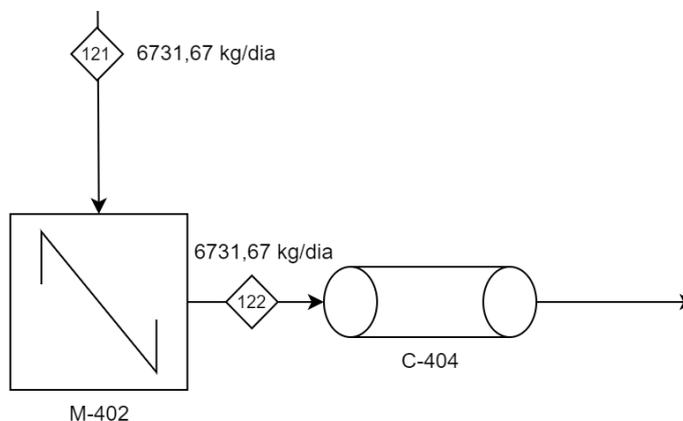
Figura 101 – Misturador M-401 e moinhos SR-401 e SR-402



Fonte: Autores (2023).

O misturador, M-401, de modelo de pás, conforme Anexo A.K, recebe a mistura sólida de $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z(\text{OH})_2$ e Li_2CO_3 do SR-401 e SR-402, pelas correntes 105 e 120, respectivamente, por gravidade. O M-401 tem por objetivo um ajuste de razão e homogeneização da mistura. Após esse controle, os sólidos saem continuamente do M-401 por gravidade pela corrente 121, até o misturador M-402. O M-402, de modelo tipo ribbon, conforme Anexo A.J, tem por objetivo uma homogeneização mais intensa da mistura sólida. Após o procedimento, a mistura sólida é transportada pela corrente 122 com a esteira C-404 para o compactador de rolos (JC-401). Os cálculos e informações adicionais do M-401 e M-402 encontram-se no Apêndice A, no item A.1.4.3 para o balanço de massa, e A.2.4.4 para o dimensionamento e cálculos energéticos. A Figura 102 representa o misturador M-402.

Figura 102 – Misturador M-402



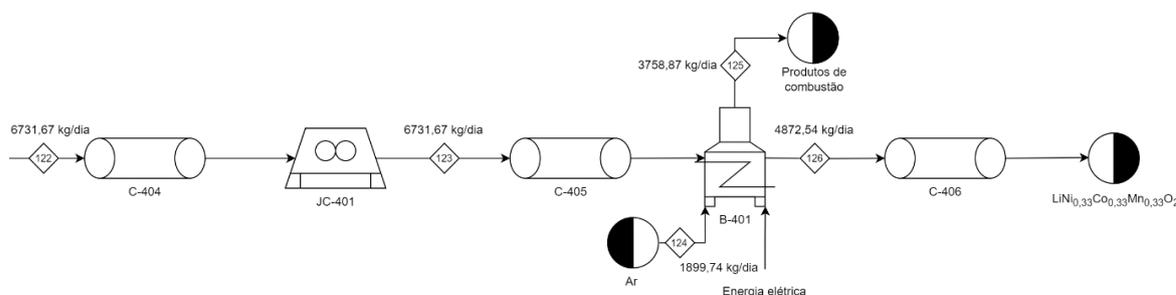
Fonte: Autores (2023).

6.4.2 Compactação e calcinação/sinterização do material (JC-401 e B-401)

O compactador por rolos (JC-401), modelo TFC-1230, encontrado no Anexo L, recebe a mistura sólida do M-402 através da corrente 122. A compactação auxilia nas etapas térmicas para a agregação entre os sólidos. A mistura sólida de $\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z(\text{OH})_2$ e Li_2CO_3 compactada continuamente é enviada para o forno de sinterização, B-401, através da corrente 123 com a esteira C-405. Os cálculos e informações adicionais do JC-401 encontram-se no Apêndice A, no item A.1.4.4 para o balanço de massa, e A.2.4.5 para o dimensionamento e cálculos energéticos.

O forno B-401, modelo 272, encontrado no Anexo M, recebe a mistura sólida pela corrente 123 para as etapas térmicas. O forno possui 3 etapas: calcinação, sinterização e resfriamento do material. A calcinação ocorre a uma temperatura de $450\text{ }^\circ\text{C}$, e requisita $\text{O}_{2(\text{g})}$ para efetuar a reação de desprendimento de $\text{CO}_{2(\text{g})}$ e $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ da composição sólida. Por isso, ar é adicionado na etapa através da corrente 124. Após isso, ocorre a etapa de sinterização do material com temperatura de operação de $850\text{ }^\circ\text{C}$, com a passagem contínua pela câmara. O excesso de 5% em Li_2CO_3 é transformado em Li_2O a $723\text{ }^\circ\text{C}$, pela reação do carbonato liberando $\text{CO}_{2(\text{g})}$. Após a passagem pelo forno de sinterização, é obtido o produto final de interesse, $\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$, com alta temperatura. O material é resfriado com ar a temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$ na etapa de resfriamento, e o material ativo é transportado pela corrente 126 com a esteira C-406. Os produtos de combustão saem do forno pela corrente 125 junto com o ar, onde serão tratados. Os cálculos e informações adicionais do B-401 encontram-se no Apêndice A, no item A.1.4.5 para o balanço de massa, e A.2.4.6 para o dimensionamento e cálculos energéticos. O compactador por rolos e o forno de sinterização encontram-se representados na Figura 103.

Figura 103 – Compactador por rolos JC-401 e forno de sinterização B-401



Fonte: Autores (2023).

7 PROJETO DE UTILIDADES DO PROCESSO

O projeto de utilidades foi desenvolvido com base nas demandas estabelecidas pelas operações do processo, consoante as metodologias de cálculo e de projeto apresentadas por Macintyre (2010). As demandas foram calculadas conforme o Apêndice A e apresentadas de forma resumida aqui, indicando os equipamentos e os fluxos correspondentes. Os cálculos envolvidos neste tópico são apresentados no memorial de cálculo das instalações (Apêndice B) com relação à planta industrial presente no Apêndice D, que mostra o arranjo físico dos equipamentos presentes no fluxograma detalhado do processo, assim como a localização dos prédios auxiliares, seguindo a lógica apresentada pelo diagrama de blocos do processo.

Os resultados são aqui apresentados resumidamente quanto ao comprimento e diâmetro nominal utilizado para as tubulações de cada utilidade presente no processo (água fria, água quente, vapor, condensado, ar comprimido e gás natural), assim como as tubulações do próprio processo que conectam os equipamentos.

7.1. INSTALAÇÕES DE ÁGUA POTÁVEL

7.1.1 Instalações de água fria

7.1.1.1 Demanda de água fria necessária ao processo

A água fria será requisitada no pavilhão industrial nas vazões determinadas por equipamento como disposto na Tabela 13. A demanda de água fria, considera os três turnos de trabalho de 8 horas cada um, é utilizada tanto na alimentação dos processos quanto como água de resfriamento para a realização de trocas térmicas, assim como para alimentação para a caldeira. Foi considerado um reciclo total da água em um circuito fechado.

Tabela 13 – Demanda de água fria necessária para o processo

| Código do equipamento | Demanda (kg/dia) | Código do equipamento | Demanda (kg/dia) |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|
| E-201 | 149212,80 | FG-303 | 48,04 |
| E-202 | 88992,00 | FG-304 | 30,37 |
| TR-201 | 435,21 | FG-305 | 892,58 |
| TK-207 | 12435,43 | FG-306 | 364,00 |
| M-301 | 10761,80 | R-301 | 886,68 |
| M-302 | 100627,99 | R-303 | 5223,73 |
| M-303 | 28415,45 | R-304 | 25683,85 |
| M-304 | 13723,27 | R-305 | 2596,98 |
| M-306 | 33295,59 | R-306 | 225888,62 |
| M-307 | 6004,07 | R-307 | 447604,67 |
| FG-301 | 403,72 | Caldeira | 1799,15 |
| FG-302 | 60,17 | Total | 1466352,33 |

Fonte: Autores (2023).

7.1.1.2 Demanda de água fria nos prédios auxiliares

Os prédios auxiliares que compreendem a casa da caldeira e o prédio que engloba a área administrativa, cozinha, refeitório, banheiros e vestiários masculino e feminino, e a lavandeira, além do laboratório presente no pavilhão industrial, necessitam de água fria para suas necessidades específicas.

Seguindo as recomendações de Macintyre (2010), além de buscar proporcionar maior conforto aos colaboradores e uma melhor distribuição de aparelhos para diversas serventias, como lavatórios, chuveiros, bebedouros, vasos sanitários e mictórios. Para este propósito, selecionou-se 6 bebedouros, estando dois deles localizados no refeitório, um no escritório e três no pavilhão industrial, 6 vasos sanitários, três em cada um dos banheiros (masculino e feminino). O banheiro masculino contará com mais 3 mictórios. Cada banheiro também possuirá 3 chuveiros cada, totalizando 6 chuveiros para aqueles funcionários dedicados a atividades contínuas ou expostas a calor excessivo, ou contaminação da pele com substâncias venenosas, infecciosas ou irritantes.

Além disso, cada vestiário contará também com 3 torneiras cada, totalizando 6 torneiras. A cozinha, no que lhe concerne, terá 3 torneiras para uso geral, assim como o laboratório que também terá 3 torneiras. Para a lavanderia, estima-se a aquisição de uma máquina de lavar roupa. Todos os itens dispostos anteriormente possuem suas vazões indicadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Consumo nas peças e aparelhos sanitários

| Aparelho ou peça | Consumo (L/min) | Consumo (m³/h) |
|--------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Bebedouro | 3 | 0,18 |
| Chuveiro de 100 mm | 12 | 0,72 |
| Máquina de lavar roupa | 18 | 1,08 |
| Mictório de caixa automática | 9 | 0,54 |
| Torneira | 12 | 0,72 |
| Vaso sanitário com caixa de descarga | 9 | 0,54 |

Fonte: Adaptado de Macintyre (2010).

De acordo com Macintyre (2010), a estimativa de consumo de água por operário em uma fábrica com restaurante é de 100 L/dia, considerando um contingente de 148 colaboradores, estima-se 14800 L/dia para as necessidades fisiológicas dos mesmos.

7.1.1.3 Tubulação de água fria

A tubulação de água fria será de aço carbono SCH 40, pois suporta maiores vazões e pressões de trabalho comparativamente ao material policloreto de vinila (PVC), tipicamente utilizado em tubulações de água fria (MACINTYRE, 2010). O dimensionamento da tubulação de água fria foi realizado conforme a seção B.1.1 do Apêndice B, totalizando 437,42 m de tubulação, sendo 99,43 m de ¼”, 24,82 m de ¾”, 8,60 m de ½”, 18,20 m de ¾”, 23,00 m de 1”, 43,48 m de 1 ¼”, 68,88 m de 2”, 79,39 m de 2 ½”, 55,43 m de 3” e 16,19 m de 4” de diâmetro nominal. A demanda de água fria de cada trecho assim como o comprimento e o diâmetro escolhido de cada trecho também são apresentados na seção B.1.1.

7.1.2 Instalações de água quente

7.1.2.1 Demanda de água quente necessárias ao processo

A água quente será o resultado da água de resfriamento utilizada nas camisas dos reatores e misturadores onde se faz necessário realizar esta troca térmica. A água quente gerada nas camisas será utilizada na caldeira para reduzir gastos energéticos na geração de vapor, pois a mesma estará pré-aquecida.

7.1.2.2 Demanda de água quente nos prédios auxiliares

Nos prédios auxiliares a água quente é requerida nos banheiros masculinos e femininos para os chuveiros. Desta forma, tendo em vista que não existe uma grande necessidade de aquecimento da água para banho em razão das condições climáticas da localização da empresa, será feito o uso de chuveiros elétricos que possuem custo de instalação e manutenção relativamente baixos.

7.1.2.3 Tubulação de água quente

A tubulação de água quente será de aço carbono SCH 40. O dimensionamento da tubulação de água quente foi realizado conforme a seção B.1.2 do Apêndice B, totalizando 175,46 m de tubulação, sendo 10,09 m de ¼”, 6,72 m de ⅜”, 2,92 m de 1”, 6,44 m de 1 ¼”, 15,01 m de 2”, 28,44 m de 2 ½” e 105,85 m de 3” de diâmetro nominal. A demanda de água quente de cada trecho assim como o comprimento e o diâmetro escolhido de cada trecho são apresentados na seção B.1.2.

7.1.3 Instalações de água gelada

7.1.3.1 Demanda de água gelada

A água gelada necessária é aquela utilizada para o consumo humano diário de água, sendo a mesma potável, filtrada e fresca, e fornecida por meio de bebedouros espalhados pelo prédio auxiliar e pelo pavilhão industrial, como comentado anteriormente. O próprio equipamento é responsável por gelar a água. Também haverá a produção de água gelada pelo chiller.

7.1.4 Reservatório de água

De acordo com Macintyre (2010), a reserva total de água acumulada nos reservatórios inferior e superior não pode ser inferior ao consumo diário e nem superior a três vezes o mesmo. Como comentado anteriormente, adota-se um coeficiente de segurança de 25% sobre o consumo total de água diário, com a finalidade de evitar faltas de água. A água armazenada é distribuída entre o reservatório inferior e superior, sendo que $\frac{3}{5}$ são destinados ao reservatório inferior e $\frac{2}{5}$ ao reservatório superior. Com base nas demandas de água e no coeficiente de segurança, tem-se uma demanda total de água de 1.466.352,33 L/dia, como apresentado na seção B.1.1 do Apêndice B. Isto é o considerado para que a operação esteja em completa operação, é claro que grande parte da água utilizada é recirculada ou reutilizada na geração de vapor, gerando economias nos gastos com água. Considera-se a criação de reservatórios auxiliares que propiciem a circulação de água de forma mais eficiente ao entorno dos equipamentos.

7.2 INSTALAÇÕES DO PROCESSO

O dimensionamento da tubulação do processo foi realizado conforme a seção B.2 do Apêndice B, totalizando 273,27 m de tubulação, sendo 58,83 m de $\frac{1}{4}$ ", 3,75 m de $\frac{3}{8}$ ", 35,64 m de $\frac{1}{2}$ ", 67,32 m de $\frac{3}{4}$ ", 18,95 m de 1" e 88,77 m de 8" de diâmetro nominal. As vazões de cada trecho foram baseadas nas demandas definidas e balanços realizados, como apresentado no Apêndice A, o comprimento e o diâmetro escolhido para cada um dos trechos são calculados e apresentados na seção B.2. Tais instalações se referem às tubulações que conectam os diversos equipamentos entre si, visando transportar as correntes do processo dentre os equipamentos. O

material utilizado nas tubulações destinadas ao processo é de aço inox 904L SCH 40, em vistas da corrosão proporcionada por determinados reagentes utilizados no processo, como o H_2SO_4 .

7.3 INSTALAÇÕES DE VAPOR E CONDENSADO

Todo o vapor utilizado no pavilhão industrial e no prédio auxiliar será produzido por meio de uma caldeira, também será feito o reciclo do condensado gerado a fim de se ter uma economia nos gastos energéticos e de água. Para auxiliar na coleta do condensado gerado, foi considerada uma inclinação na tubulação de 0,5% do comprimento do tubo no sentido do fluxo para as instalações de vapor (MACINTYRE, 2010). As tubulações de vapor possuem um comprimento total de 163,39 m, sendo 2,00 m de 1", 10,13 m de 1 ½", 13,72 m de 1 ¼", 7,68 m de 2", 114,57 m de 3", 6,70 m de 4" e 8,60 m de 6" de diâmetro nominal. Enquanto, as tubulações de condensado possuem um comprimento total de 163,39 m, sendo 58,28 m de ½", 9,68 m de ¾", 8,60 m de 1" e 86,82 m de 1 ½" de diâmetro nominal, de acordo com a seção B.3 do Apêndice B.

7.3.1 Demanda de vapor necessária ao processo

O vapor será requisitado no pavilhão industrial nas vazões determinadas por equipamento como disposto na Tabela 15. A demanda de vapor considera os três turnos de trabalho de 8 horas cada um. O dimensionamento da tubulação de vapor foi realizado conforme a seção B.3 do Apêndice B. Além disso, o dimensionamento das tubulações para o condensado gerado no processo é apresentado na mesma seção.

Tabela 15 – Demanda de vapor necessário para o processo

| Código do equipamento | Demanda (kg/dia) |
|------------------------------|-------------------------|
| D-201 | 16329,60 |
| R-301 | 6833,72 |
| R-303 | 3873,03 |
| M-303 | 2840,35 |
| M-304 | 1430,16 |
| M-306 | 1908,20 |

Fonte: Autores (2023).

7.3.2 Geração de vapor

Com base na demanda total de vapor necessária à operação da instalação industrial de 1383,96 kg/h de vapor, com uma margem de segurança de 30%, tem-se um total de 1799,15 kg/h. Selecionou-se uma caldeira capaz de atender aos requisitos mínimos desta demanda. Desse modo, é sugerida a caldeira modelo M3P-2.0 da empresa Alfa Laval, ou similar, que possui uma capacidade de produzir 2000 kg/h de vapor a uma pressão máxima de trabalho admissível (PMTA) de 11,95 kgf/cm², a mesma encontra-se no Anexo N. Inclui-se na instalação da caldeira todos os equipamentos necessários ao seu funcionamento, como o tanque de armazenamento de água que alimenta a mesma.

7.4 INSTALAÇÕES DE AR COMPRIMIDO

7.4.1 Demandas de ar comprimido

O ar comprimido é requisitado para a etapa de desmontagem manual, na qual as ferramentas pneumáticas são necessárias para fornecer maior praticidade aos colaboradores encarregados da desmontagem das baterias de íons de lítio. Como a empresa opera 24h por dia em três turnos de 8h cada, espera-se um consumo de ar comprimido contínuo destinado às ferramentas dispostas na Tabela 16. Ademais, o ar comprimido é utilizado na retirada de água do poço artesiano pelo sistema air-lift para captação de água para a unidade industrial, levando a uma demanda de ar comprimido de 3,39 m³/min.

Tabela 16 – Consumo de ar comprimido para desmontagem manual

| Setor | Equipamento | Fator de utilização | Quantidade | Consumo (m ³ /min) | Consumo (m ³ /min) | Consumo (m ³ /dia) |
|--------------------|------------------|---------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Desmontagem Manual | Furadeiras | 0,20 | 6 | 3,40 | 4,08 | 5875,20 |
| | Rosqueadeiras | 0,20 | 6 | 0,45 | 0,54 | 777,60 |
| | Aparafusadeiras | 0,10 | 6 | 0,90 | 0,54 | 777,60 |
| | Bicos de limpeza | 0,10 | 6 | 0,50 | 0,3 | 432,00 |
| Total | | | | | 5,46 | 7862,40 |

Fonte: Adaptado de Macintyre (2010).

Somando-se a necessidade de ar comprimido pelo sistema air-lift e pelas ferramentas da etapa de desmontagem manual, chega-se a uma demanda total de 12744 m³/dia. O dimensionamento das tubulações de ar comprimido, assim como demais cálculos referentes a esta utilidade estão presentes na seção B.4 do Apêndice B, totalizando 66,70 m de tubulação, sendo 38,80 m de 6” e 27,90 m de 8” de diâmetro nominal.

7.4.2 Sistema de air-lift

O sistema conhecido como air-lift é um sistema misto de bombeamento a ar, utilizado no processo apresentado para captação de água para os mais diversos usos na indústria por meio de um poço artesiano apresentado no Apêndice D, correspondente a planta baixa da unidade industrial, que utiliza ar comprimido conduzido em um tubo que permite injetar o ar em um tubo maior, até uma profundidade considerável. Assim, o tubo de ar comprimido pode ser colocado externa ou internamente ao tubo por onde se elevará a água, sendo que para esse projeto, escolheu-se um tubo externo ao tubo por onde se elevará a água. Dessa forma, o ar sai do tubo por um aspersor, que ao penetrar no tubo de sucção mistura-se com a água e, esta mistura ou emulsão água-ar é recalçada pela própria água do poço, em virtude da diferença de pressões hidrostáticas fora e dentro do tubo (MACINTYRE, 2010). A necessidade de ar comprimido para a operação do sistema de air-lift foi calculada em 3,39 m³/min para uma vazão requerida de água na indústria de 1,02 m³/min, resultando em uma tubulação de aço carbono de diâmetro interno de 6” SCH 40, como apresentado na seção B.4.5 do Apêndice B.

7.5 INSTALAÇÕES DE GÁS NATURAL

O gás natural será utilizado como combustível para a caldeira a vapor presente nas instalações localizada conforme o Apêndice D, logo, a demanda de gás natural, considerando a necessidade de geração de vapor, é de 158 Nm³/h. O que constitui uma demanda diária de 3792 Nm³/dia, calculada por meio das instruções de instalação industrial da empresa Comgás (2022), como apresentada na seção B.5.1 do Apêndice B, totalizando 9,40 m de tubulação de 10” de diâmetro nominal de aço carbono SCH 40.

7.6 IDENTIFICAÇÃO DAS TUBULAÇÕES

As cores adotadas para as tubulações seguem a norma NBR 6493:2019 que estabelece os requisitos das cores para identificação de tubulações em unidades industriais com o fim de minimizar riscos e evitar acidentes, como pode ser visualizado na Tabela 17.

Tabela 17 – Identificação das tubulações

| Função | Cor |
|-------------------------------|--------------------|
| Água (exceto para incêndio) | Verde-emblema |
| Água (para incêndio) | Vermelho-segurança |
| Ar comprimido | Azul-segurança |
| Gases não liquefeitos | Amarelo-segurança |
| Produtos químicos não gasosos | Laranja-segurança |
| Vapor | Branco |
| Álcalis | Lilás |

Fonte: NBR 6493:2019.

8 TRATAMENTO DE EFLUENTES

De acordo com Cavalcanti (2012), as indústrias são responsáveis pelo descarte de águas residuárias cujos constituintes podem ocasionar efeitos tóxicos, se lançados nas coleções hídricas ou em sistemas públicos de esgotos sanitários sem os devidos cuidados estabelecidos em normas e legislações. Portanto, o objetivo do tratamento de efluentes é a preservação do meio ambiente, principalmente dos recursos hídricos.

A medição de vazão de águas residuárias industriais, ao lado de uma caracterização qualitativa destas, são importantes no dimensionamento e na operação de sistemas de tratamento. Para isso, medidores de vazão devem ser instalados, de preferência em locais como: captações de águas superficiais, poços, processos produtivos específicos, utilidades, como produção de vapor, refeitório, entre outros. Essa medição não é simples de ser feita, com obstáculos na obtenção de uma medição precisa e confiável. Desta maneira, é recomendado que especialistas a façam, escolhendo locais adequados, tipo e tamanho dos medidores, entre outros. (CAVALCANTI, 2012).

Segundo Sperling (2014), o tratamento de efluentes divide-se em preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento preliminar tem como objetivo apenas a remoção dos sólidos grosseiros, enquanto o tratamento primário visa a remoção de sólidos sedimentáveis e, em decorrência, parte da matéria orgânica. Em ambos predominam os mecanismos físicos de remoção de poluentes. Já no tratamento secundário, no qual predominam mecanismos biológicos, o objetivo é principalmente a remoção de matéria orgânica e eventualmente nutrientes como nitrogênio e fósforo. O tratamento terciário, que ocorre eventualmente, objetiva a remoção de poluentes específicos, normalmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis, ou a remoção complementar de poluentes que não são removidos suficientemente no tratamento secundário.

Ainda segundo Sperling (2014), o tratamento preliminar é necessário em qualquer tipo de indústria que realiza tratamentos posteriores e, uma indústria que possua uma estação de tratamento de esgotos que realiza tratamentos preliminar e primário apenas é considerada uma ETE de nível primário, se realiza tratamentos preliminar, primário e secundário, é considerada uma ETE de nível secundário e assim por diante. O Quadro 3 trata dos níveis de tratamento de esgoto, principalmente quanto à demanda biológica de oxigênio, DBO. Segundo Cavalcanti (2012), todo constituinte oxidável que está presente em um efluente será oxidado através de reações químicas ou bioquímicas, resultando em um consequente consumo de oxigênio dissolvido na massa líquida, que ocasiona em uma perda de oxigênio ao longo do curso de água.

Os compostos oxidáveis, na presença de nutrientes e microorganismos, são oxidados a CO₂, H₂O e compostos inorgânicos oxidados. Essas reações bioquímicas são denominadas demanda biológica ou bioquímica de oxigênio, DBO.

DBO₅ ou DBO, portanto, é a quantidade de oxigênio necessária para a metabolização aeróbica da matéria orgânica oxidável presente após 5 dias, a 20°C. A DBO é o parâmetro mais utilizado no controle da poluição de água, detectando o efeito do lançamento de efluentes tratados e não-tratados na vida biológica de um corpo receptor.

Quadro 3 – Níveis do tratamento de efluentes

| Nível | Remoção |
|-------------------|---|
| Preliminar | Sólidos grosseiros em suspensão (materiais de maior dimensão e areia) |
| Primário | Sólidos sedimentáveis em suspensão |
| | DBO em suspensão (associada à matéria orgânica presente nos sólidos sedimentáveis em suspensão) |
| Secundário | DBO em suspensão (caso não haja tratamento primário, DBO associada à matéria orgânica presente nos sólidos sedimentáveis em suspensão) |
| | DBO em suspensão finalmente particulada (caso haja tratamento primário, DBO associada à matéria orgânica em suspensão não sedimentável) |
| | DBO solúvel (associada à matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos, presente no esgoto bruno e no efluente do tratamento primário) |
| Terciário | Nutrientes, organismos patogênicos, compostos não biodegradáveis, metais pesados, sólidos inorgânicos dissolvidos, sólidos em suspensão remanescentes |

Fonte: Sperling (2014).

Segundo Cavalcanti (2012), os sulfatos são provenientes de despejos de inúmeras atividades industriais. Esses são reduzidos biologicamente, sob condições anaeróbicas, a sulfetos, que podem combinar com hidrogênio, formando o sulfeto de hidrogênio (H₂S), que pode ser oxidado para ácido sulfúrico, também de forma biológica. Em concentrações a partir de 0,3 mg L⁻¹, o odor ofensivo do sulfato já é percebido. Concentrações superiores a 5 mg L⁻¹ podem ocasionar danos à saúde. Em concentrações de 100 mg L⁻¹ o odor já não é mais percebido, devido à inibição do olfato humano (CAVALCANTI, 2012).

O sulfato de sódio, Na_2SO_4 , especificamente, é um componente químico comum. Sua produção total global anual é de 20 milhões de toneladas, mas seu preço é barato. Portanto, além de ser tratado como resíduo perigoso na maioria das indústrias, o seu valor econômico também é baixo. Liu et al. (2020) comenta sobre uma reação de metátese (reação de dupla troca) eletrodialítica, também chamada de EDM, com a utilização de membranas, como uma tecnologia próspera para tratamento de efluentes de sulfatos, convertendo uma solução de Na_2SO_4 em uma solução de K_2SO_4 (sulfato de potássio) com alta concentração. O sulfato de potássio atua como um fertilizante potássico livre de cloro, essencial para plantas que precisam de crescimento e que são sensíveis ao mesmo. A demanda mundial desse sulfato é grande e suas reservas são limitadas. Obtiveram-se reações com pureza aparente de 95,2%.

8.1 TRATAMENTO DE EFLUENTES SÓLIDOS

Os efluentes sólidos consistem de boa parte das saídas do processo, e seu tratamento deverá consistir no armazenamento e repasse na forma de venda para empresas parceiras. Esse acordo é definido com o objetivo no reprocessamento dos resíduos para a purificação e reciclagem dos materiais que não são o foco da REFVI Metal. Isso mantém o valor da empresa na economia circular, sendo o valor atribuído para a venda desses materiais, um valor simbólico, consistindo na porcentagem de 30% do valor unitário da composição de saída. Ou seja, em 1,00 tonelada de resíduos contendo alumínio, ferro e polímeros, o valor de revenda é de 30% sobre o valor real que esse resíduo possuiria se estivesse totalmente purificado. Ainda assim, a REFVI Metal possui como objetivos também o desenvolvimento de processos internos para a reciclagem detalhada destes resíduos. A Tabela 18 demonstra as saídas dos efluentes sólidos do processo.

Tabela 18 - Saídas de efluentes sólidos do processo

| Definição | Corrente | Composição | Quantidade (kg/dia) |
|--|-----------------|-------------------|----------------------------|
| Periféricos da bateria | 4 | Tabela A.9 | 1264,57 |
| Ferrosos | 30 | Item A.1.12.16 | 0,00 |
| Condutores | 41 | Tabela A.23 | 1475,12 |
| Não-condutores | 43 | Tabela A.23 | 108,63 |
| Grafite e impurezas não lixiviáveis | 60 | Tabela A.27 | 2018,62 |
| Impurezas não lixiviáveis | 72 | Tabela A.29 | 300,82 |
| Fe(OH) ₃ , Al(OH) ₃ e impurezas | 81 | Tabela A.31 | 240,22 |
| Cu(OH) ₂ e impurezas | 91 | Tabela A.33 | 151,83 |
| Total | - | - | 5559,81 |

Fonte: Autores (2023).

8.2 TRATAMENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS

Os efluentes líquidos consistem na maioria das saídas do processo, principalmente pelas etapas de lixiviação e precipitação. A diluição dos ácidos e bases para uma concentração adequada aos processos principais geram um grande volume líquido, consistindo de íons e sais diluídos na solução aquosa. Isso gera um volume maior de solução a ser tratada, diluindo muito os íons e sais consistentes no efluente. Em contrapartida, uma grande quantidade de Na₂SO₄ é gerada em todas as reações, o que favorece a retirada de boa parte desse subproduto com uma cristalização.

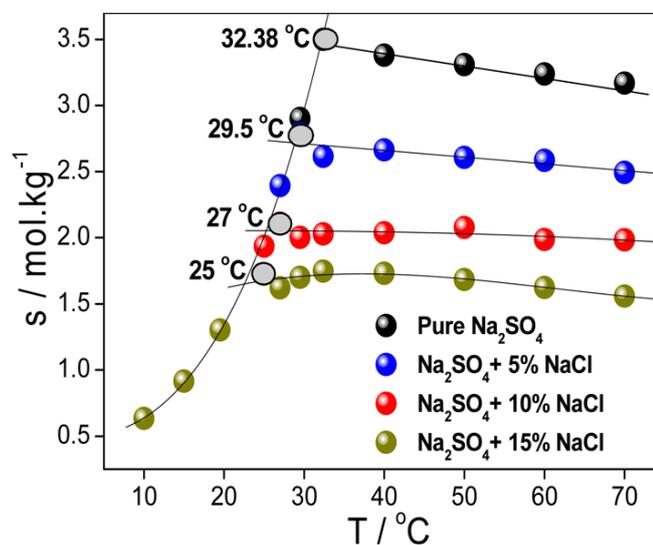
O outro tipo de efluente líquido gerado é proveniente da retirada do LiPF₆ na etapa extração líquido-líquido. O sal condutor é retirado do processo como corrente de fundo do evaporador, diluído em EC e DMC. Esse efluente é revendido para reprocessamento, já que o projeto do processo manteve a proporção de LiPF₆ na corrente de fundo, análoga com a concentração do eletrólito para baterias. O valor desse subproduto tende a ser comparável ao preço do material ativo catódico. Porém, sua revenda conteve-se a apenas 30% do valor, já que por degradação é possível que as propriedades não sejam as mesmas, necessitando de reprocessamento adicional conforme a qualidade do subproduto. A Tabela 19 demonstra a saídas dos efluentes no processo.

Tabela 19 - Saídas de efluentes líquidos do processo

| Definição | Corrente | Composição | Quantidade (kg/dia) |
|-----------------------------------|----------|-------------|---------------------|
| Fração pesada com LiPF_6 | 24 | Tabela A.15 | 919,92 |
| Subprodutos | 115 | Tabela A.38 | 117133,21 |
| Total | - | - | 118053,13 |

Fonte: Autores (2023).

A Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) consiste em processos de recuperação dos resíduos para a corrente 115. Esses processos seguem a rota tecnológica de Morin et al. (2021), que denota aspectos importantes para a característica da saída de efluentes de reciclagem. A composição de majoritariamente Na_2SO_4 como contaminante é uma vantagem, especialmente para etapas de cristalização. De acordo com Morin et al. (2021), o tratamento pode ser feito aplicando-se a cristalização em baixas temperaturas, principalmente pela curva de solubilidade do Na_2SO_4 , como demonstrado na Figura 104. O subproduto consiste basicamente de um cristal decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), diminuindo a concentração desse contaminante na corrente.

Figura 104 - Curva de cristalização do Na_2SO_4 

Fonte: Bharmoria et al. (2014).

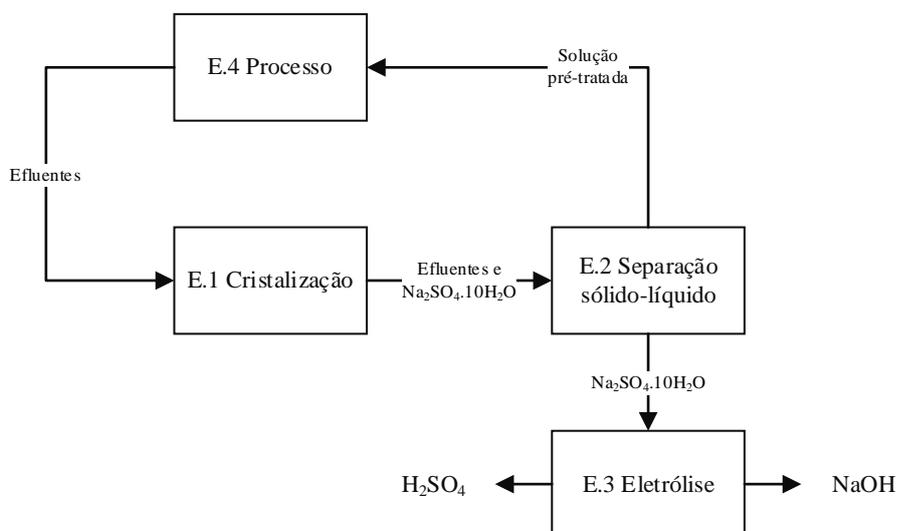
Com isso, Morin et al. (2021) destaca a reciclagem da solução aquosa remanescente da cristalização como água de diluição para os reatores e para o processo. Essa corrente contém uma quantidade de lítio com contaminantes de sulfatos não cristalizados na etapa de cristalização, que não impactarão nas etapas de lixiviação e precipitação. Isso não só respeita as normas ambientais e economiza água, como também recupera o lítio restante que não foi

carbonatado. Todo o Na_2SO_4 excedente e concentrado através do processo pode ser cristalizado antes da saída para o reciclo no processo, na etapa de cristalização da ETE. Esse reciclo não influencia no processo, já que não há contaminantes que possam acumular nas operações, sem considerar o Na_2SO_4 e o Na_2CO_3 que são cristalizados.

A etapa de cristalização do sulfato de sódio e do carbonato de sódio excedente deve ocorrer a uma temperatura de 5°C , e assim um cristizador com chiller deve garantir a eficiência do resfriamento para a operação. A concentração de alimentação consiste em uma fração mássica de 0,09, e a cristalização deve ocorrer em uma solubilidade de saturação de 0,07 kg $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{kg H}_2\text{O}$. Logo, a solução remanescente é reciclada para o processo com uma fração mássica de Na_2SO_4 em 0,066 diminuindo muito a presença desse composto no meio. Os cristais saem em uma fração mássica de Na_2SO_4 em 0,44, na forma de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Estimou-se uma vazão mássica de aproximadamente 6376,92 kg/dia de cristais, e 110756,29 kg/dia de solução para o processo. Desconsiderou-se a influência da cristalização do Na_2CO_3 , já que este está em concentrações baixíssimas e é cristalizado juntamente com o Na_2SO_4 , pela similaridade da curva de solubilidade. Desconsiderou-se a influência da cristalização do Na_2CO_3 , já que este está em concentrações baixíssimas e é cristalizado juntamente com o Na_2SO_4 , já que de acordo com Bharmoria et al. (2014), suas curvas de solubilidade são similares.

De acordo com Morin et al. (2021), o cristal produzido terá um alto grau de pureza, devido às inúmeras etapas de purificação. A falta de contaminação torna a eletrólise possível, pois apenas ppms de contaminantes iônicos em solução resultarão em precipitação na membrana das células de eletrólise. A eletrólise do sulfato de sódio produzirá ácido sulfúrico no ânodo e hidróxido de sódio no cátodo, que são os principais reagentes consumíveis necessários do processo projetado. Esta etapa eliminará a necessidade de alimentar o processo com a compra de muita quantidade de reagentes adquiridos externamente. O autor demonstra que boas condições para essa operação consistem de densidade de corrente de 1 kA/m^2 , para uma tensão de 10 V, para um percentual de massa de Na_2SO_4 de alimentação em torno de 18%. A Figura 105 demonstra o diagrama de blocos para o tratamento dos efluentes líquidos.

Figura 105 - Diagrama de blocos da ETE



Fonte: Adaptado de Morin et al. (2021).

Todos os custos de equipamentos da operação da ETE, e também de possíveis terceirizações, foram estimados na análise econômica. A terceirização também é considerada para o tratamento dos efluentes líquidos que necessitam sair do processo. Essa terceirização pode conter um processo de separação por membranas de cristalização, troca iônica, entre outras, como forma de purificar e tornar a água remanescente utilizável e apropriadamente tratada para o retorno ao meio ambiente, se necessário.

8.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS

Os efluentes gasosos consistem de uma parte importante das saídas do processo, e os compostos devem ser tratados para a não liberação destes para a atmosfera. Os resíduos gasosos consistem basicamente de compostos fluorídricos e SO_x em concentrações baixíssimas, juntamente com produtos de combustão (CO_2). Para isso, a operação de tratamento desses resíduos consiste basicamente de um lavador de gases para a retirada dos compostos de maior impacto. Assim, os compostos fluorídricos e SO_x devem ser eliminados até concentrações requisitadas antes do despejo na atmosfera. Os custos da operação estão estimados na análise econômica. A Tabela 20 demonstra a contaminação de cada corrente gasosa.

Tabela 20 - Saídas de efluentes gasosos do processo

| Definição | Corrente | Contaminação presente | Quantidade (kg/dia) |
|--------------------------|-----------------|---|----------------------------|
| Perdas de N ₂ | 9 | Fluorídricos | 8,14 |
| Ar e DMC | 34 | CO ₂ e fluorídricos (caldeira) | 53564,85 |
| Gases | 87 e 111 | SO _x | 509,46 |
| Produtos de combustão | 125 | CO ₂ | 3758,87 |
| Total | - | - | 57841,32 |

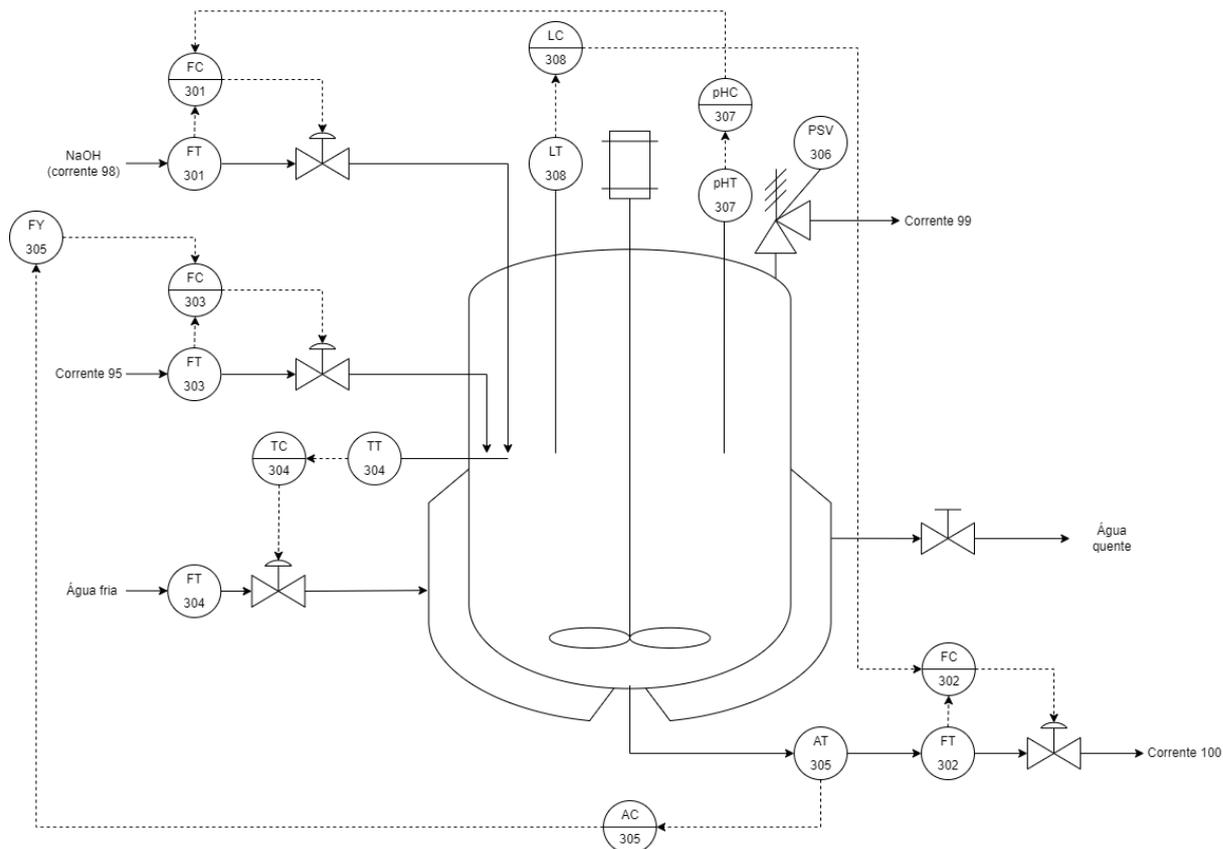
Fonte: Autores (2023).

9 CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO DO PROCESSO

No presente tópico é apresentado o controle e instrumentação do reator CSTR encamisado “R-306”. Escolheu-se tal reator para a demonstração da construção da malha de controle de um equipamento do processo em decorrência da sua importância para o processo na totalidade, devido as tão importantes reações químicas de precipitação dos hidróxidos de Ni, Mn e Co que ocorrem no interior do mesmo. De todo modo, os demais reatores seguem a mesma lógica de controle e instrumentação deste reator. As estratégias de controle e instrumentação adotadas têm como base McMillian (2015).

A Figura 106 apresenta a malha de controle para o R-306. A construção da malha de controle segue a lógica de um “Diagrama de Tubulação e Instrumentação P&ID” (*Piping & Instrument Diagram*) e está conforme a norma ANSI/ISA - 5.1 (2009) que trata dos símbolos de instrumentação e de sua identificação. Ressalta-se que, as linhas cheias representam suprimentos, sendo estas correntes do processo ou de utilidades. Enquanto, as linhas seccionadas representam sinais elétricos. Além disso, os transmissores são montados no campo e os controladores são montados no painel principal e acessíveis ao operador. As válvulas utilizadas são do tipo manual e do tipo eletro-pneumática, as quais recebem um sinal elétrico (4-20 mA) convertido para um sinal pneumático em curta distância para o acionamento da haste da válvula. Os instrumentos utilizados são apresentados genericamente na Tabela 21, incluindo quantidades e a simbologia utilizada.

Figura 106 – Malha de controle do R-306



Fonte: Autores (2022).

Tabela 21 - Instrumentos utilizados no reator R-306

| Instrumentos | Quantidade | Identificação |
|---------------------------------------|------------|---------------|
| Controlador de vazão | 3 | FC |
| Transmissor de vazão | 4 | FT |
| Controlador de temperatura | 1 | TC |
| Transmissor de temperatura | 1 | TT |
| Controlador de nível | 1 | LC |
| Transmissor de nível | 1 | LT |
| Controlador de pH | 1 | pHC |
| Transmissor de pH | 1 | pHT |
| Válvula de segurança de pressão | 1 | PSV |
| Transmissor de análise | 1 | AT |
| Controlador de análise | 1 | AC |
| Dispositivo auxiliar de taxa de vazão | 1 | FY |

Fonte: Autores (2022).

9.1 LÓGICA DE CONTROLE

O reator CSTR encamisado R-306 possui duas entradas advindas do processo, sendo uma delas correspondente à corrente 95 referente a corrente advinda do M-305 com os sulfatos dos componentes de interesse e outra referente a corrente 98 que corresponde ao suprimento de NaOH ao reator a fim de controlar o pH na faixa desejada de 10-13 para uma precipitação final em um pH máximo de 11, como elucidado em tópicos anteriores. Ambas as entradas mencionadas contam com um controle antecipatório destas correntes de alimentação para o reator, tal controle é identificado na Figura 106 pelos instrumentos FT-303 e FC-303 em conjunto com a válvula de controle para a corrente 95 e pelos instrumentos FT-301 e FC-301 em conjunto com a válvula de controle para a corrente de fornecimento de hidróxido de sódio.

Em suma, os transmissores de vazão enviam as informações coletadas através de um sinal elétrico padronizado ao controlador de vazão a fim de regular a entrada de reagentes dentro do reator, tais informações fornecidas pelos instrumentos são comparadas com um *set point*. Dessa forma, a ação definida pelo controlador com relação à abertura total ou parcial, ou fechamento total, ou parcial da válvula de controle é enviada à mesma por um sinal elétrico padronizado e convertido em um sinal pneumático para o acionamento da válvula.

De acordo McMillian (2015), o pH pode ser um indicador sensível de excesso de concentração de ácido ou base, podendo fornecer um controle preciso da conclusão da reação. Portanto, o controle do pH dentro do reator é uma atividade-chave desta etapa, visto que como também mencionado, a reação apenas ocorrerá em uma faixa especificada de pH, logo, em vistas disso, o transmissor de pH (pHT-307) envia informações a respeito do pH da solução ao controlador de pH (pHC-307) que no que lhe concerne envia informações ao controlador de vazão (FC-301) que atua sobre a válvula de controle regulando a entrada de hidróxido de sódio no reator que atuará na elevação do pH do meio até atingir a faixa desejada.

A saída de produto deste reator possui um transmissor de vazão (FT-302) e um controlador de vazão (FC-302) constituindo um controle antecipatório em conjunto com uma válvula de controle. Além disso, é instalado no reator um transmissor de nível (LT-308) que envia um sinal elétrico a um controlador de nível (LC-308) conectado ao FC-302 que também recebe um sinal do FT-302, podendo assim atuar sobre a válvula ao qual é conectado por meio de um sinal elétrico, o qual é convertido em um sinal pneumático para o acionamento da haste da válvula, controlando assim a saída dos produtos e o nível do reator. É importante ressaltar que, o controlador de nível do reator manipula o fluxo do produto de descarga, o que torna possível controlar o tempo de residência.

Para o cálculo da razão dos componentes dentro do reator a fim de se obter o produto nas proporções desejadas sem gastos desnecessários de reagentes, é instalado um analisador em linha (AT-305) que transmite um sinal elétrico ao controlador (AC-305) que se comunica por um sinal elétrico enviando um *feedback* aos dispositivos auxiliares de taxa de vazão (FY-305) ligados ao controlador de vazão da corrente 95. Dessa forma, por meio de um *set point* é possível controlar a taxa de fluxo dos reagentes da corrente 95 e obter os produtos nas devidas razões estequiométricas, além de garantir a completa conversão dos reagentes. Tais dispositivos auxiliares de taxa de vazão não se comunicam com o FC-301, pois o mesmo já possui um retorno da malha 307 a respeito do pH da solução orientando a entrada de NaOH no meio reacional.

Como previsto nas etapas apresentadas anteriormente, faz-se necessário um controle apropriado da temperatura na qual a reação ocorrerá, sendo nesta etapa necessária uma temperatura entre 40 e 80 °C para o desenvolvimento da reação (WANG et al., 2021). Para tanto, o tanque do reator é encamisado, no qual flui água fria ou outro fluido, dependendo da necessidade de aquecimento ou de resfriamento, para manter a temperatura na faixa adequada. A fim de se controlar a temperatura, o transmissor de temperatura (TT-304) que recolhe dados internos de temperatura da solução no reator envia informações ao controlador de temperatura (TC-304) que atua sobre a válvula de controle que permite a entrada de água fria ou outro fluido, como comentado, na camisa do reator, fazendo assim a regulagem de temperatura da mesma, tendo como base um *set point*. A saída da camisa do reator é controlada através de uma válvula manual.

A válvula de segurança de pressão (PSV-306) é ajustada com pressão de abertura igual ou inferior à pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), para aliviar qualquer sobrepessão que o equipamento possa sofrer, em decorrência da formação de gases, por exemplo, garantindo a segurança dos colaboradores. Tal instrumento foi adotado tendo em vista a NR-13 que trata de caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento.

10 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica do projeto visa realizar o levantamento dos custos envolvidos para a implementação e operação da unidade industrial. Desse modo, serão abordadas as estimativas de investimento, os custos fixos e variáveis anuais, estimativa de preço de venda do produto e demais aspectos pertinentes para avaliar a viabilidade econômica do empreendimento.

Para a realização do estudo, são consideradas estimativas teóricas, bem como pesquisas atuais no mercado. O desenvolvimento da análise utiliza como base a relação dos preços em dólar americano e real, sendo \$1 equivalente a R\$5,25, a partir dos índices globais econômicos em 22 de setembro de 2022.

10.1 ESTIMATIVA DE INVESTIMENTOS TOTAIS

Para a estimativa do investimento do projeto é considerado o montante necessário para dar início ao empreendimento. O investimento total (I_{total}) abrange todos os recursos, sendo o somatório do capital de investimento fixo (I_{fixo}), capital de giro (I_{giro}) e capital de investimento de partida ($I_{partida}$), conforme apresenta a Equação 49 (TOWLER & SINNOTT, 2013).

$$I_{total} = I_{fixo} + I_{giro} + I_{partida} \quad (49)$$

O investimento fixo compreende os recursos aplicados à construção do processo, incluindo o investimento direto (I_{direto}) e investimento indireto ($I_{indireto}$). O investimento direto inclui os recursos necessários para a montagem das instalações, subdividido em *inside battery limits* (ISBL) e *outside battery limits* (OSBL). As considerações utilizadas para os cálculos serão abordadas nos tópicos a seguir.

10.1.1 Investimento ISBL

O investimento do tipo ISBL inclui o custo de aquisição e instalação de todos os equipamentos do processo produtivo, além das obras civis (TOWLER & SINNOTT, 2013). Portanto, é a união dos custos com suportes estruturais, tubulações, isolamento, pintura, instrumentação, válvulas e material elétrico relacionados com a planta. O valor estimado para o ISBL da REFVI Metal é de R\$91.080.514,73 e está evidenciado nos cálculos de aquisição e preparação do terreno, construção civil e aquisição de equipamentos.

10.1.1.1 Custos de aquisição, preparação do terreno e construção civil

A empresa está localizada no município de Campinas, no estado de São Paulo, na região que compreende o Distrito Industrial, como supracitado pela análise de localização. A partir de pesquisas em portais de venda de terrenos, determinou-se um valor médio para aquisição de terrenos com um investimento aproximado de R\$530,00/m². Para possibilitar a utilização do espaço, foram orçados serviços de limpeza, drenagem e nivelamento do terreno, sendo estipulado um valor médio de R\$70,00/m². Então, considerando um terreno de 29591,18 m², capaz de comportar o pavilhão industrial e demais dependências, o investimento será de R\$17.754.708,00.

O custo com a construção da indústria foi relacionado com o indicador monetário CUB (Custo Unitário Básico), conforme a Lei Federal nº 4.591, de 16 de dezembro de 1964 e com a Norma Técnica NBR 12.721:2006 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para isto, como base de dados para fins de cálculo, o CUB foi atualizado com os dados do Sindicato da Indústria da Construção Civil de Grandes Estruturas do Estado de São Paulo (SINDUSCON-SP) em novembro de 2022 e corresponde a R\$1.910,51/m² sem desoneração. Nesse sentido, considerando uma área de construção igual a 10643,50 m², o valor a ser aplicado é de R\$20.334.513,19. Os custos atribuídos para aquisição, preparação de terreno e construção civil estão expostos na Tabela 22.

Tabela 22 - Custos previstos para aquisição, preparação de terreno e construção civil

| Descrição | Quantidade (m²) | Valor (R\$/m²) | Valor Total (R\$) |
|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Aquisição do terreno | 29591,18 | R\$ 530,00 | R\$ 15.683.325,40 |
| Preparação do terreno | 29591,18 | R\$ 70,00 | R\$ 2.071.382,60 |
| Construção civil | 10643,50 | R\$ 1.910,51 | R\$ 20.334.513,19 |
| Total | - | R\$ 2.510,51 | R\$ 38.089.221,19 |

Fonte: Autores (2023).

10.1.1.2 Custos com aquisição de equipamentos

A estimativa dos custos com aquisição de equipamentos foi realizada com base nas abordagens descritas por Towler & Sinnott (2013). Duas abordagens foram utilizadas no projeto, a primeira consiste na obtenção dos custos com equipamentos através de orçamentos e cotações em pesquisas com empresas de venda ou fabricantes, quando o preço indicado para o equipamento encontrado é condizente com a realidade.

Para equipamentos não encontrados à venda nas especificações necessárias, a abordagem foi fundamentada nas curvas de custo para os equipamentos. Assim, o custo do equipamento é definido através da relação dos coeficientes a e b , com o parâmetro S e o expoente n , para cada tipo de equipamento, seguindo as unidades estipuladas (TOWLER & SINNOTT, 2013). A Equação 50 demonstra a correlação utilizada.

$$Ce = a + b * S^n \quad (50)$$

Onde:

Ce : é o custo do equipamento (\$)

a e b : constantes de custo

S : parâmetro de tamanho

n : expoente para o tipo de equipamento

O custo do equipamento, obtido em dólar americano, foi relacionado com a moeda nacional a partir da cotação feita em 22 de setembro de 2022. Além disso, o investimento ISBL para cada equipamento também foi calculado, incluindo os demais aspectos envolvidos na aquisição e instalação, como mostrado na Equação 51, para processos envolvendo líquidos e sólidos (Anexos O e P) (TOWLER & SINNOTT, 2013).

$$ISBL = \left((1 + f_p) * f_m + (f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_l) \right) * Ce \quad (51)$$

Onde:

f_p : Fator de instalação da tubulação, 0,6

f_m : Fator de custo de materiais, 1,5

f_{er} : Fator de instalação para montagem de equipamentos, 0,5

f_{el} : Fator de instalação para trabalhos elétricos, 0,2

f_i : Fator de instalação para instrumentação e controle de processos, 0,3

f_c : Fator de instalação para obras de engenharia civil, 0,3

f_s : Fator de instalação para estruturas e edifícios, 0,2

f_l : Fator de instalação para revestimento, isolamento ou pintura, 0,1

Desse modo, as estimativas de custos com equipamentos foram realizadas a partir dos parâmetros observados no Anexo Q, segundo a abordagem utilizada. Os resultados estão apresentados na Tabela 23, sendo que os equipamentos foram identificados conforme o fluxograma e estão agrupados de acordo com suas características.

Tabela 23 - Estimativa de custos com equipamentos do fluxograma

(continua)

| Equipamento | Identificação | Valor Unitário (R\$) | Quantidade | ISBL (R\$) |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| Forno ¹ | B-401 | R\$ 258.025,00 | 1 | R\$ 1.032.100,00 |
| | C-101 a C-102 | R\$ 150.937,50 | 2 | R\$ 1.207.500,00 |
| | C-103 | R\$ 164.884,13 | 1 | R\$ 659.536,50 |
| | C-104 | R\$ 150.937,50 | 1 | R\$ 603.750,00 |
| Esteira ² | C-201 a C-204 | R\$ 181.125,00 | 4 | R\$ 2.898.000,00 |
| | C-301 a C-306 | R\$ 150.937,50 | 6 | R\$ 3.622.500,00 |
| | C-401 a c-406 | R\$ 150.937,50 | 6 | R\$ 3.622.500,00 |
| Centrífuga ² | CF-201 | R\$ 928.187,73 | 1 | R\$ 3.712.750,94 |
| Evaporador ² | D-201 | R\$ 388.014,29 | 1 | R\$ 1.552.057,15 |
| Secador ² | DE-201 | R\$ 158.802,35 | 1 | R\$ 635.209,39 |
| Desmontagem manual ¹ | DM-101 | R\$ 7.418,82 | 1 | R\$ 29.675,28 |
| Trocador de calor ² | E-201 a E-202 | R\$ 285.810,00 | 2 | R\$ 2.286.480,00 |
| Descarga manual ¹ | EL-101 | R\$ 11.799,00 | 1 | R\$ 47.196,00 |
| Separador eletrostático ¹ | ES-201 | R\$ 148.161,00 | 1 | R\$ 592.644,00 |
| Extrator ² | EX-201 a EX-205 | R\$ 34.896,44 | 5 | R\$ 697.928,73 |
| Filtro centrífugo ² | FC-201 | R\$ 350.357,12 | 1 | R\$ 1.401.428,48 |
| Filtro gravitacional ¹ | FG-301 a FG-306 | R\$ 5.200,00 | 6 | R\$ 124.800,00 |
| Flotador ² | FL-201 | R\$ 477.946,54 | 1 | R\$ 1.911.786,17 |
| Prensa ¹ | JC-401 | R\$ 707.000,00 | 1 | R\$ 2.828.000,00 |
| | M-301 | R\$ 123.269,01 | 1 | R\$ 493.076,05 |
| | M-302 | R\$ 162.659,68 | 1 | R\$ 650.638,73 |
| | M-303 | R\$ 265.877,11 | 1 | R\$ 1.063.508,43 |
| | M-304 | R\$ 188.293,89 | 1 | R\$ 753.175,57 |
| Misturador ² | M-305 | R\$ 413.105,52 | 1 | R\$ 1.652.422,07 |
| | M-306 | R\$ 295.380,06 | 1 | R\$ 1.181.520,25 |
| | M-307 | R\$ 123.269,01 | 1 | R\$ 493.076,05 |
| | M-401 a M-402 | R\$ 59.103,90 | 2 | R\$ 472.831,16 |
| Separador magnético ¹ | MS-201 | R\$ 105.000,00 | 1 | R\$ 420.000,00 |
| | P-201 a P-211 | R\$ 7.980,00 | 11 | R\$ 351.120,00 |
| Bomba ² | P-301 a P-315 | R\$ 7.980,00 | 15 | R\$ 478.800,00 |
| | R-301 | R\$ 123.269,01 | 1 | R\$ 493.076,05 |
| Reator ² | R-302 | R\$ 184.862,76 | 1 | R\$ 739.451,04 |
| | R-303 | R\$ 250.382,56 | 1 | R\$ 1.001.530,25 |

(conclusão)

| Equipamento | Identificação | Valor Unitário (R\$) | Quantidade | ISBL (R\$) |
|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| | R-304 | R\$ 123.269,01 | 1 | R\$ 493.076,05 |
| | R-305 | R\$ 184.862,76 | 1 | R\$ 739.451,04 |
| | R-306 | R\$ 250.382,56 | 1 | R\$ 1.001.530,25 |
| | R-307 | R\$ 123.269,01 | 1 | R\$ 493.076,05 |
| Peneira ² | S-201 | R\$ 722,57 | 1 | R\$ 2.890,27 |
| | SR-101 | R\$ 234.539,27 | 1 | R\$ 938.157,07 |
| Moinho ² | SR-401 a SR-402 | R\$ 234.539,27 | 2 | R\$ 1.876.314,13 |
| | TK-101A a TK-101C | R\$ 88.169,82 | 3 | R\$ 1.058.037,90 |
| Tanque de armazenamento ² | TK-201 a TK-207 | R\$ 88.169,82 | 7 | R\$ 2.468.755,10 |
| | TK-301 a TK-305 | R\$ 88.169,82 | 5 | R\$ 1.763.396,50 |
| | TK-401 a TK-403 | R\$ 88.169,82 | 3 | R\$ 1.058.037,90 |
| Total | - | R\$ 8.526.073,68 | 108 | R\$ 51.602.790,55 |

¹ Custo obtido através de orçamentos e cotações com empresas de venda ou fabricantes

² Valor fundamentado nas curvas de custo (TOWLER & SINNOTT, 2013)

Fonte: Autores (2023).

Outros equipamentos pertinentes ao processo foram contabilizados. Nesse sentido, estimou-se a aquisição de equipamentos para o recebimento da matéria-prima e para viabilização das utilidades do processo (Tabela 24). Para garantir o controle de qualidade das matérias-primas e produtos, serão adquiridos dois espectrômetros de fluorescência de raios-X portáteis, no valor de R\$234.287,80 cada.

Tabela 24 - Custos com demais equipamentos do processo

| Equipamento | Valor Unitário (R\$) | Quantidade | Valor Total (R\$) |
|--------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|
| Empilhadeira | R\$ 102.900,00 | 2 | R\$ 205.800,00 |
| Ponte rolante | R\$ 64.000,00 | 1 | R\$ 64.000,00 |
| Caldeira | R\$ 105.000,00 | 1 | R\$ 105.000,00 |
| Bomba | R\$ 7.980,00 | 26 | R\$ 207.480,00 |
| Furadeira | R\$ 622,11 | 6 | R\$ 3.732,66 |
| Rosqueadeira | R\$ 17.990,00 | 6 | R\$ 107.940,00 |
| Parafusadeira | R\$ 344,96 | 6 | R\$ 2.069,76 |
| Bicos de limpeza | R\$ 34,27 | 6 | R\$ 205,62 |
| Total | R\$ 298.871,34 | 54 | R\$ 696.228,04 |

Fonte: Autores (2023).

Será realizado um investimento de R\$170.000,00 para aquisição e instalação dos equipamentos da estação de tratamento de efluentes, tendo em vista a geração de resíduos por parte do processo produtivo. A estimativa tem como base estações de tratamento encontradas no mercado. Ainda, foram considerados os utensílios principais envolvidos no dia a dia do empreendimento e seus funcionários, mostrados na Tabela 25. Os custos envolvidos na aquisição e instalação de equipamentos da REFVI Metal totalizam em R\$52.821.293,55 e são fundamentais para dar continuidade à análise econômica.

Tabela 25 - Custos com utensílios gerais

| Identificação | Valor Unitário (R\$) | Quantidade | Valor Total (R\$) |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|
| Bebedouro | R\$ 1.422,75 | 6 | R\$ 8.536,50 |
| Chuveiro | R\$ 79,00 | 6 | R\$ 474,00 |
| Máquina de lavar roupa | R\$ 37.723,76 | 1 | R\$ 37.723,76 |
| Torneira | R\$ 167,00 | 12 | R\$ 2.004,00 |
| Mictório de caixa automática | R\$ 513,90 | 3 | R\$ 1.541,70 |
| Vaso Sanitário | R\$ 569,90 | 6 | R\$ 3.419,40 |
| Total | R\$ 40.476,31 | 34 | R\$ 53.699,36 |

Fonte: Autores (2023).

10.1.2 Investimento OSBL

O OSBL também faz parte do investimento direto e engloba os itens de fora da área do empreendimento, porém relacionados ao processo. Custos envolvendo edificações para abrigar os equipamentos, edificações auxiliares, subestações de energia, linhas de vapor e condensado, estação de tratamento de água, caldeira, bombas de circulação e abastecimento, torres de refrigeração, plantas de separação de ar, laboratórios e equipamentos analíticos, escritórios, serviços de emergência, entre outros (TOWLER & SINNOTT, 2013).

A interação de custos com outras empresas e custos externos a localidade também estão presentes dentro dos valores do OSBL. Tratando-se de um novo empreendimento, ainda são inconsistentes os dados para obtenção do seu valor real, portanto, o OSBL foi calculado como o equivalente a 40% do ISBL. Além disso, diferentes autores utilizam o parâmetro de 40%, relacionando-o a um valor intermediário. O valor de OSBL calculado a partir do ISBL é de R\$36.432.205,89, assim é possível calcular um valor total de investimento direto, igual a R\$127.512.720,63.

10.1.3 Investimento Fixo Indireto

Os custos relacionados ao capital de investimento fixo ainda contam com custos indiretos, relacionados a mão-de-obra terceirizada, energia, utilidades, manutenção de equipamentos, entre outros. É importante destacar que são custos que não estão relacionados diretamente ao produto ou a linha de produção (TOWLER & SINNOTT, 2013). Com a mesma lógica utilizada para determinar o OSBL, foi utilizado o parâmetro de 25%, assim como diferentes autores na área, correspondendo a R\$31.878.180,16. Dessa forma, é possível determinar o investimento fixo como R\$159.390.900,78.

10.1.4 Capital de Giro

O capital de giro corresponde aos recursos necessários para manter o empreendimento funcionando durante interrupções ocasionais da produção, garantindo que não aconteçam perdas significativas ao processo (PERLINGEIRO, 2005). O parâmetro é calculado entre 5 a 30% sobre o investimento direto, sendo que, nas condições do processo produtivo, será utilizado 15% para o cálculo. Assim, é obtido um capital de giro no valor de R\$19.126.908,09.

10.1.5 Investimento de Partida

O investimento de partida é estabelecido a partir do investimento fixo, como capital necessário para o início do processo produtivo. Este é estabelecido como 10% do investimento fixo, obtendo o valor de R\$15.939.090,08 (TOWLER & SINNOTT, 2013). Portanto, o valor de investimento total necessário ao empreendimento é dado por R\$194.456.898,96.

10.2 CUSTOS COM A PRODUÇÃO

Os custos com a produção foram calculados com base no dimensionamento do projeto para necessidades durante o período de um ano de funcionamento. Os custos estão divididos em fixos e variáveis, com despesas que dependem ou não da produção atual.

10.2.1 Custos Fixos

10.2.1.1 Custos com folhas de pagamento

Os custos com folhas de pagamento foram estipulados com base no piso salarial de cada categoria e estão dispostos na Tabela 26, sem descontos. Os valores são obtidos a partir do sindicato ou federação de cada categoria. O número de funcionários e suas respectivas funções foram estipuladas conforme as necessidades do processo produtivo e pela quantidade de operações unitárias. Sendo assim, a REFVI Metal tem um custo anual com folhas de pagamento de R\$5.305.327,30, incluindo 13.º salário.

Tabela 26 - Custos com folhas de pagamento

(continua)

| Função Exercida | Turno | Quantidade/Dia | Salário Bruto (R\$/mês) | Valor Total (R\$/ano) |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Diretor Geral | Horário comercial | 1 | R\$ 11.256,00 | R\$ 146.328,00 |
| Gerente de Produção | Horário comercial | 1 | R\$ 4.622,00 | R\$ 60.086,00 |
| Gerente de Vendas | Horário comercial | 1 | R\$ 4.190,00 | R\$ 54.470,00 |
| Gerente Administrativo Financeiro | Horário comercial | 1 | R\$ 4.319,00 | R\$ 56.147,00 |
| Gerente de Gente e Gestão | Horário comercial | 1 | R\$ 6.481,00 | R\$ 84.253,00 |
| Analista de Produção | Horário comercial | 1 | R\$ 3.480,00 | R\$ 45.240,00 |
| Analista de Vendas | Horário comercial | 1 | R\$ 3.000,00 | R\$ 39.000,00 |
| Analista Administrativo Financeiro | Horário comercial | 1 | R\$ 2.948,00 | R\$ 38.324,00 |
| Analista de Gente e Gestão | Horário comercial | 1 | R\$ 4.020,00 | R\$ 52.260,00 |
| Engenheiro Químico | Horário comercial | 1 | R\$ 6.529,00 | R\$ 84.877,00 |
| Supervisor de Produção | Por turno | 6 | R\$ 5.109,00 | R\$ 398.502,00 |
| Supervisor de Manutenção | Por turno | 3 | R\$ 5.407,00 | R\$ 210.873,00 |
| Supervisor do Almojarifado | Por turno | 3 | R\$ 3.390,00 | R\$ 132.210,00 |
| Supervisor de Controle de Qualidade | Por turno | 3 | R\$ 4.106,00 | R\$ 160.134,00 |
| Técnico de Laboratório | Por turno | 6 | R\$ 2.629,00 | R\$ 205.062,00 |

(conclusão)

| Função Exercida | Turno | Quantidade/Dia | Salário Bruto (R\$/mês) | Valor Total (R\$/ano) |
|---|--------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Técnico em Segurança do Trabalho | Por turno | 3 | R\$ 3.500,00 | R\$ 136.500,00 |
| Auxiliar de Lavanderia | Por turno | 6 | R\$ 1.444,00 | R\$ 112.632,00 |
| Cozinheiro | Por turno | 6 | R\$ 2.269,00 | R\$ 176.982,00 |
| Auxiliar de Cozinha | Por turno | 6 | R\$ 1.368,00 | R\$ 106.704,00 |
| Auxiliar de Limpeza | Por turno | 12 | R\$ 1.862,00 | R\$ 290.472,00 |
| Vigilantes* | Por turno | 9 | R\$ 2.476,50 | R\$ 289.750,50 |
| Encarregado do recebimento da matéria-prima | Por turno | 3 | R\$ 2.218,00 | R\$ 86.502,00 |
| Operador de empilhadeira* | Por turno | 6 | R\$ 2.224,30 | R\$ 173.495,40 |
| Operador de guindaste | Por turno | 6 | R\$ 3.602,00 | R\$ 280.956,00 |
| Operador de caldeira | Por turno | 3 | R\$ 2.608,00 | R\$ 101.712,00 |
| Operador de controle | Por turno | 3 | R\$ 3.241,00 | R\$ 126.399,00 |
| Colaborador da produção* | Por turno | 54 | R\$ 2.358,20 | R\$ 1.655.456,40 |
| Total | - | 148 | R\$ 100.657,00 | R\$ 5.305.327,30 |

*Adicional de periculosidade (30%).

Fonte: Autores (2023).

10.2.1.2 Custos com licenças e documentos

Os custos com licenças e documentos como alvarás sanitários, licenças ambientais, licença de instalação, licença de operação, programa de proteção contra incêndio, entre outros, são calculados como 1% do investimento fixo (TOWLER & SINNOTT, 2013). O montante corresponde a R\$1.593.909,01.

10.2.1.3 Custos com manutenção e seguro

Os custos que envolvem a manutenção de equipamentos e utilidades são estabelecidos em relação aos custos de investimento direto, assim sendo, é estabelecido 3% sendo seu valor de R\$2.732.415,44. Estes custos consideram a manutenção de todos os equipamentos ao longo dos anos, equivalente para os equipamentos com relação direta no processo e equipamentos de utilidades como também dos utensílios para os funcionários (TOWLER & SINNOTT, 2013).

10.2.2 Custos Variáveis

10.2.2.1 Custos com matérias-primas

Dentre os custos variáveis estão estabelecidos os custos com matérias-primas e reagentes do processo produtivo. Utilizando portais de pesquisa (COMEXSTAT, 2022) para a obtenção de preços tabelados, foi possível contabilizar um custo anual de R\$92.585.161,05. A Tabela 27 apresenta os preços determinados para os materiais em questão.

Tabela 27 - Custos com matérias-primas do processo

| Matéria-prima | Unidade | Valor/Unidade | Quantidade/Dia | Total Diário |
|--------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Bateria de íons de lítio | kg | R\$ 6,64 | 10000 | R\$ 66.400,00 |
| Carbonato de dimetil | kg | R\$ 5,25 | 1143,410 | R\$ 6.002,90 |
| Peróxido de hidrogênio | kg | R\$ 32,36 | 605,370 | R\$ 19.587,35 |
| Ácido sulfúrico | kg | R\$ 0,96 | 6501,514 | R\$ 6.241,45 |
| Hidróxido de sódio | kg | R\$ 2,10 | 4522,188 | R\$ 9.496,59 |
| Sulfato de cobalto (II) | kg | R\$ 75,60 | 803,005 | R\$ 60.707,18 |
| Sulfato de manganês | kg | R\$ 2,52 | 967,908 | R\$ 2.439,13 |
| Carbonato de sódio | kg | R\$ 2,38 | 2694,774 | R\$ 6.413,56 |
| Carbonato de lítio | kg | R\$ 363,26 | 448,785 | R\$ 135.853,95 |
| Querosene | L | R\$ 6,61 | 12,435 | R\$ 82,20 |
| Total | - | R\$ 528,79 | 27699,389 | R\$ 340.395,11 |

Fonte: COMEXSTAT (2022).

Uma importante consideração é realizada acerca da principal matéria-prima do processo, as baterias de íons de lítio, obtidas segundo orientações do Artigo 33 da Lei Federal Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. O documento descreve sobre a responsabilidade, por parte de fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de produtos de pilhas e baterias, em estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos. Com isto, é estabelecido que as baterias serão adquiridas em parcerias com empresas produtoras de veículos elétricos, para o cumprimento da logística reversa.

Segundo Azadnia et al. (2021), existem diversas barreiras financeiras e econômicas para implementação da logística reversa de baterias de íons de lítio, sendo que a taxa atual de LIBs devolvidas não é suficiente para avaliar a viabilidade financeira. Dessa maneira, para definição

do custo estimado, buscou-se o valor de compra de baterias em geral em recicladoras nacionais. Com valores variando de R\$3,50 a R\$4,50, definiu-se uma média de R\$4,00 para o kg de baterias de íons de lítio. Ainda, foi contabilizado o custo com transporte desse material, de R\$2,64 para transporte rodoviário de carga com alto desempenho (ANTT, 2022).

10.2.2.2. Custos com utilidades

Os custos envolvidos com utilidades do processo produtivo são representados pelos gastos com energia, água e nitrogênio. Ademais, são considerados os custos envolvidos nas necessidades dos funcionários e energia elétrica, em geral. A Tabela 28 demonstra os custos totais com cada uma das utilidades e o respectivo valor determinado via orçamento na região de Campinas, em São Paulo, para as companhias de abastecimento. Os custos totais com utilidades representam R\$41.803.493,30 ao ano.

Tabela 28 - Custos com utilidades

| Utilidade | Unidade | Valor/Unidade | Quantidade/Dia | Total Diário |
|--------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Água ¹ | m ³ | R\$ 44,37 | 1466,35 | R\$ 63.685,61 |
| Energia ² | kWh | R\$ 0,98 | 29248,59 | R\$ 28.663,62 |
| Nitrogênio ³ | kg | R\$ 1,93 | 8,14 | R\$ 15,71 |
| Gás natural ⁴ | m ³ | R\$ 8,55 | 3792 | R\$ 32.421,60 |
| Total | - | R\$ 55,83 | 34515,09 | R\$ 124.786,55 |

¹Tarifa fornecida pela SANASA, com parcela a deduzir de R\$1.376,44 (2022)

²Tarifa do kWh fornecida pela CPFL Paulista (2022)

³Tarifa obtida pelo Comex Star (2022)

⁴Tarifa fornecida pela Comgás do grupo Cosan (2022)

Fonte: Autores (2023).

10.2.2.2. Custos com análises

Serão realizadas análises semanais de lotes produzidos para garantir a qualidade do produto entregue. Também, serão realizadas análises para garantir o controle dos efluentes gasosos. As análises em laboratório terceirizado contarão com microscopia eletrônica de varredura e espectrometria de massa, sendo R\$300,00 cada. Ao todo, serão contabilizados R\$288.000,00 anualmente em análises laboratoriais.

10.3 FINANCIAMENTO

Para a arrecadação de fundos necessários ao investimento de abertura da empresa REFVI Metal, será realizado um financiamento de R\$150.000.000,00, concedido pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), equivalente a cerca de 77% do investimento inicial, equivalente a R\$194.456.898,96. Demais investimentos serão obtidos por meio de capital de investidores, do qual o valor é de R\$44.456.898,96.

A taxa de juros do financiamento corresponde a 12,96% a/a (BNDES), utilizando a tarifa Taxa Fixa do BNDES (TFB) para médias empresas no período de 120 meses. O comportamento do saldo devedor e das prestações de juros ao longo do período é demonstrado pela Tabela 29.

Tabela 29 - Comportamento do financiamento em um período de 10 anos

| Ano | Saldo Devedor | Prestação | Juro | Amortização |
|--------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 0 | R\$ 150.000.000,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| 1 | R\$ 135.000.000,00 | R\$ 34.440.000,00 | R\$ 19.440.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 2 | R\$ 120.000.000,00 | R\$ 32.496.000,00 | R\$ 17.496.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 3 | R\$ 105.000.000,00 | R\$ 30.552.000,00 | R\$ 15.552.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 4 | R\$ 90.000.000,00 | R\$ 28.608.000,00 | R\$ 13.608.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 5 | R\$ 75.000.000,00 | R\$ 26.664.000,00 | R\$ 11.664.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 6 | R\$ 60.000.000,00 | R\$ 24.720.000,00 | R\$ 9.720.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 7 | R\$ 45.000.000,00 | R\$ 22.776.000,00 | R\$ 7.776.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 8 | R\$ 30.000.000,00 | R\$ 20.832.000,00 | R\$ 5.832.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 9 | R\$ 15.000.000,00 | R\$ 18.888.000,00 | R\$ 3.888.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| 10 | R\$ 0,00 | R\$ 16.944.000,00 | R\$ 1.944.000,00 | R\$ 15.000.000,00 |
| Total | - | R\$ 256.920.000,00 | R\$ 106.920.000,00 | R\$ 150.000.000,00 |

Fonte: Autores (2023).

10.4 FLUXO DE CAIXA

No fluxo de caixa será representada a receita bruta da empresa com base no valor da venda do produto Cátodo NMC e demais componentes reciclados ao ano, equivalente a R\$241.257.767,15, conforme a Tabela 30. A valorização do produto principal deve-se ao alto valor agregado para o mercado nacional e internacional. Os demais materiais reciclados são vendidos a 30% do seu valor de mercado.

Tabela 30 – Receita total bruta

| Descrição | Unidade | Valor/Unidade | Quantidade/Dia | Total Diário |
|---|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Cátodo NMC | kg | R\$ 133,88 | 4872,54 | R\$ 652.311,29 |
| Eletrólito | L | R\$ 15,75 | 766,60 | R\$ 12.073,95 |
| Componentes do módulo | kg | R\$ 7,36 | 1264,57 | R\$ 9.309,20 |
| Não condutores | kg | R\$ 7,38 | 108,63 | R\$ 801,28 |
| Condutores | kg | R\$ 7,38 | 1475,13 | R\$ 10.880 |
| Grafite | kg | R\$ 16,04 | 2018,62 | R\$ 32.368,57 |
| Fe(OH) ₃ , Al(OH) ₃ | kg | R\$ 1,64 | 240,22 | R\$ 394,60 |
| Cu(OH) ₂ | kg | R\$ 13,39 | 151,83 | R\$ 2.032,62 |
| Total | - | R\$ 202,80 | - | R\$ 720.172,44 |

Fonte: Autores (2023).

Os custos totais anuais correspondem aos montantes destinados à compra de matérias-primas, gastos com utilidades, pagamento de funcionários, licenças, documentos, manutenção e seguro. O total dos custos está apresentado no Quadro 4, na qual constam os valores calculados anteriormente, separados em fixos e variáveis.

Quadro 4 – Custos totais do empreendimento

| | | |
|----------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| <i>Custos Fixos</i> | | <i>R\$ 9.631.651,75</i> |
| Custos com folhas de pagamento | R\$ 5.305.327,30 | |
| Custos com licenças e documentos | R\$ 1.593.909,01 | |
| Custos com manutenção e seguro | R\$ 2.732.415,44 | |
| <i>Custos Variáveis</i> | | <i>R\$ 134.417.454,35</i> |
| Custos com matérias-primas | R\$ 92.585.161,05 | |
| Custos com utilidades | R\$ 41.803.493,00 | |
| Custos com análises | R\$ 28.800,00 | |
| <i>Custos Totais</i> | | <i>R\$ 144.049.106,10</i> |

Fonte: Autores (2022).

O lucro bruto (LB) do empreendimento é dado pela diferença entre a receita e os custos totais, contabilizando R\$97.208.661,05. O lucro bruto não avalia o desempenho final do empreendimento, tendo em vista que não está sendo considerado o valor investido em instalações (PERLINGEIRO, 2005). O Quadro 5 apresenta os demais aspectos pertinentes ao fluxo de caixa, para observação do comportamento ao longo dos anos da análise, com base no financiamento.

Quadro 5 – Resultados para o Lucro do Empreendimento

| Parâmetro | Equação | Valor |
|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Lucro Bruto | $LB = R - C_{total}$ | R\$ 97.208.661,05 |
| Depreciação | $D = e * I_{direto}$ | R\$ 12.751.272,06 |
| Lucro Líquido Antes do IR | $LA = LB - D$ | R\$ 84.457.388,98 |
| Imposto de Renda | $IR = t * (LB - Df)$ | R\$ 21.114.347,25 |
| Depreciação Fiscal | $Df = d * I_{direto}$ | R\$ 12.751.272,06 |
| Lucro Líquido Depois do IR | $LD = LA - IR$ | R\$ 63.343.041,74 |
| Taxa de Retorno sobre o Investimento | $RI = i * I_{total}$ | R\$ 25.279.396,86 |
| Lucro Líquido Descontado o RI | $LL = LD - RI$ | R\$ 38.063.644,87 |
| Compensação pelo Risco | $CR = h * I_{total}$ | R\$ 19.445.689,90 |
| Taxa de Retorno com Risco | $RIR = im * I_{total}$ | R\$ 44.725.086,76 |
| Lucro do Empreendimento | $LE = LB - (D + IR + RI + CR)$ | R\$ 18.617.954,98 |

Fonte: Autores (2023).

Onde:

R : é a Receita do empreendimento

C_{total} : Custos Totais

I_{direto} : Investimento Direto

I_{total} : Investimento Total

e : Taxa de Depreciação Linear, 0,1

t : Taxa Anual de Imposto de Renda, 0,25

d : Taxa de Depreciação Tributária, 0,1

i : Taxa de Retorno para Indústria de Produtos Químicos, 0,13

h : Taxa de Risco para risco razoável, 0,1

im : Taxa de Retorno de Risco, 0,23

A Depreciação (D) é o cálculo que relaciona as instalações físicas que deterioram ao longo do tempo, da qual deve ser deduzida contabilmente. Assim, o Lucro Líquido Antes do Imposto de Renda (LA) é o Lucro Bruto com o desconto da Depreciação. O LA também não define o desempenho do empreendimento, pois deve-se fazer o desconto do Imposto de Renda (IR). Para tal, é feita a relação da Taxa Anual de Imposto (t) aplicada sobre o Lucro Tributável, do qual é a parcela da diferença do Lucro Bruto pela Depreciação Fiscal (Df). Após o cálculo do IR, é possível calcular o Lucro Líquido Depois do Imposto de Renda (LD), o qual precisa ser positivo para a rentabilidade do empreendimento (PERLINGEIRO, 2005).

Com o valor de LD, pode ser realizada a caracterização do investimento, a partir do cálculo da Taxa de Retorno sobre o Investimento Alternativo (RI) para indústrias de produtos químicos. Assim, com o resultado para RI, é calculado o Lucro Líquido descontando a Taxa de Retorno sobre o Investimento Alternativo (LL), utilizado como critério comparativo (PERLINGEIRO, 2005).

Outras variáveis necessárias para o cálculo do Lucro do Empreendimento (LE), estão relacionadas a Compensação pelo Risco (CR), com uma taxa relativa ao risco razoável do empreendimento. Deste modo, é possível o cálculo do Lucro do Empreendimento, sendo descontados do Lucro Bruto a Depreciação, o Imposto de Renda, a Taxa de Retorno sobre o Investimento Alternativo e a Compensação pelo Risco, obtendo um valor de R\$ 18.617.954,98.

Com estes valores tem-se o perfil do fluxo de caixa ao longo de 10 anos, apresentado pela Tabela 31.

Tabela 31 - Fluxo de caixa durante 10 anos

| Ano | Receita Bruta (R\$) | Custo Total (R\$) | Depreciação (R\$) | Impostos (R\$) | Financiamento (R\$) | Lucro do Empreendimento |
|-----|---------------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| 0 | 0,00 | 0,00 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 0,00 | -33.865.619,31 |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 34.440.000,00 | -68.305.619,31 |
| 2 | 120.628.883,57 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 32.496.000,00 | -89.781.841,84 |
| 3 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 30.552.000,00 | 32.791.041,74 |
| 4 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 28.608.000,00 | 34.735.041,74 |
| 5 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 26.664.000,00 | 36.679.041,74 |
| 6 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 24.720.000,00 | 38.623.041,74 |
| 7 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 22.776.000,00 | 40.567.041,74 |
| 8 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 20.832.000,00 | 42.511.041,74 |
| 9 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 18.888.000,00 | 44.455.041,74 |
| 10 | 241.257.767,15 | 144.049.106,10 | 12.751.272,06 | 21.114.347,25 | 16.944.000,00 | 46.399.041,74 |

Fonte: Autores (2022).

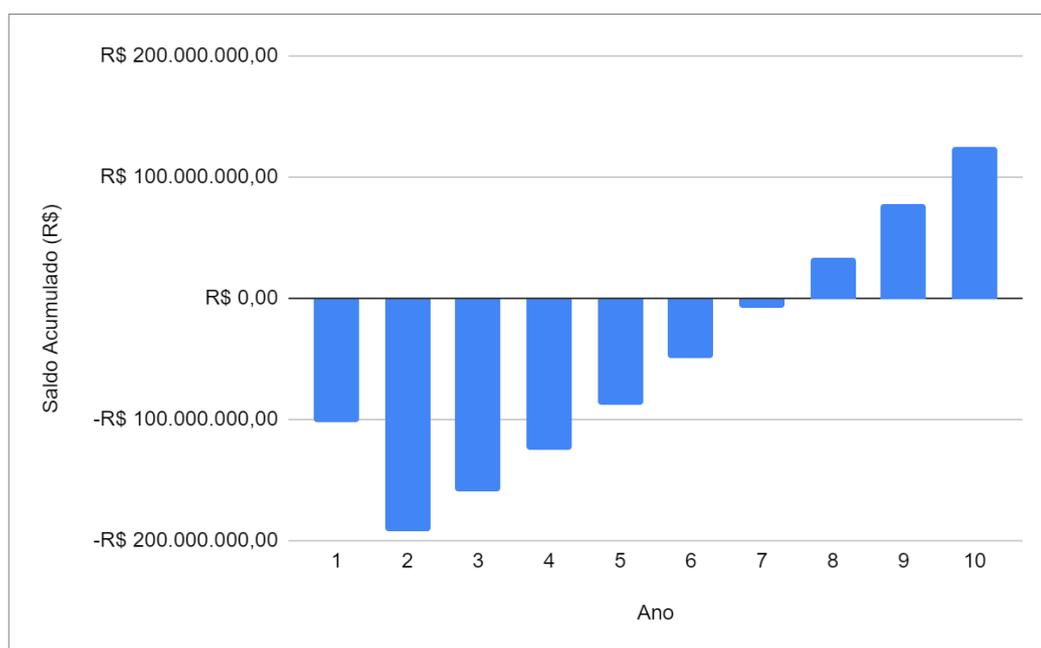
É de suma importância observar que nos primeiros anos não existe produção, já que é estabelecido de que se trata dos anos de construção e instalação do empreendimento. Além disso, a receita bruta no segundo ano de produção está em 50%, já que é o primeiro ano do empreendimento com a estrutura pronta para a produção, neste caso, é necessário um tempo

para adaptações e ajustes no processo produtivo. O lucro do empreendimento, neste caso, utiliza a relação da receita bruta, descontando os custos totais, depreciação, impostos e o financiamento.

10.4.1 Payback

O Payback é demonstrado graficamente pela Figura 107, através da tendência do projeto considerando do saldo acumulado ao longo dos anos. Observando as colunas do gráfico, é possível identificar que a partir do oitavo ano a REFVI Metal tem tendência de lucro, com saldo acumulado positivo que aumenta nos próximos anos.

Figura 107 – Saldo Acumulado durante 10 anos



Fonte: Autores (2023).

10.5 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE, VALOR PRESENTE LÍQUIDO E TAXA INTERNA DE RETORNO

Os critérios econômicos para a avaliação do projeto envolvem a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), tratando-se do índice de juros que reflete o retorno financeiro mínimo esperado de um investimento. A TMA utilizado para esta avaliação será a taxa SELIC, que em 2022 está cotada em 13,75% (MELHOR CÂMBIO, 2022). A taxa TMA é utilizada no cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), que consiste em relacionar o valor dos fluxos de caixa e

somá-los ao valor de investimento inicial, estimando os lucros anuais a partir da data zero de concretização da operação. O VPL ao longo dos anos é demonstrado pela Tabela 32, do qual resultou em um valor de R\$437.440.233,71 positivo, assim, indicando que o projeto em questão é viável economicamente.

Tabela 32 - Valor Presente Líquido

| Ano | Lucro | VPL |
|------------|--------------------|--------------------|
| 1 | -R\$ 34.440.000,00 | -R\$ 30.276.923,08 |
| 2 | -R\$ 55.887.422,53 | -R\$ 49.131.800,02 |
| 3 | R\$ 66.685.461,05 | R\$ 58.624.581,14 |
| 4 | R\$ 68.629.461,05 | R\$ 60.333.592,13 |
| 5 | R\$ 70.573.461,05 | R\$ 62.042.603,12 |
| 6 | R\$ 72.517.461,05 | R\$ 63.751.614,11 |
| 7 | R\$ 74.461.461,05 | R\$ 65.460.625,10 |
| 8 | R\$ 76.405.461,05 | R\$ 67.169.636,09 |
| 9 | R\$ 78.349.461,05 | R\$ 68.878.647,07 |
| 10 | R\$ 80.293.461,05 | R\$ 70.587.658,06 |

Fonte: Autores (2023).

Outra ferramenta para observar a viabilidade econômica do projeto utilizada nesta análise é a Taxa Interna de Retorno (TIR), obtida por meio do cálculo que aponta o percentual de ganhos sobre o investimento, dependendo dos resultados de fluxo de caixa e o Valor Presente Líquido igualado a zero. Assim, as entradas e saídas de caixa serão zeradas, demonstrando uma aplicação sem lucro e nem prejuízo. A TIR avalia a atratividade do empreendimento quando comparada com a TMA, nesse sentido, o valor da TIR deve ser maior. O valor obtido para a Taxa Interna de Retorno foi de 24,33%, comparando-o com a TMA de 13,75% utilizada na análise, é possível concluir a REFVI Metal é atrativa para investimentos, com valorização maior que a Taxa Mínima de Atratividade aplicada.

11 CONCLUSÕES

Em meio ao rápido desenvolvimento de novas tecnologias e da criação de novas tendências, pode-se notar o grande protagonismo que a mobilidade elétrica vem tendo ao estar cada vez mais presente no dia-a-dia, com mais marcas interessadas em produzir, prioritariamente, veículos elétricos, com foco em carros, sendo eles totalmente elétricos, ou híbridos como apresentado. Contudo, com este rápido crescimento, é observável a constante busca por matérias-primas, principalmente àquelas envolvidas na produção das baterias destes veículos. Essa produção está muitas vezes sob o domínio total ou parcial de uma única nação e/ou companhia, logo, tornando fabricantes dependentes de um ou de poucos fornecedores. Isso faz com que a reciclagem de baterias usadas para a fabricação de novas baterias se torne um mercado promissor por meio do conceito de economia circular. Dentro desse segmento, o presente projeto foi aplicado na proposta de gerar o material catódico NMC ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$) para a fabricação de novas baterias.

Dentro das transformações do mercado de baterias de íons de lítio, tem-se a adaptabilidade do processo de reciclagem empregado a estas, e considerado para o presente trabalho, já que a composição do material catódico tende a mudar, mas a forma de reciclar tende a se manter a mesma dentro dos componentes que se espera para um bom material. Isso é um fator chave de investimento para o processo de reciclagem, já que mesmo que as razões molares do material, ou algum metal de transição mude, o processo de reciclagem pode se manter o mesmo, contemplando pequenas diferenças existentes para a nova realidade. Por isso, o mercado do produto contemplado é seguro, principalmente pela abrangência da utilização destas no mundo, e pela rota tecnológica empregada ao procedimento para recicla-lo e produzi-lo. Porém, cabe ressaltar que as tecnologias das baterias tendem a mudar ano após ano, e década após década, fazendo com que esse seja uma das fraquezas do empreendimento.

Ainda do ponto de vista comparativo, com um processamento de minérios para o produto é necessária uma gama de processamento de proporções muito maiores que um processo de reciclagem. Isso se dá pela necessidade da concentração de metais em concentrações muito baixas, para concentrações adequadas a aplicação desejada. Isso não retira a importância da mineração natural, mas reforça-se a importância da economia circular de componentes presentes em baterias de íons de lítio, principalmente o material catódico NMC. Por isso, projetos de reciclagem como o do presente trabalho reforçam a necessidade e a viabilidade de produzir composições de alto valor agregado a partir de resíduos, mas também

reforçam os desafios de encarar projetos que tenham abrangência em uma gama de resíduos de baterias existentes no mercado.

Com isto em mente, foi possível, por meio da análise de tecnologias, selecionar os mecanismos que mais se adequassem ao projeto, mesmo que com um avanço tecnológico cada vez mais rápido nestes ramos, tem-se a todo momento novidades que tendem a facilitar etapas que apresentam grandes impedimentos no desenvolvimento do processo. Foi possível principalmente adequar um processo novo, utilizando rotas tecnológicas descritas na literatura como base para o projeto, mas inovando em soluções de problemas envolvidos com cada componente da bateria. Como consequência dessa análise, o fluxograma do processo contemplado utilizou informações importantes da literatura e, da união destas, fez-se um projeto inovador para as condições da operação, e suas considerações.

Dessa maneira, com os conhecimentos de Engenharia Química foi possível desenvolver o projeto e dimensionamento das operações requisitadas dentro do fluxograma do processo, utilizando considerações aceitáveis e reais para tal sendo a unidade industrial localizada em Campinas-SP, no Distrito Industrial. Com isso, desenvolveu-se balanços de massa e de energia para toda a operação conforme a disponibilidade de informações, resultando em um valor de 4872,54 kg/dia (aproximadamente 1632,3 toneladas/ano) de material $\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$ produzidos, com uma pureza de 99,49%, sendo assim definível como um componente de alto valor agregado (acima de 99%). Apesar disso, uma vazão considerável de efluentes composta em maioria de Na_2SO_4 , foi gerado, mas podendo ser contornada com processos de reutilização dos efluentes de volta ao processo, tratando o efluente por meio de cristalização, eletrólise, etc.

Para a viabilidade econômica, demonstra-se que o lucro é obtido a partir do 8º ano, e que o investimento para o empreendimento é de R\$194.456.898,96. Assim, com uma TIR de 24,33%, em comparação a uma TMA de 13,75% a.a., apresentando deste modo uma viabilidade teórica da aplicação deste empreendimento em solo nacional, considerando maiores avanços neste mercado nos próximos anos no Brasil. Leva-se em consideração também que uma possível expansão da fábrica já foi considerada no dimensionamento, influenciando diretamente na viabilidade econômica do processo. Percebe-se que o projeto é viável e o projeto pode ser implementado com uma unidade industrial para o prosseguimento da operação, levando-se em conta principalmente o desenvolvimento da mobilidade elétrica no país pelos próximos anos, e os possíveis lucros de uma operação ambientalmente amigável considerando a consolidação da REFVI Metal na obtenção de créditos de carbono e economia verde.

11.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolvimento e simulação do processo em *softwares* de simulação de processos industriais, como UNISIM, HSC Chemistry®, USIM PAC, Aspen Plus, entre outros;
- Desenvolvimento de processos físicos e metalúrgicos para o reaproveitamento de subprodutos provenientes da atual rota, já que muitos componentes são vendidos para reprocessamento;
- Desenvolvimento de projetos industriais detalhados para a estação de tratamento de efluentes líquidos e gasosos, contemplando principalmente a reutilização do Na_2SO_4 com processos eletrometalúrgicos para o reciclo de reagentes (NaOH e H_2SO_4) utilizados no atual processo;
- Pesquisa e desenvolvimento da extração para a reciclagem do eletrólito (LiPF_6 1,2M + EC + DMC) e seus mecanismos com diferentes solventes de extração, considerando reações e mecanismos que podem existir nas etapas de purificação do mesmo;
- Desenvolvimento de sistemas produtivos para a otimização da descarga e desmontagem das baterias, por meio da utilização de sistemas autônomos e de robótica avançada para a diminuição da mão de obra humana nos procedimentos;
- Desenvolvimento da relação do ciclo de vida da operação, considerando as vantagens ambientais da reciclagem das baterias para o meio ambiente e para o mercado, com foco na dilatação das operações da empresa com relação aos créditos de carbono;
- Pesquisa de rotas secundárias para a expansão da empresa com outros tipos de materiais ativos, com foco no aumento da gama de produtos oferecidos pela REFVI Metal, considerando outros tipos de materiais catódicos com relações molares diferentes (NMC 622, NMC 881, NCA);
- Pesquisa e desenvolvimento de metodologias de sinterização por operações mais brandas em gasto energético;
- Pesquisa e desenvolvimento de rotas de lixiviação e precipitação mais eficazes, utilizando operações mais complexas e tecnológicas;
- Desenvolvimento de projetos de instrumentação, com foco no controle das operações de ajuste de razão e de procedimentos com sólidos, visando uma pureza ainda maior do produto final;
- Desenvolvimento de rotas de separação com maior eficiência, mitigando custos possíveis com matérias-primas importantes do processo.

REFERÊNCIAS

ACCARDO, A.; DOTELLI, G.; MUSA, M.L.; SPESSA, E. **Life Cycle Assessment of an NMC Battery for Application to Electric Light-Duty Commercial Vehicles and Comparison with a Sodium-Nickel-Chloride Battery**. Appl. Sci. 2021, 11, 1160. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/3/1160>

AGATHA, Edimeh; GRACE, Cooney; JANE, Maduelosi; AUGUSTINE, Abia. **Conductivity and Viscosity Studies of Binary Mixtures of Dimethyl Carbonate and Dimethyl Sulphoxide Based Electrolyte for Li-Ion Battery at 298.15k**. Chem Sci Rev Lett, v. 6, 2017. ISSN 1773-1778.

AGILENT TECHNOLOGIES. Agilent.com, 2022. Agilent Technologies: **ICP-OES Instruments**. Disponível em: <<https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/inductively-coupled-plasma-optical-emission-spectroscopy-icp-oes/icp-oes-instruments/5900-icp-oes>> Acesso em: 29 nov. 2022.

AGILENT TECHNOLOGIES. Agilent.com, 2022. Agilent Technologies: **ICP-MS Instruments**. Disponível em: <<https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry-icp-ms/icp-ms-instruments/7900-icp-ms>>. Acesso em: 29 nov. 2022.

ÁGUAS CLARAS. **Estação de Tratamento de Efluente Industrial**. Disponível em: <<https://loja.aguasclarasengenharia.com.br/para-sua-casa/estacao-de-tratamento-de-esgoto-residencial/industrat-plus-17000-sobre-o-solo>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

AL-SHAMMARI, Hammad; FARHAD, Siamak. **Separating battery nano/microelectrode active materials with the physical method**. In: **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. [s.l.]: Elsevier, 2022, p. 263–286. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323911344000169>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

ALSPAUGH, M. A. (Org.). **Bulk material handling by conveyor belt 7**. Littleton, Colo: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2008. ISBN: 978-0-87335-260-4

ALTMANN. altmann.com.br, 2022. altmann s.a. importação e comércio: **Apreo 2 MEV/FEG**. Disponível em: <<https://altmann.com.br/produtos/apreo-2-mev-feg/>>. Acesso em: 29 de Nov. de 2022.

AMARAL, Paulo. **Brasil terá gigafábrica de carros elétricos**. 2022. Disponível em: <https://canaltech.com.br/carros/brasil-tera-gigafabrica-de-carros-eletricos-220152/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS; AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (Orgs.). **ASME steam tables: properties of saturated and superheated steam in U.S. customary and SI units from the IAPWS-IF97 International Standard for Industrial Use**. Compact ed. New York, NY: American Society of Mechanical Engineers, U.S., 2006. (CRTD, vol. 83).

AN, Seong Jin; LI, Jianlin; DANIEL, Claus; et al. **The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling**. *Carbon*, v. 105, p. 52–76, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622316302676>>. Acesso em: 19 set. 2022.

ANDRADE, Alex & GERMAIN, Mike. **Electrostatic Separation**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4.

ANDREA, Davide. **Lithium-ion batteries and applications**. Volume 1: Batteries. Boston London: Artech House, 2020. (Power engineering). ISBN: 978-1-63081-767-1

ANDREA, Davide. **Lithium-ion batteries and applications**. Volume 2: Applications. Boston London: Artech House, 2020. (Power engineering). ISBN: 978-1-63081-769-5.

ANIDROL. FISPQ - **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico: carbonato de sódio anidro**. São Paulo, 2004. Disponível em: <<https://www.ict.unesp.br/Home/sobreict/departamentosdeensino/odontologiarestauradora/li-pq-laboratoriointegradodepesquisa/carbonato-de-sodio-anidro-pa.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

ANSI/CEMA: **Screw conveyors for bulk materials**. Fifth edition. Naples, Florida: Conveyor Equipment Manufacturers Association, 2019.

ASPEN. Kit bacia com caixa acoplada e assento sanitário: similar. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Bacia-Acoplada-Assento-Sanit%C3%A1rio-Branco/dp/B07ZQLRWVR/ref=asc_df_B07ZQLRWVR/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=379727821330&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=14248994406096168443&hvpone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1001689&hvtargid=pla-1367104726969&psc=1>. Acesso em: 27 set. 2022.

ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres. Diário Oficial da União. Tabela C - **Transporte Rodoviário de Carga de Lotação de Alto Desempenho**. Publicado em: 18/03/2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-169-de-18-de-marco-de-2022-387043278>>. Acesso em: 06 mar. 2023.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Energy Systems: GREET®**, Cass Avenue, Building 362, Argonne, IL 60439-4844 USA, 2020. Disponível em <<https://greet.es.anl.gov/homepage2>>. Acesso em: 26 de set. 2022.

ASGHARI, I.; MOUSAVI, S.M.; AMIRI, F.; et al. **Bioleaching of spent refinery catalysts: A review**. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 19, n. 4, p. 1069–1081, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X12004145>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade.** Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6493: Emprego das cores para identificação de tubulações industriais.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AUSTIN, L. G.; TRASS, O. **Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment.** In: FAYED, Muhammad E.; OTTEN, Lambert (Orgs.). *Handbook of Powder Science & Technology.* Boston, MA: Springer US, 1997, p. 586–634. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-6373-0_12>. Acesso em: 15 ago. 2022.

AZADNIA, Amir Hossein; et al. **Electric Vehicles Lithium-Ion Batteries Reverse Logistics Implementation Barriers Analysis: A TISM-MICMAC Approach.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 174, Nov. 2021, p. 105751. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105751>>. Acesso em: 06 mar. 2023.

AZKEN. **Secadora de roupas industrial: similar.** Mercado Livre. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2693172525-secadora-de-roupas-para-50-kg-azken-lavanderia-industrial-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=d8361bdc-5d19-4cad-89b6-af934844d3d2>. Acesso em: 27 set. 2022.

BAE, Hyuntae; KIM, Youngsik. **Technologies of lithium recycling from waste lithium ion batteries: a review.** *Materials Advances*, v. 2, n. 10, p. 3234–3250, 2021. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=D1MA00216C>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

BAMFORD, C.H. **Homogeneous Acid–Base Equilibria and Acidity Scales in Ionic Melts.** In: *Comprehensive Chemical Kinetics.* [s.l.]: Elsevier, 2005, v. 41, p. 1–128. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0069804005800044>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

BAUM, Zachary J.; BIRD, Robert E.; YU, Xiang; MA, Jia. **Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends.** *Acs Energy Letters*, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 712-719, 19 jan. 2022. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acseenergylett.1c02602>.

BBC. **O que leva Apple, Google, Tesla e outras empresas a serem acusadas de lucrar com trabalho infantil na África.** 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-50828077>. Acesso em: 23 out. 2022.

BENEVELLI. **“What is BEV, HEV, PHEV, MHEV, FCEV? Here’s your guide to types of electric vehicles”.** Benevelli Group. Disponível em: <www.news.benevelli-group.com/index.php/en/133-what-is-bev-fhev-phev-mhev-fcev.html> Acesso em: 23 set. 2022.

BEIJING JITAI TECH. **Espectrômetro de fluorescência de raios-X:** similar. AliExpress. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/1005004412809723.html?pdp_npi=2%40dis%21BRL%21R%24%20261.183%2C71%21R%24%20238.039%2C74%21%21%21%21%21%402101d1b816801509271927304e199f%2112000029093391541%21btf&_t=pvid%3A9ee270ec-5abc-49bb-982f->

4962212f0902&afTraceInfo=1005004412809723__pc__pcBridgePPC__xxxxxx__1680150927&spm=a2g0o.ppclist.product.mainProduct&gatewayAdapt=glo2bra>. Acesso em: 12 dez. 2022.

BERGER Roland, Dr. Wolfgang Bernhar. Advanced Technology Center – Automotive & Industrials. “**The Lithium-Ion (EV) battery market and supply chain**” Disponível em: <https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/Roland%20Berger_The%20Lithium-Ion%20Battery%20Market%20and%20Supply%20Chain_2022_final.pdf> Acesso em: 16 ago. 2022.

BERTUOL, D.A.; SANTANA, M.P.; TANABE, E.H.; et al. **Recovery of valuable materials from spent lithium ion batteries using electrostatic separation**. International Journal of Mineral Processing, v. 169, p. 91–98, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751617302375>>. Acesso em: 12 out. 2022.

BHARMORIA, Pankaj; GEHLOT, Praveen Singh; GUPTA, Hariom; *et al.* Temperature-Dependent Solubility Transition of Na₂SO₄ in Water and the Effect of NaCl Therein: Solution Structures and Salt Water Dynamics. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 118, n. 44, p. 12734–12742, 2014. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp507949h>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

BIZHANOV, Aitber; CHIZHIKOVA, Valentina. **Sinter Production**. In: BIZHANOV, Aitber; CHIZHIKOVA, Valentina (Eds.). **Agglomeration in Metallurgy**. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 1–170. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-26025-5_1>. Acesso em: 18 jan. 2023.

BOBTON RECICLAGEM. Tabela de Preços. Atualização dia 26/10/2020. Disponível em: <<http://www.bobtonreciclagem.com.br/>>. Acesso em: 06 mar. 2023.

BOSCH. Parafusadeira: similar. Americanas. Disponível em: <https://www.americanas.com.br/produto/2971837330?opn=YSMESP&offerId=622b9c3d87c00289c26d7891&srsltid=AeTuncoH8EoUEmMDjI3hflJoKXv_n91zeWhTc7FGcd4CDFrF2-BphYqfywE>. Acesso em: 17 nov. 2022.

BRASIL. **Banco Nacional do Desenvolvimento**: Taxa Fixa do BNDS (TFB). 2022. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tfb-taxa-fixa-bndes/>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 02/08/2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31/08/1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, 1981.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12/02/1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, 1998.

BRASIL. Ministério da Economia. **Imposto sobre a renda das pessoas jurídicas (IRPJ)**: Receita Federal: 27 set. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/orientacao-tributaria/tributos/IRPJ>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA n° 237, de 19/12/1997**. Disposição sobre o Licenciamento Ambiental. Legislação Ambiental, Rio de Janeiro, 1997.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 05 – Comissão Interna de Prevenção de Acidentes**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 06 – Equipamento de proteção individual**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 23 – Proteção contra incêndios**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 25 – Resíduos industriais**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2011.

BREMEN. Bico pneumático de limpeza: similar. Disponível em: <<https://www.createk.com.br/bico-pneumatico-para-limpeza-em-metal>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

BRIERLEY, James A. & BRIERLEY, Corale L. **Bioleaching**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4

BRUKER. **Handheld XRF: How it works**. Disponível em: <<https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/handheld-xrf-spectrometers/how-xrf-works.html>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

BURGOT, Jean-Louis. **Definitions of Acids and Bases: Strength of Acids and Bases**. In: BURGOT, Jean-Louis (Ed.). **Ionic Equilibria in Analytical Chemistry**. New York, NY: Springer New York, 2012, p. 51–75. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-8382-4_4>. Acesso em: 2 nov. 2022.

Caldeiras Industriais no Brasil. Disponível em: <<https://www.alfalaval.com.br/produtos/transferencia-de-calor/caldeiras-industriais-no-brasil/>>. Acesso em: 6 dez. 2022.

CAMPBELL, F. C. (Org.). **Metals fabrication: understanding the basics**. ASM International. Materials Park, Ohio, 2013. ISBN-13: 978-1-62708-018-7.

CAMPINAS. **Decreto n° 17.313, de 02/05/2011**. Regulamenta a expedição e renovação dos alvarás de uso. Campinas, 2011.

CARNEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora, ed. 2, 2002.

CASTRO, Bernardo Hauch R.; BARROS, Daniel Chiari; VEIGA, Suzana Gonzaga. **Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDS), n. 37, p. 443-496, 2013. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/151>>. Acesso em: 08 de jun. 2022.

CAZES, J. **Analytical Instrumentation Handbook**. Marcel Dekker, ed. 3, Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, USA, 2005.

CHAKRABORTY, Arup; KUNNIKURUVAN, Sooraj; KUMAR, Sandeep; et al. **Layered Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries: Review of Computational Studies on $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ and $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Al}_y\text{O}_2$** . Chemistry of Materials, v. 32, n. 3, p. 915-952, 2020. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemmater.9b04066>>. Acesso em: 15 set. 2022.

Chemical centrifugal pumps- dosing pumps chlorine gas chlorinators disinfection water treatment - Lutz-Jesco GmbH -. Disponível em: <<http://www.lutz-jesco.com/en/about-lutz-jesco/jesco-world/februar17/chemie-kreiselpumpen.html>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

CHEN, Jingqi; ZHAO, Yang; GAO, Haitao; et al. **Rolled electrodeposited copper foil with modified surface morphology as anode current collector for high corrosion resistance in lithium-ion battery electrolyte**. Surface and Coatings Technology, v. 421, p. 127369, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897221005430>>. Acesso em: 13 set. 2022.

CHEN, Wei Hua; WEGENER, Kathrin; DIETRICH, Franz; et al. **Robot Assisted Disassembly for the Recycling of Electric Vehicle Batteries**. Procedia CIRP, v. 29, p.716-721, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827115000931>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

CHEN, Wei-Sheng; HO, Hsing-Jung. **Recovery of Valuable Metals from Lithium-Ion Batteries NMC Cathode Waste Materials by Hydrometallurgical Methods**. Metals, v. 8, n. 5, p. 321, 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-4701/8/5/321>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

CHEN, Xiangping; CAO, Ling; KANG, Duozi; et al. **Hydrometallurgical Processes for Valuable Metals Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries**. In: AN, Liang (Org.). **Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 93-139. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-31834-5_5>. Acesso em: 17 ago. 2022.

CHEN, Z.; et al. **Zinc/selenium conversion battery: a system highly compatible with both organic and aqueous electrolytes**. Energy Environ, vol. 14, p. 2441-2450, 2021.

CHERNYAEV, Alexander; PARTINEN, Jere; KLEMETTINEN, Lassi; et al. **The efficiency of scrap Cu and Al current collector materials as reductants in LIB waste leaching**.

Hydrometallurgy, v. 203, p. 105608, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X21000578>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

CHHABRA, Raj & BASAVARAJ, Madivala G. **Centrifugal Separations**. In: **Coulson and Richardson's Chemical Engineering**. [s.l.]: Elsevier, 2019, p. 627–656. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081010983000123>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

Chiller scroll YCAL – YORK. Disponível em: <<http://yorkaircon.com.br/produtos/chiller-scroll-ycal/>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

CHOI, Jonghyun; DE SOUZA, Felipe M.; GUPTA, Ram K. **Innovative strategies for recycling used batteries for brighter future**. In: **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. [s.l.]: Elsevier, 2022, p. 105–121. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323911344000121>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

CHORNEY, Janette L. **Calcination**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4

CHOW, Norman et al. **PROCESSING OF COBALTOUS SULPHATE/DITHIONATE LIQUORS DERIVED FROM COBALT RESOURCE**. Titular: Rocher Manganese Inc. US n. US 10308523 B1. Depósito: 14 mar. 2019. Concessão: 4 jun. 2019.

CHU, Hsun-Chen; TUAN, Hsing-Yu. High-performance lithium-ion batteries with 1.5 μm thin copper nanowire foil as a current collector. *Journal of Power Sources*, v. 346, p. 40–48, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775317302057>>. Acesso em: 13 set. 2022.

COMEX STAT. **Exportação e Importação Geral**. 2020. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/3647>>. Acesso em: 22 nov. 2022.

COMGÁS. **Para Indústria**: entenda e simule sua conta. 2023. Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/para-industria/>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

CONTAGEM. PREFEITURA DE CONTAGEM. **Invista em Contagem**: programas de incentivo. Programas de Incentivo. Disponível em: <https://www.contagem.mg.gov.br/invista-em-contagem/incentivos/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

COUPER, James R. (Org.). **Chemical process equipment: selection and design**. 2 ed. Elsevier, Amsterdam, Boston, 2005. ISBN: 0-7506-7510-1

COUPER, James R.; PENNEY, W. Roy; FAIR, James R.; et al. **Extraction and Leaching**. In: **Chemical Process Equipment**. [s.l.]: Elsevier, 2012, p. 487–528. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123969590000148>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

COUPER, James R.; PENNEY, W. Roy; FAIR, James R.; et al. **Solid-liquid separation**. In: **Chemical Process Equipment**. [s.l.]: Elsevier, 2012, p. 487–528. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123969590000148>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

COUTINHO, Fernanda M. B.; et al. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, n. 1, p. 1–13, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000100005>>. Acesso em: 24 de set. 2022.

CREMASCO, Marco A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos e outros trabalhos**. Editora Blucher, 2018. E-book. ISBN 9788521208563.

DAHAN, J.; EHRLICH, G. **Lithium-Ion Batteries**. In: REDDY, T. B. *Linden's handbook of batteries*. New York: McGraw-Hill, ed. 4, p. 26.1-26.79, 2011.

DAI, Q.; KELLY, J. C.; DUNN, J.; BENAVIDES, P.T. **Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET® Model**. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Cass Avenue, Building 362, Argonne, IL 60439-4844 USA, 2018. Disponível em: <https://greet.es.anl.gov/publication-update_bom_cm>. Acesso em: 26 de set. 2022.

DALINI, Asadi E.; KARIMI, Gh.; ZANDEVAKILI, S.; et al. **A Review on Environmental, Economic and Hydrometallurgical Processes of Recycling Spent Lithium-ion Batteries**. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 42, n. 7, p. 451–472, 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08827508.2020.1781628>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

DEDAVID, Berenice Anina. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos e semicondutores** [recurso eletrônico] / Berenice Anina Dedavid, Carmem Isse Gomes, Giovanna Machado. - Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60p. ISBN: 978-85-7430-702-2 Edição do CEMM- Centro de Microscopia. Acesso em: 20 de dez. 2022.

DIAZ, Luis A.; STRAUSS, Mark L.; ADHIKARI, Birendra; et al. **Electrochemical-assisted leaching of active materials from lithium ion batteries**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 161, p. 104900, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344920302184>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

DICORTE FERRAMENTAS. Rosqueadeira articulada: similar. Disponível em: <https://www.dicorteferramentas.com.br/rosqueadeira-articulada-eletrica-m6-m30?utm_source=Site&utm_medium=GoogleMerchant&utm_campaign=GoogleMerchant>. Acesso em: 17 nov. 2022.

DIEKMANN, Jan; et al. **Potential Dangers During the Handling of Lithium-Ion Batteries**. In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan. *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*. Springer International Publishing, p. 39-52, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_1>. Acesso em: 08 de jun. 2022.

DIEKMANN, Jan; SANDER, Steffen; SELIN, Guido; et al. **Crushing of Battery Modules and Cells**. In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan (Orgs.). **Recycling of Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 127–138. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70572-9_7>. Acesso em: 18 jan. 2023.

DIEKMANN, Jan; SANDER, Steffen; SELIN, Guido; et al. **Material Separation**. In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan (Orgs.). **Recycling of Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 207–217. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70572-9_12>. Acesso em: 26 set. 2022.

DIN MICA. FISPQ - **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: Sulfato de Níquel II**. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.metaquimica.com/amfilerating/file/download/file_id/5692/>. Acesso em: 21 out. 2022.

DING, Michel S.; XU, Kang; JOW, T. Richard. **Liquid-Solid Phase Diagrams of Binary Carbonates for Lithium Batteries**. Journal of The Electrochemical Society, v. 147, n. 5, p. 1688-1694, 2000 Disponível em: <<https://doi.org/10.1149/1.1393419>>. Acesso em: 05 de out. 2022.

DOCOL. Torneira: similar. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Torneira-Cozinha-Docol-00801306-Cromado/dp/B0792ND5FD/ref=asc_df_B0792ND5FD/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=379707889890&hvpos=&hvnetw=g&hvrand=7982325242602475485&hvpone=&hvptwo=&hvmqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1001689&hvtargid=pla-810604235693&psc=1>. Acesso em: 27 set. 2022.

DORN, Roland; SCHWARTZ, Reiner; STEURICH, Bjoern. **Battery management system**. In: KORTHAUER, Reiner (Org.). **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9_2>. Acesso em: 15 set. 2022.

DURBIN, Thomas D.; KARAVALAKIS, Georgios; JOHNSON, Kent C.; COCKER, David R.; YANG, Jiacheng; JIANG, Yu; KUMAR, Sachin. **Evaluating the Viability of Dimethyl Carbonate as an Alternative Fuel for the Transportation Sector**. A Research Report from the National Center for Sustainable Transportation, Jun. 2017.

DUTTA, Tanushree; et al. **Recovery of Nanomaterials from Battery and Electronic Wastes: A New Paradigm of Environmental Waste Management**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 3694-3704, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.094>>. Acesso em: 13 de jun. 2022.

ELEKTRO-AUTOMATIK. Inversos de carga: similar. Elfa Distrelec. Disponível em: <<https://www.elfadistrelec.dk/en/electronic-load-500v-30a-5kw-ea-elektro-automatik-ea-elr-9500-30-3u/p/11068535>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

ELWERT, Tobias; GOLDMANN, Daniel; RÖMER, Felix; et al. **Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles**. *Recycling*, v. 1, n. 1, p. 25–60, 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2313-4321/1/1/25>>. Acesso em: 21 set. 2022.

FANG, Zhigang Zak. **Sintering of advanced materials: fundamentals and processes**. Woodhead pub, Oxford, 2010. (Woodhead publishing in materials). ISBN 978-1-84569-562-0.

FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 487 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

FARRAR, James M. **Ion Kinetics and Energetics**. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. [s.l.]: Elsevier, 2003, p. 65–82. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B0122274105003525>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

FAYED, M. E.; SKOCIR, Thomas S. **Mechanical conveyors: selection and operation**. Lancaster, PA: Technomic Pub. Co, 1997. ISBN: 1-56676-416-5

FEITOSA, Isabelle Ramos; LIMA, Luciana Santana; FAGUNDES, Roberta Lins. **Manual de Licenciamento Ambiental: Guia de procedimentos passo a passo**. 1 ed. Rio de Janeiro: Sistema FIRJAN, 2004.

FLINTOFF, Brian & KNORR, Brian. **Cyclones**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4.

FLINTOFF, Brian; MAERSCHNER, Ricardo; JACOBSON, Dusty. **Screens**. In: KAWATRA, S. K.; YOUNG, Courtney (Orgs.). **SME mineral processing & extractive metallurgy handbook**. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Inc, 2019.

FOGLER, H. Scott. **Essentials of chemical reaction engineering**. Second edition. Boston: Prentice Hall, 2018. (Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences).

FOREMAN, Evan; ZAKRI, Waleed; HOSSEIN SANATIMOGHADDAM, Mohammad; et al. **A Review of Inactive Materials and Components of Flexible Lithium-Ion Batteries**. *Advanced Sustainable Systems*, v. 1, n. 11, p. 1700061, 2017. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adsu.201700061>>. Acesso em: 14 set. 2022.

FOSHAN HUICHENGSHENG. Forno de sinterização com esteira transportadora: similar. Alibaba. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/p-detail/Continuous-62396057482.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.77844af4VKehX5>. Acesso em: 12 dez. 2022.

FREE, Michael L. **Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications**. Cham: Springer International Publishing, 2022. (The Minerals, Metals & Materials Series). Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-88087-3>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

FUJITA, Toyohisa. **Magnetic Separation**. In: HIGASHITANI, Ko; MAKINO, Hisao; MATSUSAKA, Shuji. **Powder Technology Handbook**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742, 2020. p. 633. ISBN: 978-0-367-86280-0.

G1. **Montadora chinesa GWM anuncia fábrica de veículos elétricos e híbridos no interior de SP**. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2022/01/27/montadora-chinesa-gwm-anuncia-fabrica-de-veiculos-eletricos-e-hibridos-no-interior-de-sp.ghtml>. Acesso em: 03 ago. 2022.

G1. **Termômetros chegam a 40,1 °C e Campinas registra recorde de calor, diz Defesa Civil**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2020/09/30/termometros-chegam-a-40oc-e-campinas-registra-recorde-de-calor-diz-defesa-civil.ghtml>>. Acesso em: 3 jan. 2023.

GAVRITCHEV, K. S.; SHARPATAYA, G. A.; SMAGIN, A. A.; et al. **Calorimetric study of thermal decomposition of lithium hexafluorophosphate**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 73, n. 1, p. 71–83, 2003. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/A:1025125306291>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

GEANKOPLIS, Christie J. **Transport processes and separation process principles**. Fifth edition. Boston, MA: Prentice Hall, 2018. (Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences).

GERLITZ, Eduard; GREIFENSTEIN, Marvin; HOFMANN, Janna; et al. **Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an Agile Automated Disassembly System**. *Procedia CIRP*, v. 96, p. 175–180, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827121000974>>. Acesso em: 13 set. 2022.

GOLMOHAMMADZADEH, Rabeeh; FARAJI, Fariborz; RASHCHI, Fereshteh. **Recovery of lithium and cobalt from spent lithium ion batteries (LIBs) using organic acids as leaching reagents: A review**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 136, p. 418–435, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344918301629>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

GOMIDE, Reynaldo. **Operações Unitárias**: operações com sistemas sólidos granulares. v. 1. São Paulo: Edição do autor, 1983.

GORES, Heiner Jakob; et al. **Liquid Nonaqueous Electrolytes**. In: CLAUS, Daniel; BESENHARD, Jürgen O. *Handbook of Battery Materials*. Wiley, ed. 1, p. 525–626, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9783527637188.ch17>>. Acesso em: 23 de set. 2022.

GRAF, Christian. **Cathode materials for lithium-ion batteries**. In: KORTHAUER, Reiner (Org.). **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 29–41. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9_4>. Acesso em: 15 set. 2022.

GRATZ, Eric; SA, Qina; APELIAN, Diran; et al. **A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries**. *Journal of Power Sources*, v. 262, p. 255–262, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775314004571>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

GREEN, Don W.; SOUTHARD, Marylee Z. (ed.). **Perry's chemical engineers' handbook**. 9. ed. Nova Iorque: McGraw Hill Education, 2019.

GRENVILLE, R.K.; MAK, A.T.C.; BROWN, D.A.R. **Suspension of solid particles in vessels agitated by axial flow impellers**. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 100, p. 282–291, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263876215001872>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

GUPTA, Ashok; YAN, Denis. **Size Reduction and Energy Requirement**. In: **Mineral Processing Design and Operations**. [s.l.]: Elsevier, 2016, p. 71–121. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444635891000034>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

GUPTA, C. K. **Chemical metallurgy: principles and practice**. Weinheim, Germany; [Cambridge]: Wiley-VCH, 2003.

GUPTA, C. K.; MUKHERJEE, T. K. **Hydrometallurgy in extraction processes**. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1990. ISBN: 9780849368042.

GUPTA, Chiranjib Kumar. **Chemical Metallurgy: Principles and Practice**. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003. 791 p. ISBN: 3-527-30376-6.

GURGEL. Empilhadeira: similar. NetMak. Disponível em: <<https://www.netmak.com.br/empilhadeiras/empilhadeira-diesel-gurgel-fd-25-30-2-5-ton-torre-3-0-m-rodado-simples?parceiro=4574>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

HAAS, Paul; PFEIFER, Stefan; MÜLLER, Jannes; et al. **Separation of the Electrolyte—Solvent Extraction**. In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan (Orgs.). **Recycling of Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 155–176. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70572-9_9>. Acesso em: 16 ago. 2022.

HARPER, Gavin; SOMMERVILLE, Roberto; KENDRICK, Emma; et al. **Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles**. *Nature*, v. 575, n. 7781, p. 75–86, 2019. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>>. Acesso em: 26 set. 2022.

HAUCK, Daniel; KURRAT, Michael. **Overdischarging Lithium-Ion Batteries**. In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan (Orgs.). **Recycling of Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 53–81. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70572-9_4>. Acesso em: 21 set. 2022.

HAVLÍK, Tomáš. **Hydrometallurgy: principles and applications**. Cambridge: International Science Publishing, 2008. ISBN 978-1-4200-7044-6

HAYES, Peter. **Process Principles in Minerals and Materials Production**. 4. ed. Brisbane: Hayes Publishing Co, 2021.

HAYNES, William M.; LIDE, David R.; BRUNO, Thomas J. (Orgs.). **CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data**. 2016–2017, 97th edition. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.

HE, Li-Po; SUN, Shu-Ying; SONG, Xing-Fu; et al. **Leaching process for recovering valuable metals from the LiNi 1/3 Co 1/3 Mn 1/3 O 2 cathode of lithium-ion batteries**. Waste Management, v. 64, p. 171–181, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17300533>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

HELLMUTH, Jan F.; DIFILIPPO, Nicholas M.; JOUANEH, Musa K. **Assessment of the automation potential of electric vehicle battery disassembly**. Journal of Manufacturing Systems, v. 59, p. 398–412, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278612521000649>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

HIPPLE, Jack. **Chemical engineering for non-chemical engineers**. Hoboken, New Jersey: Wiley, AIChE, 2017. ISBN: 9781119309635

HOUACHE, Mohamed S. E.; YIM, Chae-Ho; KARKAR, Zouina; et al. **On the Current and Future Outlook of Battery Chemistries for Electric Vehicles—Mini Review**. Batteries, v. 8, n. 7, p. 70, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2313-0105/8/7/70>>. Acesso em: 19 set. 2022.

HSC Chemistry. V.9.3. Metso: Outotec, 2017. Disponível em: <<https://www.mogroup.com/portfolio/hsc-chemistry/>>. Acesso em: 26 de set. 2022.

HU, Qiushi; XU, Linghong. **An overview on Lithium-ion batteries recycling processes**. Journal of Physics: Conference Series, v. 1885, n. 3, p. 032031, 2021. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1885/3/032031>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**: Campinas. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/campinas.html>. Acesso em: 03 ago. 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**: Contagem. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/contagem.html>. Acesso em: 03 ago. 2022.

IEA. International Energy Agency. **“Global Supply Chain of EV Batteries”**. Disponível em: < www.iea.org> Acesso em: 16 de Agosto de 2022.

INCROPERA, Frank P.; BERGMAN, T. L.(Orgs.). **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2011.

IRANMANES, M. & HULLIGER, J. **Magnetic separation: its application in mining, waste purification, medicine, biochemistry and chemistry**. The Royal Society of

Chemistry, Chemical Society Reviews, v. 46, p. 5925-5934, mar. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C7CS00230K>>

ISOLAB. **Ficha de Informações de Segurança: Sulfato de manganês**. São Paulo, 2003. Disponível em: <<https://cloud.cnpqc.embrapa.br/wp-content/igu/fispq/laboratorios/Sulfato%20de%20Mangan%C3%AAs.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

JACOBY, Mitch. **It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries**. 2019. Disponível em: <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>. Acesso em: 23 out. 2022.

JENSEN, Robert. **Recycling of lithium-ion batteries: The effects of a reducing agent on the efficiency and kinetics of metal leaching**. 2019. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2019.

JIANGXI PROVINCE. Separador magnético: similar. Alibaba. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/p-detail/Hot-62070991996.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.557250fbFf913>. Acesso em: 12 dez. 2022.

JIN, Xiaogang; WU, Jiangtao; LIU, Zhigang; et al. **The thermal conductivity of dimethyl carbonate in the liquid phase**. Fluid Phase Equilibria, v. 220, n. 1, p. 37–40, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378381204001359>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

JULIEN, Christian; MAUGER, Alain; VIJH, Ashok; et al. **Anodes for Li-Ion Batteries**. In: JULIEN, Christian; MAUGER, Alain; VIJH, Ashok; et al (Eds.). **Lithium Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 323–429. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-19108-9_10>. Acesso em: 19 set. 2022.

JUMARI, A; NIZAM, M; DYARTANTI, E R; et al. **A Reductive Pre-Treatment to Improve NCA Cathode Material Hydrometallurgical Recycle Process**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1096, n. 1, p. 012135, 2021. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1096/1/012135>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

JUMARI, Arif; APRILIYANI, Enni; MUZAYANHA, Soraya Ulfa; et al. **Reprocessing through co-precipitation of NCA cathode scrap waste for cathode material of Li-ion battery**. In: Surakarta, Indonesia: [s.n.], 2020, p. 030017. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0000647>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

KAM, Kinson C.; DOEFF, Marca M. **Electrode materials for lithium ion batteries**. Material Matters, v. 7, n. 4, p. 56-60, 2012.

KASPER, Angela Cristina; JUCHNESKI, Nichele Cristina de Freitas; VEIT, Hugo Marcelo. **Mechanical Processing**. In: VEIT, Hugo Marcelo; MOURA BERNARDES, Andréa (Orgs.). **Electronic Waste**. Cham: Springer International Publishing, 2015, p. 19–38. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-15714-6_4>. Acesso em: 16 ago. 2022.

KAYA, Muammer. **Sorting and Separation of WPCBs**. In: KAYA, Muammer (Ed.). **Electronic Waste and Printed Circuit Board Recycling Technologies**. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 143–176. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-26593-9_7>. Acesso em: 16 ago. 2022.

KERN, Brandon. **Ion Exchange Technologies**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4

KNEHR, Kevin W; KUBAL, Joseph J; NELSON, Paul A; AHMED, Shabbir. **Battery Performance and Cost Modeling for Electric Vehicles: A Manual for BatPaC v5.0**. Argonne National Laboratory, Chemical Sciences and Engineering Division. Lemont, IL, Estados Unidos, 2022.

KUMAR, A.; YEDHU KRISHNAN, R. **A Review on the Technology of Size Reduction Equipment**. International Journal of ChemTech Research, v. 13, n. 1, p. 48–54, 2020. Disponível em: <[http://www.sphinxsai.com/2020/ch_vol13_no1/1/\(48-54\)V13N1CT.pdf](http://www.sphinxsai.com/2020/ch_vol13_no1/1/(48-54)V13N1CT.pdf)>. Acesso em: 15 ago. 2022.

LAROCHE, Francois; TEDJAR, Farouk; AMOUZEGAR, Kamyab; HOULACHI, Georges; BOUCHARD, Patrick; DEMOPOULOS, George P.; ZAGHIB, Karim. **Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-Ion batteries and beyond**. Materials, v. 13, n. 3, 2020.

LARSON, John W. **Thermodynamics of divalent metal sulfate dissociation and the structure of solvated metal sulfate ion pair**. The Journal of Physical Chemistry, v. 74, n. 18, p. 3392–3396, 1970. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j100712a016>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

LAWSON, André; et al. **Caderno Fórum Energia**. VII Seminário sobre Matriz e Segurança Energética Brasileira. 13º Brasil Energy and Power. Realização: FGV Energia, 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/seminario_matriz_de_seguranca_-_baixa_site.pdf>. Acesso em: 08 de jun. 2022.

LEE, Churl Kyoung; RHEE, Kang-In. **Reductive leaching of cathodic active materials from lithium ion battery wastes**. Hydrometallurgy, v. 68, n. 1–3, p. 5–10, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X02001676>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

LEUTHNER, Stephan. **Lithium-ion battery overview**. In: KORTHAUER, Reiner (Org.). **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 13–19. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9_2>. Acesso em: 15 set. 2022.

LI, Lucky. **Lithium battery current collector material - copper foil and aluminum foil**. Disponível em: <<https://www.takomabattery.com/lithium-battery-current-collector-material-copper-foil-and-aluminum-foil/>>. Acesso em: 13 set. 2022.

LI, Qi; CHEN, Juner; FAN, Lei; et al. **Progress in electrolytes for rechargeable Li-based batteries and beyond**. *Green Energy & Environment*, v. 1, n. 1, p. 18–42, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468025716300218>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

LITORAL LIMPO. Preços: Sucata Ferrosa e Não-Ferrosa. Comércio de Sucatas em Geral. Disponível em: <<https://litorallimpo.com.br/precos/>>. Acesso em: 03 mar. 2023.

LIU, Kailong; WANG, Yujie; LAI, Xin. **Introduction to Battery Full-Lifespan Management**. In: LIU, Kailong; WANG, Yujie; LAI, Xin (Eds.). **Data Science-Based Full-Lifespan Management of Lithium-Ion Battery**. Cham: Springer International Publishing, 2022, p. 1–25. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-01340-9_1>. Acesso em: 15 set. 2022.

LIU, P. S. & CHEN, G. F. **Porous materials: processing and applications**. 1 ed. Elsevier, Waltham, MA, 2014. ISBN: 978-0-12-407788-1.

LOPES, C.; SILVESTRE, P. **Elevação pneumática de líquidos (Air Lift)**. *Revista D.A.E.*, ed. 65, 1967. Disponível em: <<http://revistadae.com.br/site/artigo/917-Elevacao-pneumatica-de-liquidos-Air-Lift>>

LORENZETTI. Chuveiro: similar. Amazon. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Chuveiro-Ducha-Lorenzetti-400737-Branco/dp/B0772WS9YN/ref=asc_df_B0772WS9YN/?tag=googleshopp00-20&linkCode=df0&hvadid=379720654228&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=6661537591459385280&hvppone=&hvptwo=&hvqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1001689&hvtargid=pla-902518544851&pssc=1>. Acesso em: 27 set. 2022.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de minérios**. [s.l.]: CETEM/MCT, 2010. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/476>>. Acesso em: 4 jan. 2023.

MA, Yiqian; SVÄRD, Michael; XIAO, Xiong; et al. **Precipitation and Crystallization Used in the Production of Metal Salts for Li-Ion Battery Materials: A Review**. *Metals*, v. 10, n. 12, p. 1609, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/10/12/1609>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

MACINTYRE, A.J. **Instalações Hidráulicas Prediais E Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, ed. 4, 2010.

MACKEY, Phillip J. & GEORGE-KENNEDY, David. **Smelting**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Society for

Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4

MAKUZA, Brian; TIAN, Qinghua; GUO, Xueyi; et al. **Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review**. Journal of Power Sources, v. 491, p. 229622, 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775321001671>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

MALIK, Monu; CHAN, Ka Ho; AZIMI, Gisele. **Review on the synthesis of Li_{Nix}MnyCo_{1-x-y}O₂ (NMC) cathodes for lithium-ion batteries**. Materials Today Energy, v. 28, p. 101066, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468606922001241>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

MANCHESTER CHEMICAL. FISPQ - **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico: Peróxido de Hidrogênio**. São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://201.57.253.136/qualidade/FISPQs/FISPQs%20por%20clientes/Manchester%20Chemical/peroxido%20de%20hidrogenio.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C.; HARRIOTT, Peter. **Unit operations of chemical engineering**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1985. (McGraw-Hill chemical engineering series).

MCMILLIAN, Gregory K. **Advances in reactor measurement and control**. Research Triangle Park, North Carolina: International Society of Automation (ISA), 2015.

MEADOWS, David G. **Filtration** In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4

MEDUSA: **Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms**. Royal Institute of Technology: Inorganic Chemistry. Ignasi Puigdomenech, Stockholm, Sweden, 2010. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/chemdiagr/download>>. Acesso em: 26 de set. 2022.

MELHOR C MBIO. **Taxa Selic Hoje**: Cotação da taxa Selic atual. Disponível em: <<https://www.melhorcambio.com/taxa-selic>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

MF RURAL. Ponte rolante: similar. Disponível em: <<https://www.mfrural.com.br/detalhe/352510/ponte-rolante>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

MESC-MESC-UM series - **Misturador de pás by WAMGROUP S.p.A | DirectIndustry**. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/wamgroup-spa/product-29492-520417.html>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MICROMERITICS. **Analysis of Separator and Binder Materials in Lithium Ion Batteries**. 2017. Disponível em: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=14583>. Acesso em: 26 set. 2022.

MILLS, David. **Pneumatic conveying design guide**. 3 ed. Amsterdam Boston Heidelberg: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2016. ISBN: 978-0-08-100649-8

MIRKOWSKA, M.; KRATZER, M.; TEICHERT, C. **Principal Factors of Contact Charging of Minerals for a Successful Triboelectrostatic Separation Process – a Review**. Berg Huettenmaenn Monatsh, v. 161, p. 359–382, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0515-1>.

MOLDOVEANU, Serban; DAVID, Victor. **Phase Transfer in Sample Preparation**. In: Modern Sample Preparation for Chromatography. [s.l.]: Elsevier, 2015, p. 105–130. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444543196000050>. Acesso em: 2 nov. 2022.

MOURA, Jacira I. de; FARIAS FILHO, Benedito B.; LAGE, Maria Conceição S. M. **Determinação de fósforo em paleossedimentos empregando espectrometria de fluorescência de raios-X portátil**. Química Nova, v. 44, p. 198–204, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/qn/a/b7wR8w6hKjwcWbzytJPqTDw/?lang=pt>. Acesso em: 27 dez. 2022.

MORIN, Dominique et al. **LITHIUM-ION BATTERIES RECYCLING PROCESS**. US n. US 2021/0376399 A1. Depósito: 28 set. 2017. Concessão: 2 dez. 2021.

MOSAIC. FISPQ - **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: Ácido Sulfúrico. Minas Gerais, 2020**. Disponível em: https://mosaicco.com.br/fileLibrary/publicFiles/0-FISPQ____cido_Sulf_rico____Rev.01.pdf. Acesso em: 21 out. 2022.

MUJUMDAR, Arun Sadashiv (Org.). **Handbook of industrial drying**. Fourth edition. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

MURI, Trond. **Continuous Drying Technologies**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4.

MUZAYANHA, Soraya Ulfa; YUDHA, Cornelius Satria; NUR, Adrian; et al. **A Fast Metals Recovery Method for the Synthesis of Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide Material from Cathode Waste**. Metals, v. 9, n. 5, p. 615, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/9/5/615>. Acesso em: 2 nov. 2022.

NAKANISHI, Shigeki; SUZUKI, Takashi; CUI, Qi; et al. **Effect of surface treatment for aluminum foils on discharge properties of lithium-ion battery**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 24, n. 7, p. 2314–2319, 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1003632614633501>. Acesso em: 13 set. 2022.

NASERI, Tannaz; BEIGI, Vahid; NAMDAR, Ashkan; et al. **Biohydrometallurgical recycling approaches for returning valuable metals to the battery production cycle**. In: **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. [s.l.]: Elsevier, 2022, p. 217–246. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323911344000054>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

NELSON, G. Michel & RICHINS, Amy J. **Belt Conveyors**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4.

NELSON, Michael G.; RICHINS, Amy J. **Belt Conveyors**. In: KAWATRA, S. K.; YOUNG, Courtney (Orgs.). **SME mineral processing & extractive metallurgy handbook**. Englewood, Colorado: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Inc, 2019.

NETTO, A. **Manual de Hidráulica**. Edgard Blucher LTDA, Rua Pedroso Alvarenga, São Paulo, SP, Brasil, ed. 8, 1998.

NEUMANN, Jonas; PETRANIKOVA, Martina; MEEUS, Marcel; et al. **Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling**. *Advanced Energy Materials*, v. 12, n. 17, p. 2102917, 2022. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202102917>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

NEXT, “**What does BEV, HEV, FCEV & PHEV stand for?**”. *Next.agl.com.au*. Disponível em: <<https://next.agl.com.au/evhub/what-does-bev-hev-fcev-phev-stand-for>> Acesso em: 23 set. 2022.

NG SOLAR. **Preço da energia elétrica CPFL 2022**. 30 MAI, 2022. Disponível em: <[https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl#:~:text=Com%20o%20reajuste%20de%202022,comercial%2F%20industrial%20\(B3\)](https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl#:~:text=Com%20o%20reajuste%20de%202022,comercial%2F%20industrial%20(B3).)>. Acesso em: 13 jan. 2023.

NIE, Zuoren; MA, Liwen; XI, Xiaoli; et al. **Cobalt recovery from cobalt-bearing waste in sulphuric and citric acid systems**. *Hydrometallurgy*, v. 136, p. 1–7, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X13000194>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

NING, Chao; LIN, Carol Sze Ki; HUI, David Chi Wai; MCKAY, Gordon. **Waste Printed Circuit Board (PCB) Recycling Techniques**. *Topics of Current Chemistry*, v. 375, n. 43, jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41061-017-0118-7>>.

NITTA, Naoki; WU, Feixiang; LEE, Jung Tae; et al. **Li-ion battery materials: present and future**. *Materials Today*, v. 18, n. 5, p. 252–264, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702114004118>>. Acesso em: 15 set. 2022.

NZEREOGU, P.U.; OMAH, A.D.; EZEMA, F.I.; et al. **Anode materials for lithium-ion batteries: A review**. *Applied Surface Science Advances*, v. 9, p. 100233, 2022. Disponível

em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666523922000253>>. Acesso em: 19 set. 2022.

OLYMPUS. **The Benefits of Handheld XRF for Medical Device RoHS Compliance**. Disponível em: <<https://www.olympus-ims.com/pt/applications/benefits-handheld-xrf-medical-device-rohs-compliance/>>. Acesso em: 27 dez. 2022.

ONU, Organização das Nações Unidas. “**The Sustainable Development Goals: Our Framework for COVID-19 Recovery**”. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sdgs-framework-for-covid-19-recovery/>> Acesso em: 21 out. 2022.

Optimise froth recovery with Smart Flotation. FLSmidth. Disponível em: <<https://www.flsmidth.com/en-gb/products/flotation-and-attribution/smart-flotation>>. Acesso em: 4 jan. 2023.

OR, Tyler; GOURLEY, Storm W. D.; KALIYAPPAN, Karthikeyan; et al. **Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook**. Carbon Energy, v. 2, n. 1, p. 6–43, 2020. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cey2.29>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

OSTERWALDER, Alexander; PIGNEUR, Yves. **Business model generation: inovação em modelos de negócios: um manual para visionários, inovadores e revolucionários**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2011. 278 p.

OU, Xing; WANG, Wei. **Recycling battery cathode materials**. In: **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. [s.l.]: Elsevier, 2022, p. 303–319. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323911344000170>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

PANDEY, Ashwani; PATNAIK, Sarthak; PATI, Soobhankar. **Available technologies for remanufacturing, repurposing, and recycling lithium-ion batteries: an introduction**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 487 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

PANERO, S. ELECTROCHEMICAL THEORY | Kinetics. In: **Encyclopedia of Electrochemical Power Sources**. [s.l.]: Elsevier, 2009, p. 14–22. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444527455000344>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

PAUL, Edward L.; ATIEMO-OBENG, Victor A.; KRESTA, Suzanne M. (Orgs.). **Handbook of industrial mixing: science and practice**. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2004.

PAVLOV, Detchko. **H₂SO₄ Electrolyte – An Active Material in the Lead–Acid Cell**. In: **Lead-Acid Batteries: Science and Technology**. [s.l.]: Elsevier, 2011, p. 117–148. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444528827100035>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

PAVOSKI, Giovanni; et al. **Nanotechnology and recycling, remanufacturing, and reusing battery**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. *Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing*. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, p. 53-72, 2022. ISBN: 978-0-323-91134-4.

PENG, Chao; LIU, Fupeng; WANG, Zulin; et al. **Selective extraction of lithium (Li) and preparation of battery grade lithium carbonate (Li₂CO₃) from spent Li-ion batteries in nitrate system**. *Journal of Power Sources*, v. 415, p. 179–188, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775319300825>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

PEREIRA, Luiz Carlos F. **O design para a economia circular: Repensando a forma como fazemos as coisas**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Design, Universidade de Brasília, Brasília, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/40304>>. Acesso em: 13 de jun. 2022.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. **Engenharia de Processos: Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. São Paulo: Blucher. 2005. ISBN: 978-85-212-0368-1.

PERONI, Jady. **Carros elétricos e híbridos já recebem incentivos no Brasil; saiba quais**. 2021. Disponível em: <https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/carros-eletricos-e-hibridos-ja-recebem-incentivos-no-brasil-saiba-quais/>. Acesso em: 03 ago. 2022.

PEROXY BAHIA. **Ficha Técnica: Peróxido de Hidrogênio 50%**. Bahia, 2013. Disponível em: <<https://www.peroxybahia.com/pdf/EspecificacaoTecnicaHPS50.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

PIAMCHEEWA BENJAMASUTIN, Piamcheewa & PROMPHANSASTRE, Raksina. **Recycling of lithium-ion batteries: Determination of optimal parameters for the application of hydrogen peroxide as reducing agent in the leaching process**. 2020. 91 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2020.

PIERSON, H. G. W. **The selection of solid-liquid separation equipment**. In: SVAROVSKY, Ladislav (Org.). **Solid-liquid separation**. 4 ed. Butterworth-Heinemann, Oxford, Boston, 2000. ISBN 0750645687

PISTOIA, Gianfranco. **Lithium-Ion Batteries**. 1st. ed. Roma: Elsevier, 2014. Disponível em: <<https://www.elsevier.com/books/lithium-ion-batteries/9780444595133>>

POETZ, S.; FUCHSBICHLER, B.; SCHMUCK, M.; KOLLER, S. **Development of a 3d Current Collector for the Positive Electrode in Lithium-Ion Batteries**. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 44, n. 9, p. 989–994, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10800-014-0719-6>>. Acesso em: 24 de set. 2022.

POKORNÝ, Václav; ŠTEJFA, Vojtěch; FULEM, Michal; et al. **Vapor Pressures and Thermophysical Properties of Dimethyl Carbonate, Diethyl Carbonate, and Dipropyl Carbonate**. *Journal of Chemical & Engineering Data*, v. 62, n. 10, p. 3206–3215, 2017.

Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jced.7b00295>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

POKORNÝ, Václav; ŠTEJFA, Vojtěch; FULEM, Michal; et al. **Vapor Pressures and Thermophysical Properties of Ethylene Carbonate, Propylene Carbonate, γ -Valerolactone, and γ -Butyrolactone**. *Journal of Chemical & Engineering Data*, v. 62, n. 12, p. 4174–4186, 2017. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jced.7b00578>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

Ponte rolante. hmn.wiki. Disponível em: <https://hmn.wiki/pt/Overhead_crane>. Acesso em: 9 set. 2022.

PORZIO, Jason; SCOWN, Corinne D. **Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials**. *Advanced Energy Materials*, v. 11, n. 33, p. 2100771, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aenm.202100771>>. Acesso em: 26 set. 2022.

PRB Series - Misturador tipo ribbon by PerMix Tec. Co. Ltd.- North America | DirectIndustry. Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/permix-tec-co-ltd-north-america/product-241794-2433236.html>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

RESIMAPI. FISPQ - **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos: Sulfato de Cobalto**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.resimapi.com.br/fispq/sulfato-de-cobalto.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

REUTER, Markus; SERNA-GUERRERO, Rodrigo. **A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective**. *Batteries*, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 1-34, 5 nov. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/batteries5040068>.

RFB - Receita Federal do Brasil. **Instrução Normativa Secretaria da Receita Federal nº 1863, de 27/12/2018**. Dispõe sobre o Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica (CNPJ). Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2018.

RICHA, Kirti; BABBITT, Callie W.; GAUSTAD, Gabrielle; WANG, Xue. **A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 83, n. 2014, p. 63–76, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.008>.

RODRÍGUEZ, A.; CANOSA, J.; DOMÍNGUEZ, A.; et al. **Isobaric vapour–liquid equilibria of dimethyl carbonate with alkanes and cyclohexane at 101.3 kPa**. *Fluid Phase Equilibria*, v. 198, n. 1, p. 95–109, 2002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378381201007610>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ROINE, A. HSC Chemistry® [Software], Metso Outotec, Pori 2022. Disponível em: www.mogroup.com/hsc.

Rotary Drum Filters. Disponível em: <<https://www.911metallurgist.com/equipment/rotary-drum-filters/>>. Acesso em: 16 jan. 2023.

ROTHERMEL, Sergej; et al. **Background**. In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan. *Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way*. Springer International Publishing, p. 1-31,

2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_1>. Acesso em: 24 de set. 2022.

S. ABDULLAH, Mazin A. Othman and Rostam R. Braim. “**Applications, Compositions, and Performances of Lithium Ion Batteries in Electric Vehicles**” Pure and Applied Science Conference. Applied Chemistry (ACH), 2018
<<http://dx.doi.org/10.14500/icpas2018>>

SANTOS, Ana Paula. **Campinas é pioneira em lei de incentivo à inovação; confira!** 2022. Disponível em: <https://www.tudoep.com/tudo-inovacao/NOT,0,0,1768085,campinas-e-pioneira-em-lei-de-incentivo-a-inovacao-confira.aspx>. Acesso em: 03 ago. 2022.

SA, Qina. **Synthesis and Impurity Study of High Performance LiNixMnyCozO2 Cathode Materials from Lithium Ion Battery Recovery Stream**. 2015. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2015.

SA, Qina; GRATZ, Eric; HE, Meinan; et al. **Synthesis of high performance LiNi1/3Mn1/3Co1/3O2 from lithium ion battery recovery stream**. Journal of Power Sources, v. 282, p. 140–145, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775315002694>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

SAITO, Fumio. **Crushing and Grinding**. in: HIGASHITANI, Ko; MAKINO, Hisao; MATSUSAKA, Shuji. **Powder technology handbook**. 4 ed. Boca Raton, FL 33487-2742, 2020. ISBN: 978-0-367-86280-0

SALCES, Aliza Marie; BREMERSTEIN, Irina; RUDOLPH, Martin; et al. **Joint recovery of graphite and lithium metal oxides from spent lithium-ion batteries using froth flotation and investigation on process water re-use**. Minerals Engineering, v. 184, p. 107670, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687522002801>>. Acesso em: 18 out. 2022.

SALGADO, Rui Martim; DANZI, Federico; OLIVEIRA, Joana Espain; et al. **The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries**. Molecules, v. 26, n. 11, p. 3188, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1420-3049/26/11/3188>>. Acesso em: 4 out. 2022.

SANASA. **Resumo de ata de registro de preços**. Campinas, São Paulo. Ata Registrada: 28 set. 2022. Disponível em: <<https://www.sanasa.com.br/document/noticias/3363.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2022.

SANGUESA, Julio A.; TORRES-SANZ, Vicente; GARRIDO, Piedad; et al. **A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges**. Smart Cities, v. 4, n. 1, p. 372–404, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2624-6511/4/1/22>>. Acesso em: 26 set. 2022.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto n° 47.400, de 04/12/2002**. Regulamenta dispositivos da Lei Estadual n° 9.509, de 20 de março de 1997, referentes ao licenciamento ambiental, estabelece prazos de validade para cada modalidade de licenciamento ambiental e condições para sua renovação.

SASTRE, Jose Paulino Peris. **Resynthesis of Cathode Active Material from Electric Vehicle Battery Waste and Metal Quantification along the Route**. 2021. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Norwegian University Of Science And Technology, Trondheim, 2021.

SCHIAVI PIER GIORGIO; BRANCHI MARIO; CASALESE ELEONORA; et al. **Resynthesis of NMC111 Cathodic Material from Real Waste Lithium Ion Batteries**. Chemical Engineering Transactions, v. 86, p. 463–468, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3303/CET2186078>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

SCHOENBRUNN, Fred; LARIS, Tim; HENRIKSSON, Brandt; ARBUTHNOT, Ian. **Sedimentation Equipment**. In: DUNNE, R.S.; AWATRA, Komar K.; YOUNG, Courtney A. **SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. Society for Mining, Metallurgy & Exploration**. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 12999 E. Adam Aircraft Circle, Englewood, Colorado, USA 80112, 2019. 2197 p. ISBN: 978-0-87335-385-4

SCHUBERT, G.; BERNOTAT, S. **Comminution of non-brittle materials**. International Journal of Mineral Processing, v. 74, p. S19–S30, 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751604000687>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SHAMSUDDIN, M. **Physical Chemistry of Metallurgical Processes**. The Minerals, Metals & Materials Society, Springer Nature Switzerland AG, Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland, 2021. 601 p. ISBN: 978-3-030-58068-1

SHI, Lei; QU, Tao; LIU, Dachun; et al. **Process of Thermal Decomposition of Lithium Carbonate**. In: LEE, Jonghyun; WAGSTAFF, Samuel; L AMBOTTE, Guillaume; et al (Orgs.). **Materials Processing Fundamentals 2020**. Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 107–116. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-36556-1_10>. Acesso em: 22 jan. 2023.

SHI, Fengnian; KOJOVIC, Toni; ESTERLE, Joan S.; et al. **An energy-based model for swing hammer mills**. International Journal of Mineral Processing, v. 71, n. 1–4, p. 147–166, 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751603000358>>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SIGMA-ALDRICH. **Ficha de Dados de Segurança: hidróxido de sódio**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<https://sites.ffclrp.usp.br/cipa/fispq/Hidroxido%20de%20sodio.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

SIGMA-ALDRICH. **Ficha de Dados de Segurança: lithium carbonate**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<https://sites.ffclrp.usp.br/cipa/fispq/Carbonato%20de%20litio.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2022.

SILVA, Calvin; ZEBA, Guido; ROCHA, Christiano; et al. **PROCESSING OF A METAL CONCENTRATE FROM GROUND WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS IN ACIDIC MEDIA USING HYDROGEN PEROXIDE AS OXIDANT**. Química Nova, 2020. Disponível em: <https://quimicanova.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=9128&nomeArquivo=AR2020-0090.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2022.

SILVEIRA, A.V.M.; SANTANA, M.P.; TANABE, E.H.; et al. **Recovery of valuable materials from spent lithium ion batteries using electrostatic separation.** *International Journal of Mineral Processing*, v. 169, p. 91–98, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751617302375>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

SILVEIRA, A.V.M.; CELLA, M.; TANABE, E.H.; et al. **Application of tribo-electrostatic separation in the recycling of plastic wastes.** *Process Safety and Environmental Protection*, v. 114, p. 219–228, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095758201730438X>>. Acesso em: 15 mar. 2023.

SINPROQUIM. **Solvay e Veolia montarão planta demo para reciclagem de metais de baterias de veículos elétricos.** 2021. Disponível em: <https://sinproquim.org.br/solvay-e-veolia-montarao-planta-demo-para-reciclagem-de-metais-de-baterias-de-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 14 jun. 2022.

SMITH, York R.; NAGEL, James R.; RAJAMANI, Raj K. **Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review.** *Minerals Engineering*, v. 133, p. 149-159, jan. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.025>>.

SMM, Sales & Raw Materials Dept., Battery Materials Div. **Battery Materials: Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC).** Disponível em: <<https://www.smm.co.jp/en/business/material/products/nmc/>> Acesso em: 24 out. 2022.

SOUZA, Adriane D.V.; ARRUDA, Cezar C.; FERNANDES, Leandro; et al. **Characterization of aluminum hydroxide (Al(OH)₃) for use as a porogenic agent in castable ceramics.** *Journal of the European Ceramic Society*, v. 35, n. 2, p. 803–812, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221914004865>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

STEHMANN, Friederike; BRADTMÖLLER, Christian; SCHOLL, Stephan. **Separation of the Electrolyte—Thermal Drying.** In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan (Orgs.). **Recycling of Lithium-Ion Batteries.** Cham: Springer International Publishing, 2018, p. 139–153. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-70572-9_8>. Acesso em: 16 ago. 2022.

STEHMANN, Friederike; et al. **Separation of the Electrolyte - Thermal Drying.** In: KWADE, Arno; DIEKMANN, Jan. **Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way.** Springer International Publishing, p. 139-153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_1>. Acesso em: 24 de set. 2022.

SULLIVAN, James F. **Screening Theory and Practice.** Triple/S Dynamics, Inc. Jan. 2013.

SUN, Hong; ZHAO, Kejie. **Electronic Structure and Comparative Properties of Li_{1-x}Ni_xMnyCozO₂ Cathode Materials.** *The Journal of Physical Chemistry C*, v. 121, n. 11, p. 6002-6010, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00810>>. Acesso em: 23 de set. 2022.

Tupy, BMW e Senai se unem para reciclar baterias de carros. ISTO É Dinheiro, 24 de mar. de 2022. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/tupy-bmw-e-senai-se-unem-para-reciclar-baterias-de-carros/>>. Acesso em: 28 de jun. de 2022.

TURTON, Richard (Org.). **Analysis, synthesis, and design of chemical processes.** 5th edition. Boston: Prentice Hall, 2018. (Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences).

ULISSES Galvão Romão, Amauri Dias de Carvalho, Arnaldo de Carvalho Junior. “**Baterias de Íon de Lítio, Estado da Arte e Aplicações**”. QUALIF, Revista Acadêmica – Ensino de Ciência e Tecnologia IFSP – Campus Cubatão, 2019.
<https://www.researchgate.net/publication/339209159_BATERIAS_DE_ION_DE_LITIO_E_STADO_DA_ARTE_E_APLICACOES>

UPADHYAYA, G. S. **Powder metallurgy technology.** Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 1997. ISBN 1 898326 40 1.

URBAŃSKA, Weronika. **Recovery of Co, Li, and Ni from Spent Li-Ion Batteries by the Inorganic and/or Organic Reducer Assisted Leaching Method.** Minerals, v. 10, n. 6, p. 555, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-163X/10/6/555>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

VANDERZEE, Cecil E.; WIGG, Dwight A. **The standard enthalpies of solution and formation of Wegscheider’s salt: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{NaHCO}_3(\text{s})$ and of trona: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$ at 298.15 K.** The Journal of Chemical Thermodynamics, v. 13, n. 6, p. 573–583, 1981. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021961481901142>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

VEGLIO, Francesco; BEHNAMFARD, Ali; SALARIRAD, Mohammad Mehdi. **Process development for recovery of copper and precious metals from waste printed circuit boards with emphasize on palladium and gold leaching and precipitation.** Waste Management, v. 33, n. 11, p. 2354–2363, 2013. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X13003450>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, Omar; VALIO, Johanna; SANTASALO-AARNIO, Annukka; VETTER, Matthias; LUX, Stephan. **Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium-Ion Batteries.** In: **Storing Energy.** Elsevier, 2016, p. 205–225. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128034408000117>>. Acesso em: 15 set. 2022.

VEREVKIN, Sergey P.; TOKTONOV, Alexey V.; CHERNYAK, Yury; et al. **Vapour pressure and enthalpy of vaporization of cyclic alkylene carbonates. Fluid Phase Equilibria,** v. 268, n. 1–2, p. 1–6, 2008. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378381208001155>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

VUORILEHTO, Kai. **Materials and function.** In: KORTHAUER, Reiner (Org.). **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 21–28. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9_3>. Acesso em: 15 set. 2022.

WANG Yan et al. **CHARGE MATERIAL FOR RECYCLED LITHIUM-ION BATTERIES**. Depositante: Worcester Polytechnic Institute, US 2021/0391606 A1, Depósito: 26 ago. 2021. Concessão: 16 dez. 2021.

WANG, Jiexi; GUO, Zhihao. **Hydrometallurgically Recycling Spent Lithium-Ion Batteries**. In: AN, Liang (Org.). **Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 27–55. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-31834-5_2>. Acesso em: 16 ago. 2022.

WANG, Shunli; XIE, Yanxin; GUERRERO, Josep M. **Market batteries and their characteristics**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 3-28 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

WANG, Yan et al. **CHARGE MATERIAL FOR RECYCLED LITHIUM-ION BATTERIES**. Titular: Worcester Polytechnic Institute. US n. US 2021/0391606 A1. Depósito: 26 ago. 2021. Concessão: 16 dez. 2021.

WARNER, John T. **Handbook of lithium-ion battery pack design : chemistry, components, types and terminology**. 1st. ed. Midland, MI: Elsevier, 2015.

WARNER, John T. **Lithium-ion battery operation**. In: **Lithium-Ion Battery Chemistries**. Elsevier, 2019, p. 43–77. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012814778800003X>>. Acesso em: 15 set. 2022.

WARNER, John T. **The Anodes**. In: **Lithium-Ion Battery Chemistries**. Elsevier, 2019, p. 115–138. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128147788000065>>. Acesso em: 15 set. 2022.

WARNER, John T. **The Cathodes**. In: **Lithium-Ion Battery Chemistries**. [s.l.]: Elsevier, 2019, p. 99–114. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128147788000053>>. Acesso em: 15 set. 2022.

WARNER, John. **Lithium-ion battery chemistries: a primer**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019. ISBN: 978-0-12-814778-8.

Water-lubricated Oil-free Air Compressor. Disponível em: <<https://www.ziqi-group.net/Oil-Free-Water-Lubricated-Scre/46.html>>. Acesso em: 6 dez. 2022.

WEGENER, Kathrin; ANDREW, Stefan; RAATZ, Annika; et al. **Disassembly of Electric Vehicle Batteries Using the Example of the Audi Q5 Hybrid System**. *Procedia CIRP*, v. 23, p. 155–160, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221282711401155X>>. Acesso em: 11 ago. 2022.

WERNER, Denis Manuel; MÜTZE, Thomas; KAAS, Alexandra; et al. **Mechanical and physical processes of battery recycling**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 487 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

WERNER, Denis Manuel; MÜTZE, Thomas; PEUKER, Urs Alexander. **Influence of Cell Opening Methods on Electrolyte Removal during Processing in Lithium-Ion Battery Recycling**. *Metals*, v. 12, n. 4, p. 663, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/12/4/663>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

WERNER, Denis; PEUKER, Urs Alexander; MÜTZE, Thomas. **Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries**. *Metals*, v. 10, n. 3, p. 316, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-4701/10/3/316>>. Acesso em: 12 ago. 2022.

WIEBELT, Achim; ZEYEN, Michael Guenther. **Battery thermal management**. In: KORTHAUER, Reiner (Org.). **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9_2>. Acesso em: 15 set. 2022.

WILLS, Barry A.; FINCH, James E. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 8 ed. Amsterdam Boston, Mass Heidelberg: Elsevier, 2016. ISBN: 978-0-08-097053-0

WINJOBI, O.; DAI, Q.; KELLY, J.C. **Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry addition for Lithium-ion Batteries in GREET® 2020**. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Cass Avenue, Building 362, Argonne, IL 60439-4844 USA, 2020. Disponível em: <https://greet.es.anl.gov/publication-bom_lib_2020>. Acesso em: 26 de set. 2022.

WU, Yuping; FU, Lijun; REE, Teunis V. **Negative Electrode Materials Based on Carbon**. In: WU, Yuping (Org.). **Lithium-ion batteries: fundamentals and applications**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. ISBN: 978-1-4665-5734-5.

WU, Yuping; YUAN, Xiangyun; ZHAO, Shiyong; REE, Teunis V. **Introduction**. In: WU, Yuping (Org.). **Lithium-ion batteries: fundamentals and applications**. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. ISBN: 978-1-4665-5734-5.

WURM, Călin; OETTINGER, Oswin; WITTKAEMPER, Stephan; et al. **Anode materials for lithium-ion batteries**. In: KORTHAUER, Reiner (Org.). **Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, p. 43–58. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-53071-9_5>. Acesso em: 19 set. 2022.

WUSCHKE, Lutz; JÄCKEL, Hans-Georg; LEISSNER, Thomas; et al. **Crushing of large Li-ion battery cells**. *Waste Management*, v. 85, p. 317–326, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18307840>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

XU, Kang. **Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries**. *Chemical Reviews*, v. 104, n. 10, p. 4303–4418, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/cr030203g>>. Acesso em: 23 de set. 2022.

YANG, Haiyu; LIU, Jingyang; YANG, Jiakuan. **Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 187, n. 1–3, p. 393–400, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389411000732>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

YANG, Yue; LEI, Shuya; XU, Rui. **Recycling lithium, cobalt, and nickel for return to the battery production cycle**. In: *Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing*. [s.l.]: Elsevier, 2022, p. 427–444. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323911344000157>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

YASSUDA, E. R. **Poços profundos: manual técnico, subsídio para a aplicação de normas**. São Paulo: Faculdade de Higiene e Saúde Pública, 1965.

YAVUZ, Cafer T.; PRAKASH, Arjun; MAYO, J.T.; COLVIN, Vicki L. **Magnetic separations: From steel plants to biotechnology**. *Chemical Engineering Science*, v. 64, p. 2510-2521, dez. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.11.018>>.

YIN, Huayi; XING, Pengfei. **Pyrometallurgical Routes for the Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries**. In: AN, Liang (Org.). **Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries**. Cham: Springer International Publishing, 2019, p. 57–83. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-31834-5_3>. Acesso em: 17 ago. 2022.

YOSHIDA, Hideto & FUKUI, Kunihiro. **Classification**. in: HIGASHITANI, Ko; MAKINO, Hisao; MATSUSAKA, Shuji. **Powder technology handbook**. 4 ed. Boca Raton, FL 33487-2742, 2020. ISBN: 978-0-367-86280-0

YOSHINO, Akira. **Development of the Lithium-Ion Battery and Recent Technological Trends**. *Lithium-Ion Batteries*, Elsevier, p. 1–20, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00001-7>>. Acesso em: 23 de set. 2022.

ZELEZNIK, Frank J. **Thermodynamic Properties of the Aqueous Sulfuric Acid System to 350 K**. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, v. 20, n. 6, p. 1157–1200, 1991. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.555899>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

ZHAN, Ruiting; OLDENBURG, Zachary; PAN, Lei. **Recovery of active cathode materials from lithium-ion batteries using froth flotation**. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 17, p. e00062, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00062>.

ZHANG, Jiafeng. **Application of hydrometallurgy in spent lithium-ion battery recycling**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 487 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

ZHANG, Jiafeng. **Application of hydrometallurgy in spent lithium-ion battery recycling**. In: *Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing*. [s.l.]:

Elsevier, 2022, p. 183–216. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323911344000133>>. Acesso em: 16 ago. 2022.

ZHANG, Jiafeng. **Pyrometallurgy-based applications in spent lithium-ion battery recycling**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 487 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

ZHANG, Jiafeng. **Technologies for separating nanomaterials from spent lithium-ion batteries**. In: FARHAD, Siamak; GUPTA, Ram K.; YASIN, Ghulam; NGUYEN, Tuan Anh. **Nano Technology for Battery Recycling, Remanufacturing, and Reusing**. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands, 2022. 487 p. ISBN: 978-0-323-91134-4.

ZHANG, Xihua; CAO, Hongbin; XIE, Yongbing; et al. **A closed-loop process for recycling LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ from the cathode scraps of lithium-ion batteries: Process optimization and kinetics analysis**. *Separation and Purification Technology*, v. 150, p. 186–195, 2015. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S138358661530071X>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

ZOU, Haiyang; GRATZ, Eric; APELIAN, Diran; et al. **A novel method to recycle mixed cathode materials for lithium ion batteries**. *Green Chemistry*, v. 15, n. 5, p. 1183, 2013. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=c3gc40182k>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

ZOU, Yuanmin; CHERNYAEV, Alexander; WILSON, Benjamin P.; et al. **The interference of copper, iron and aluminum with hydrogen peroxide and its effects on reductive leaching of LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O₂**. *Separation and Purification Technology*, v. 281, p. 119903, 2022. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586621016105>>. Acesso em: 2 nov. 2022.

ZSCHORNAK, Matthias, Meutzner, Falk, Lück, Jessica, Latz, Arnulf, Leisegang, Tilmann, Hanzig, Juliane, Nentwich, Melanie, Zosel, Jens and Balbuena, Perla B.. **"Fundamental principles of battery design"** *Physical Sciences Reviews*, vol. 3, no. 11, 2018, pp. 20170111. <<https://doi.org/10.1515/psr-2017-0111>>.

ZWIETERING, Th.N. **Suspending of solid particles in liquid by agitators**. *Chemical Engineering Science*, v. 8, n. 3–4, p. 244–253, 1958. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250958850319>>. Acesso em: 18 jan. 2023.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULOS

O memorial de cálculos possui todos os cálculos efetuados para o balanço de massa, dimensionamento dos equipamentos, balanço de energia e demais cálculos energéticos efetuados para o processo. Muitos dados são necessários para a determinação dos valores requisitados, e por isso foi necessário a criação de um pequeno banco de dados para a utilização destes nos cálculos conforme o componente. A Tabela A.1 possui alguns dados calculados e obtidos para a densidade e massa molar dos componentes.

Tabela A.1 – Dados de propriedades físicas dos componentes

| Componentes Sólidos | Densidade (kg/m ³) | Viscosidade (cP) | Temperatura (°C) | Referência | (continua) |
|--|-----------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------------|
| | | | | | Massa molar (g/mol) |
| NMC 111 alimentado | 4650,00 | - | 25°C | Software BatPac | 93,59 |
| NCA alimentado | 4780,00 | - | 25°C | Software BatPac | 96,16 |
| Al₂(SO₄)₃ | 2710,00 | - | 25°C | Software HSC | 342,15 |
| Al_(s) | 2698,90 | - | 25°C | Software HSC | 26,98 |
| Cu_(s) | 8960,00 | - | 25°C | Software HSC | 63,55 |
| Fe_(s) | 7860,00 | - | 25°C | Software HSC | 55,85 |
| Ni_(s) | 8900,00 | - | 25°C | Software HSC | 58,69 |
| Co_(s) | 8860,00 | - | 25°C | Software HSC | 58,93 |
| Mn_(s) | 7430,00 | - | 25°C | Software HSC | 54,94 |
| Li | - | - | 25°C | Software HSC | 6,94 |
| CoSO₄ | 3710,00 | - | 25°C | Software HSC | 155,00 |
| NiSO₄ | 4010,00 | - | 25°C | Software HSC | 154,76 |
| MnSO₄ | 3250,00 | - | 25°C | Software HSC | 151,00 |
| Fe₂(SO₄)₃ | 3100,00 | - | 25°C | Software HSC | 399,88 |
| CuSO₄ | 3603,00 | - | 25°C | Software HSC | 159,61 |
| Na₂SO₄ | 2680,00 | - | 25°C | Software HSC | 142,04 |
| Na₂CO₃ | 2532,00 | - | 25°C | Software HSC | 105,99 |
| Li₂CO_{3(s)} | 2110,00 | - | 25°C | Software HSC | 73,89 |
| Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}(OH)₂ | 3652,33 | - | 25°C | Software HSC | 91,54 |
| Li₂SO₄ | 2210,00 | - | 25°C | Software HSC | 109,94 |
| NaOH | 2130,00 | - | 25°C | Software HSC | 40,00 |
| Co(OH)₂ | 3597,00 | - | 25°C | Software HSC | 92,95 |

| (conclusão) | | | | | |
|--|---|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| Componentes Sólidos | Densidade (kg/m³) | Viscosidade (cP) | Temperatura (°C) | Referência | Massa molar (g/mol) |
| Ni(OH)₂ | 4100,00 | - | 25°C | Software HSC | 92,71 |
| Mn(OH)₂ | 3260,00 | - | 25°C | Software HSC | 88,95 |
| Cu(OH)₂ | 3368,00 | - | 25°C | Software HSC | 97,56 |
| Al(OH)₃ | 2420,00 | - | 25°C | Souza et al. (2015) | 78,00 |
| Fe(OH)₃ | 3120,00 | - | 25°C | Software HSC | 106,87 |
| Parte eletrônica | 991,70 | - | 25°C | Software BatPac | |
| PP | 946,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| PE | 900,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| PET | 1380,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| PVDF | 1770,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| Carbano negro | 1830,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| Grafite | 2240,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| (Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33})SO₄ | 3656,67 | - | 25°C | Software BatPac | 153,58 |
| Na⁺ | - | - | 25°C | Software HSC | 22,99 |
| OH⁻ | - | - | 25°C | Software HSC | 17,01 |
| NMC 111 produzido | 4650,00 | - | 25°C | Software HSC | 96,46 |
| Componentes líquidos | | | | | |
| H₂O_{2(l)} | 1440,00 | - | 25°C | Software HSC | 34,01 |
| H₂SO_{4(l)} | 1841,00 | - | 25°C | Software HSC | 98,08 |
| H₂O_(l) | 997,00 | - | 25°C | Software HSC | 18,02 |
| Eletrólito (1,2 M LiPF₆) (l) | 1200,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| LiPF₆ | 2840,00 | - | 25°C | Software BatPac | |
| DMC | 1068,00 | 0,63 | 25°C | Agatha et al. (2017) | |
| EC | 1321,40 | 1,93 | 39°C | Ding et al. (2000) | |
| Componentes Gasosos | | | | | |
| O_{2(g)} | 1,40 | | 25°C | Software HSC | 32,00 |
| CO_{2(g)} | 1,93 | | 0°C | Software HSC | 44,01 |
| N_{2(g)} | 1,23 | | 0°C | Software HSC | 28,01 |

Fonte: Software HSC Chemistry® (2023); Software BatPac (2023).

Para o balanço energético, foram obtidos dados do *software* HSC Chemistry® 10, de versão teste obtida em e-mail com representantes da Metseo Outotec. O *software* apresenta um bom desempenho de simulação para processos metalúrgicos, porém não foi possível sua utilização pelo pouco tempo (14 dias) disponibilizado para o uso. Porém, a retirada dos dados do banco de dados foi de extrema importância para o trabalho, já que o software possui um sistema robusto e preciso de estimativa de valores para elementos sem dados na literatura. Outros *softwares* foram buscados, como o USIM PAC, UniSIM, SuperPro, entre outros, porém todos haviam limitações em licenças e operações de simulação para o processo desenvolvido no presente trabalho (ROINE, 2022).

Por isso, o desenvolvimento dos cálculos realizou-se em planilhas eletrônicas com considerações baseadas na literatura e nas patentes de referência para o projeto, provenientes de Morin et al. (2021) e Wang et al. (2021). A Tabela A.2 de dados energéticos apresenta os valores retirados do *software* HSC Chemistry®.

Tabela A.2 – Tabela de dados energéticos para o processo

(continua)

| Componente | T (°C) | Massa molar (g/mol) | H formação (kJ/mol) | S (J/mol.K) | Cp (J/mol.K) | ΔG (kJ/mol) | H formação (kJ/kg) | S (kJ/kg.K) | Cp (kJ/kg.K) | ΔG (kJ/kg) |
|--|--------|---------------------|---------------------|-------------|--------------|---------------------|--------------------|-------------|--------------|--------------------|
| LiNi_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}O_{2(s)} | 25 | 95,89 | -700,55 | 74,5 | 79,29 | -643,86 | -7305,77 | 0,78 | 0,83 | -6714,57 |
| LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_{2(s)} | 25 | 96,08 | -661,77 | 71,99 | 78,52 | -604,51 | -6887,7 | 0,75 | 0,82 | -6291,74 |
| Al_(s) | 25 | 26,98 | 0 | 28,28 | 24,2 | -0,06 | 0 | 1,05 | 0,9 | -2,22 |
| Cu_(s) | 25 | 63,55 | 0 | 33,15 | 24,44 | -1,25 | 0 | 0,52 | 0,38 | -19,67 |
| Co²⁺ | 25 | 58,93 | 0 | 28,64 | 25,53 | 0,42 | 0 | 0,49 | 0,43 | 7,13 |
| Mn²⁺ | 25 | 54,94 | 0 | 33,85 | 27,97 | -0,49 | 0 | 0,62 | 0,51 | -8,92 |
| Ni²⁺ | 25 | 58,69 | 0 | 28,62 | 26,18 | 0,35 | 0 | 0,49 | 0,45 | 5,96 |
| Al₂(SO₄)₃ | 25 | 342,15 | -3465,05 | 239,3 | 259,39 | -3123,86 | -10127,28 | 0,7 | 0,76 | -9130,09 |
| CoSO₄ | 25 | 155 | -888,26 | 117,36 | 103,22 | -782,41 | -5730,71 | 0,76 | 0,67 | -5047,81 |
| NiSO₄ | 25 | 154,76 | -872,91 | 92,05 | 97,63 | -759,58 | -5640,41 | 0,59 | 0,63 | -4908,12 |
| MnSO₄ | 25 | 151 | -1065,66 | 112,09 | 100,49 | -957,59 | -7057,35 | 0,74 | 0,67 | -6341,66 |
| Fe₂(SO₄)₃ | 25 | 399,88 | -2585,2 | 305,6 | 264,71 | -2264,37 | -6464,94 | 0,76 | 0,66 | -5662,62 |
| CuSO₄ | 25 | 159,61 | -771,4 | 109,25 | 98,97 | -662,2 | -4833,03 | 0,68 | 0,62 | -4148,86 |
| Li₂SO₄ | 25 | 109,94 | -1436,49 | 113,9 | 120,96 | -1321,19 | -13066,13 | 1,04 | 1,1 | -12017,37 |
| Na₂SO₄ | 25 | 142,04 | -1387,9 | 149,58 | 128,12 | -1270,02 | -9771,19 | 1,05 | 0,9 | -8941,28 |
| H₂SO_{4(l)} | 25 | 98,08 | -814 | 156,9 | 138,91 | -689,93 | -8299,35 | 1,6 | 1,42 | -7034,36 |
| Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}SO₄ | 25 | 153,01 | -841,59 | 120,06 | 113,59 | -736,44 | -5500,23 | 0,78 | 0,74 | -4813,02 |
| Na₂CO₃ | 25 | 105,99 | -1130,77 | 135,02 | 111,12 | -1046,97 | -10668,65 | 1,27 | 1,05 | -9878,01 |
| Li₂CO_{3(s)} | 25 | 73,89 | -1216,04 | 90,17 | 96,26 | -1132,1 | -16457,44 | 1,22 | 1,3 | -15321,42 |

(conclusão)

| Componente | T (°C) | Massa molar (g/mol) | H formação (kJ/mol) | S (J/mol.K) | Cp (J/mol.K) | ΔG (kJ/mol) | H formação (kJ/kg) | S (kJ/kg.K) | Cp (kJ/kg.K) | ΔG (kJ/kg) |
|--|--------|---------------------|---------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|-------------|--------------|------------|
| H₂O | 25 | 18,02 | -285,83 | 69,95 | 75,23 | -237,14 | -15861,82 | 3,88 | 4,17 | -13159,82 |
| H₂O_{2(l)} | 25 | 34,01 | -187,86 | 109,62 | 89,33 | -120,42 | -5523,67 | 3,22 | 2,63 | -3540,72 |
| NaOH_(l) | 25 | 40 | -417,12 | 75,47 | 87,13 | -374,27 | -10428 | 1,89 | 2,18 | -9356,75 |
| Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}(OH)₂ | 25 | 90,96 | -566,94 | 81,89 | 81,86 | -482,17 | -6232,85 | 0,9 | 0,9 | -5300,9 |
| Li₂O_(s) | 25 | 29,88 | -597,88 | 37,61 | 54,1 | -561,15 | -20009,37 | 1,26 | 1,81 | -18780,12 |
| Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}O | 25 | 72,95 | -261,57 | 45,55 | 42,71 | -235,52 | -3585,61 | 0,62 | 0,59 | -3228,51 |
| CO_{2(g)} | 25 | 44,01 | -393,5 | 213,77 | 37,1 | -394,36 | -8941,15 | 4,86 | 0,84 | -8960,69 |
| C₃H₆O_{3(l)} | 25 | 90,08 | -499,57 | 210,12 | 163,83 | -348,45 | -5545,85 | 2,33 | 1,82 | -3868,23 |
| C₃H₄O_{3(l)} | 25 | 88,06 | -442,27 | 184,34 | 148,72 | -322,42 | -5022,37 | 2,09 | 1,69 | -3661,37 |
| LiPF₆ | 25 | 151,91 | -2176,97 | 179,6 | 166,02 | -2028,19 | -14330,66 | 1,18 | 1,09 | -13351,26 |
| N_{2(g)} | 25 | 28,01 | 0 | 214,19 | 23,71 | -6,73 | 0 | 7,65 | 0,85 | -240,27 |
| O_{2(g)} | 25 | 32 | 0 | 199,86 | 24,8 | 1,58 | 0 | 6,25 | 0,78 | 49,38 |
| C | 25 | 12,01 | 0 | 5,74 | 8,54 | 0 | 0 | 0,48 | 0,71 | 0 |
| Cu(OH)₂ | 298,15 | 97,56 | -450 | 108,37 | 95,19 | -372,79 | -4612,5 | 1,11 | 0,98 | -3821,14 |
| Al(OH)₃ | 298,15 | 78 | -1277 | 71,13 | 31,91 | -1305,83 | -16371,17 | 0,91 | 0,41 | -16740,72 |

Fonte: Software HSC Chemistry® (2023).

A.1. BALANÇO DE MASSA

Para o balanço de massa global sem reação química, a base de cálculo é definida pela Equação A.1, considerando o balanço de equipamentos com diferentes entradas ou diferentes saídas.

$$\sum [Entrada\ de\ material]_i = \sum [Saída\ de\ material]_j + [Acúmulo\ de\ material] \quad (A.1)$$

E por fim, para o balanço de massa de equipamentos para a operações que envolvam transformação da matéria-prima, tem-se a Equação A.2.

$$\sum [Entrada\ de\ material]_i + \sum [Geração]_i = \sum [Saída\ de\ material]_j + \sum [Consumo]_j + [Acúmulo] \quad (A.2)$$

De modo geral, para o balanço de massa, é considerado todo o processo em estado estacionário e sem acúmulos no sistema. Assim, a Equação A.1 e A.2 podem ser descritas nas Equações A.3, A.4 e A.5.

$$m_{ent} * x_{i,ent} = m_{sai} * x_{j,sai} \quad (A.3)$$

$$\sum_i m_{ent} * x_{i,ent} = \sum_i m_{sai} * x_{j,sai} \quad (A.4)$$

$$\sum_i m_{ent} * x_{i,ent} + \sum_{ii} m_{prod} * x_{ii,prod} = \sum_j m_{sai} * x_{j,sai} + \sum_{jj} m_{reag} * x_{jj,reag} \quad (A.5)$$

Onde:

m_{ent} - Vazão mássica de entrada, kg/dia

$x_{i,ent}$ - Fração mássica de entrada do componente i

m_{sai} - Vazão mássica de saída, kg/dia

$x_{i,sai}$ - Fração mássica de saída do componente i

m_{prod} - Vazão mássica de produção de componentes, kg/dia

$x_{ii,prod}$ - Fração mássica produzida do componente i

m_{reag} - Vazão mássica de consumo de componentes, kg/dia

$x_{jj,reag}$ - Fração mássica consumida do componente i

A.1.1 Área 100

Com o início do processamento, as baterias são armazenadas no estoque de recebimento de matéria-prima com um espaço suficiente de estocagem para garantir o processamento por pelo menos meio ano. Elas podem ser estocadas carregadas, sem necessitar de descarregamento, porém um sistema de segurança deve ser instalado na área de estocagem para possíveis problemas ocasionais. As baterias devem ser processadas de tal forma que uma razão entre baterias NCA e NMC seja estabelecida na entrada, considerando 20% de NCA e 80% de NMC 111 na alimentação. Todo o processo foi dimensionado para tal consideração, e, portanto, essa especificação é muito importante para o andamento do processo. De toda forma, baterias de composições diferentes e razões molares diferentes podem ser processadas e não impactariam o processo, já que os metais são similares e o que mudaria seria a concentração parcial de cada componente. Além disso, baterias com eletrólitos diferentes também poderiam ser processadas sem grandes problemas, já que as similaridades e aplicações com o solvente de extração DMC abrange quase que a totalidade de tal necessidade.

Dessa forma, a composição mássica da bateria é essencial para o cálculo e o balanço de massa, sendo isso a definição para o processo e suas necessidades de operações unitárias envolvidas. Dessa forma, a composição provém de uma lista de materiais de LIBs para os EVs, incluindo HEVs, PHEVs e BEVs presentes no modelo GREET®, baseada na versão do modelo Battery Performance and Cost (BatPaC) v4.0 do Argonne National Laboratory. Os principais parâmetros das baterias consideradas para a composição mássica estão descritos na Tabela 6 do tópico 2 Referencial Teórico (DAI et al., 2018; WINJOBI et al., 2020).

Por isso, utilizou-se a composição em massa da bateria proveniente do BatPaC v4.0 para definir uma alimentação para o processamento. Essa alimentação é uma consideração para um modelo geral de composição parcial de cada componente dentro da bateria, mas que não implica em restrições quanto a outras composições, já que a grande diferença entre a consideração e modelos diferentes é a variação da concentração de materiais existentes na mesma. Logo, a Tabela A.3 demonstra valores de composição mássica (%) para os modelos de baterias considerados, destacando-se que NMC 111 ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Co}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{O}_2$) e NCA ($\text{LiNi}_{0,85}\text{Co}_{0,10}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$) são os cátodos considerados para a reciclagem como alimentação do

processo, e, além disso, as baterias são todas provenientes de BEVs, apesar de a variação de composição com relação a outros modelos de veículos e com relação a baterias de componentes eletrônicos ser baixa. A composição foi calculada em planilha eletrônica com o software Excel®. Todo o balanço de massa, bem como o balanço de energia e o dimensionamento foram calculados em planilha eletrônica, alterando automaticamente os valores com relação a modificações na entrada e no meio do processo.

Tabela A.3 – Composição de entrada no balanço de massa

(continua)

| Componentes da célula (kg) | BEV | | | |
|--|--------------|-------------|----------|---------|
| | NMC 111 (kg) | NMC 111 (%) | NCA (kg) | NCA (%) |
| Material do cátodo ativo | 125,43 | 39,19 | 97,27 | 35,72 |
| Carbônio negro | 2,61 | 0,82 | 2,03 | 0,75 |
| Grafite | 63,67 | 19,9 | 63,87 | 23,45 |
| Aglutinante (PVDF) | 5,96 | 1,86 | 3,33 | 1,22 |
| Cobre | 23,17 | 7,24 | 18,67 | 6,86 |
| Alumínio | 13,13 | 4,10 | 10,70 | 3,93 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 4,55 | 1,42 | 3,83 | 1,41 |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 12,70 | 3,97 | 10,70 | 3,93 |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 12,70 | 3,97 | 10,70 | 3,93 |
| Plástico: Polipropileno | 2,17 | 0,68 | 1,68 | 0,62 |
| Plástico: Polietileno | 0,47 | 0,15 | 0,36 | 0,13 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 0,62 | 0,19 | 0,53 | 0,19 |
| Subtotal: Célula | 267,18 | 83,49 | 223,67 | 82,13 |
| Componentes do módulo sem célula (kg) | | | | |
| Cobre | 0,43 | 0,13 | 0,43 | 0,16 |
| Alumínio | 12,48 | 3,90 | 10,94 | 4,02 |
| Plástico: Polietileno | 0,13 | 0,04 | 0,13 | 0,05 |
| Isolamento | 0,11 | 0,03 | 0,11 | 0,04 |
| Parte eletrônica | 1,12 | 0,35 | 1,12 | 0,41 |
| Subtotal: Módulo sem célula | 14,27 | 4,46 | 12,73 | 4,67 |
| Componentes do pacote sem módulo (kg) | | | | |
| Cobre | 0,09 | 0,03% | 0,09 | 0,03 |
| Alumínio | 31,09 | 9,71 | 29,00 | 10,65 |
| Aço | 1,98 | 0,62 | 1,69 | 0,62 |
| Isolamento | 0,99 | 0,31 | 0,93 | 0,34 |

(conclusão)

| Componentes da célula (kg) | BEV | | | |
|-----------------------------------|------------|--------|--------|--------|
| Refrigerante | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Parte eletrônica | 4,43 | 1,38 | 4,23 | 1,55 |
| Subtotal: Pack sem módulo | 38,58 | 12,06 | 35,94 | 13,20 |
| Total: Bateria | 320,03 | 100,00 | 272,34 | 100,00 |

Fonte: Adaptado de Winjobi et al. (2020).

A partir disso, para o cálculo da vazão mássica de baterias por dia deve-se normalizar a composição para a base mássica desejada, considerando também a fração de cada tipo de bateria utilizada. Espera-se que o setor da qualidade identifique por meio de métodos práticos a composição da bateria logo no recebimento, e assim as planilhas de estoque podem ser atualizadas para o processamento. Dessa forma, a Tabela A.4 define as considerações em fração mássica para baterias de cada tipo de cátodo, e a base mássica adotada, considerando aproximadamente 32 baterias veiculares processadas por dia (ou mais baterias de componentes eletrônicos por dia).

Tabela A.4 – Considerações para a normalização de entrada

| Fração de NMC 111 | Fração de NCA | Vazão mássica (kg/dia) | Vazão mássica de NMC 111 (kg/dia) | Vazão mássica de NCA (kg/dia) |
|--------------------------|----------------------|-------------------------------|--|--------------------------------------|
| 0,80 | 0,20 | 10000,00 | 8000,00 | 2000,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com os valores normalizados, obtém-se a Tabela A.5 de valores parciais para a entrada de matéria-prima.

Tabela A.5 – Valores parciais normalizados para a entrada de matéria-prima

(continua)

| Componentes da célula (kg/dia) | BEV | | | |
|---------------------------------------|------------------|-------------|--------------|---------|
| | NMC 111 (kg/dia) | NMC 111 (%) | NCA (kg/dia) | NCA (%) |
| Material do cátodo ativo | 3135,46 | 39,19 | 714,33 | 35,72 |
| Carbão negro | 65,24 | 0,82 | 14,91 | 0,75 |
| Grafite | 1591,60 | 19,90 | 469,05 | 23,45 |
| Aglutinante (PVDF) | 148,99 | 1,86 | 24,45 | 1,22 |

(conclusão)

| Componentes da célula (kg/dia) | | BEV | | | |
|---|---------|------------------|-------------|--------------|---------|
| Cobre | 579,20 | 7,24 | 137,11 | 6,86 | |
| Alumínio | 328,22 | 4,10 | 78,58 | 3,93 | |
| Eletrólito: LiPF₆ | 113,74 | 1,42 | 28,13 | 1,41 | |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 317,47 | 3,97 | 78,58 | 3,93 | |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 317,47 | 3,97 | 78,58 | 3,93 | |
| Plástico: Polipropileno | 54,24 | 0,68 | 12,34 | 0,62 | |
| Plástico: Polietileno | 11,75 | 0,15 | 2,64 | 0,13 | |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 15,50 | 0,19 | 3,89 | 0,19 | |
| Subtotal: Célula | 6678,87 | 83,49 | 1642,58 | 82,13 | |
| Componentes do módulo sem célula (kg/dia) | | NMC 111 (kg/dia) | NMC 111 (%) | NCA (kg/dia) | NCA (%) |
| Cobre | 10,75 | 0,13 | 3,16 | 0,16 | |
| Alumínio | 311,97 | 3,90 | 80,34 | 4,02 | |
| Plástico: Polietileno | 3,25 | 0,04 | 0,95 | 0,05 | |
| Isolamento | 2,75 | 0,03 | 0,81 | 0,04 | |
| Parte eletrônica | 28,00 | 0,35 | 8,23 | 0,41 | |
| Subtotal: Módulo sem célula | 356,72 | 4,46 | 93,49 | 4,67 | |
| Componentes do pacote sem módulo (kg/dia) | | NMC 111 (kg/dia) | NMC 111 (%) | NCA (kg/dia) | NCA (%) |
| Cobre | 2,25 | 0,03 | 0,66 | 0,03 | |
| Alumínio | 777,18 | 9,71 | 212,97 | 10,65 | |
| Aço | 49,50 | 0,62 | 12,41 | 0,62 | |
| Isolamento | 24,75 | 0,31 | 6,83 | 0,34 | |
| Refrigerante | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| Parte eletrônica | 110,74 | 1,38 | 31,06 | 1,55 | |
| Subtotal: Pack sem módulo | 964,41 | 12,06 | 263,93 | 13,20 | |
| Total: Bateria | 8000,00 | 100,00 | 2000,00 | 100,00 | |

Fonte: Adaptado de Winjobi et al. (2020).

De modo geral, para definir corretamente os valores reais do material ativo do cátodo de cada tipo de bateria, é necessário definir uma razão molar, já que as relações entre os componentes do cátodo não são perfeitas. Assim, utiliza-se a referência da Tabela 5 da composição elementar do material ativo do cátodo, do tópico 2 Referencial Teórico para a definição da massa de cada metal do componente ativo e da relação molar. Portanto, tem-se os

valores da vazão mássica de cada componente considerando o estudo de Porzio & Scown (2021) na Tabela A.6, e os valores da relação molar na Tabela A.7.

Tabela A.6 – Composição mássica do material ativo por cátodo

| Elemento | NMC | | NCA | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Fração mássica | Massa (kg/dia) | Fração mássica | Massa (kg/dia) |
| Li | 0,078 | 244,566 | 0,072 | 51,432 |
| Ni | 0,197 | 617,685 | 0,489 | 349,306 |
| Mn | 0,184 | 576,924 | 0,000 | 0,000 |
| Co | 0,198 | 620,82 | 0,092 | 65,718 |
| Al | 0,000 | 0,000 | 0,014 | 10,001 |
| Fe | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| P | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| O | 0,343 | 1075,461 | 0,333 | 237,871 |
| Total | 1,000 | 3135,456 | 1,000 | 714,328 |

Fonte: Autores (2023).

Tabela A.7 – Relação molar para os materiais ativos de entrada

| Elemento | NMC | | NCA | |
|-----------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | Fração molar | Relação molar | Fração molar | Relação molar |
| Li | 0,263 | 1,052 | 0,249 | 0,997 |
| Ni | 0,079 | 0,314 | 0,200 | 0,801 |
| Mn | 0,078 | 0,313 | 0,000 | 0,000 |
| Co | 0,079 | 0,314 | 0,038 | 0,150 |
| Al | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,050 |
| Fe | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| P | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| O | 0,502 | 2,006 | 0,500 | 2,001 |

Fonte: Autores (2023).

Dessa forma, os valores de alimentação para os processos envolvidos estão presentes na Tabela A.8, considerando a soma dos componentes em comum entre as diferentes baterias.

Tabela A.8 – Composição da alimentação de matéria-prima

(continua)

| Componentes da célula (kg/dia) | Alimentação total por componente (kg/dia) |
|--|--|
| Material do cátodo ativo | |
| Li | 296,00 |
| Ni | 966,99 |
| Mn | 576,92 |
| Co | 686,54 |
| Al | 10,00 |
| Fe | 0,00 |
| P | 0,00 |
| O | 1313,33 |
| Subtotal material do cátodo ativo | 3849,78 |
| Carbono negro | 80,15 |
| Grafite | 2060,65 |
| Aglutinante (PVDF) | 173,44 |
| Cobre | 716,30 |
| Alumínio | 406,80 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 141,87 |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 396,05 |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 396,05 |
| Plástico: Polipropileno | 66,58 |
| Plástico: Polietileno | 14,39 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 19,39 |
| Subtotal: Célula | 8321,45 |
| Componentes do módulo sem célula (kg/dia) | Entrada total por componente (kg/dia) |
| Cobre | 13,91 |
| Alumínio | 392,31 |
| Plástico: Polietileno | 4,20 |
| Isolamento (Al) | 3,56 |
| Parte eletrônica | 36,22 |
| Subtotal: Módulo sem célula | 450,20 |

(conclusão)

| Componentes do pacote sem módulo (kg/dia) | Entrada total por componente (kg/dia) |
|---|---------------------------------------|
| Cobre | 2,91 |
| Alumínio | 990,15 |
| Aço | 61,91 |
| Isolamento (Al) | 31,58 |
| Refrigerante | 0,00 |
| Parte eletrônica | 141,8 |
| Subtotal: Pack sem módulo | 1228,34 |
| Total (NCA + NMC 111) | 10000,00 |

Fonte: Autores (2023).

A.1.1.1 Descarregamento da bateria (EL-101)

A operação de descarregamento elétrico da bateria recebe as unidades para a retirada da energia residual contida pela corrente 1, onde é feita a movimentação pela esteira C-101. Após a descarga pela esteira EL-101, as baterias seguem pela corrente 2 com a esteira C-102 até a desmontagem da bateria (DM-101). Como não há transformação da matéria-prima, os valores em massa estão abaixo:

$$m_{ent,EL-101} = 10000,00 \text{ kg/dia} = m_{sai,EL-101}$$

A.1.1.2 Desmontagem da bateria (DM-101)

A esteira de desmontagem da bateria recebe os pacotes da corrente 2 pela esteira C-102. Os componentes do pacote e a parte eletrônica são retirados manualmente, sendo armazenados nos TK-101A, TK-101B e TK-101C. O módulo sem a parte eletrônica segue para o processo pela corrente 5 com a esteira fechada C-103. A Tabela A.9 demonstra o balanço de massa da separação.

Tabela A.9 – Balanço de massa para o DM-101

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|-------------------------|------------------------|---------------|----------------------|------------|-------------|
| | Corrente 2 | Entrada total | Corrente 5 | Corrente 3 | Saída total |
| Subtotal: Célula | 8321,45 | 8321,45 | 8321,45 | 0,00 | 8321,45 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|---------------|----------------------|------------|-------------|
| | Corrente 2 | Entrada total | Corrente 5 | Corrente 3 | Saída total |
| Componentes do módulo sem célula (kg/dia) | | | | | |
| Cobre | 13,91 | 13,91 | 13,91 | 0,00 | 13,91 |
| Alumínio | 392,31 | 392,31 | 392,31 | 0,00 | 392,31 |
| Plástico: Polietileno | 4,20 | 4,20 | 4,20 | 0,00 | 4,2 |
| Isolamento (Al) | 3,56 | 3,56 | 3,56 | 0,00 | 3,56 |
| Parte eletrônica | 36,22 | 36,22 | 0,00 | 36,22 | 36,22 |
| Subtotal: Módulo sem célula | 450,2 | 450,2 | 450,20 | 0,00 | 450,2 |
| Componentes do pacote sem módulo (kg/dia) | | | | | |
| Cobre | 2,91 | 2,91 | 0,00 | 2,91 | 2,91 |
| Alumínio | 990,15 | 990,15 | 0,00 | 990,15 | 990,15 |
| Aço | 61,91 | 61,91 | 0,00 | 61,91 | 61,91 |
| Isolamento (Al) | 31,58 | 31,58 | 0,00 | 31,58 | 31,580 |
| Parte eletrônica | 141,8 | 141,8 | 0,00 | 141,8 | 141,80 |
| Subtotal: Pack sem módulo | 1228,34 | 1228,34 | 0,00 | 1264,57 | 1264,57 |
| Total por corrente (kg/dia) | 10000,00 | 10000,00 | 8735,43 | 1264,57 | 10000,00 |
| Total (kg/dia) | | 10000,00 | | 10000,00 | |

Fonte: Autores (2022).

A.1.1.3 Tanques de estocagem de peças (TK-101A, TK-101B e TK-101C)

As peças são separadas consoante a peculiaridade do material, selecionando-se manualmente os componentes. O TK-101 é dividido em 3 tanques para esses, e os valores envolvidos no balanço de massa pode não ser coerente com a separação grosseira envolvida, já que muitas vezes o material de construção (Al) do pacote pode estar incrustado em outros materiais, e vice-versa. A Tabela A.10 demonstra os valores do balanço de massa para estes.

Tabela A.10 – Balanço de massa para o TK-101

| Tanque TK-101 | Componente | Corrente 3 (kg/dia) | Corrente 4 (kg/dia) |
|----------------|----------------|---------------------|---------------------|
| TK-101A | Al | 1021,72 | 1021,72 |
| TK-101B | Eletrônicos | 178,03 | 178,03 |
| TK-101C | Cu e Aço | 64,82 | 64,82 |
| TK-101 | Total (kg/dia) | 1264,57 | 1264,57 |

Fonte: Autores (2023).

A.1.1.4 Moinho (SR-101)

Para o moinho *rotorshredder*, a matéria-prima é alimentada proveniente da desmontagem em forma de módulos pela com a esteira C-103. O moinho também recebe N₂ para a inertização da atmosfera de moagem, para garantir a segurança da operação, sendo reciclado, considerando perdas de 5% por dia, como consideração. A matéria-prima cominuída é encaminhada pela corrente 9 com o transportador helicoidal até o primeiro estágio da extração do eletrólito (EX-201).

A composição da matéria-prima no SR-101 não muda, sendo a composição da corrente 5 de saída do DM-101 presente na Tabela A.9 para o DM-101, pois se considera sem perdas de sólidos na moagem. Porém, deve-se considerar a entrada do N₂ no processo em contato com a pasta, e assim tem-se a Tabela A.11 para o balanço do SR-101.

Tabela A.11 – Balanço de massa para o SR-101

| | | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|----------------------|------------|------------------------|------------------------|-------------|----------------------|------------|----------------------|
| SR-101 | Corrente 5 | Corrente 7 | Entrada por componente | Corrente 10 | Corrente 8 | Corrente 9 | Saída por componente |
| Pasta | 8735,43 | 0,00 | 8735,43 | 8735,43 | 0,00 | 0,00 | 8735,43 |
| N₂ | 0,00 | 162,79 | 162,79 | 0,00 | 154,65 | 8,14 | 162,79 |
| Total | | 8898,22 | | | 8898,22 | | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.1.5 Vazões mássicas por corrente (Área 100)

Algumas correntes não são demonstradas em todos os tópicos, por isso os valores estão presentes na Tabela A.12. A corrente apresentada é a vazão mássica total da corrente, calculada com o balanço de massa de cada equipamento e presente no Apêndice A.1.

Tabela A.12 – Vazões mássicas por corrente na Área 100

| Corrente | Vazão mássica (kg/dia) |
|-----------------|-------------------------------|
| 1 | 10000,00 |
| 2 | 10000,00 |
| 3 | 1264,57 |
| 4 | 1264,57 |
| 5 | 8735,43 |
| 6 | 8,14 |
| 7 | 162,79 |
| 8 | 154,65 |
| 9 | 8,14 |
| 10 | 8735,43 |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2 Área 200

A.1.2.1 Extrator misturador decantador (EX-201)

O EX-201 recebe os sólidos com o transportador helicoidal em forma de pasta, cominuídos pelo moinho SR-101. O misturador dilui e extrai o LiPF_6 , para minimizar problemas em processos de secagem e demais operações. A eficiência de extração está presente na Tabela 12 do detalhamento do diagrama de blocos do processo no item dos extratores. O balanço de massa considera essa eficiência de remoção e os valores estão na Tabela A.13.

Tabela A.13 – Balanço de massa para o EX-201

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|-------------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 10 | Corrente 18 | Entrada total por componente | Corrente 11 | Corrente 19 | Saída total por componente |
| Componentes da célula cominuída (kg/dia) | | | | | | |
| Material do cátodo ativo | 3849,78 | 0,00 | 3849,78 | 3849,78 | 0,00 | 3849,78 |
| Carbono negro | 80,15 | 0,00 | 80,15 | 80,15 | 0,00 | 80,15 |
| Grafite | 2060,65 | 0,00 | 2060,65 | 2060,65 | 0,00 | 2060,65 |
| Aglutinante (PVDF) | 173,44 | 0,00 | 173,44 | 173,44 | 0,00 | 173,44 |
| Cobre | 716,30 | 0,00 | 716,30 | 716,30 | 0,00 | 716,30 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | | | | | | |
| Alumínio | 406,80 | 0,00 | 406,80 | 406,80 | 0,00 | 406,80 |
| Eletrólito: LiPF ₆ | 141,87 | 0,00 | 141,87 | 14,29 | 127,58 | 141,87 |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 396,05 | 0,00 | 396,05 | 0,00 | 396,05 | 396,05 |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 396,05 | 0,00 | 396,05 | 0,00 | 396,05 | 396,05 |
| Plástico: Polipropileno | 66,58 | 0,00 | 66,58 | 0,00 | 66,58 | 66,58 |
| Plástico: Polietileno | 14,39 | 0,00 | 14,39 | 0,00 | 14,39 | 14,39 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 19,39 | 0,00 | 19,39 | 19,39 | 0,00 | 19,39 |
| Componentes do módulo cominuídos (kg/dia) | Corrente 10 | Corrente 18 | Entrada total por componente | Corrente 11 | Corrente 19 | Saída total por componente |
| Cobre | 13,91 | 0,00 | 13,91 | 13,91 | 0,00 | 13,91 |
| Alumínio | 392,31 | 0,00 | 392,31 | 392,31 | 0,00 | 392,31 |
| Plástico: Polietileno | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 0,00 | 4,20 | 4,20 |
| Isolamento | 3,56 | 0,00 | 3,56 | 3,56 | 0,00 | 3,56 |
| Parte eletrônica e Aço contaminantes | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Reciclo (kg/dia) | Corrente 10 | Corrente 18 | Entrada total por componente | Corrente 11 | Corrente 19 | Saída total por componente |
| DMC | 0,00 | 77163,50 | 77163,50 | 23149,05 | 54014,45 | 77163,50 |
| Eletrólito: LiPF ₆ (outros estágios) | 0,00 | 14,28 | 14,28 | 0,00 | 14,28 | 14,28 |
| Total por corrente (kg/dia) | 8735,43 | 77177,77 | 85913,21 | 30879,63 | 55033,58 | 85913,21 |
| Total (kg/dia) | | 85913,21 | | | 85913,21 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.2 Filtro centrífugo (FC-201)

O filtro FC-201 recebe o líquido com uma concentração baixíssima de sólidos proveniente do EX-201. O líquido é carregado de LiPF₆ sendo separado para processamento posterior. Os sólidos são transportados com a esteira C-201 e seguem para secagem no DE-201. A Tabela A.14 demonstra o balanço de massa para o filtro.

Tabela A.14 – Balanço de massa para o FC-201

| Componente | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 19 | Entrada total por componente | Corrente 21 | Corrente 20 | Saída total por componente |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 54410,50 | 54410,50 | 54410,50 | 0,00 | 54410,50 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 141,86 | 141,86 | 141,86 | 0,00 | 141,86 |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 396,05 | 396,05 | 396,05 | 0,00 | 396,05 |
| Plástico: Polipropileno | 66,58 | 66,58 | 0,00 | 66,58 | 66,58 |
| Plástico: Polietileno | 18,60 | 18,60 | 0,00 | 18,60 | 18,60 |
| Total por corrente (kg/dia) | 55033,58 | 55033,58 | 54948,40 | 85,18 | 55033,58 |
| Total (kg/dia) | | 55033,58 | | 55033,58 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.3 Tanque de retenção (TK-201)

O TK-201 recebe a fração líquida proveniente do FC-201, onde a composição é basicamente o eletrólito com excesso de DMC. Além disso, ele também recebe a fração líquida proveniente do CF-201, no qual a composição também é basicamente o eletrólito em concentração baixíssima e DMC. A composição pode ser vista da Tabela A.14 e da Tabela A.20. Não há acúmulos nem perdas, portanto, todo o líquido é passado, assim o balanço de massa é visto na sequência.

$$m_{ent,TK-201} = 76940,00 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-201}$$

A.1.2.4 Evaporador (D-201)

O D-201 recebe a corrente líquida do TK-201, e separa boa parte do solvente de extração (DMC) para reciclo no processo. Assim, a corrente de topo é composta basicamente de DMC, e a corrente de fundo é composta do eletrólito com uma parcela de DMC. A eficiência de separação do DMC pela sua maior volatilidade em comparação com o resto, foi considerada

em 99,50%, levando em consideração a grande diferença de ponto de ebulição dos compostos separados. Os valores do balanço de massa estão presentes na Tabela A.15.

Tabela A.15 – Balanço de massa para o D-201

| Componente | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 22 | Entrada total por componente | Corrente 23 | Corrente 25 | Saída total por componente |
| Eletrólito: Carbonato de Dimetil | 76402,09 | 76402,09 | 382,01 | 76020,08 | 76402,09 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 141,86 | 141,86 | 141,86 | 0,00 | 141,86 |
| Eletrólito: Carbonato de Etileno | 396,05 | 396,05 | 396,05 | 0,00 | 396,05 |
| Total parcial (kg/dia) | 76940,00 | 76940,00 | 919,92 | 76020,08 | 76940,00 |
| Total (kg/dia) | | 76940,00 | | 76940,00 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.5 Tanque de retenção (TK-202)

O TK-202 recebe o eletrólito separado proveniente do D-201. A composição é a demonstrada no balanço de massa do D-201, e o tanque de retenção efetua o armazenamento temporário dos componentes até uma descarga programada. O balanço de massa é visto abaixo.

$$m_{ent,TK-202} = 919,92 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-202}$$

A.1.2.6 Condensador (E-201)

O E-201 condensa o vapor de DMC gerado no D-201, recebendo a alimentação da corrente de topo do D-201. O balanço de massa do E-201 é visto abaixo, sem perdas nem acúmulos.

$$m_{ent,E-201} = 76020,08 \text{ kg/dia} = m_{sai,E-201}$$

A.1.2.7 Resfriador (E-202)

O E-202 resfria o líquido de DMC condensado pelo E-201, recebendo a alimentação pela corrente de saída do E-201. O balanço de massa é visto abaixo.

$$m_{ent,E-202} = 76020,08 \text{ kg/dia} = m_{sai,E-202}$$

A.1.2.8 Tanque de retenção (TK-203)

O TK-203 recebe o DMC reciclado, e também possui entrada de DMC para as perdas ocasionadas pelo processo de secagem (já que a CF-201 não retira todo o DMC). O balanço de massa sem acúmulo nem perdas é visto abaixo.

$$m_{ent,TK-203} = 76020,08 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-203}$$

A.1.2.9 Extrator misturador decantador (EX-202)

O EX-202 é o segundo estágio de separação, e o processo possui uma operação similar ao EX-201. Considerou-se que a concentração de LiPF_6 do eletrólito não afeta a concentração de LiPF_6 provenientes de outros estágios. Logo, a saída e entrada pode ser parecida, porém, o valor real de LiPF_6 de cada corrente é demonstrado apenas na própria corrente. O balanço de massa é visto na Tabela A.16.

Tabela A.16 – Balanço de massa para o EX-202

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 11 | Corrente 17 | Entrada total por componente | Corrente 12 | Corrente 18 | Saída total por componente |
| Sólidos | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 14,29 | 0,00 | 14,29 | 1,38 | 12,90 | 14,29 |
| DMC | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 |
| Eletrólito: LiPF₆ (outros estágios) | 0,00 | 1,38 | 1,38 | 0,00 | 1,38 | 1,38 |
| Total por correntes (kg/dia) | 30879,63 | 77164,87 | 108044,50 | 30866,72 | 77177,77 | 108044,50 |
| Total (kg/dia) | | 108044,50 | | | 108044,50 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.10 Extrator misturador decantador (EX-203)

A Tabela A.17 demonstra o balanço de massa para o EX-203. Percebe-se que a concentração de LiPF₆ é baixíssima ao longo dos estágios.

Tabela A.17 – Balanço de massa para o EX-203

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 12 | Corrente 16 | Entrada total por componente | Corrente 13 | Corrente 17 | Saída total por componente |
| Sólidos | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 1,38 | 0,00 | 1,38 | 0,28 | 1,10 | 1,38 |
| DMC | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 |
| Eletrólito: LiPF₆ (outros estágios) | 0,00 | 0,28 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,28 |
| Total por correntes (kg/dia) | 30866,72 | 77163,77 | 108030,49 | 30455,85 | 77164,87 | 108030,49 |
| Total (kg/dia) | | 108030,49 | | | 108030,49 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.11 Extrator misturador decantador (EX-204)

A Tabela A.18 apresenta o balanço de massa para o EX-204.

Tabela A.18 – Balanço de massa para o EX-204

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|----------------|---------------------------------|----------------------|----------------|-------------------------------|
| | Corrente 13 | Corrente 15 | Entrada total por componente | Corrente 14 | Corrente 16 | Saída total por componente |
| Sólidos | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,06 | 0,22 | 0,28 |
| DMC | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 |
| Eletrólito: LiPF₆ (outros estágios) | 0,00 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,05 | 0,05 |
| Total por correntes (kg/dia) | 30865,62 | 77163,55 | 108029,17 | 30865,40 | 77163,77 | 108029,17 |
| Total (kg/dia) | | 108029,17 | | | 108029,17 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.12 Extrator misturador decantador (EX-205)

A Tabela A.19 apresenta o balanço de massa para o EX-205.

Tabela A.19 – Balanço de massa do EX-205

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|----------------|---------------------------------|----------------------|----------------|-------------------------------|
| | Corrente 14 | Corrente 29 | Entrada total por componente | Corrente 30 | Corrente 15 | Saída total por componente |
| Sólidos | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 |
| Eletrólito: LiPF₆ | 0,06 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 0,05 | 0,06 |
| DMC | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 | 23149,05 | 77163,50 | 100312,54 |
| Eletrólito: LiPF₆ (outros estágios) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por correntes (kg/dia) | 30865,40 | 77163,50 | 108028,89 | 30865,35 | 77163,55 | 108028,89 |
| Total (kg/dia) | | 108028,89 | | | 108028,89 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.13 Centrífuga (CF-201)

A CF-201 separa boa parte do DMC carregado com os sólidos, e assim é possível recuperar muito solvente que pode ser reciclado também nas extrações. Considerou-se uma recuperação de 95% de DMC na CF-201, garantindo também menor gasto energético etapa posterior de secagem (DE-201). A Tabela A.20 apresenta o balanço de massa.

Tabela A.20 – Balanço de massa para o CF-201

| Componentes | Entrada total | | Saída total | | |
|------------------------------------|---------------|------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 30 | Entrada total por componente | Corrente 32 | Corrente 31 | Saída total por componente |
| Sólidos | 7716,29 | 7716,29 | 7716,29 | 0,00 | 7716,29 |
| DMC | 23149,06 | 23149,06 | 1157,46 | 21991,60 | 23149,06 |
| Total por corrente (kg/dia) | 30865,35 | 30865,35 | 8873,75 | 21991,60 | 30865,35 |
| Total (kg/dia) | 30865,35 | | 30865,35 | | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.14 Secador de esteira (DE-201)

Para o secador de esteira, considera-se que todo o solvente DMC saia com o ar quente de secagem. É uma consideração coerente pela volatilidade do solvente, e pela baixa concentração deste no meio. Os dados de balanço de massa estão na Tabela A.21.

Tabela A.21 – Balanço de massa para o DE-201

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | | Saída total (kg/dia) | | |
|------------------------------------|------------------------|-------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 32 | Corrente 20 | Corrente 33 | Entrada total por componente | Corrente 35 | Corrente 34 | Saída total por componente |
| Sólidos | 7716,28 | 0,00 | 0,00 | 7716,28 | 7716,28 | 0,00 | 7716,29 |
| LiPF₆ | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Plástico: Polipropileno | 0,00 | 66,58 | 0,00 | 66,58 | 66,58 | 0,00 | 66,58 |
| Plástico: Polietileno | 0,00 | 18,60 | 0,00 | 18,60 | 18,60 | 0,00 | 18,60 |
| DMC | 1157,46 | 0,00 | 0,00 | 1157,46 | 0,00 | 1157,46 | 1157,46 |
| Ar quente | 0,00 | 0,00 | 52407,39 | 52407,39 | 0,00 | 52407,39 | 52407,39 |
| Total por corrente (kg/dia) | 8873,75 | 85,18 | 52407,39 | 61366,32 | 7801,47 | 53564,86 | 61366,32 |
| Total (kg/dia) | 61366,32 | | | 61366,32 | | | |

Fonte: Autores (2023).

Como segurança, calcula-se a concentração de LiPF₆ na saída 33 que possui direção para a caldeira. Essa concentração deve estar baixíssima para a atuação de um lavador de gases na saída da caldeira. A Equação A.7 determina a concentração.

$$C_i = \frac{m_i}{m_t} \quad (\text{A.6})$$

Onde:

C_i – Concentração de i (kg de i /kg total)

m_i – Vazão mássica de i na corrente (kg/dia)

m_t – Vazão mássica total da corrente (kg/dia)

Para o LiPF_6 , tem-se o valor abaixo presente na corrente direcionada a caldeira.

$$C_{\text{LiPF}_6} = 1,87 \cdot 10^{-7} = 186,7 \text{ ppb de LiPF}_6$$

A.1.2.15 Peneira vibratória (S-201)

Para a peneira vibratória, considerou-se que boa parte dos materiais de construção da bateria (ao nível de módulo e célula) saem na etapa de peneiramento, já que esses materiais possuem uma granulometria maior que os pós (tanto de material ativo catódico quanto anódico). Assim, estimou-se que aproximadamente 90% dos materiais de construção e eletrodos de maior granulometria saiam nessa etapa, o que é um bom valor, já que os pós são soltos com todas as operações unitárias anteriores.

Além disso, considerou-se também uma saída de 60% de todo aglutinante (PVDF) com os materiais de construção, já que a cola é muito agregada aos eletrodos. Para os pós, considerou-se uma perda de 0,10% em massa, já que se espera que muito pouco desse material saia em granulometrias maiores que $250 \mu\text{m}$. Os dados do balanço de massa para o S-201 estão na Tabela A.22.

Tabela A.22 – Balanço de massa para o S-201

(continua)

| Componente | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|---------------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 35 | Entrada total por componente | Corrente 44 | Corrente 36 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 3849,78 | 3849,78 | 3845,93 | 3,85 | 3849,78 |
| Componentes da célula | Corrente 35 | Entrada total por componente | Corrente 44 | Corrente 36 | Saída total por componente |
| Carbono negro | 80,15 | 80,15 | 80,07 | 0,08 | 80,15 |
| Grafite | 2060,65 | 2060,65 | 2058,59 | 2,06 | 2060,65 |

(conclusão)

| Componente | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| Aglutinante (PVDF) | 173,44 | 173,44 | 69,38 | 104,06 | 173,44 |
| Cobre | 716,30 | 716,30 | 71,63 | 644,67 | 716,30 |
| Alumínio | 406,80 | 406,80 | 40,68 | 366,12 | 406,80 |
| Plástico: Polipropileno | 66,58 | 66,58 | 6,66 | 59,92 | 66,58 |
| Plástico: Polietileno | 18,60 | 18,60 | 1,86 | 16,74 | 18,60 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 19,39 | 19,39 | 1,94 | 17,45 | 19,39 |
| Módulo cominuído (kg/dia) | Corrente 35 | Entrada total por componente | Corrente 44 | Corrente 36 | Saída total por componente |
| Cobre | 13,91 | 13,91 | 1,39 | 12,52 | 0,00 |
| Alumínio | 392,31 | 392,31 | 39,23 | 353,08 | 13,91 |
| Plástico: Polietileno | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 392,31 |
| Isolamento (Al) | 3,56 | 3,56 | 0,36 | 3,20 | 0,00 |
| Parte eletrônica + Aço (contaminantes) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,56 |
| Total por corrente (kg/dia) | 7801,47 | 7801,47 | 6217,71 | 1583,76 | 7801,47 |
| Total (kg/dia) | 7801,47 | | 7801,47 | | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.16 Separador magnético (MS-201)

Com a alimentação da corrente 36 no MS-201, percebe-se que não há a consideração de contaminantes de aço ou partes eletrônicas. Dessa forma, o MS-201 serve apenas como um equipamento de controle e necessidades ocasionais de descontaminação de metais fortemente magnéticos. Por isso, seu balanço de massa é descrito abaixo.

$$m_{ent,MS-201} = 1583,76 \text{ kg/dia} = m_{sai,MS-201}$$

A.1.2.17 Separador eletrostático (ES-201)

Para os cálculos de balanço para o ES-201, considerou-se os dados de eficiência obtidos de Bertuol et al. (2017), para a eficiência de seleção de materiais condutivos em 99%, e a eficiência de seleção de materiais pouco condutivos em 99,6%. Assim, as parcelas separadas

podem estar um pouco misturadas, porém, pela eficiência ser grande, as contaminações são mínimas. Um processamento adicional pode ser feito, em caso de revenda dos materiais. A Tabela A.23 define o balanço de massa.

Tabela A.23 – Balanço de massa do ES-201

| Componente | Entrada total (kg/dia) | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 39 | Entrada total por componente | Corrente 40 | Corrente 42 | Saída total por componente |
| Material ativo do cátodo | 3,85 | 3,85 | 3,81 | 0,04 | 3,85 |
| Carbono negro | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,00 | 0,08 |
| Grafite | 2,06 | 2,06 | 2,04 | 0,02 | 2,06 |
| Aglutinante (PVDF) | 104,06 | 104,06 | 103,02 | 1,04 | 104,06 |
| Cobre | 657,19 | 657,19 | 650,62 | 6,57 | 657,19 |
| Alumínio | 722,40 | 722,40 | 715,18 | 7,22 | 722,40 |
| Plástico: Polipropileno | 59,92 | 59,92 | 0,24 | 59,68 | 59,92 |
| Plástico: Polietileno | 16,74 | 16,74 | 0,07 | 16,67 | 16,74 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 17,45 | 17,45 | 0,07 | 17,38 | 17,45 |
| Parte eletrônica + Aço (contaminantes) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 1583,76 | 1583,76 | 1475,12 | 108,63 | 1583,76 |
| Total (kg/dia) | | 1583,76 | | 1583,76 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.18 Tanques de sólidos (TK-204, TK-205 e TK-206)

O TK-204, TK-205 e TK-206 efetuam apenas o armazenamento temporário dos sólidos separados, e assim não há nenhuma separação, nem perdas e nem acúmulo. Dessa forma, a composição do material para cada reator é a composição de cada corrente de entrada nos tanques. Assim, tem-se os valores do balanço abaixo.

$$m_{ent,TK-204} = 0,00 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-204}$$

$$m_{ent,TK-205} = 1475,12 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-205}$$

$$m_{ent,TK-206} = 108,63 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-206}$$

A.1.2.19 Flotador (FL-201)

O FL-201 efetua etapas de separação do grafite e de componentes hidrofóbicos. Assim, considerou-se uma eficiência de 95% na remoção de componentes hidrofóbicos, e uma remoção de 10% de materiais ativos do cátodo, pelos dados obtidos de Zhan, Oldenburg e Pan (2018). Portanto, tem-se o balanço de massa na Tabela A.24.

Tabela A.24 – Balanço de massa para o FL-201

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | | Saída total (kg/dia) | | | |
|--|------------------------|-------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 44 | Corrente 46 | Corrente 47 | Entrada total por componente | Corrente 49 | Corrente 50 | Corrente 48 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 3845,93 | 0,00 | 0,00 | 3845,93 | 3461,34 | 384,59 | 0,00 | 3845,93 |
| Carbão negro | 80,07 | 0,00 | 0,00 | 80,07 | 4,00 | 76,07 | 0,00 | 80,07 |
| Grafite | 2058,59 | 0,00 | 0,00 | 2058,59 | 102,93 | 1955,66 | 0,00 | 2058,59 |
| Aglutinante (PVDF) | 69,38 | 0,00 | 0,00 | 69,38 | 3,47 | 65,91 | 0,00 | 69,38 |
| Cobre | 71,63 | 0,00 | 0,00 | 71,63 | 71,63 | 0,00 | 0,00 | 71,63 |
| Alumínio | 40,68 | 0,00 | 0,00 | 40,68 | 40,68 | 0,00 | 0,00 | 40,68 |
| Plástico: Polipropileno | 6,66 | 0,00 | 0,00 | 6,66 | 0,33 | 6,33 | 0,00 | 6,66 |
| Plástico: Polietileno | 1,86 | 0,00 | 0,00 | 1,86 | 0,09 | 1,77 | 0,00 | 1,86 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 1,94 | 0,00 | 0,00 | 1,94 | 0,10 | 1,84 | 0,00 | 1,94 |
| Sólidos do módulo | 40,98 | 0,00 | 0,00 | 40,98 | 40,98 | 0,00 | 0,00 | 40,98 |
| Utilidades | Corrente 44 | Corrente 46 | Corrente 47 | Entrada total por componente | Corrente 49 | Corrente 50 | Corrente 48 | Saída total por componente |
| Água | 0,00 | 12435,43 | 0,00 | 12435,43 | 11191,88 | 1243,54 | 0,00 | 12435,43 |
| Querosene | 0,00 | 12,44 | 0,00 | 12,44 | 0,00 | 12,44 | 0,00 | 12,44 |
| Ar | 0,00 | 0,00 | 8,69 | 8,69 | 0,00 | 0,00 | 8,69 | 8,69 |

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------|----------|------|----------|----------|---------|------|----------|
| Total por corrente (kg/dia) | 6217,71 | 12447,86 | 8,69 | 18674,27 | 14917,44 | 3748,14 | 8,69 | 18674,27 |
| Total (kg/dia) | 18674,27 | | | 18674,27 | | | | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.2.20 Tanque de dosagem (TK-207)

O TK-207 dosa a quantidade de querosene requisitada para o FL-201, como visto na corrente 45 da Tabela A.24. Assim, tem-se a composição, e o valor em massa está presente abaixo, considerando sem acúmulos ou perdas.

$$m_{ent,TK-207} = 12447,86 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-207}$$

A.1.2.21 Vazões por corrente (Área 200)

Algumas correntes não são demonstradas em todos os tópicos, por isso os valores estão presentes na Tabela A.25.

Tabela A.25 – Vazões mássicas por corrente na Área 200

(continua)

| Corrente | Vazão mássica (kg/dia) | Corrente | Vazão mássica (kg/dia) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 10 | 8735,43 | 30 | 30865,35 |
| 11 | 30879,63 | 31 | 21991,60 |
| 12 | 30866,72 | 32 | 8873,75 |
| 13 | 30865,62 | 33 | 52407,39 |
| 14 | 30865,40 | 34 | 53564,85 |
| 15 | 77163,55 | 35 | 7801,47 |
| 16 | 77163,77 | 36 | 1583,76 |
| 17 | 77164,87 | 37 | 0,00 |
| 18 | 77177,77 | 38 | 0,00 |
| 19 | 55033,58 | 39 | 1583,76 |
| 20 | 54948,40 | 40 | 1475,12 |
| 21 | 76940,00 | 41 | 1475,12 |
| 22 | 76940,00 | 42 | 108,63 |

| Corrente | Vazão mássica (kg/dia) | Corrente | Vazão mássica (kg/dia) |
|----------|------------------------|----------|------------------------|
| 23 | 919,92 | 43 | 108,63 |
| 24 | 919,92 | 44 | 6217,71 |
| 25 | 76020,08 | 45 | 12447,86 (conclusão) |
| 26 | 76020,08 | 46 | 12447,86 |
| 27 | 76020,08 | 47 | 8,69 |
| 28 | 1143,41 | 48 | 8,69 |
| 29 | 77163,50 | 49 | 14917,44 |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3 Área 300

A.1.3.1 Reator de lixiviação (R-301)

O cálculo do processo de lixiviação foi realizado em comum com o balanço de energia e demais dimensionamentos. Assim, as reações químicas envolvidas podem ser vistas no tópico 5 do Projeto do Processo, bem como equações para o cálculo cinético. Portanto, utilizou-se dados cinéticos de He et al. (2017), presente na Equação A.7 para a determinação do tempo em que 99,99% da alimentação seja transformada e lixiviada. O valor em tempo foi determinado pela Equação 18 do tópico 5 de lixiviação no Projeto do Processo. O tempo está presente na Equação A.8, e considera apenas a reação de superfície nos sólidos, já que os outros mecanismos presentes podem ser desprezíveis. Além disso, apesar de o tempo ser um valor calculado, pode-se adotar outro valor para o tempo de residência dos componentes para garantir a lixiviação completa.

$$k_{NMC} = k_{NCA} = 0,24654 \text{ min}^{-1} \quad (\text{A.7})$$

$$t_{R-301} = 3,80 \text{ min} \quad (\text{A.8})$$

Onde:

k - Constante cinética da reação, 1/min

t - Tempo de reação, min

O valor é coerente com os valores encontrados por He et al. (2017), e assim define-se as demandas da solução ácida com agente redutor. O estudo baseado na literatura utilizou uma concentração de H₂SO₄ e H₂O₂ mais branda, e o projeto atual define uma concentração 2,00 M para o H₂SO₄ e um excesso de 20% de H₂O₂ sobre as demandas da reação. Os cálculos de diluição foram feitos com auxílio do HSC Chemistry®, porém também foram recalculados em planilhas eletrônicas, utilizando as equações padrão para a diluição (Equação A.9 e A.10). Além disso, considerou-se também uma concentração de sólidos em solução de aproximadamente 120 kg sólidos/m³ de solução, sendo um requisito de diluição para a posterior solubilidade dos sais formados. O pH da solução foi calculado em -0,60, sendo um ótimo valor para a lixiviação dos metais.

$$M_i = \frac{n_i}{V} \quad (\text{A.9})$$

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad (\text{A.10})$$

Onde:

M_i - Molaridade do componente i da solução, mol/L

n_i - Número de mols do componente i na solução, mol

V - Volume total da solução, L

C₁ - Concentração na etapa 1, mol/L

C₂ - Concentração na etapa 2, mol/L

V₁ - Volume da solução na etapa 1, L

V₂ - Volume da solução na etapa 2, L

Com a eficiência de 99,99% considerada, o balanço de massa é calculado para o R-301. Os valores estão presentes na Tabela A.26.

Tabela A.26 – Balanço de massa para o R-301

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---------------------------------|------------------------|-------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 50 | Corrente 53 | Corrente 55 | Entrada total por componente | Corrente 57 | Corrente 56 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 384,59 | 0,00 | 0,00 | 384,59 | 0,04 | 0,00 | 0,04 |
| Carbono negro | 76,07 | 0,00 | 0,00 | 76,07 | 76,07 | 0,00 | 76,07 |

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | | | | | | | |
| Grafite | 1955,66 | 0,00 | 0,00 | 1955,66 | 1955,66 | 0,00 | 1955,66 |
| Aglutinante (PVDF) | 65,91 | 0,00 | 0,00 | 65,91 | 65,91 | 0,00 | 65,91 |
| Cobre | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | (conclusão) |
| Alumínio | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Plástico: Polipropileno | 6,33 | 0,00 | 0,00 | 6,33 | 6,33 | 0,00 | 6,33 |
| Plástico: Polietileno | 1,77 | 0,00 | 0,00 | 1,77 | 1,77 | 0,00 | 1,77 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 1,84 | 0,00 | 0,00 | 1,84 | 1,84 | 0,00 | 1,84 |
| Transformados | Corrente 50 | Corrente 53 | Corrente 55 | Entrada total por componente | Corrente 57 | Corrente 56 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 233,90 | 0,00 | 233,90 |
| NiSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 258,96 | 0,00 | 258,96 |
| MnSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 155,59 | 0,00 | 155,59 |
| CoSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 178,81 | 0,00 | 178,81 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,83 | 0,00 | 6,83 |
| O₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 50,95 | 50,95 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 50 | Corrente 53 | Corrente 55 | Entrada total por componente | Corrente 57 | Corrente 56 | Saída total por componente |
| Água | 1243,54 | 825,80 | 886,68 | 2956,02 | 3083,54 | 0,00 | 3083,54 |
| Querosene | 12,44 | 0,00 | 0,00 | 12,44 | 12,44 | 0,00 | 12,44 |
| H₂SO₄ | 0,00 | 628,67 | 0,00 | 628,67 | 35,82 | 0,00 | 35,82 |
| H₂O₂ | 0,00 | 42,20 | 0,00 | 42,20 | 7,04 | 0,00 | 7,04 |
| Total por corrente (kg/dia) | 3748,14 | 1496,67 | 886,68 | 6131,49 | 6080,52 | 50,95 | 6131,47 |
| Total (kg/dia) | 6131,49 | | | 6131,49 | | | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.2 Misturador de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio (M-301)

O balanço de massa do M-301 não considera perdas, reações ou acúmulos, e sua composição é a da corrente 53 presente na Tabela A.26 do R-301. Assim, o balanço de massa é obtido abaixo.

$$m_{ent,M-301} = 1496,67 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-301}$$

A.1.3.3 Filtro rotativo (FG-301)

O FG-301 separa a fração sólida da solubilizada pela etapa de lixiviação, e também não é considerado acúmulo de material. Considerou-se uma eficiência de separação dos materiais sólidos em 95%, e perdas de solução em 0,1%. As perdas baixas da solução podem ser argumentadas pela lavagem da torta filtrante ao longo da etapa de rotação da torta. Essa lavagem considera a passagem de 0,20 kg de água/kg de sólidos filtrados, e a fase líquida com excedente de água é retornada para o processo. Assim, a Tabela A.27 demonstra o balanço de massa.

Tabela A.27 – Balanço de massa para o FG-301

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 57 | Corrente 58 | Entrada total por componente | Corrente 61 | Corrente 59 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,04 | 0,04 |
| Carbono negro | 76,07 | 0,00 | 76,07 | 3,80 | 72,26 | 76,07 |
| Grafite | 1955,66 | 0,00 | 1955,66 | 97,78 | 1857,87 | 1955,66 |
| Aglutinante (PVDF) | 65,91 | 0,00 | 65,91 | 3,30 | 62,61 | 65,91 |
| Cobre | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Alumínio | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Plástico: Polipropileno | 6,33 | 0,00 | 6,33 | 0,32 | 6,01 | 6,33 |
| Plástico: Polietileno | 1,77 | 0,00 | 1,77 | 0,09 | 1,68 | 1,77 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 1,84 | 0,00 | 1,84 | 0,09 | 1,75 | 1,84 |
| Transformados | Corrente 57 | Corrente 58 | Entrada total por componente | Corrente 61 | Corrente 59 | Saída total por componente |

(continuação)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | | | | | | |
| Li₂SO₄ | 233,90 | 0,00 | 233,90 | 233,67 | 0,23 | 233,90 |
| NiSO₄ | 258,96 | 0,00 | 258,96 | 258,70 | 0,26 | 258,96 |
| MnSO₄ | 155,59 | 0,00 | 155,59 | 155,43 | 0,16 | 155,59 |
| CoSO₄ | 178,81 | 0,00 | 178,81 | 178,63 | 0,18 | (conclusão) |
| Al₂(SO₄)₃ | 6,83 | 0,00 | 6,83 | 6,82 | 0,01 | 6,83 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 57 | Corrente 58 | Entrada total por componente | Corrente 61 | Corrente 59 | Saída total por componente |
| Água | 3083,54 | 0,00 | 3083,54 | 3484,18 | 3,08 | 3487,26 |
| Querosene | 12,44 | 0,00 | 12,44 | 0,00 | 12,44 | 12,44 |
| H₂SO₄ | 35,82 | 0,00 | 35,82 | 35,78 | 0,04 | 35,82 |
| H₂O₂ | 7,04 | 0,00 | 7,04 | 7,03 | 0,01 | 7,04 |
| Água de lavagem (filtro) | 0,00 | 403,72 | 403,72 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 6080,52 | 403,72 | 5650,16 | 4465,63 | 2018,62 | 6484,25 |
| Total (kg/dia) | | 6484,25 | | | 6484,25 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.4 Reator de lixiviação (R-302)

O R-302 não possui reação considerada, apesar de ser descrito como um reator e ter condições de pré-lixiviar uma parte dos componentes. Assim, o reator obedece apenas a uma mistura de correntes determinadas pelas saídas do FL-201 e pela saída do R-301 para o processo. Como não há acúmulos e nem perdas, o balanço de massa é trivial.

$$m_{ent,R-302} = 19383,06 \text{ kg/dia} = m_{sai,R-302}$$

A.1.3.5 Reator de lixiviação (R-303)

As mesmas considerações adotadas para o R-301 foram feitas para o R-303, que é o reator principal de lixiviação. O balanço de massa pode ser visto na Tabela A.28 considerando reação e consumo de componentes, mas sem perdas ou acúmulos. O grande diferencial dessa etapa com relação ao R-301 é que foram considerados reações com contaminantes dos eletrodos (Cu e Al), e assim foi utilizada as reações do tópico 5 na lixiviação para as reações ácidas do

Al e do Cu. Considerou-se uma eficiência de 60% para estes, sendo assim bem menor que a eficiência do restante, pois a lixiviação ou não destes metais pouco implica no processo, já que caso eles forem lixiviados existe o controle para a precipitação dos mesmos, e caso não forem lixiviados o filtro rotativo separa-os.

Tabela A.28 – Balanço de massa para o R-303

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 63 | Corrente 67 | Corrente 64 | Entrada total por componente | Corrente 69 | Corrente 69 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 3461,34 | 0,00 | 0,00 | 3461,34 | 0,35 | 0,00 | 0,35 |
| Carbono negro | 7,81 | 0,00 | 0,00 | 7,81 | 7,81 | 0,00 | 7,81 |
| Grafite | 200,71 | 0,00 | 0,00 | 200,71 | 200,71 | 0,00 | 200,71 |
| Aglutinante (PVDF) | 6,76 | 0,00 | 0,00 | 6,76 | 6,76 | 0,00 | 6,76 |
| Cobre | 73,02 | 0,00 | 0,00 | 73,02 | 29,21 | 0,00 | 29,21 |
| Alumínio | 80,27 | 0,00 | 0,00 | 80,27 | 32,11 | 0,00 | 32,11 |
| Plástico: Polipropileno | 0,65 | 0,00 | 0,00 | 0,65 | 0,65 | 0,00 | 0,65 |
| Plástico: Polietileno | 0,18 | 0,00 | 0,00 | 0,18 | 0,18 | 0,00 | 0,18 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 0,19 | 0,00 | 0,19 |
| Transformados | Corrente 63 | Corrente 67 | Corrente 64 | Entrada total por componente | Corrente 69 | Corrente 69 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 233,67 | 0,00 | 0,00 | 233,67 | 2338,81 | 0,00 | 2338,81 |
| NiSO₄ | 258,70 | 0,00 | 0,00 | 258,70 | 2589,35 | 0,00 | 2589,35 |
| MnSO₄ | 155,43 | 0,00 | 0,00 | 155,43 | 1555,70 | 0,00 | 1555,70 |
| CoSO₄ | 178,63 | 0,00 | 0,00 | 178,63 | 1787,94 | 0,00 | 1787,94 |
| Al₂(SO₄)₃ | 6,82 | 0,00 | 0,00 | 6,82 | 373,62 | 0,00 | 373,62 |
| O₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 458,51 | 458,51 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 110,04 | 0,00 | 110,04 |

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | | Saída total (kg/dia) | | | |
|------------------------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------|-------------|----------------------------|
| | Utilidades e reagentes | Corrente 63 | Corrente 67 | Corrente 64 | Entrada total por componente | Corrente 69 | Corrente 69 | Saída total por componente |
| Água | | 14676,06 | 6451,98 | 5223,73 | 26351,78 | 27620,77 | 0,00 | 27620,77 |
| H ₂ SO ₄ | | 35,78 | 5872,84 | 0,00 | 5908,62 | 242,71 | 0,00 | 242,71 |
| H ₂ O ₂ | | 7,03 | 563,17 | 0,00 | 570,20 | 139,20 | 0,00 | 139,20 |
| Total por corrente (kg/dia) | | 19383,06 | 12888,00 | 5223,73 | 37494,79 | 37036,11 | 458,51 | 37494,62 |
| Total (kg/dia) | | | | 37494,62 | | | | 37494,62 |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.6 Misturador de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio (M-302)

O misturador de ácido sulfúrico não possui perdas e nem acúmulos, e a composição é definida pela corrente 67 do R-303, da Tabela A.28. O balanço de massa é visto abaixo.

$$m_{ent,M-302} = 12888,00 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-302}$$

A.1.3.7 Filtro rotativo (FG-302)

O FG-302 retira as impurezas não lixiviáveis remanescentes do processo, e as considerações são as mesmas para o FG-301. O balanço de massa é visto na Tabela A.29.

Tabela A.29 – Balanço de massa para o FG-302

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 69 | Corrente 70 | Entrada total por componente | Corrente 73 | Corrente 71 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 0,35 | 0,00 | 0,35 | 0,02 | 0,33 | 0,35 |
| Carbono negro | 7,81 | 0,00 | 7,81 | 0,39 | 7,42 | 7,81 |
| Grafite | 200,71 | 0,00 | 200,71 | 10,04 | 190,68 | 200,71 |
| Aglutinante (PVDF) | 6,76 | 0,00 | 6,76 | 0,34 | 6,43 | 6,76 |
| Cobre | 29,21 | 0,00 | 29,21 | 1,46 | 27,75 | 29,21 |
| Alumínio | 32,11 | 0,00 | 32,11 | 1,61 | 30,50 | 32,11 |
| Plástico: Polipropileno | 0,65 | 0,00 | 0,65 | 0,03 | 0,62 | 0,65 |
| Plástico: Polietileno | 0,18 | 0,00 | 0,18 | 0,01 | 0,17 | 0,18 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 0,19 | 0,00 | 0,19 | 0,01 | 0,18 | 0,19 |
| Transformados | Corrente 69 | Corrente 70 | Entrada total por componente | Corrente 73 | Corrente 71 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2338,81 | 0,00 | 2338,81 | 2336,47 | 2,34 | 2338,81 |
| NiSO₄ | 2589,35 | 0,00 | 2589,35 | 2586,76 | 2,59 | 2589,35 |
| MnSO₄ | 1555,70 | 0,00 | 1555,70 | 1554,14 | 1,56 | 1555,70 |
| CoSO₄ | 1787,94 | 0,00 | 1787,94 | 1786,15 | 1,79 | 1787,94 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 69 | Corrente 70 | Entrada total por componente | Corrente 73 | Corrente 71 | Saída total por componente |
| Al₂(SO₄)₃ | 373,62 | 0,00 | 373,62 | 373,25 | 0,37 | 373,62 |
| CuSO₄ | 110,04 | 0,00 | 110,04 | 109,93 | 0,11 | 110,04 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 69 | Corrente 70 | Entrada total por componente | Corrente 73 | Corrente 71 | Saída total por componente |
| Água | 27620,77 | 0,00 | 27620,77 | 27653,32 | 27,62 | 27680,94 |
| H₂SO₄ | 242,71 | 0,00 | 242,71 | 242,47 | 0,24 | 242,71 |
| H₂O₂ | 139,20 | 0,00 | 139,20 | 139,06 | 0,14 | 139,20 |
| Água de lavagem (filtro) | 0,00 | 60,16 | 60,16 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 37036,11 | 60,16 | 37096,28 | 36795,45 | 300,82 | 37096,28 |
| Total (kg/dia) | | 37096,28 | | | 37096,28 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.8 Reator de precipitação com hidróxido (R-304)

O R-304 precipita o Al presente no meio e neutraliza a solução para o pH 4,00, no qual o Al(OH)₃ é precipitado com maior facilidade. Os cálculos de diluição foram realizados conforme o R-301, mas utilizando agora o NaOH para a neutralização. As reações são todas demonstradas no tópico 5 do Projeto de Processo. O tempo de reação não é calculado, pois não foram encontrados dados cinéticos para tal, sendo utilizada assim a referência da rota tecnológica usada no trabalho, das patentes de Morin et al. (2021) e Wang et al. (2021) para um tempo de residência de 2 horas, no máximo. O balanço de massa está presente na Tabela A.30.

Tabela A.30 – Balanço de massa para o R-304

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---------------------------------|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 73 | Corrente 76 | Entrada total por componente | Corrente 78 | Corrente 77 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| Carbóno negro | 0,39 | 0,00 | 0,39 | 0,39 | 0,00 | 0,39 |
| Grafite | 10,04 | 0,00 | 10,04 | 10,04 | 0,00 | 10,04 |
| Aglutinante (PVDF) | 0,34 | 0,00 | 0,34 | 0,34 | 0,00 | 0,34 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|----------------|---------------------------------|----------------------|----------------|-------------------------------|
| | | | | | | |
| Cobre | 1,46 | 0,00 | 1,46 | 1,46 | 0,00 | 1,46 |
| Alumínio | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 1,61 | 0,00 | 1,61 |
| Plástico: Polipropileno | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 |
| Plástico: Polietileno | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| Transformados | Corrente 73 | Corrente 76 | Entrada total por componente | Corrente 78 | Corrente 77 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2336,47 | 0,00 | 2336,47 | 2336,47 | 0,00 | 2336,47 |
| NiSO₄ | 2586,76 | 0,00 | 2586,76 | 2586,76 | 0,00 | 2586,76 |
| MnSO₄ | 1554,14 | 0,00 | 1554,14 | 1554,14 | 0,00 | 1554,14 |
| CoSO₄ | 1786,15 | 0,00 | 1786,15 | 1786,15 | 0,00 | 1786,15 |
| Al₂(SO₄)₃ | 373,25 | 0,00 | 373,25 | 0,37 | 0,00 | 0,37 |
| Al(OH)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 170,02 | 0,00 | 170,02 |
| CuSO₄ | 109,93 | 0,00 | 109,93 | 109,93 | 0,00 | 109,93 |
| Na₂SO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 815,33 | 0,00 | 815,33 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 73 | Corrente 76 | Entrada total por componente | Corrente 78 | Corrente 77 | Saída total por componente |
| Água | 27653,32 | 28415,45 | 56068,76 | 56157,78 | 0,00 | 56157,78 |
| NaOH | 0,00 | 459,17 | 459,17 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H₂SO₄ | 242,47 | 0,00 | 242,47 | 0,15 | 0,00 | 0,15 |
| H₂O₂ | 139,06 | 0,00 | 139,06 | 139,06 | 0,00 | 139,06 |
| Total por corrente (kg/dia) | 36795,45 | 28874,62 | 65670,07 | 65670,07 | 0,00 | 65670,07 |
| Total (kg/dia) | | 65670,07 | | | 65670,07 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.9 Misturador de diluição de hidróxido (M-303)

O balanço de massa para o M-303 é considerado a composição da corrente 76 do R-304, na Tabela A.30. O misturador não contém reação de transformação (apenas de diluição), e também não contém perdas nem acúmulos. O balanço de massa é demonstrado abaixo.

$$m_{ent,M-303} = 28874,62 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-303}$$

A.1.3.10 Filtro rotativo (FG-303)

O filtro FG-303 considera as mesmas perdas e eficiência de remoção de sólidos que os outros filtros, e por isso o balanço de massa se repete para os componentes presentes nas correntes. O balanço de massa está definido na Tabela A.31.

Tabela A.31 – Balanço de massa para o FG-303

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 78 | Corrente 79 | Entrada total por componente | Corrente 82 | Corrente 80 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 |
| Carbóno negro | 0,39 | 0,00 | 0,39 | 0,02 | 0,37 | 0,39 |
| Grafite | 10,04 | 0,00 | 10,04 | 0,50 | 9,53 | 10,04 |
| Aglutinante (PVDF) | 0,34 | 0,00 | 0,34 | 0,00 | 0,34 | 0,34 |
| Cobre | 1,46 | 0,00 | 1,46 | 0,07 | 1,39 | 1,46 |
| Alumínio | 1,61 | 0,00 | 1,61 | 0,08 | 1,53 | 1,61 |
| Plástico: Polipropileno | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 |
| Plástico: Polietileno | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Plástico: Polietileno Tereftalato | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Transformados | Corrente 78 | Corrente 79 | Entrada total por componente | Corrente 82 | Corrente 80 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2336,47 | 0,00 | 2336,47 | 2334,13 | 2,34 | 2336,47 |
| NiSO₄ | 2586,76 | 0,00 | 2586,76 | 2584,17 | 2,59 | 2586,76 |
| MnSO₄ | 1554,14 | 0,00 | 1554,14 | 1552,59 | 1,55 | 1554,14 |
| CoSO₄ | 1786,15 | 0,00 | 1786,15 | 1784,37 | 1,79 | 1786,15 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,37 | 0,00 | 0,37 | 0,37 | 0,00 | 0,37 |
| Al(OH)₃ | 170,02 | 0,00 | 170,02 | 8,50 | 161,51 | 170,02 |
| CuSO₄ | 109,93 | 0,00 | 109,93 | 109,82 | 0,11 | 109,93 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|-------------------------------------|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 78 | Corrente 79 | Entrada total por componente | Corrente 82 | Corrente 80 | Saída total por componente |
| Na₂SO₄ | 815,33 | 0,00 | 815,33 | 814,51 | 0,82 | 815,33 |
| Utilidades e reagentes | | | | | | |
| Água | 56157,78 | 0,00 | 56157,78 | 56149,67 | 56,16 | 56205,83 |
| NaOH | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H₂SO₄ | 0,15 | 0,00 | 0,15 | 0,15 | 0,00 | 0,15 |
| H₂O₂ | 139,06 | 0,00 | 139,06 | 138,92 | 0,14 | 139,06 |
| Água de lavagem (filtro) | 0,00 | 48,04 | 48,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 65670,07 | 48,04 | 65718,11 | 65477,89 | 240,22 | 65718,11 |
| Total (kg/dia) | | 65718,11 | | | 65718,11 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.11 Reator de precipitação com hidróxido (R-305)

O R-305 precipita uma parcela do Cu contido como CuSO₄ e também do restante de Al contido como Al(OH)₃. Não são considerados dados cinéticos, pois não foram encontrados na literatura, e por isso considerou-se dados provenientes da rota tecnológica do trabalho, das patentes de Morin et al. (2021) e Wang et al. (2021) para um tempo de residência de 2 horas. O pH da solução foi calculado para estar mantido em 5,50, e a Tabela A.32 define o balanço de massa.

Tabela A.32 – Balanço de massa para o R-305

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---------------------------------|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 82 | Corrente 85 | Entrada total por componente | Corrente 88 | Corrente 86 | Saída total por componente |
| Material do cátodo ativo | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Carbono negro | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| Grafite | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,00 | 0,50 |
| Cobre | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,07 |
| Alumínio | 0,08 | 0,00 | 0,08 | 0,08 | 0,00 | 0,08 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 82 | Corrente 85 | Entrada total por componente | Corrente 88 | Corrente 86 | Saída total por componente |
| Transformados | | | | | | |
| Li ₂ SO ₄ | 2334,13 | 0,00 | 2334,13 | 2334,13 | 0,00 | 2334,13 |
| NiSO ₄ | 2584,17 | 0,00 | 2584,17 | 2584,17 | 0,00 | 2584,17 |
| MnSO ₄ | 1552,59 | 0,00 | 1552,59 | 1552,59 | 0,00 | 1552,59 |
| CoSO ₄ | 1784,37 | 0,00 | 1784,37 | 1784,37 | 0,00 | 1784,37 |
| Al ₂ (SO ₄) ₃ | 0,37 | 0,00 | 0,37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH) ₃ | 8,50 | 0,00 | 8,50 | 8,67 | 0,00 | 8,67 |
| CuSO ₄ | 109,82 | 0,00 | 109,82 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na ₂ SO ₄ | 814,51 | 0,00 | 814,51 | 912,92 | 0,00 | 912,92 |
| Cu(OH) ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 67,13 | 0,00 | 67,13 |
| Utilidades e reagentes | | | | | | |
| Água | 56149,67 | 13723,27 | 69872,94 | 69872,99 | 0,00 | 69872,99 |
| NaOH | 0,00 | 55,42 | 55,42 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H ₂ SO ₄ | 0,15 | 0,00 | 0,15 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| H ₂ O ₂ | 138,92 | 0,00 | 138,92 | 138,92 | 0,00 | 138,92 |
| Total por corrente (kg/dia) | 65477,89 | 13778,69 | 79256,59 | 79256,59 | 0,00 | 79256,59 |
| Total (kg/dia) | | 79256,59 | | | 79256,59 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.12 Misturador de diluição de hidróxido (M-304)

O M-304 possui sua composição definida na corrente 85 da Tabela A.32, e não considera reação de transformação e nem perdas ou acúmulos. A única reação presente é a reação de diluição, que ocorre liberando energia. O balanço de massa então pode ser descrito abaixo.

$$m_{ent,M-304} = 13778,69 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-304}$$

A.1.3.13 Filtro rotativo (FG-304)

O FG-304 retira os precipitados formados no R-305, e as considerações são as mesmas que a de outros filtros. O balanço de massa pode ser visto na Tabela A.33.

Tabela A.33 – Balanço de massa para o FG-304

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 88 | Corrente 89 | Entrada total por componente | Corrente 92 | Corrente 90 | Saída total por componente |
| Carbono negro | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 |
| Grafite | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 0,03 | 0,48 | 0,50 |
| Cobre | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,00 | 0,07 | 0,07 |
| Alumínio | 0,08 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,08 | 0,08 |
| Transformados | Corrente 88 | Corrente 89 | Entrada total por componente | Corrente 92 | Corrente 90 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2334,13 | 0,00 | 2334,13 | 2331,80 | 2,33 | 2334,13 |
| NiSO₄ | 2584,17 | 0,00 | 2584,17 | 2581,59 | 2,58 | 2584,17 |
| MnSO₄ | 1552,59 | 0,00 | 1552,59 | 1551,04 | 1,55 | 1552,59 |
| CoSO₄ | 1784,37 | 0,00 | 1784,37 | 1782,58 | 1,78 | 1784,37 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH)₃ | 8,67 | 0,00 | 8,67 | 0,43 | 8,24 | 8,67 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂SO₄ | 912,92 | 0,00 | 912,92 | 912,00 | 0,91 | 912,92 |
| Cu(OH)₂ | 67,13 | 0,00 | 67,13 | 3,36 | 63,77 | 67,13 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 88 | Corrente 89 | Entrada total por componente | Corrente 92 | Corrente 90 | Saída total por componente |
| Água | 69872,99 | 0,00 | 69872,99 | 69833,49 | 69,87 | 69903,36 |
| NaOH | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H₂SO₄ | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| H₂O₂ | 138,92 | 0,00 | 138,92 | 138,79 | 0,14 | 138,92 |
| Água de lavagem (filtro) | 0,00 | 30,37 | 30,37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 79256,59 | 30,37 | 79286,95 | 79135,12 | 151,83 | 79286,95 |
| Total (kg/dia) | | 79286,95 | | | 79286,95 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.14 Misturador de ajuste de razão (M-305)

O M-305 possui a definição de misturar os sulfatos metálicos faltantes para a razão ideal ao final da operação de precipitação, e conseqüentemente de sinterização. Ele opera sem perdas e nem acúmulos, e sem reações, sendo apenas para a mistura dos componentes por um tempo de residência adequado. O balanço de massa está presente na Tabela A.34.

Tabela A.34 – Balanço de massa para o M-305

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|
| | Corrente 92 | Corrente 94 | Entrada total por componente | Corrente 95 | Saída total por componente |
| Grafite | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Transformados | Corrente 92 | Corrente 94 | Entrada total por componente | Corrente 95 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2331,80 | 0,00 | 2331,80 | 2331,80 | 2331,80 |
| NiSO₄ | 2581,59 | 0,00 | 2581,59 | 2581,59 | 2581,59 |
| MnSO₄ | 1551,04 | 967,91 | 2518,94 | 2518,94 | 2518,94 |
| CoSO₄ | 1782,58 | 803,00 | 2585,59 | 2585,59 | 2585,59 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH)₃ | 0,43 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂SO₄ | 912,00 | 0,00 | 912,00 | 912,00 | 912,00 |
| Cu(OH)₂ | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 3,36 | 3,36 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 92 | Corrente 94 | Entrada total por componente | Corrente 95 | Saída total por componente |
| Água | 69833,49 | 0,00 | 69833,49 | 69833,49 | 69833,49 |
| NaOH | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H₂SO₄ | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| H₂O₂ | 138,79 | 0,00 | 138,79 | 138,79 | 138,79 |
| Total por corrente (kg/dia) | 79135,12 | 1770,91 | 80906,03 | 80906,03 | 80906,03 |
| Total (kg/dia) | | 80906,03 | | 80906,03 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.15 Reator de precipitação com hidróxido (R-306)

Com a entrada dos sulfatos metálicos para o ajuste de razão, o R-306 encaminha a precipitação dos hidróxidos metálicos para as etapas finais. A operação trabalha com uma eficiência de 99,90%, e em um pH de 11,00 para a melhor precipitação do $Ni_xCo_yMn_z(OH)_2$. O procedimento necessita de um tempo de residência de 2 horas para a precipitação, seguindo a rota tecnológica de Morin et al. (2021) e Wang et al. (2021). O balanço de massa está presente na Tabela A.35.

Tabela A.35 – Balanço de massa para o R-306

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|-------------|------------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|
| | Corrente 95 | Corrente 98 | Entrada total por componente | Corrente 100 | Corrente 99 | Saída total por componente |
| Grafite | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 |
| Transformados | Corrente 95 | Corrente 98 | Entrada total por componente | Corrente 100 | Corrente 99 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2331,80 | 0,00 | 2331,80 | 2331,80 | 0,00 | 2331,80 |
| NiSO₄ | 2581,59 | 0,00 | 2581,59 | 2,58 | 0,00 | 2,58 |
| MnSO₄ | 2518,94 | 0,00 | 2518,94 | 2,52 | 0,00 | 2,52 |
| CoSO₄ | 2585,59 | 0,00 | 2585,59 | 2,59 | 0,00 | 2,59 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH)₃ | 0,43 | 0,00 | 0,43 | 0,43 | 0,00 | 0,43 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂SO₄ | 912,00 | 0,00 | 912,00 | 8013,41 | 0,00 | 8013,41 |
| Cu(OH)₂ | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 3,36 | 0,00 | 3,36 |
| (Ni_xMn_yCo_z)(OH)₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4576,35 | 0,00 | 4576,35 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 95 | Corrente 98 | Entrada total por componente | Corrente 100 | Corrente 99 | Saída total por componente |
| Água | 69833,49 | 31387,39 | 101220,88 | 101220,89 | 0,00 | 101220,89 |
| NaOH | 0,00 | 4007,60 | 4007,60 | 8,28 | 0,00 | 8,28 |
| H₂SO₄ | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H₂O₂ | 138,79 | 0,00 | 138,79 | 138,79 | 0,00 | 138,79 |
| Total por corrente (kg/dia) | 80906,03 | 35394,99 | 116301,02 | 116301,02 | 0,00 | 116301,02 |
| Total (kg/dia) | | 116301,02 | | | 116301,02 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.16 Misturador de diluição de hidróxido (M-306)

O M-306 possui sua composição definida na corrente 98 da Tabela A.35, e não considera reação de transformação e nem perdas ou acúmulos. A única reação presente é a reação de diluição, que ocorre liberando energia. O balanço de massa então pode ser descrito abaixo.

$$m_{ent,M-306} = 35394,99 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-306}$$

A.1.3.17 Filtro rotativo (FG-305)

O FG-305 retira o $Ni_xCo_yMn_z(OH)_2$ precipitado com uma eficiência de 95%, e perdas de líquido em 0,1% carregados com o sólido como umidade. Considera-se a mesma relação do FG-301 para a lavagem dos sólidos na torta para retirada de contaminantes. O balanço de massa é visto na Tabela A.36.

Tabela A.36 – Balanço de massa para o FG-305

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| | Corrente 100 | Corrente 102 | Entrada total por componente | Corrente 106 | Corrente 103 | Saída total por componente |
| Grafite | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 |
| Transformados | Corrente 100 | Corrente 102 | Entrada total por componente | Corrente 106 | Corrente 103 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2331,80 | 0,00 | 2331,80 | 2329,47 | 2,33 | 2331,80 |
| NiSO₄ | 2,58 | 0,00 | 2,58 | 2,58 | 0,00 | 2,58 |
| MnSO₄ | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 2,52 | 0,00 | 2,52 |
| CoSO₄ | 2,59 | 0,00 | 2,59 | 2,58 | 0,00 | 2,59 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH)₃ | 0,43 | 0,00 | 0,43 | 0,02 | 0,41 | 0,43 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂SO₄ | 8013,41 | 0,00 | 8013,41 | 8005,40 | 8,01 | 8013,41 |
| Cu(OH)₂ | 3,36 | 0,00 | 3,36 | 0,17 | 3,19 | 3,36 |
| (Ni_xMn_yCo_z)(OH)₂ | 4576,35 | 0,00 | 4576,35 | 228,82 | 4347,53 | 4576,35 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 100 | Corrente 102 | Entrada total por componente | Corrente 106 | Corrente 103 | Saída total por componente |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|-------------------------------|------------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| | | | | | | |
| Água | 101220,89 | 0,00 | 101220,89 | 102012,24 | 101,22 | 102113,46 |
| NaOH | 8,28 | 0,00 | 8,28 | 8,28 | 0,01 | 8,28 |
| H ₂ O ₂ | 138,79 | 0,00 | 138,79 | 138,65 | 0,14 | 138,79 |
| Água de lavagem (filtro) | 0,00 | 892,58 | 892,58 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 116301,02 | 892,58 | 117193,60 | 112730,71 | 4462,89 | 117193,60 |
| Total (kg/dia) | | 117193,60 | | | 117193,60 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.18 Reator de precipitação com carbonato (R-307)

O R-307 possui a adição de carbonatos para a precipitação de Li₂CO₃, e assim a eficiência considerada foi de 99,90%. A reação acontece em pH básico, mas o controle precisa ser feito de acordo com um pH acima de 13,00 para a melhor eficiência da reação, segundo a rota tecnológica seguida para o projeto por Morin et al. (2021) e Wang et al. (2021), além do tempo de residência de 2 horas descrita pela mesma rota. O balanço de massa está presente na Tabela A.37.

Tabela A.37 – Balanço de massa para o R-307

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| | Corrente 106 | Corrente 109 | Entrada total por componente | Corrente 112 | Corrente 110 | Saída total por componente |
| Transformados | | | | | | |
| Li ₂ SO ₄ | 2329,47 | 0,00 | 2329,47 | 2,33 | 0,00 | 2,33 |
| NiSO ₄ | 2,58 | 0,00 | 2,58 | 2,58 | 0,00 | 2,58 |
| MnSO ₄ | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 2,52 | 0,00 | 2,52 |
| CoSO ₄ | 2,58 | 0,00 | 2,58 | 2,58 | 0,00 | 2,58 |
| Al ₂ (SO ₄) ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH) ₃ | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| CuSO ₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na ₂ SO ₄ | 8005,40 | 0,00 | 8005,40 | 11011,92 | 0,00 | 11011,92 |
| Cu(OH) ₂ | 0,17 | 0,00 | 0,17 | 0,17 | 0,00 | 0,17 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| | | | | | | |
| $(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)(\text{OH})_2$ | 228,82 | 0,00 | 228,82 | 228,82 | 0,00 | 228,82 |
| Li_2CO_3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1564,01 | 0,00 | |
| Utilidades e reagentes | Corrente 106 | Corrente 109 | Entrada total por componente | Corrente 112 | Corrente 110 | Saída total por componente |
| Água | 102012,24 | 3163,72 | 105175,96 | 105175,96 | 0,00 | 105175,96 |
| NaOH | 8,28 | 0,00 | 8,28 | 8,28 | 0,00 | 8,28 |
| H_2O_2 | 138,65 | 0,00 | 138,65 | 138,65 | 0,00 | 138,65 |
| Na_2CO_3 | 0,00 | 2694,77 | 2694,77 | 451,37 | 0,00 | 451,37 |
| Total parcial | 112730,71 | 5858,50 | 118589,21 | 118589,21 | 0,00 | 117025,20 |
| Total do balanço de massa | | 118589,21 | | | 118589,21 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.19 Misturador de carbonatos (M-307)

O M-307 possui sua composição definida na corrente 109 da Tabela A.37, e não considera reação de transformação e nem perdas ou acúmulos. A única reação presente é a reação de diluição, que ocorre liberando energia. O balanço de massa então pode ser descrito abaixo.

$$m_{ent,M-307} = 5858,50 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-307}$$

A.1.3.20 Filtro rotativo (FG-306)

O FG-306 separa a fração líquida que se destina a ETE e a fração sólida que segue para a etapa de acabamento do produto. Assim, o Li_2CO_3 precipitado é separado com a mesma eficiência considerada para outros filtros, e as contaminações saem em cerca de 0,1% de eficiência. Como não há acúmulos nem perdas, o balanço de massa é visto na Tabela A.38.

Tabela A.38 – Balanço de massa para o FG-306

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| | Corrente 112 | Corrente 113 | Entrada total por componente | Corrente 114 | Corrente 116 | Saída total por componente |
| Transformados | | | | | | |
| Li₂SO₄ | 2,33 | 0,00 | 2,33 | 2,33 | 0,00 | 2,33 |
| NiSO₄ | 2,58 | 0,00 | 2,58 | 2,58 | 0,00 | 2,58 |
| MnSO₄ | 2,52 | 0,00 | 2,52 | 2,51 | 0,00 | 2,52 |
| CoSO₄ | 2,58 | 0,00 | 2,58 | 2,58 | 0,00 | 2,58 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH)₃ | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂SO₄ | 11011,92 | 0,00 | 11011,92 | 11000,91 | 11,01 | 11011,92 |
| Cu(OH)₂ | 0,17 | 0,00 | 0,17 | 0,17 | 0,00 | 0,17 |
| (Ni_{0,33}Mn_{0,33}Co_{0,33})(OH)₂ | 228,82 | 0,00 | 228,82 | 11,44 | 217,38 | 228,82 |
| Li₂CO₃ | 1564,01 | 0,00 | 1564,01 | 78,20 | 1485,81 | 1564,01 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 112 | Corrente 113 | Entrada total por componente | Corrente 114 | Corrente 116 | Saída total por componente |
| Água | 105175,96 | 0,00 | 105175,96 | 105434,79 | 105,18 | 105539,96 |
| NaOH | 8,28 | 0,00 | 8,28 | 8,27 | 0,01 | 8,28 |
| H₂SO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H₂O₂ | 138,65 | 0,00 | 138,65 | 138,51 | 0,14 | 138,65 |
| Na₂CO₃ | 451,37 | 0,00 | 0,00 | 450,92 | 0,45 | 451,37 |
| Água de lavagem (filtro) | 0,00 | 364,00 | 364,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Total por corrente (kg/dia) | 118589,21 | 364,00 | 118501,84 | 117133,21 | 1820,00 | 118953,21 |
| Total (kg/dia) | | 118953,21 | | | 118953,21 | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.3.21 Tanque de retenção de sólidos (TK-301, TK-302, TK-303, TK-304 e TK-305)

Os TK-301, TK-302, TK-303, TK-304 e TK-305 possuem a composição definida em cada saída de corrente indicada nos respectivos filtros que encaminham os sólidos para estes. Considera-se que estes não possuem perdas nem acúmulos, pela descarga rotineira e talvez até

instantânea, já que um controle de processo deve ser feito para tal. O balanço de massa pode ser visto abaixo.

$$m_{ent,TK-301} = 2018,62 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-301}$$

$$m_{ent,TK-302} = 300,82 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-302}$$

$$m_{ent,TK-303} = 240,22 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-303}$$

$$m_{ent,TK-304} = 151,83 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-304}$$

$$m_{ent,TK-305} = 1770,91 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-305}$$

A.1.3.22 Vazão por corrente (Área 300)

Algumas correntes não são demonstradas em todos os tópicos, por isso os valores estão presentes na Tabela A.39.

Tabela A.39 – Vazões mássicas por corrente na Área 300

(continua)

| Corrente | Vazão mássica (kg/dia) | Corrente | Vazão mássica (kg/dia) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 50 | 3748,14 | 84 | 13723,27 |
| 51 | 670,87 | 85 | 13778,69 |
| 52 | 825,80 | 86 | 0,00 |
| 53 | 1496,67 | 87 | 509,46 |
| 54 | 6652,71 | 88 | 79256,59 |
| 55 | 886,68 | 89 | 30,37 |
| 56 | 50,95 | 90 | 151,83 |
| 57 | 6080,52 | 91 | 151,83 |
| 58 | 403,72 | 92 | 79135,12 |
| 59 | 2018,62 | 93 | 1770,91 |
| 60 | 2018,62 | 94 | 1770,91 |
| 61 | 4465,63 | 95 | 80906,03 |
| 62 | 0,00 | 96 | 4007,60 |
| 63 | 19383,06 | 97 | 31387,39 |
| 64 | 5223,73 | 98 | 35394,99 |

(conclusão)

| Corrente | Vazão mássica (kg/dia) | Corrente | Vazão mássica (kg/dia) |
|-----------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 65 | 6436,01 | 99 | 0,00 |
| 66 | 6451,98 | 100 | 116301,02 |
| 67 | 12888,00 | 101 | 1256,58 |
| 68 | 458,51 | 102 | 892,58 |
| 69 | 37036,11 | 103 | 4462,89 |
| 70 | 60,16 | 104 | 4462,89 |
| 71 | 300,82 | 105 | 4462,89 |
| 72 | 300,82 | 106 | 112730,71 |
| 73 | 36795,45 | 107 | 2694,77 |
| 74 | 459,17 | 108 | 3163,72 |
| 75 | 28415,45 | 109 | 5858,50 |
| 76 | 28874,62 | 110 | 0,00 |
| 77 | 0,00 | 111 | 0,00 |
| 78 | 65670,07 | 112 | 118589,21 |
| 79 | 48,04 | 113 | 364,00 |
| 80 | 240,22 | 114 | 117133,21 |
| 81 | 240,22 | 115 | 117133,21 |
| 82 | 65477,89 | 116 | 1820,00 |
| 83 | 55,42 | | |

Fonte: Autores (2023).

A.1.4 Área 400

A.1.4.1 Tanques de retenção de sólidos (TK-401, TK-402 e TK-403)

Da mesma forma que outros tanques de retenção, o TK-401, TK-402 e TK-403 possuem a composição definida em cada saída de corrente indicada nas respectivas correntes que encaminham o material a estes. Considera-se que não possuem perdas nem acúmulos. O balanço de massa pode ser visto abaixo.

$$m_{ent,TK-401} = 4462,89 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-401}$$

$$m_{ent,TK-402} = 1820,00 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-402}$$

$$m_{ent,TK-403} = 448,78 \text{ kg/dia} = m_{sai,TK-403}$$

A.1.4.2 Moinhos (SR-401 e SR-402)

Os moinhos SR-401 e SR-401 possuem a composição definida em cada saída de corrente indicada nas respectivas correntes que encaminham o material a estes. Considera-se que não possuem perdas nem acúmulos. O balanço de massa pode ser visto abaixo.

$$m_{ent,SR-401} = 4462,89 \text{ kg/dia} = m_{sai,SR-401}$$

$$m_{ent,SR-402} = 2268,79 \text{ kg/dia} = m_{sai,SR-402}$$

A.1.4.3 Misturadores (M-401 e M-402)

O misturador M-401 recebe a entrada de sólidos precipitados e ajusta a razão destes, que devem ser misturados para a homogeneização e processamento de acabamento. Um sólido bem homogeneizado garante um ótimo produto final, garantindo a litiação do componente ativo. A qualidade do produto final e o valor agregado, bem como a capacidade de ser um ótimo cátodo está diretamente ligado a isso. A Tabela A.40 define o balanço de massa para este.

Tabela A.40 – Balanço de massa para o M-401

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | |
|---|------------------------|--------------|------------------------------|----------------------|----------------------------|
| | Corrente 105 | Corrente 120 | Entrada total por componente | Corrente 121 | Saída total por componente |
| Grafite | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,03 |
| Transformados | Corrente 105 | Corrente 120 | Entrada total por componente | Corrente 121 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2,33 | 0,00 | 2,33 | 2,33 | 2,33 |
| NiSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| MnSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| CoSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | |
|--|------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Al(OH) ₃ | 0,41 | 0,02 | 0,43 | 0,43 | 0,43 |
| CuSO ₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na ₂ SO ₄ | 8,01 | 11,01 | 19,03 | 19,03 | 19,03 |
| Cu(OH) ₂ | 3,19 | 0,00 | 3,19 | 3,19 | 3,19 |
| (Ni _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33}) (OH) ₂ | 4347,53 | 217,38 | 4564,91 | 4564,91 | 4564,91 |
| Li ₂ CO ₃ | 0,00 | 1934,59 | 1934,59 | 1934,59 | 1934,59 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 105 | Corrente 120 | Entrada total por componente | Corrente 121 | Saída total por componente |
| Água | 101,22 | 105,18 | 206,40 | 206,40 | 206,40 |
| NaOH | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| H ₂ SO ₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H ₂ O ₂ | 0,14 | 0,14 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| Na ₂ CO ₃ | 0,00 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 |
| Total por corrente (kg/dia) | 4462,89 | 2268,79 | 6731,67 | 6731,67 | 6731,67 |
| Total (kg/dia) | | 6731,67 | | 6731,67 | |

Fonte: Autores (2023).

Para o balanço de massa do M-402, esse misturador funciona como um misturador mais agressivo, e, portanto, toda a massa de saída do M-401 passa pelo M-402. Desconsiderando perdas ou acúmulos, tem-se o balanço de massa abaixo.

$$m_{ent,M-402} = 6731,67 \text{ kg/dia} = m_{sai,M-402}$$

A.1.4.4 Compressor de rolos (JC-401)

O JC-401 comprime o material a ser acabado na etapa de B-401 como uma pré-aglomeração do componente. Assim, o material passa continuamente pelos rolos, e não é considerada perdas ou acúmulos de material, e sem nenhuma adição de material para a etapa. O balanço de massa pode ser visto abaixo.

$$m_{ent,JC-401} = 6731,67 \text{ kg/dia} = m_{sai,JC-401}$$

A.1.4.5 Forno de sinterização/calцинаção (B-401)

O B-401 considera reações e semi reações nas etapas de calcinação e sinterização. O processo calcinativo principal ocorre com a Equação 47 do tópico 5 do Projeto do Processo. Para a reação na etapa de sinterização, a Equação 48 do tópico 5 do Projeto do Processo é definida. Para as demais semirreações, estas são demonstradas abaixo nas Equações A.11 e A.12, e definem apenas uma transformação mássica que pode ocorrer, mas não tem relevância no processo (SHI et al., 2020). Essas reações não são consideradas no balanço de energia e nem no dimensionamento, e estão demonstrando apenas a transformação da alimentação.



Com isso, o balanço de massa é definido na Tabela A.41.

Tabela A.41 – Balanço de massa para o B-401

(continua)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|--|------------------------|-----------------|---------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|
| | Corrente 123 | Corrente 124 | Entrada total por componente | Corrente 126 | Corrente 125 | Saída total por componente |
| Grafite | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,03 |
| Transformados | Corrente 123 | Corrente 124 | Entrada total por componente | Corrente 126 | Corrente 125 | Saída total por componente |
| Li₂SO₄ | 2,33 | 0,00 | 2,33 | 2,33 | 0,00 | 2,33 |
| NiSO₄ | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| MnSO₄ | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| CoSO₄ | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| Al₂(SO₄)₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Al(OH)₃ | 0,43 | 0,00 | 0,43 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| CuSO₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Na₂SO₄ | 19,03 | 0,00 | 19,03 | 19,03 | 0,00 | 19,03 |
| Cu(OH)₂ | 3,19 | 0,00 | 3,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| (Ni_{0,33}Mn_{0,33}Co_{0,33})(OH)₂ | 4564,91 | 0,00 | 4564,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Li₂CO₃ | 1934,59 | 0,00 | 1934,59 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

(conclusão)

| Componentes | Entrada total (kg/dia) | | | Saída total (kg/dia) | | |
|---|------------------------|----------------|------------------------------|----------------------|----------------|----------------------------|
| | | | | | | |
| CO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1152,25 | 1152,25 |
| LiNi _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33} O ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4810,53 | 0,00 | 4810,53 |
| CuO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,60 | 0,00 | 2,60 |
| Al ₂ O ₃ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 |
| Li ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 37,25 | 0,00 | 37,25 |
| Utilidades e reagentes | Corrente 123 | Corrente 124 | Entrada total por componente | Corrente 126 | Corrente 125 | Saída total por componente |
| Água | 206,40 | 0,00 | 206,40 | 0,00 | 1105,56 | 1105,56 |
| NaOH | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,02 |
| H ₂ SO ₄ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| H ₂ O ₂ | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,00 | 0,28 | 0,28 |
| Na ₂ CO ₃ | 0,45 | 0,00 | 0,45 | 0,45 | 0,00 | 0,45 |
| Ar (O ₂ e N ₂) | 0,00 | 1899,74 | 1899,74 | 0,00 | 1500,79 | 1500,79 |
| Total por corrente (kg/dia) | 6731,67 | 1899,74 | 8631,41 | 4872,54 | 3758,87 | 8631,41 |
| Total (kg/dia) | | 8631,41 | | | 8631,41 | |

Fonte: Autores (2023).

Com os valores em vazão mássica da corrente de material ativo 117, calcula-se a pureza do produto final com a Equação A.13.

$$p = \frac{m_{NMC+Li}}{m_t} * 100 \quad (\text{A.13})$$

$$p_{NMC,B-401} = 99,49\%$$

Percebe-se então que a pureza do produto atende aos requisitos de um produto de alta pureza (acima de 99%) e que possui um alto valor agregado. Além disso, a confiabilidade do mesmo é provada, já que toda a composição final de saída é demonstrada.

A.1.4.6 Vazão por corrente (Área 400)

Algumas correntes não são demonstradas em todos os tópicos, por isso os valores estão presentes na Tabela A.42.

Tabela A.42 – Vazões mássicas por corrente na Área 400

| Corrente | Vazão mássica (kg/dia) | Corrente | Vazão mássica (kg/dia) |
|----------|------------------------|----------|------------------------|
| 117 | 1820,00 | 122 | 6731,67 |
| 118 | 448,78 | 123 | 6731,67 |
| 119 | 448,78 | 124 | 1899,74 |
| 120 | 2268,20 | 125 | 3758,87 |
| 121 | 6731,67 | 126 | 4872,54 |

Fonte: Autores (2023).

A.2. BALANÇO DE ENERGIA E DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

A.2.1 Área 100

A.2.1.1 Transportador de correia (C-101)

De acordo com Nelson & Richins (2019), o projeto de uma correia transportadora deve considerar as condições de carga previstas na aplicação. O ponto de carregamento da correia geralmente é o local de maior impacto e abrasão na correia, portanto, as condições de carregamento afetam a seleção das coberturas e da carcaça. O primeiro fator na avaliação dos efeitos das condições de carregamento é o fator de frequência, o qual é a quantidade de tempo necessária para que a correia complete uma travessia de seu comprimento. O fator de frequência é dado pela Equação A.14:

$$F_f = 2 * L/V \quad (\text{A.14})$$

Onde:

F_f - Fator de frequência, min

L - Comprimento da correia, m

V - Velocidade da correia, m/min

Recomenda-se que o fator de frequência seja maior ou igual a 4 minutos, e assim a espessura mínima da cobertura superior pode ser selecionada com base nas condições de carga. Para fatores de frequência menores, à medida que o fator de frequência diminui para 0,2 minutos, a espessura da cobertura superior deve ser aumentada proporcionalmente ao dobro do uso para uma frequência de 4 minutos. Para projeto, as condições de carregamento que minimizam o desgaste da tampa incluem: a direção na qual a alimentação do material está viajando, a queda livre de material na correia transportadora ser de 1 m ou menos, a área de carregamento do transportador de correia ser horizontal ou ter uma inclinação não superior a 8 graus, e calhas-guia adequadamente projetadas para formar, centralizar e acomodar a carga na correia, e temperatura do material alimentado na faixa de 0 a 65 °C (NELSON & RICHINS, 2019).

Para o movimento da carga, o acionamento motorizado de uma correia transportadora fornece a energia necessária para movimentar a correia e o material transportado. Essa potência é fornecida como um torque aplicado a uma ou mais polias de acionamento, que no que lhe concerne transmitem força para a correia por fricção. Essa transmissão de energia ocorre na partida, parada e operação em estado estacionário da correia. A potência consumida pela correia é dada pela Equação A.15:

$$P = T_e * V \quad (A.15)$$

Onde:

Te - Tensão efetiva, kgf

V - Velocidade do transporte, m/min

P - Potência de operação necessária, kgf.m/min

O projeto correto do acionamento por correia deve considerar todas as condições de operação, como a potência necessária para a aceleração na partida, frenagem, entre outras variáveis. Em correias de inclinação acentuada, o motor de acionamento pode atuar como um gerador, opondo-se à aceleração da carga do material conforme ela desce, ou a energia do material em aceleração pode ser dissipada em um sistema de frenagem. A estimativa da tensão efetiva é um passo importante para o cálculo da potência necessária para superar o atrito do sistema, e é o fator crucial para o dimensionamento de esteiras. Essa tensão pode ser estimada conforme as normas ANSI/CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association) de 2014, definida pela Equação A.16:

$$T_e = L * K_f * (K_x + K_y * W_b + 0,015 * W_b) + W_m * (L * K_y + H) + T_p + T_{am} + T_{ac} \quad (\text{A.16})$$

Onde:

W_m - Peso do material transportado por unidade de comprimento da distância, kg/m

H - Altura da inclinação ou descida da esteira, se houver, m

W_b - Peso da correia, kg/m

L - Distância de transporte ou comprimento do transportador, m

K_y - Fator de resistência da correia

K_t - Fator de correção de temperatura

T_p - Tensão da flexão da correia em torno das polias e resistência do rolamento da polia, kgf

T_{am} - Tensão da força para acelerar o material à medida que é alimentado na correia, kgf

T_{ac} - Tensão dos acessórios, kgf

Sendo aplicável a:

- Esteira única de menos de 900 m de comprimento
- Inclinado, declinado ou horizontal com, ou sem curvas verticais
- Unidirecional ou reverso em qualquer velocidade
- Unidades únicas ou múltiplas de esteira
- Saída por gravidade ou com coleta automática
- Tensão máxima da correia de 7250 kgf

Porém, em termos práticos alguns coeficientes são difíceis de estimar, ou não possuem impacto efetivo no projeto da esteira. Dessa forma, uma equação reduzida da equação de tensão definida por Nelson & Richins (2019) pode ser utilizada como estimativa para o projeto de esteiras com limitações de uso, porém ainda assim muito abrangente, como demonstra a Equação A.17:

$$T_e = W_m * H + 1,72(2 * W_b + W_m) * L \quad (\text{A.17})$$

Sendo aplicável a:

- Esteira única de menos de 250 m de comprimento
- Ponto de carga único e de fluxo livre
- Inclinado ou horizontal, mas sem curvas

- Cinto da esteira de tecido
- Roletes de calha planos ou de rolos iguais
- Unidade única
- Unidirecional ou reverso em velocidade de até 150 m/min
- Tensão máxima da correia de 53 kN

A.2.1.1.1 Dimensionamento C-101

O transportador de correia que recebe as baterias inteiras deve ser dimensionado em grande escala, a fim de evitar problemas na transportadora. Pela força localizada das baterias ser grande, a capacidade de carga desta deve ser grande e considerar um fluxo mássico bem maior que a entrada calculada no balanço de massa. Além disso, a esteira deve possuir acionamento automático assim que detectar carga em seu compartimento, com o objetivo em economia de consumo energético no transporte das baterias até a etapa de descarregamento. Em média e considerando a composição de entrada, as baterias de veículos elétricos possuem em massa um valor de 310,492 kg por unidade. Assim, a capacidade da esteira deve comportar o dobro disso considerando, possíveis baterias mais pesadas como força localizada, e também baterias de menor porte que podem ser alimentadas com estas.

Além disso, considerando os valores máximos de tamanho presentes na Tabela 7, a esteira deve possuir uma largura que comporte todos os tipos de baterias, e então a largura deve ser maior que todas as dimensões do maior valor possível para essa. Algumas considerações necessárias para o cálculo podem ser vistas na Tabela A.43, sendo consideradas com a perspectiva de um layout em linha de produção para que as etapas de acionamento/frenagem da esteira sejam automatizadas ou controláveis conforme a necessidade do processo.

Tabela A.43 – Considerações para o cálculo da C-101

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|----------------------------|------------------------|---|--------------|------------------|-------------------------------|
| 6,00 | 3,00 | 620,98 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.1.1.2 Cálculos energéticos C-101

Inicialmente, para o cálculo do fator de frequência, utiliza-se a Equação A.14 obtém-se:

$$F_{f,C-101} = 0,20 \text{ minZ}$$

Aplicando a Equação A.17 para o cálculo da tensão efetiva, tem-se:

$$T_{e,C-101} = 1171,29 \text{ kgf}$$

Com a tensão efetiva, calcula-se a potência de operação necessária para a movimentação das baterias aplicando-se a Equação A.15 e convertendo o resultado para kW.

$$P_{C-101} = 70277,55 \text{ kgf.m/min}$$

$$P_{C-101} = 11486,455 \text{ W} = 11,486 \text{ kW}$$

A linha da esteira deve considerar uma área de pelo menos 2,00 metros em cada lado da mesma para fins de locomoção de funcionários e para possíveis manutenções. Assim, uma largura de 7,00 metros para a área isolada deve ser considerada ao longo do comprimento considerado para o Transportador C-101. Portanto, a área total para o transporte das baterias pode ser calculado em um retângulo conforme a Equação A.18:

$$A_{t,C-101} = C_{t,C-101} * (2 * L_{ff,C-101} + L_{e,C-101}) \quad (\text{A.18})$$

$$A_{t,C-101} = 42,00 \text{ m}^2$$

A.2.1.2 Descarregamento da bateria (EL-101)

Para a operação de descarregamento das baterias, utiliza-se o equipamento descrito no item 5.1.1.2 para sua realização. Assim, os conectores devem ser adicionados e removidos manualmente por funcionários e a energia é revertida para a rede, que pode ser utilizada para a economia de energia no funcionamento de transportadores e demais máquinas. De acordo com Diekmann et al. (2018), um Estado da Carga (SoC) em 30% da carga total da bateria já garante uma desmontagem e uma moagem segura, sem a possibilidade de ocorrer explosões para a última, porém ainda com a necessidade de EPIs de isolamento para os funcionários para o primeiro. Considerando a corrente e a voltagem do equipamento escolhido, um tempo de operação de descarga estimado em 15 minutos por bateria veicular já pode ser considerado ideal para o processo. Porém, baterias menores requisitam um tempo de operação muito menor e

talvez uma descarga quase instantânea, principalmente pela menor capacidade de carga que estas possuem.

A.2.1.2.1 Dimensionamento EL-101

Nessa etapa utiliza-se também uma esteira transportadora com controle manual e automático conforme a necessidade do processo, e conectada a esteira C-101. Assim, pode-se pausar o deslocamento das baterias ao longo do processo para a descarga completa ou parcial, e encaminhar para a próxima etapa. A esteira dessa etapa é condicionada com os mesmos parâmetros considerados para a esteira C-101, mas ainda deve considerar necessidades adicionais, como: um espaço maior para a retenção de baterias caso o processo esteja sobrecarregado, um espaço maior para o maior fluxo de funcionários ao longo desta estação de trabalho, um espaço nas laterais da esteira (sem fluxo de matéria-prima) visando realizar uma descarga mais uniforme caso necessário, e por último, um guindaste de ponte rolante para a movimentação das baterias da esteira para a lateral imóvel da esteira e vice-versa, caso seja necessário.

Para o cálculo energético, algumas considerações foram elaboradas e estão presentes na Tabela A.44.

Tabela A.44 – Considerações para o cálculo da EL-101

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|----------------------------|------------------------|---|--------------|------------------|-------------------------------|
| 4,00 | 3,00 | 620,98 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da área total de isolamento para o processo, os dados de largura para cada espaço da área estão apresentados na Tabela A.45. Assim, para a largura imóvel da esteira e para a largura de fluxo de funcionários, considera-se o valor descrito na tabela para cada lado da transportadora.

Tabela A.45 – Considerações para o cálculo da EL-101

| Comprimento (m) | Largura da esteira (m) | Largura imóvel da esteira (m) | Largura de fluxo de funcionários (m) |
|----------------------------|-----------------------------------|--|---|
| 4,00 | 3,00 | 1,50 | 3,00 |

Fonte: Autores (2022).

Dessa forma, a Equação A.19 determina a área total reservada para o processo de descarregamento:

$$A_{t,EL-101} = C_{t,EL-101} * (L_{e,EL-101} + 2 * L_{i,EL-101} + 2 * L_{ff,EL-101}) \quad (A.19)$$

$$A_{t,EL-101} = 48,00 \text{ m}^2$$

A.2.1.2.2 Cálculos energéticos EL-101

Aplicando-se a Equação A.14 para o fator de frequência, tem-se:

$$F_{f,EL-101} = 0,13 \text{ min}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,EL-101} = 1136,89 \text{ kgf}$$

Para o cálculo da potência, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{EL-101} = 68213,55 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 11149,11 \text{ W} = 11,15 \text{ kW}$$

A.2.1.3 Transportador de correia (C-102)

As baterias são encaminhadas para a desmontagem com uma conexão entre a esteira da EL-101 com a esteira da DM-101.

A.2.1.3.1 Dimensionamento C-102

Para o transportador de correia C-102, as mesmas considerações utilizadas no transportador C-101 são feitas. As considerações para esta estão presentes na Tabela A.46.

Tabela A.46 – Considerações para o cálculo da C-102

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|-----------------|-------------|--------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 4,00 | 3,00 | 620,98 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da área total de isolamento para o processo, utiliza-se a Equação A.20 conforme a largura do transportador, e considerando 2,00 metros em cada lado da esteira para possíveis fluxos de funcionários.

$$A_{t,C-102} = C_{t,C-102} * (2 * L_{ff,C-102} + L_{e,C-102}) \quad (\text{A.20})$$

$$A_{t,C-102} = 28,00 \text{ m}^2$$

A.2.1.3.2 Cálculos energéticos C-102

Aplicando-se a Equação A.14 para o fator de frequência, tem-se:

$$F_{f,C-102} = 0,13 \text{ min}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,C-102} = 1136,89 \text{ kgf}$$

Para o cálculo da potência, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{C-102} = 68213,55 \text{ kgf.m/min} = 11149,11 \text{ W} = 11,15 \text{ kW}$$

A.2.1.4 Desmontagem da bateria (DM-101)

Com a entrada pela esteira C-102 das baterias inteiras e descarregadas completamente e/ou parcialmente, elas são desmontadas por funcionários através de uma esteira transportadora, controlada manual ou automaticamente conforme a necessidade do processo, em velocidades baixíssimas ou de operação (em acionamento esporádico). Assim como na descarga, o fluxo de funcionários e áreas de retenção de matéria-prima devem ser considerados para a operação, já

que acúmulos de matéria-prima e a grande mobilidade dos funcionários com a utilização dos equipamentos podem ocorrer. O grande diferencial dessa etapa é que partes desmontadas da bateria devem ser movimentadas até tanques de pequeno/médio porte para processamentos secundários. Assim, guindastes de ponte rolante devem ser considerados não só para o deslocamento da bateria para as áreas de retenção/desmonte, mas também para o deslocamento de peças pesadas retiradas da bateria para os devidos tanques de armazenamento que estão próximos, caso seja necessário.

Além disso, os equipamentos de desmontagem devem estar próximos, e uma área para estes também deve ser considerada. Para a operação, estima-se que um tempo de 60 minutos de desmonte por bateria veicular pode ser considerado para uma desmontagem eficaz e sem grandes esforços. Para o caso de baterias menores, são mantidas na esteira transportadora sem o desmonte, já que estas já estão ao nível de módulo/célula. Os módulos desmontados da bateria sem a parte eletrônica são encaminhados com as baterias menores para o moinho SR-101 através da esteira C-103, por uma conexão entre a esteira da desmontagem e o transportador.

A.2.1.4.1 Dimensionamento DM-101

Para a esteira da desmontagem, o dimensionamento é procedido da mesma forma como feito para a descarga, e as estimativas considerando a linha de desmonte são observadas na Tabela A.47.

Tabela A.47 – Considerações para o cálculo da DM-101

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|----------------------------|------------------------|---|--------------|------------------|-------------------------------|
| 8,00 | 3,00 | 620,98 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da área total de isolamento para o processo, consideram-se larguras para cada lado dentro do comprimento definido para a operação, considerando as diferentes necessidades descritas anteriormente, e observáveis na Tabela A.48.

Tabela A.48 – Considerações para o cálculo da DM-101

| Comprimento (m) | Largura da esteira (m) | Largura imóvel da esteira (m) | Largura de fluxo de funcionários (m) | Largura para equipamentos de desmonte (m) |
|-----------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---|
| 8,00 | 3,00 | 1,50 | 6,00 | 1,00 |

Fonte: Autores (2022).

Assim, utiliza-se a Equação A.21 para o cálculo da área de isolamento para a operação:

$$A_{t,DM-101} = C_{t,DM-101} * (L_{e,DM-101} + 2 * L_{i,DM-101} + 2 * L_{ff,DM-101} + 2 * L_{ed,DM-101}) \quad (A.21)$$

$$A_{t,DM-101} = 160,00 \text{ m}^2$$

A.2.1.4.2 Cálculos energéticos DM-101

Utilizando a Equação A.14 para o cálculo do fator de frequência, encontra-se:

$$F_{f,DM-101} = 0,26 \text{ min}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,DM-101} = 1205,69 \text{ kgf}$$

Para o cálculo da potência, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{DM-101} = 72341,55 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 11823,80 \text{ W} = 11,82 \text{ kW}$$

A.2.1.5 Tanques de estocagem de peças (TK-101A, TK-101B e TK-101C)

Para a estocagem das peças, os tanques devem possuir dimensões que comportem os materiais retirados do invólucro da bateria. Essas dimensões devem ser definidas de acordo com o tamanho do pacote da bateria, para comportar os tamanhos máximos das peças armazenadas para processamento posterior ou venda. Como a seleção dessas peças é feita manualmente, os tanques TK-101A, TK-101B e TK-101C devem ser selecionados para a entrada de peças de alumínio, componentes eletrônicos e materiais de cobre e aço, respectivamente.

A.2.1.5.1 Dimensionamento TK-101

Do balanço de massa, tem-se os valores em massa para cada uma das 3 frações selecionadas para os tanques presentes na Tabela A.49.

Tabela A.49 – Vazão mássica dos materiais desmontados e armazenados

| Alumínio no TK-101A (kg/dia) | Eletrônicos no TK-101B (kg/dia) | Cobre e aço no TK-101C (kg/dia) |
|-------------------------------------|--|--|
| 1021,72 | 141,80 | 64,82 |

Fonte: Autores (2022).

Considera-se um tanque quadrado de lado com 2,00 metros para cada um dos tanques, o qual é suficiente para criar rotinas de armazenamento em cada tanque diariamente considerando o fluxo dos materiais. Essa retirada de material pode ser feita por empilhadeiras, desde que seja considerado tanques que possuam abertura, e também pode ser feita pelo guindaste de ponte rolante até um caminhão transportador, e deste para um armazenamento fora do processo ou para a venda. Para o cálculo do volume, utiliza-se a Equação A.22.

$$V = L^3 \quad (\text{A.22})$$

$$V_{TK-101A} = V_{TK-101B} = V_{TK-101C} = 8 \text{ m}^3$$

A.2.1.6 Transportador de correia (C-103)

O transportador de correia C-103 recebe as baterias menores e os módulos sem a parte eletrônica desmontados anteriormente, e encaminha para o moinho em que serão triturados. O grande diferencial dessa esteira é a sua inclinação, já que é necessário manter o moinho SR-101 em um nível elevado com relação ao nível do solo. Outra questão importante é o isolamento dessa esteira, ou seja, a movimentação acontece pela esteira inclinada em um duto de seção retangular para evitar possíveis contaminações de gases provenientes do processo de moagem das baterias ao ambiente fabril, e para a atmosfera.

Além disso, a inclinação desse transportador também favorece outros aspectos no ambiente produtivo, como o melhor fluxo de funcionários para a desmontagem das baterias, já que com a inclinação da esteira é possível ter uma passagem de pessoas abaixo desta, melhorando o deslocamento entre os dois lados da linha de desmontagem. O isolamento da esteira também favorece essa ideia, já que com um duto de seção retangular não existe o risco

de alguma bateria cair no deslocamento até o moinho, evitando também riscos para o fluxo que possa ocorrer abaixo desta.

A.2.1.6.1 Dimensionamento C-103

Com isso, algumas considerações são criadas e reconsideradas com relação às outras esteiras, considerando as dimensões do módulo descritos na Tabela 7, e também o peso destes. Como visto anteriormente, a consideração do BatPaC é que existam 20 módulos por bateria, e com um valor médio de 13,62 kg por módulo (considerando a alimentação definida), deve-se estimar um valor de 20 vezes esse valor para a capacidade da esteira de forma prévia. Para posterior definição das considerações, deve-se calcular o comprimento da esteira considerando uma inclinação e uma altura a ser inclinada. Assim, considerando uma altura de 5,00 metros com uma inclinação da esteira em 20°, utiliza-se a Equação A.23 para o cálculo do comprimento da esteira.

$$C_{t,C-103} = H_{t,C-103}/\text{sen}(i) \quad (\text{A.23})$$

$$C_{t,C-103} = 14,62 \text{ m}$$

A partir disso, é possível elaborar as considerações para o cálculo da tensão efetiva e potência da esteira, presentes na Tabela A.50.

Tabela A.50 – Considerações para o cálculo da C-103

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|-----------------|-------------|--------------------------------|-------|-----------|--------------------|
| 14,62 | 1,00 | 272,44 | 5,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da área total de isolamento para o processo, considera-se os 1,00 metros de largura da esteira e mais 2,00 metros em cada lado da esteira para possíveis fluxos de pessoas. Assim, utiliza-se a Equação A.24 para o cálculo total da área isolada para a operação.

$$A_{t,C-103} = C_{t,C-103} * (L_{e,C-103} + 2 * L_{ff,C-103}) \quad (\text{A.24})$$

$$A_{t,C-103} = 73,10 \text{ m}^2$$

A.2.1.6.2 Cálculos energéticos C-103

Utilizando a Equação A.14 para o cálculo do fator de frequência, encontra-se:

$$F_{f,C-103} = 0,49 \text{ min}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,C-103} = 813,22 \text{ kgf}$$

Para o cálculo da potência, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{C-103} = 48793,44 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 7975,00 \text{ W} = 7,98 \text{ kW}$$

A.2.1.7 Moinho (SR-101)

Os módulos e baterias menores ao nível de célula e/ou módulo são alimentados no moinho do tipo shredder elevado a uma altura de 5,00 metros acima do nível industrial, pela esteira transportadora C-103. O moinho pode contar com acionamento automático através de sensores de peso em algum ponto da esteira, o que pode economizar energia em detrimento de estar ligado a todo momento. Outra alternativa é a contenção e material, utilizando o moinho em alguns determinados períodos diários para o processamento e acúmulo, que pode ser encaminhado continuamente ao resto do processo consoante a necessidade. Porém, a operação pode ser dimensionada considerando a operação total diária, considerando capacidades mínimas pré-definidas para essa.

O dimensionamento do moinho depende principalmente de dados experimentais para a determinação da energia necessária para a quebra e diminuição do tamanho das partículas. Esses dados podem ser obtidos por diferentes técnicas como: teste do pêndulo, teste do pêndulo de Narayanan e Whitens, teste de queda JKMRC, teste de moagem em moinho de bolas, e teste de moagem em moinho de hastes de liga. Esses testes fornecem dados individuais para cada tipo de material processado, que podem ser utilizados para a definição do índice de trabalho de trituração (W_i) em kWh/t, destes materiais. Com esse índice, é possível definir a energia

específica de trabalho para um moinho processar uma determinada matéria-prima pela Equação A.25 (GUPTA & YAN, 2011).

$$E_G = 10 * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (\text{A.25})$$

Onde:

E_G - Energia específica de trituração, kWh/t

W_i - Índice de trabalho de trituração, kWh/t

P_{80} - 80% do tamanho da fração passante de partículas trituradas, μm

F_{80} - 80% do tamanho da fração passante de partículas alimentadas, μm

Com o valor da energia específica definida com os dados experimentais, é possível estimar a potência do triturador com a Equação A.26, considerando a vazão alimentada do material caracterizado experimentalmente.

$$E_G = P_M/Q \quad (\text{A.26})$$

Onde:

P_M - Potência de eixo do moinho, kW

Q - Vazão alimentada, t/h

A.2.1.7.1 Dimensionamento SR-101

Considerando as dimensões do módulo observadas na Tabela 7 do Referencial Teórico, é necessário estimar uma abertura do moinho que comporte o volume do módulo. Assim, a Tabela A.51 define os termos de altura, e largura para isso. O tamanho do equipamento depende diretamente do fornecedor e do modelo escolhido, e por isso, também é feita uma estimativa de valores de largura e comprimento para a área isolada do processo.

Tabela A.51 – Estimativa de dimensões para o SR-101

| Altura da entrada (m) | Comprimento da câmara de moagem (m) | Largura da entrada (m) | Largura da área isolada (m) | Comprimento da área isolada (m) |
|-----------------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 0,50 | 1,00 | 1,00 | 5,00 | 5,00 |

Fonte: Autores (2022).

Calculando a área isolada para o moinho, tem-se a Equação A.27.

$$A_{t,SR-101} = C_{t,SR-101} * L_{t,SR-101} \quad (\text{A.27})$$

$$A_{t,SR-101} = 25,00 \text{ m}^2$$

Com os valores da dimensão da câmara de moagem do SR-101 presentes na Tabela A.50, utiliza-se a Equação A.28 para o cálculo do volume da câmara e conseqüentemente do volume de gás inerte necessário para conter possíveis riscos da operação. Utiliza-se a Equação A.29 para o cálculo da vazão volumétrica de gás requisitado considerando o tempo de residência de 5 minutos.

$$V = C * L * H \quad (\text{A.28})$$

$$V_{ca,SR-101} = 0,50 \text{ m}^3$$

$$t_R = \frac{V_R}{Q} \quad (\text{A.29})$$

$$Q_{N_2,SR-101} = 0,10 \text{ m}^3/\text{min} = 0,00167 \text{ m}^3/\text{s} = 144 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Considerando a Figura A.1 do Anexo A.E para as propriedades termodinâmicas do N₂, obtém-se a densidade do gás na temperatura ambiente (25 °C ou 298,15 K) demonstrada na Equação A.30. Assim, calcula-se a vazão mássica de gás N₂ com a Equação A.31.

$$\rho_{N_2,SR-101} = 1,13 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{A.30})$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A.31})$$

$$m_{N_2,SR-101} = 162,79 \text{ kg/dia} = 0,113 \text{ kg/min}$$

$$m_{N_2,SR-101} = 0,00188 \text{ kg/s}$$

A.2.1.7.2 Cálculos energéticos SR-101

Para o cálculo da potência necessária para o shredder triturar os módulos e células alimentadas, é possível buscar dados na literatura sobre a energia específica para esse material.

Assim, a partir dos estudos realizados por Wuschke et al. (2018) para a trituração de células das baterias de íons de lítio, é possível estimar a energia necessária para o moinho do tipo shredder, considerando uma faixa menor que 10 mm de partículas trituradas. O valor encontrado no estudo define que 4,50 kWh/t é suficiente para liberar o invólucro, a folha separadora, a folha do ânodo e a folha do cátodo. Apesar desse valor não considerar outros aspectos, como a parte do módulo e demais materiais presentes na bateria, é possível demonstrar uma perspectiva de escolha para o tipo de shredder necessário para o andamento do processo.

Considerando que o moinho tenha capacidade de processar 1 módulo por segundo, ou seja, utilizando o valor médio de massa de módulo de 13,62 kg. Utiliza-se esse valor de capacidade como um valor mínimo de capacidade para o shredder, já que podem existir módulos maiores. Além disso, as baterias menores já estariam contempladas, pois a sua trituração necessitaria de menos energia que o valor mínimo. Assim, calcula-se a vazão mássica mínima necessária (em t/h) para estimar a potência de eixo do moinho com a Equação A.32, adaptada da Equação A.26, considerando a energia específica definida pela literatura.

$$Q_{min,SR-101} = 13,62 \text{ kg/s} = 817,32 \text{ kg/min} = 49,04 \text{ t/h}$$

$$P_{M,SR-101} = E_{G,SR-101} Q_{min,SR-101} \quad (\text{A.32})$$

$$P_{M,SR-101} = 220,68 \text{ kW}$$

A.2.1.8 Transportador helicoidal (C-104)

Com a saída dos sólidos cominuídos do moinho SR-101, provenientes dos módulos sem peças eletrônicas, é necessário primeiramente estimar uma vazão volumétrica para este. Dessa forma, a utilização de uma densidade aparente torna-se essencial para considerar os aspectos não uniformes do sólido. Apesar de ser uma estimativa pouco precisa, a utilização do volume do módulo como referência para o cálculo de densidade considerando a massa do mesmo pode ser usada, já que a capacidade do transportador helicoidal deverá ser considerado bem maior que o requisitado por fatores de ampliação e de funcionamento do mesmo. Por isso, considerando as dimensões do módulo provenientes da Tabela 7 do Referencial Teórico para o cálculo do volume por meio da Equação A.33, e da estimativa da massa média de 13,62 kg para cada módulo, é possível definir a densidade aparente para o sólido cominuído com a Equação A.34.

$$V_{mod} = C_{mod} * L_{mod} * H_{mod} \quad (\text{A.33})$$

$$V_{mod} = 0,01043 \text{ m}^3$$

$$\rho_{ap} = \frac{m_{mod}}{V_{mod}} \quad (\text{A.34})$$

$$\rho_{ap} = 1306,00 \text{ kg/m}^3 = 81,53 \text{ lbs/ft}^3$$

A.2.1.8.1 Dimensionamento C-104

Considerando a entrada de 8735,43 kg/dia proveniente do balanço de massa para a vazão prevista, calcula-se o valor em vazão volumétrica com a Equação A.35, e estima-se um valor de vazão mássica e volumétrica para o dimensionamento do transportador em 15 vezes acima do valor real para fins de projeto, já que o equipamento tende a funcionar bem em qualquer vazão abaixo do projetado e acima da capacidade mínima. Utiliza-se a Equação A.36 para o cálculo do reajuste de capacidade, e utiliza-se a Equação A.37 para o cálculo da capacidade volumétrica de projeto para o transportador.

$$\underline{V}_{C-104} = \frac{m_{C-104}}{\rho_{ap}} \quad (\text{A.35})$$

$$\underline{V}_{C-104} = C_{real,C-104} = 0,28 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$C_{m,C-104} = \underline{m}_{C-104} * 15 \quad (\text{A.36})$$

$$C_{m,C-104} = 131031,49 \text{ kg/dia} = 5459,65 \text{ kg/h}$$

$$C_{v,C-104} = \frac{C_{m,C-104}}{\rho_{ap}} \quad (\text{A.37})$$

$$C_{v,C-104} = 4,18 \text{ m}^3/\text{h} = 147,63 \text{ ft}^3/\text{h}$$

Assim, os valores da capacidade mínima de um transportador helicoidal podem ser calculados segundo a Equação A.38, proveniente das normas ANSI/CEMA de 2019 para transportadores helicoidais. Os transportadores helicoidais geralmente são muito controláveis no sentido da vazão requerida para o processo, já que eles são controlados pelas rotações por minuto do disco giratório que realiza o transporte (CEMA, 2019).

$$C_{hmin,C-104} = \frac{0,7854 * (D_s^2 - D_p^2) * P * K * 60}{1728} \quad (A.38)$$

Onde:

C_{hmin} - Capacidade mínima, $ft^3/h.rpm$

D_s - Diâmetro do parafuso, in

D_p - Diâmetro do pino central, in

P - Passo ou frequência do parafuso, in

K - Fração de carregamento de calha

A equação não considera a espessura da lâmina, a tolerância do diâmetro da lâmina, a tolerância do passo do parafuso ou ainda que o material pode ou não se mover na folga entre a rosca e a calha. Alguns materiais podem aderir à calha e formar um bolo, caso em que a capacidade pode ser muito próxima do valor da equação. Porém, em estado estacionário isso pode ser considerado desprezível. Assim, os valores para o cálculo da capacidade mínima podem ser encontrados consoante a Figura A.1 presente no Anexo A.A para transportadores helicoidais comerciais. Os valores considerados estão presentes na Tabela A.52, utilizando os transportadores do tipo A-45, e também considerando valores presentes na norma CEMA (2019) para o diâmetro do pino central, e considerando a frequência (ou distância entre os helicoidais) do parafuso como padrão e igual ao diâmetro do parafuso.

Tabela A.52 – Estimativa de dimensões para o C-104

| Frequência do parafuso (in) | Diâmetro do parafuso (in) | Diâmetro do pino central (in) | Fração de carga do transportador (-) | Rotações máximas (rpm) |
|-----------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 9,00 | 9,00 | 2,37 | 0,30 | 100,00 |

Fonte: CEMA (2019).

Assim, é possível calcular a capacidade mínima com a Equação A.38.

$$C_{hmin,C-104} = 5,55 \text{ ft}^3/h.rpm = 0,157 \text{ m}^3/h.rpm$$

Também é possível estimar as rotações para a capacidade estimada e para a capacidade real conforme a Equação A.39 também da norma CEMA (2019).

$$N_{C-104} = \frac{C_{req,C-104}}{C_{min,C-104}} \quad (A.39)$$

Onde:

N - Rotações do transportador na capacidade desejada, rpm

C_{req} - Capacidade requerida, ft³/h

Utilizando dados da capacidade real e da capacidade estimada, desenvolvem-se os limites inferiores e superiores para a operação conforme as Equações A.40 e A.41 para as rotações e para a capacidade, respectivamente, e calculam-se seus limites segundo os valores definidos anteriormente e com a Equação A.39. Os valores são usados como referência, e podem ser alternados consoante o andamento do processo, já que é a potência do motor do helicoidal que rege o transporte do material, logo, com sensores e instrumentos de controle de vazão, o material pode ser transportado com diferentes rotações por minuto.

$$N_{min,C-104} < N_{real,C-104} < N_{estimado,C-104} \quad (A.40)$$

$$1 \text{ rpm} < 1,77 \text{ rpm} < 26,61 \text{ rpm}$$

$$C_{min,C-104} < C_{real,C-104} < C_{v,C-104} \quad (A.41)$$

$$0,157 \text{ m}^3/\text{h} < 0,28 \text{ m}^3/\text{h} < 4,18 \text{ m}^3/\text{h}$$

A.2.1.8.1 Cálculos energéticos C-104

Após o dimensionamento da capacidade, a energia necessária para a movimentação do parafuso é requisitada para o projeto. Assim, a potência necessária para operar um transportador helicoidal é baseada na instalação adequada, taxa de alimentação uniforme e regular para o transportador e outros critérios de projeto. A potência requerida para o transportador é definida pela potência para superar o atrito (hp_f) e pela potência para transportar o material nas condições definidas (hp_m), demonstrado pelas Equações A.42 e A.43, respectivamente, definidas pelas normas CEMA (2019).

$$hp_f = \frac{L * N * F_d * F_b}{1000000} \quad (\text{A.42})$$

$$hp_m = \frac{C * L * W * F_f * F_m * F_p}{1000000} \quad (\text{A.43})$$

Onde:

C- Capacidade do transportador, ft³/h

F_b - Fator de rolamento

F_d - Fator de diâmetro

F_f - Fator de carga

F_p - Fator de palhetas

F_m - Fator do material

L - Comprimento do transportador, ft

N - Rotações do helicoidal, rpm

W - Densidade aparente do material, lbs/ft³

Para o cálculo da potência total requisitada, utiliza-se a Equação A.44 também definida pelas normas CEMA (2019).

$$hp_{total} = \frac{(hp_f + hp_m) * F_o}{e} \quad (\text{A.44})$$

Onde:

e - Eficiência do motor

F_o - Fator de sobrecarga

Dessa forma, utiliza-se tabelas e gráficos para a determinação dos fatores de cada equação consoante o projeto considerado. Para o Fator de Rolamento (F_d), considera-se o caso para o pior tipo de material possível, no caso, para ferro duro resfriado ou manga de liga endurecida, com o fator presente na Figura A.2 do Anexo A.A. Para o Fator de Diâmetro Helicoidal, considera-se o valor do diâmetro considerado no projeto, conforme a Figura A.3 no Anexo A.A. Além disso, para o comprimento do transportador, considera-se o valor de 5,00 metros. Os valores considerados e tabelados para o cálculo do hp_f podem ser vistos na Tabela A.53.

Tabela A.53 – Estimativa de dimensões para o C-104

| Comprimento do transportador (ft) | Fator de rolamento | Fator de do diâmetro | Rotações (rpm) |
|--|---------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 16,40 | 4,40 | 31,00 | 26,61 |

Fonte: CEMA (2019).

Para o cálculo do hp_m , utiliza-se as Figuras A.4 e A.5 do Anexo A.A para a estimativa do Fator de Carga (F_f) e Fator de Palhetas (F_p), respectivamente, considerando sem palhetas e com carga padrão. Para o Fator do Material (F_m), esse dado não foi encontrado na literatura e nem no livro de normas CEMA (2019), e por isso foi feito uma estimativa do maior número possível, já que este considera a abrasividade e transportabilidade do material. Os valores típicos para este variam de 0,4 até 4. As considerações para o cálculo do hp_m estão presentes na Tabela A.54.

Tabela A.54 – Considerações para o transportador C-104

| Fator de carga | Fator de palhetas | Fator do material |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1,00 | 1,00 | 4,00 |

Fonte: CEMA (2019).

Com isso, calcula-se utilizando as considerações elaboradas e valores pré-estabelecidos anteriormente no projeto do transportador.

$$hp_{f,C-104} = 0,06 \text{ hp}$$

$$hp_{m,C-104} = 0,79 \text{ hp}$$

Utilizando esses valores, é necessário encontrar o Fator de Sobrecarga (F_o) a partir do gráfico presente na Figura A.6 do Anexo A.A, somando-se os dois valores de potência para a obtenção do Eixo X, conforme a Equação A.45.

$$Eixo X = hp_f + hp_m \quad (A.45)$$

$$Eixo X = hp_f + hp_m$$

Rebatendo o valor do Eixo X na reta presente na Figura A.6, obtém-se o valor do Fator de Sobrecarga presente abaixo. Para a eficiência do motor (ϵ), considera-se uma engrenagem helicoidal de redução simples, redutores de velocidade montados em eixo fechado e acionamentos de rosca transportadora, e seleciona-se o valor dessa descrição presente na Figura A.7 do Anexo A.A, com valor de 0,95. Com a Equação A.44, calcula-se o valor de potência total obtido para o transportador projetado, presente na abaixo.

$$F_o = 2,15$$

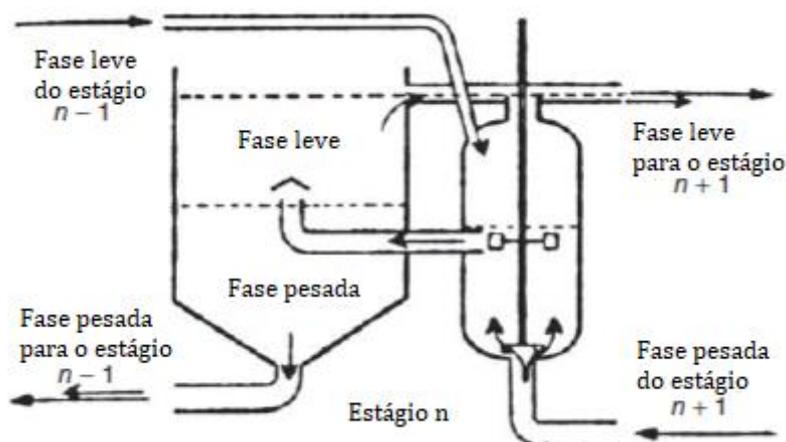
$$hp_{total,C-104} = 1,92 \text{ hp} = 1,43 \text{ kW}$$

A.2.2 Área 200

A.2.2.1 Extrator misturador decantador (EX-201)

Com a alimentação dos sólidos pelo transportador helicoidal C-104, a extração líquido-líquido deve ser realizada para a retirada do eletrólito e de compostos fluorídricos diluídos neste. O modo de extração é incomum, já que essa operação específica para o eletrólito não é caracterizável como uma extração sólido-líquido, já que a fase a ser extraída não está no sólido, e também não é totalmente uma extração líquido-líquido, pois os sólidos existem como uma fase da operação em detrimento de uma fase aquosa, por exemplo. Assim, o extrator misturador decantador demonstra uma capacidade de operação entre os dois modos de extração, fazendo sentido prático. A Figura A.1 demonstra o sistema de operação sugerido para o equipamento, considerando um decantador ao lado do recipiente de extração que passa através dos recírculos. Esse decantador é considerado parte do equipamento, e ele ajuda na concentração da fase a ser reciclada para o estágio seguinte, retirando parte da fase líquida de volta ao estágio anterior.

Figura A.1 – Sistema de extração proposto



Fonte: Adaptado de Green & Southard (2019).

A.2.2.1.1 Dimensionamento EX-201

Considerando o balanço de massa, o cálculo de volume do extrator deve ser feito considerando o volume das duas fases presentes nesse, com suas respectivas densidades. Como forma de estimativa, para os sólidos considera-se a densidade aparente dos sólidos com o mesmo valor considerado anteriormente, pois mesmo que existam dados da densidade de cada sólido, a estimativa de uma densidade média para os sólidos não faria sentido, já que sólidos imersos em um líquido vão possuir uma densidade aparente por possíveis poros ou características de não-molhabilidade. As considerações estão presentes na Tabela A.55 para o cálculo volumétrico, e também considerando, dados da extração feita por Haas et al. (2018), que definiu um tempo de extração com DMC de 60 minutos, sendo este o tempo de residência necessário dos sólidos no extrator.

Tabela A.55 – Propriedades e considerações para os componentes

| Densidade do meio (kg/m ³) | Densidade aparente dos sólidos (kg/m ³) | Densidade do eletrólito (kg/m ³) | Tempo de residência (min) |
|--|---|--|---------------------------|
| 1068,00 | 1306,00 | 1200,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da vazão volumétrica da fase líquida, utiliza-se a Equação A.46 considerando a participação do eletrólito como um líquido diluído em DMC. Para o cálculo da vazão volumétrica da fase sólida, utiliza-se a Equação A.47.

$$V_l = Q_l = \frac{m_{DMC}}{\rho_{DMC}} + \frac{m_E}{\rho_E} \quad (\text{A.46})$$

$$V_s = Q_s = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (\text{A.47})$$

Do balanço de massa, as vazões mássicas de cada fração considerada para o cálculo do volume estão presentes na Tabela A.56.

Tabela A.56 – Vazão mássica para o extrator

| Vazão mássica de DMC (kg/dia) | Vazão mássica de eletrólito (kg/dia) | Vazão mássica de sólidos (kg/dia) |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 77163,49 | 933,96 | 7801,47 |

Fonte: Autores (2022).

Pelas Equações A.46 e A.47, e utilizando-se Equação A.48 para a soma da vazão volumétrica, tem-se:

$$V_t = V_l + V_s \quad (\text{A.48})$$

$$V_{l,EX-201} = 73,03 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{s,EX-201} = 5,97 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{t,EX-201} = Q_{t,EX-201} = 79,00 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,055 \text{ m}^3/\text{min}$$

Com a vazão volumétrica total, calcula-se o volume do extrator conforme a Equação A.49 do tempo de residência.

$$t_R = \frac{V_R}{Q} \quad (\text{A.49})$$

$$V_{Rmin,EX-201} = 3,29 \text{ m}^3$$

Considerando que o extrator possua uma capacidade de 65% acima do necessário com a Equação A.50, o volume é calculado. O extrator EX-201 recebe menos DMC que os outros, já que uma parte que este recebe é recirculada pelos outros extratores, fazendo com que os outros consequentemente recebam um valor maior de DMC pela recirculação.

$$V_{R,EX-201} = V_{Rmin,EX-201} * 1,65 \quad (A.50)$$

$$V_{R,EX-201} = 5,43 \text{ m}^3$$

Para o cálculo do modelo de extrator, considera-se medidas padrão estabelecidas por Cremasco (2014) e pela correlação de Zwietering para modelos de mistura sólido-líquidos de acordo com Green & Southard (2019). As Equações A.51, A.52, A.53, A.54 e A.55 representam esses modelos para a altura do tanque (H), diâmetro do tanque (T), diâmetro do impelidor (Di), altura do impelidor com relação ao fundo (C), espessura do impelidor (W) e espessura das chicanas (Wb).

$$\frac{H}{T} = 2 \quad (A.51)$$

$$\frac{D_i}{T} = \frac{1}{2} \quad (A.52)$$

$$\frac{C}{T} = \frac{1}{3} \quad (A.53)$$

$$\frac{W}{D_i} = 0,2 \quad (A.54)$$

$$\frac{W_b}{T} = 0,083 \quad (A.55)$$

$$V = H * \frac{(T^2) * \pi}{4} \quad (A.56)$$

$$V = \frac{(T^3) * \pi}{2} \quad (A.57)$$

Os valores calculados estão listados na Tabela A.57.

Tabela A.57 – Valores dimensionados para o extrator EX-201

| T (m) | H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,51 | 3,02 | 0,76 | 0,50 | 0,15 | 0,13 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.2.1.2 Cálculos energéticos EX-201

Para o EX-201, não é necessário balanço de energia, pois a temperatura do solvente de entrada no extrator está em temperatura ambiente, e o extrator não necessita de aquecimento nem de resfriamento. O grande fator importante para o EX-201 é a agitação e a sedimentação das partículas dentro dessa agitação por modelos sólido-líquido que estimem a eficiência da sedimentação. Assim, a potência do impelidor deve ser determinada como um cálculo energético estimativo para o motor de agitação do impelidor, e os cálculos para a sedimentação considerado um modelo adequado dependente da agitação no meio de extração.

Dessa forma, para o cálculo da potência de agitação, usa-se então o valor do diâmetro do impelidor, viscosidade do meio, densidade do meio e velocidade de rotação do agitador para o cálculo do Número de Reynolds (Re), com o qual é possível definir o Número de Potência (N_p) a partir da Figura A.1 do Anexo A.B para o cálculo da potência de agitação conforme o impelidor escolhido, e assim determinar a potência do impelidor. O diâmetro do impelidor é um valor conhecido, porém a viscosidade do meio e a densidade do meio deve ser considerada para fins de projeto. Dessa forma, para ambas se considera valores do DMC, já que a fração mássica e volumétrica dos sólidos está abaixo de 10%, não tendo grandes significâncias para esses cálculos preliminares. A rotação do agitador é estimada pelo estudo de Haas et al. (2018), podendo ser modificado conforme o necessário. As considerações feitas para isso estão presentes na Tabela A.58.

Tabela A.58 – Valores calculados e retirados da literatura para os extratores

| Densidade do meio (kg/m³) | Viscosidade do meio (cP) | Velocidade de agitação (rpm) | Diâmetro do impelidor (m) |
|---|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1068,00 | 0,63 | 60,00 | 0,76 |

Fonte: Autores (2022).

O Número de Reynolds e a Potência do Impelidor podem ser calculados com as Equações A.58 e A.59, respectivamente.

$$Re = \frac{D^2 * N * \rho}{\mu} \quad (A.58)$$

$$N_p = \frac{P}{\rho * N^3 * D^5} \quad (A.59)$$

Onde:

$Re \geq 20000$ - Turbulento

$20000 > Re > 10$ - Transição

$Re \leq 10$ - Laminar

D - Diâmetro do impelidor, m

N - Velocidade de agitação, rps

μ - Viscosidade do meio, Pa.s

ρ - Densidade do meio, kg/m³

Considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p de acordo com o Re calculado. Para o EX-201 tem-se os valores definidos nas Equações A.60 e A.61 para o Re e o N_p , respectivamente, e assim um valor de P calculado abaixo.

$$Re_{EX-201} = 969093,90 \quad (A.60)$$

$$N_{p,EX-201} = 1,30 \quad (A.61)$$

$$P_{EX-201} = 343,05 \text{ N.m/s} = 0,343 \text{ kW}$$

Porém, em uma solução contendo sólidos a potência de agitação pode ser maior, e o fator de aceleração das partículas pode ajudar a manter os sólidos totalmente suspensos, o que para um extrator misturador decantador não é o ideal. Assim, Zwietering (1958) elaborou uma correlação utilizada por diversos autores, entre eles Grenville et al. (2015), para o cálculo da velocidade de agitação que corresponde a suspensão completa, ou uma suspensão em que os sólidos ficam no máximo 1 segundo, no fundo do recipiente. A Figura A.2 do Anexo A.B representa a movimentação das partículas de acordo com o estado de suspensão dos sólidos.

Por isso, utiliza-se a Equação A.62 para o cálculo da velocidade de agitação em que os sólidos permanecem completamente em suspensão, conforme Green & Southard (2019) e Greenville et al. (2015). O valor da constante S pode ser calculado pela Equação A.63, ou utilizar a tabela de correlação de Zwietering para a estimativa do seu valor conforme os modelos do recipiente. Assim, utilizou-se a Figura A.3 do Anexo A.B para definir o valor de S, já que os valores de projeto do extrator são condizentes com valores listados, considerando o impelidor de turbinas de pás inclinadas (PBT). A Equação A.64 define o valor definido pela correlação.

$$N_{js} = S * \frac{v^{0,10} * d^{0,20} * X^{0,13} * (g * \Delta\rho/\rho_L)^{0,45}}{D^{0,85}} \quad (\text{A.62})$$

Onde:

N_{js} - Velocidade de rotação em suspensão de sólidos completa, rps

S - Constante de Zwietering

v - Viscosidade cinemática, m²/s

d - Diâmetro médio da partícula em suspensão, m

X - Concentração em relação kg de sólidos por kg de fluido, %

g - Aceleração da gravidade, 9,81 m/s²

$\Delta\rho$ - Diferença de densidade entre o sólido e o meio líquido ($\rho_s - \rho_L$), kg/m³

D - Diâmetro do impelidor

$$S = Re^{0,10} * Fr^{0,45} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,20} * X^{0,13} \quad (\text{A.63})$$

Onde:

Fr - Número de Froude, $\left(\frac{N^2 * D}{g}\right)$

$$S = 3,40 \quad (\text{A.64})$$

Com o valor estabelecido pela velocidade de rotação em suspensão completa, refazem-se os cálculos para o Re com a Equação A.58, encontra-se um novo N_p e corrige-se o valor de potência com a Equação A.59. Assim, a potência do impelidor obedecerá aos sólidos presentes, e também se define uma margem para a utilização da agitação, não podendo ultrapassar o valor de N_{js} , já que uma suspensão completa não é interessante para um misturador decantador,

podendo resultar em um reciclo muito diluído com DMC, o que conseqüentemente pode sobrecarregar os outros extratores e a centrífuga.

Para o cálculo da concentração de sólidos em meio líquido, usa-se a Equação A.65. e para o cálculo da viscosidade cinemática utiliza-se a Equação A.66.

$$X = \frac{m_s}{m_s + m_l} * 100 \quad (\text{A.65})$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{A.66})$$

Para o cálculo do extrator EX-201 e dos outros extratores, algumas considerações devem ser feitas, principalmente com relação ao diâmetro médio da partícula. Assim, os valores considerados e/ou calculados estão presentes na Tabela A.59.

Tabela A.59 – Considerações e cálculos para a velocidade de suspensão completa do EX-201

| X (%) | ν (m²/s) | d (m) | S |
|--------------|---|-------------------|----------|
| 9,08 | $5,89 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | 3,40 |

Fonte: Autores (2022).

Com isso, os cálculos são precedidos para o EX-201 e o valor da velocidade para a suspensão uniforme é demonstrado abaixo. O valor para o novo Re utilizando a Equação A.58 e para o novo valor de N_p plotado na Figura A.1 do Anexo A.B estão presentes abaixo também, respectivamente, e com isso estima-se o novo valor de potência do impelidor.

$$N_{js,EX-201} = 1,14 \text{ rps} = 68,7 \text{ rpm}$$

$$Re_{js,EX-201} = 1109233,93$$

$$N_{p,js,EX-201} = 1,30$$

$$P_{js,EX-201} = 0,51 \text{ kW}$$

Assim, estabelece-se um parâmetro importante no projeto de um extrator misturador decantador, já que o dimensionamento deve considerar os sólidos em uma suspensão uniforme, caso seja necessário para o tempo de residência da mistura sólido-líquida no equipamento. Essa

estimativa é importante do ponto de vista operacional, já que a razão sólido-líquido da saída, o tempo de residência médio da partícula no equipamento e a quantidade da mistura sólido-líquida reciclada podem ser instrumentados com equipamentos de controle considerando uma faixa de velocidade agitação definida, ou seja, até a velocidade de agitação em que a suspensão dos sólidos é uniforme. Por isso, percebe-se que a agitação em 60 rpm ainda pode ser utilizada e está dentro da faixa aceitável para o tempo de residência pré-definido.

De forma complementar, a velocidade de sedimentação das partículas pode ser calculada desconsiderando a agitação, como forma de referência para a ocorrência da sedimentação no meio. A agitação tende a retardar essa velocidade de sedimentação, impulsionando uma partícula específica em uma trajetória helicoidal pelo tanque cilíndrico até o fundo do recipiente. Além disso, a passagem de fluido entre os estágios também diminui essa velocidade, assim como, a presença de outras partículas, pois elas também tendem a diminuir a velocidade de sedimentação, devido a interações com as outras partículas, interações com o fluxo de fluido criado pela sedimentação das partículas e ao aumento da viscosidade e densidade aparentes de uma suspensão na totalidade. Assim, a velocidade de sedimentação impedida pode ser calculada a fim de estimar essa velocidade de sedimentação considerando essas interações (PAUL et al., 2004).

A velocidade de sedimentação é calculada pelas correlações dependentes do regime hidrodinâmico da partícula. Assim, o Número de Reynolds da Partícula (Re_p) é calculado pela Equação A.67, e ele define qual correlação utilizar para o coeficiente de arraste (C_D) para cada regime.

$$Re_p = \frac{\rho_L * v_t * d}{\mu} \quad (A.67)$$

As correlações estão dispostas nas Equações A.68, A.69 e A.70, as quais são utilizáveis nas faixas de Re definidas, e a Equação A.71 que define o coeficiente de arraste para o regime intermediário.

$$v_t = \frac{g * d^2 * (\rho_S - \rho_L)}{18 * \mu} \quad (A.68)$$

Onde:

Regime de stokes (laminar): $Re_p < 0,3$

$$v_t = 1,73 * \left(\frac{g * d * (\rho_s - \rho_L)}{\rho_L} \right)^{1/2} \quad (\text{A.69})$$

Onde:

Regime de Newton (turbulento): $1000 < Re_p < 350000$

$$v_t = \frac{4 * g * d * (\rho_s - \rho_L)}{3 * C_D * \rho_L} \quad (\text{A.70})$$

Onde:

Regime intermediário: $0,3 < Re_p < 1000$

$$C_D = \frac{18,5}{Re_p^{3/5}} \quad (\text{A.71})$$

Para o cálculo da velocidade de sedimentação, os valores de densidade do sólido devem ser os valores de densidade específica. Por isso, estima-se uma densidade média dos materiais presentes considerando uma mistura de sólidos homogênea. Assim, utiliza-se a Equação A.72 para o cálculo da densidade média considerando a fração mássica de cada componente presente.

$$\rho_m = \sum x_i * \rho_i \quad (\text{A.72})$$

Para o cálculo da velocidade de sedimentação, primeiramente calcula-se a velocidade de sedimentação para o regime de Stokes com a Equação A.68, para o cálculo do Re_p inicial com a Equação A.67. Após isso, calcula-se a velocidade de sedimentação para o regime de Newton com a Equação A.69, e recalcula-se o Re_p com o valor da Equação A.69 em uma 2ª interação com a velocidade de sedimentação encontrada nesta. Se o valor de Re_p estiver dentro da faixa de valores do regime de Newton, o valor da velocidade de sedimentação é aceito. Para valores de Re_p fora dessa faixa, calcula-se uma 3ª interação com a Equação A.70, considerando o Re_p encontrado na 2ª interação para a Equação A.71. Se o valor da velocidade de sedimentação estiver dentro do regime intermediário, o valor é aceito (PAUL et al., 2004). Para o cálculo da velocidade de sedimentação impedida, utiliza-se a Equação A.73.

$$v_{ts} = v_t(1 - X_v)^n \quad (\text{A.73})$$

Onde:

v_{ts} - Velocidade de sedimentação impedida, m/s

X_v - Fração volumétrica de sólidos em suspensão

n - Constante com relação ao Re_p

As Equações A.74, A.75 e A.76 definem regras com relação à constante n .

- Se $Re_p < 0,3$:

$$n = 4,65 \quad (A.74)$$

- Se $1000 > Re_p > 0,3$:

$$n = \frac{4,375}{Re_p^{0,0875}} \quad (A.75)$$

- Se $Re_p > 1000$:

$$n = 2,33 \quad (A.76)$$

A Equação A.77 determina o cálculo para X_v .

$$X_v = \frac{V_s}{V_s + V_l} \quad (A.77)$$

Com a velocidade de sedimentação impedida, usa-se a Figura A.4 presente no Anexo A.B para a determinação da dificuldade em uniformizar a suspensão completa das partículas na agitação. A correlação também define as taxas para a potência do impelidor atingir os níveis de suspensão definidos nesta.

Para o cálculo do projeto para o EX-201, inicialmente calcula-se a densidade média dos sólidos presentes, e tem-se:

$$\rho_m = 4041,69 \text{ kg/m}^3$$

Com isso, calcula-se a 1ª interação com a Equação A.68 e o Re_p com a Equação A.67, e assim tem-se:

$$v_{t1,EX-201} = 0,64 \text{ m/s}$$

$$Re_{p1,EX-201} = 545,12$$

Pelo valor estar fora do regime de Stokes, recalcula-se a V_t em uma 2ª interação com a Equação A.69 e o Re_p com a Equação A.67:

$$v_{t2,EX-201} = 0,20 \text{ m/s}$$

$$Re_{p2,EX-201} = 171,37$$

Pelo valor estar fora do regime de Newton, recalcula-se a V_t em uma 3ª interação com a Equação A.70, A.71 e o Re_p com a Equação A.67:

$$C_{D,EX-201} = 0,84$$

$$v_{t3,EX-201} = 0,15 \text{ m/s}$$

$$Re_{p2,EX-201} = 124,43$$

Pelo valor da 3ª interação estar dentro do regime intermediário, o valor é aceito. Após isso, calcula-se a velocidade de sedimentação impedida com a Equação A.73, e utilizando a Equação A.75 para a constante n . O valor de X_v é calculado pela Equação A.77.

$$X_{v,EX-201} = 0,076$$

$$n_{EX-201} = 2,87$$

$$v_{ts,EX-201} = 0,12 \text{ m/s} = 23,03 \text{ ft/min}$$

Com o valor obtido para a velocidade de sedimentação impedida, usa-se a tabela da Figura A.4 do Anexo A.B para determinar a dificuldade da uniformidade da suspensão destas no meio líquido. O valor está na faixa de 16 a 60 ft/min, o que é considerado de difícil suspensão completa ou parcial, e sendo assim sólidos de boa sedimentação.

A.2.2.2 Filtro centrífugo (FC-201)

Com a saída do DMC carregado de eletrólito do EX-201, alguns sólidos de densidade menor que a do líquido estão presentes na corrente. O filtro centrífugo deve ser projetado a fim de garantir a eliminação de qualquer sólido presente na corrente rica em líquido de modo contínuo. Espera-se que todo PP e PE sejam eliminados com essa etapa, garantindo a totalidade

de fração líquida para a corrente de entrada no TK-201. Os sólidos eliminados são conduzidos para a esteira isolada C-201 para o transporte, quando necessário, até o secador DE-201. Os cálculos para o meio filtrante não são elaborados, já que não foram encontrados dados específicos na literatura.

A.2.2.2.1 Dimensionamento FC-201

O filtro não considera a entrada de outros materiais, porém não é descartada a entrada destes pelos movimentos do fluido dentro do EX-201, e por isso é necessário um filtro com reciclo destes sólidos por uma esteira até o secador, minimizando possíveis perdas de materiais valiosos. Os valores de vazão mássica provenientes do balanço de massa são demonstrados na Tabela A.60.

Tabela A.60 – Vazões mássicas parciais para o FC-201

| Vazão mássica de sólidos (kg/dia) | Vazão mássica de líquido (kg/dia) |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 85,18 | 54948,40 |

Fonte: Autores (2022).

Utilizando-se a Equação A.78, encontra-se a fração mássica de sólidos e com esta, encontra-se um equipamento que atende as necessidades do processo.

$$X_s = \frac{m_s}{m_s + m_l} \quad (\text{A.78})$$

$$X_{s,FC-201} = 0,002 = 0,20 \%$$

A.2.2.2.2 Estimativa energética FC-201

Para os cálculos de estimativa energética, utiliza-se uma centrífuga de rolos como parâmetro operacional para as mesmas condições da CF-201. Com os dados de densidade do meio na Tabela A.58, e considerando a vazão mássica de líquido na Tabela A.60, calcula-se a vazão volumétrica de líquido com a Equação A.45.

$$Q_{t,FC-201} = 51,45 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,04 \text{ m}^3/\text{min} = 9,44 \text{ gal}/\text{min}$$

Para isso, escolhe-se a centrífuga de rolos compatível na Figura A.1 do Anexo A.C, e obtém-se os dados abaixo para a parte centrífuga.

$$D_{c,FC-201} = 14 \text{ in} = 0,36 \text{ m}$$

$$N_{c,FC-201} = 4000 \text{ rpm} = 66,67 \text{ rps}$$

$$P_{c,FC-201} = 20 \text{ hp} = 14,92 \text{ kW}$$

A.2.2.3 Evaporador (D-201)

O evaporador D-201 deve separar o DMC do solvente contendo LiPF_6 e EC para o reciclo do DMC nos extratores.

A.2.2.3.1 Dimensionamento D-201

Do balanço de massa, tem-se a fração esperada de recuperação dos componentes presentes na Tabela A.61. Considera-se novamente a densidade do meio como a densidade do DMC, já que outros componentes do eletrólito estão em uma fração muito menor que a do DMC.

Tabela A.61 – Valores considerados para o D-201

| Densidade do meio (kg/m³) | Vazão mássica de alimentação (kg/dia) | Vazão mássica de líquido de saída (kg/dia) | Vazão mássica de vapor de saída (kg/dia) |
|---|--|---|---|
| 1068,00 | 76940,00 | 919,92 | 76020,08 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da vazão volumétrica, utiliza-se a Equação A.79, e com a Equação A.80 calcula-se o volume do evaporador considerando uma vazão 50% maior que o definido para fins de projeto, com a Equação A.81.

$$\rho_l = \frac{m_{l0}}{Q_{l0}} \quad (\text{A.79})$$

$$Q_l = Q_{l0} * 1,50 \quad (\text{A.80})$$

$$t_R = \frac{V_R}{Q_l} \quad (\text{A.81})$$

Com isso, obtém-se os resultados abaixo considerando um tempo de residência de, no máximo, 30 minutos.

$$Q_{l0,D-201} = 0,05 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$Q_{l,D-201} = 0,075 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$V_{R,D-201} = 2,25 \text{ m}^3$$

Considerando a Equação A.57 do EX-201 para a consideração de $H = 2 * D$, tem-se:

$$D_{D-201} = 1,13 \text{ m}$$

$$H_{D-201} = 2,26 \text{ m}$$

A.2.2.3.2 Balanço de energia D-201

A principal consideração do balanço de energia é a não utilização do LiPF_6 nos cálculos, já que por ele ser um sal e estar muito diluído, a sua interação é quase nula. Assim, considera-se principalmente a separação do DMC do EC, em razão da maior quantidade de DMC em comparação à de EC. A Tabela A.62 demonstra algumas propriedades importantes a serem consideradas para o evaporador, como a faixa de temperatura bem próxima à temperatura de ebulição do DMC.

Tabela A.62 – Operação do D-201

| Temperatura (°C) | Pressão (kPa) |
|------------------|---------------|
| 92,00 | 101,32 |

Fonte: Autores (2022).

Para a predição da facilidade de separação destes por processos termodinâmicos, utiliza-se a Equação A.82 para a volatilidade relativa (α) destacada por Geankoplis (2018). Essa equação segue a lei de Raoult, e varia muito pouco em sistemas binários considerando a pressão constante.

$$\alpha_{AB} = \frac{P_A}{P_B} \quad (\text{A.82})$$

Onde:

α_{AB} - Volatilidade relativa de A com relação a B

P_A - Pressão parcial de vapor do componente A, kPa

P_B - Pressão parcial de vapor do componente B, kPa

Se:

$\alpha_{AB} > 1$ - Possibilidade de separação

$\alpha_{AB} = 1$ - Azeótropo

$\alpha_{AB} < 1$ - Impossível de separar com as condições definidas

Assim, considerando A como o DMC e B como o EC, a partir da temperatura dada retiram-se as pressões parciais de A e B dos estudos de Rodríguez et al. (2002) e Verevkin et al. (2008), respectivamente, com os valores presentes abaixo. Calculando-se a volatilidade relativa, tem-se assim o último valor também abaixo.

$$P_{DMC} = 106,63 \text{ kPa}$$

$$P_{EC} = 0,347 \text{ kPa}$$

$$\alpha_{AB} = 307,46$$

Demonstra-se assim que a separação é muito possível, já que existe uma grande diferença no ponto de ebulição dos dois componentes a serem separados (entre 90 e 91 °C para

o DMC, e 247 e 249 °C para o EC), confirmando assim que pode ser realizada por uma evaporação simples. Dessa forma, utiliza-se a Equação A.83 para o balanço de energia proveniente de Geankoplis (2018), assumindo não haver perdas de calor por radiação ou convecção, e que o sal com o EC não saem na fase vapor.

$$F * h_F + S * \lambda = L * h_L + V * H_v \quad (\text{A.83})$$

Onde:

F - Vazão de alimentação do solvente, kg/h

h_F - Entalpia da alimentação na temperatura T_F , kJ/kg

S - Vazão de vapor saturado requisitado para a troca de calor com o líquido, kg/h

λ - Calor latente do vapor saturado, kJ/kg

L - Vazão de saída de líquido do evaporador, kg/h

h_L - Entalpia da saída de líquido do evaporador na T_1 , kJ/kg

V - Vazão de saída de vapor do evaporador, kg/h

H_v - Entalpia de saída de vapor do evaporador na T_1 , kJ/kg

De acordo com Geankoplis (2018), a Equação A.84 demonstra a predição do vapor saturado a partir de tabelas termodinâmicas, e a Equação A.85 define o calor trocado entre o líquido e o trocador de calor contendo vapor saturado.

$$\lambda = H_s - h_s \quad (\text{A.84})$$

$$q = S * \lambda = S * (H_{V,S} - h_{L,S}) = U * A * (T_s - T_1) \quad (\text{A.85})$$

Onde:

H_s - Entalpia do vapor saturado na temperatura T_s , kJ/kg

h_s - Entalpia de líquido na temperatura T_s , kJ/kg

U - Coeficiente global de transferência de calor para o arranjo do evaporador, kW/m².K

A - Área de troca térmica, m²

T_s - Temperatura do vapor saturado, °C

T_1 - Temperatura do evaporador, °C

Para o cálculo do evaporador, considera-se a temperatura de referência igual a zero ($T_{ref} = 0$ °C), e com isso calculam-se as entalpias para a alimentação e para a fração líquida. As

Equações A.86, A.87 e A.88 demonstram o cálculo da entalpia da alimentação, entalpia de saída do líquido, e entalpia de saída de vapor, respectivamente.

$$h_F = C_{p,F} * (T_F - T_{ref}) \quad (\text{A.86})$$

$$h_L = C_{p,L} * (T_L - T_{ref}) \quad (\text{A.87})$$

$$\Delta H_l^g = H_v - h_l \quad (\text{A.88})$$

Onde:

$C_{p,F}$ - Calor específico da alimentação na T_F , kJ/kg.K

$C_{p,L}$ - Calor específico da saída de líquido na T_L , kJ/kg.K

T_L - Temperatura de saída do líquido ($T_L = T_1$), °C

ΔH_l^g - Entalpia de vaporização do solvente, kJ/kg

h_l - Entalpia de líquido do solvente em evaporação, kJ/kg

Considerando a mistura de saída na fração L, utiliza-se a Equação A.89 para o cálculo do calor específico médio considerando as frações mássicas de cada componente com seus respectivos $C_{p,L}$, sendo assim possível assumir o valor médio para o cálculo do h_L .

$$C_{p,med,L} = \sum(x_i * C_{p,L_i}) \quad (\text{A.89})$$

As considerações para as temperaturas estão presentes na Tabela A.63, considerando a entrada de vapor saturado no D-201.

Tabela A.63 – Temperaturas do D-201

| T_1 (°C) | T_F (°C) | T_S (°C) | T_{ref} (°C) |
|------------|------------|------------|----------------|
| 92,00 | 25,00 | 140,00 | 0,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo das propriedades termodinâmicas, utilizam-se dados de Pokorný et al. (2017) para os valores de calor específico em diferentes temperaturas do DMC, retirados da Figura A.1 do Anexo A.D, e também utiliza-se a entalpia de vaporização retirada do estudo do mesmo autor. Os dados estão presentes na Tabela A.64.

Tabela A.64 – Valores do DMC para condições do D-201

| $C_{p,L}$ (kJ/kg.K) na T_F | $C_{p,L}$ (kJ/kg.K) na T_1 | ΔH_1^g (kJ/kg) |
|------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 1,11 | 1,27 | 369,23 |

Fonte: Autores (2022).

Para os dados do calor específico do EC e do LiPF_6 , retira-se dos dados presente na Figura A.3 do Anexo A.F provenientes do estudo de Pokorný et al. (2017) e dos dados presentes na Figura A.4 do Anexo A.F proveniente do estudo de Gavritchev et al. (2003), respectivamente, considerando a T_L . A Tabela A.65 demonstra os valores de calor específico para o LiPF_6 e para o EC.

Tabela A.65 – Valores de calor específico para o LiPF_6 e para o EC para T_1

| $C_{p,L,EC}$ (kJ/kg.K) | $C_{p,L,LiPF6}$ (kJ/kg.K) |
|------------------------|---------------------------|
| 1,07 | 1,15 |

Fonte: Autores (2022).

Para o calor latente da água, retira-se da Figura A.5 do Anexo A.F para dados termodinâmicos da água proveniente de ASME (2006). E para o coeficiente global de troca térmica, considera-se um evaporador do tipo de tubo horizontal e circulação natural presente na Figura A.6 do Anexo A.F, e assim utiliza-se um valor de U para o mesmo, considerando um fluido não viscoso (assim, o valor de U é o máximo da faixa) retirando da Figura A.7 do Anexo A.G. A Tabela A.66 infere os dados para o vapor de água saturado e para o coeficiente global do evaporador.

Tabela A.66 – Valores para o coeficiente global e para entalpias de água em vapor saturado a 140°C

| U (kW/m ² .K) | $H_{v,S}$ (kJ/kg) | $h_{L,S}$ (kJ/kg) |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| 2,80 | 2733,40 | 589,20 |

Fonte: Autores (2022).

Utilizando-se as Equações A.86, A.87 e A.88 para o cálculo do h_F , h_l e H_v , respectivamente, e considerando para o h_l apenas o $C_{p,L}$ do DMC por ser o valor da entalpia de líquido do DMC na temperatura T_1 , tem-se:

$$h_{F,D-201} = 27,70 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{l,D-201} = 117,04 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{v,D-201} = 486,27 \text{ kJ/kg}$$

Após isso, calcula-se o valor do calor específico médio para a saída L com as frações mássicas provenientes do balanço de massa, presentes na Tabela A.67.

Tabela A.67 – Frações mássicas de saída líquida do D-201

| X_{DMC} | X_{LiPF₆} | X_{EC} |
|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 0,42 | 0,15 | 0,43 |

Fonte: Autores (2022).

Aplicando-se a Equação A.89 tem-se assim:

$$C_{p,med,L_{D-201}} = 1,17 \text{ kJ/kg.K}$$

Após isso, calcula-se o valor do calor latente da água com os dados presentes na Tabela A.66 com a Equação A.84.

$$\lambda_{D-201} = 2144,20 \text{ kJ/kg}$$

Com a Equação A.83 calcula-se o valor da energia necessária transferida do vapor para o líquido para a evaporação do DMC.

$$q_{D-201} = S_{D-201} * \lambda_{D-201} = 404,33 \text{ kJ/s} = 404,33 \text{ kW}$$

Com o valor da energia necessária, também é possível determinar a vazão mássica de vapor saturado para a operação com a Equação A.85, e também a área de troca térmica necessária com a relação da Equação A.85, considerando dados de temperatura da Tabela A.63 e o valor de U da Tabela A.66.

$$S_{D-201} = 0,19 \text{ kg/s} = 680,4 \text{ kg/h} = 16329,60 \text{ kg/dia}$$

$$A_{D-201} = 3,00 \text{ m}^2$$

Para o cálculo do número de tubos para a passagem do vapor saturado no evaporador, utiliza-se a Equação A.90 para a área lateral dos tubos considerando o número de tubos. Consideram-se tubos com diâmetro (D_t) de 50 mm e o valor do comprimento igual ao diâmetro do evaporador ($L_t = D_{D-201}$).

$$A = N_t * \pi * D_t * L_t \quad (\text{A.90})$$

Onde:

N_t - Número de tubos

D_t - Diâmetro dos tubos, m

L_t - Comprimento dos tubos, m

A - Área total de troca térmica, m^2

Tem-se assim:

$$N_{t,D-201} = 16,9 = 17 \text{ tubos}$$

A.2.2.4 Tanque de retenção e armazenamento (TK-201, TK-202 e TK-203)

O tanque de retenção TK-201 possui o objetivo de controlar os passos no processo com o DMC, controlando a vazão adequada para o evaporador e para o restante dos equipamentos. Ele é fundamental também para o recebimento de uma corrente secundária proveniente do CF-201. Os tanques de armazenamento possuem o objetivo de armazenar e controlar as descargas e reintrodução de solventes no processo. O TK-202 possui o objetivo de reter a fração não evaporada do D-201, e assim possuir um tempo de retenção para este até sua descarga por um tempo determinado. O TK-203 possui o objetivo de receber o DMC reciclado que foi evaporado pelo D-201, condensado pelo E-201 e resfriado até a temperatura ambiente pelo E-202 e, além disso, possuir a reintrodução de DMC pelas perdas diárias ocasionadas pelo processo.

A.2.2.4.1 Dimensionamento TK-201

A partir da alimentação do extrato pelo EX-201 contendo majoritariamente DMC, faz-se as mesmas considerações presentes na Tabela A.55 para o EX-201. Com a densidade do meio e a densidade do eletrólito calcula-se a vazão volumétrica de líquido com a Equação A.46,

e com o tempo de residência de 1 hora calcula-se o volume do tanque com a Equação A.49. Os valores para estes estão presentes abaixo.

$$V_{l,TK-201} = Q_{l,TK-201} = 72,04 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{l,TK-201} = Q_{l,TK-201} = 3,00 \text{ m}^3/\text{h} = 0,05 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$V_{Rmin,TK-201} = 3,00 \text{ m}^3$$

Considera-se uma sobrecapacidade de 30% com a Equação A.91 e calcula-se o diâmetro do tanque com a Equação A.57 para a mesma consideração do EX-201 ($H = 2 * D$).

$$V_R = V_{Rmin} * 1,30 \quad (\text{A.91})$$

$$V_{R,TK-201} = 3,90 \text{ m}^3$$

$$D_{TK-201} = 1,35 \text{ m}$$

$$H_{TK-201} = 2,71 \text{ m}$$

A.2.2.4.2 Dimensionamento TK-202

Para o dimensionamento do TK-202, considera-se a vazão mássica da fase pesada proveniente da separação no D-201 presente na Tabela A.61, obtido do balanço de massa. Considerando a densidade do eletrólito (EC, DMC e LiPF₆) de 1200 kg/m³, já que a concentração foi calculada para manter-se a concentração do eletrólito, calcula-se a vazão volumétrica de líquido com a Equação A.46, e com o tempo de residência considerado de pelo menos 3 dias calcula-se o volume do tanque com a Equação A.49. Os valores para estes estão presentes abaixo.

$$V_{l,TK-202} = Q_{l,TK-202} = 0,77 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,03 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{Rmin,TK-202} = 2,30 \text{ m}^3$$

Considera-se uma sobrecapacidade de 30% com a Equação A.91 e calcula-se o diâmetro do tanque com a Equação A.57 para a mesma consideração do TK-201 ($H = 2 * D$).

$$V_{R,TK-202} = 2,99 \text{ m}^3$$

$$D_{TK-202} = 1,24 \text{ m}$$

$$H_{TK-202} = 2,48 \text{ m}$$

A.2.2.4.3 Dimensionamento TK-203

Para o dimensionamento do TK-203, considera-se a vazão mássica da fase leve da separação no D-201 presente na Tabela A.61, obtido do balanço de massa. Considerando a densidade do DMC de $1068,00 \text{ kg/m}^3$, calcula-se a vazão volumétrica de líquido com a Equação A.46, e com o tempo de residência considerado de pelo menos 1 hora calcula-se o volume do tanque com a Equação A.49. Os valores para estes estão presentes abaixo.

$$V_{l,TK-203} = Q_{l,TK-203} = 72,25 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{l,TK-203} = Q_{l,TK-203} = 3,01 \text{ m}^3/\text{h} = 0,05 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$V_{Rmin,TK-203} = 3,01 \text{ m}^3$$

Considera-se uma sobrecapacidade de 30% com a Equação A.91 e calcula-se o diâmetro do tanque com a Equação A.57 para a mesma consideração do TK-201 ($H = 2 * D$).

$$V_{R,TK-203} = 3,91 \text{ m}^3$$

$$D_{TK-203} = 1,36 \text{ m}$$

$$H_{TK-203} = 2,72 \text{ m}$$

A.2.2.5 Condensador (E-201)

O condensador é um trocador de calor com o objetivo de condensar o vapor obtido no D-201. Dessa forma, algumas considerações devem ser feitas a fim de condensar o DMC para o reciclo posterior. A operação do trocador de calor é feita em contracorrente pela melhor eficiência do modelo.

A.2.2.5.1 Balanço de energia E-201

Para o balanço energético do trocador de calor para a condensação do DMC, considera-se um trocador de calor de casco e tubo com água a temperatura ambiente como corrente fria. A corrente quente em vapor de DMC proveniente do evaporador deve ser condensada para posterior resfriamento para o reciclo. Para o cálculo energético, utiliza-se uma situação especial para a troca térmica, onde a corrente quente não varia a temperatura, já que nesse trocador de calor a única mudança para o fluido quente é o seu estado físico. As Equações A.92 e A.93 são utilizadas para o caso em que a temperatura do fluido quente não varia, e com esta é possível calcular a transferência de calor entre os fluidos, de acordo com Incropera (2011). Dessa forma, para uma mudança de fase do fluido quente utiliza-se a Equação A.88 do D-201, considerando o valor de entalpia de vaporização. A massa de fluido frio também pode ser calculada pela Equação A.94, já que a temperatura apresenta variação com relação à troca térmica.

$$q = m_q * (h_{q,ent} - h_{q,sai}) \quad (A.92)$$

$$q = m_f * (h_{f,sai} - h_{f,ent}) \quad (A.93)$$

$$q = m_f * C_{p,f}(T_{f,sai} - T_{f,ent}) \quad (A.94)$$

Onde:

q - Transferência de calor entre os fluidos, kW

m_q - Vazão mássica de fluido quente, kg/s

m_f - Vazão mássica de fluido frio, kg/s

$h_{q,ent}$ - Entalpia do fluido quente na entrada, kJ/kg

$h_{q,sai}$ - Entalpia do fluido quente na saída, kJ/kg

$h_{f,ent}$ - Entalpia do fluido frio na entrada, kJ/kg

$h_{f,sai}$ - Entalpia do fluido frio na saída, kJ/kg

$T_{f,sai}$ - Temperatura do fluido frio na saída, K

$T_{f,ent}$ - Temperatura do fluido frio na entrada, K

$C_{p,f}$ - Calor específico do fluido frio, kJ/kg.K

Para o cálculo da área de troca térmica e demais dimensionalidades da operação, utiliza-se a Equação A.95. Essa equação é extremamente dependente do coeficiente global de troca térmica do trocador de calor, e da variação de temperatura média logarítmica das correntes.

Assim, a Equação A.96 pode ser utilizada para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor considerando uma espessura da parede desprezível entre os dois fluidos, e uma elevada condutividade térmica, desprezando a resistência do tubo, considerando assim a Equação A.97 para o cálculo. Já para a determinação da variação de temperatura média logarítmica, utiliza-se a Equação A.98, com as Equações A.99 e A.100 para as variações de temperatura (INCROPERA, 2011).

$$q = U * A * \Delta T_{ml} \quad (\text{A.95})$$

$$U = \frac{1}{A * \sum R} \quad (\text{A.96})$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}} \quad (\text{A.97})$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (\text{A.98})$$

$$\Delta T_1 = T_{q,1} - T_{f,1} = T_{q,ent} - T_{f,ent} \quad (\text{A.99})$$

$$\Delta T_2 = T_{q,2} - T_{f,2} = T_{q,sai} - T_{f,sai} \quad (\text{A.100})$$

Onde:

U - Coeficiente global de troca térmica, kW/m².K

ΔT_{ml} - Variação de temperatura média logarítmica, K ou °C

ΔT_1 - Variação de temperatura na entrada, K ou °C

ΔT_2 - Variação de temperatura na saída, K ou °C

h_e - Coeficiente convectivo externo, kW/m².K

h_i - Coeficiente convectivo interno, kW/m².K

$T_{q,sai}$ - Temperatura do fluido quente na saída, K

$T_{q,ent}$ - Temperatura do fluido quente na entrada, K

Para a estimativa do U, é necessário relacionar os equacionamentos entre o escoamento externo (casco) com o escoamento interno (tubo) do trocador de calor. Assim, deve-se definir os coeficientes convectivos médios externo e interno. Para o coeficiente externo, primeiramente calcula-se o número de Reynolds do escoamento para um tubo cilíndrico com a Equação A.101, e o número de Prandtl para o fluido externo considerando a Equação A.102. Com isso é possível determinar a correlação compatível a ser usada pela Figura A.1 do Anexo A.H para correlações

em escoamento externo, para determinar o número de Nusselt, que está diretamente relacionado com o coeficiente convectivo médio pela Equação A.103 (INCROPERA, 2011).

$$Re_D = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (\text{A.101})$$

$$Pr = \frac{C_p * \mu}{k} \quad (\text{A.102})$$

$$Nu_L = \frac{h * D}{k} = \text{correlação} \quad (\text{A.103})$$

Onde:

Re_D - Número de Reynolds

V - Velocidade do fluido externo, m/s

D - Diâmetro externo do tubo cilíndrico

ν - Viscosidade do fluido, Pa.s

k - Condutividade térmica do fluido, kW/m.K

C_p - Calor específico do fluido, kW/m².K

Nu_L - Número de Nusselt

h - Coeficiente convectivo, kW/m².K

Para algumas correlações utiliza-se a Figura A.2 do Anexo A.H para determinar valores de constantes presentes na Equação A.103 com relação a diferentes números de Reynolds. Para os cálculos do coeficiente interno de convecção, utiliza-se a Equação A.104 para o cálculo do Re para a parte interna do tubo do trocador de calor. Considera-se escoamento incompressível em regime estacionário em um tubo com área de seção transversal uniforme com velocidade de fluxo constante (INCROPERA, 2011). Os diâmetros externo e interno do tubo podem ser considerados utilizando a Figura A.3 do Anexo A.H. Assim, determina-se a correlação do Nusselt também com a Equação A.103 com a Figura A.4 do Anexo A.H para escoamento interno e calcula-se o número de Prandtl com a Equação A.102.

$$Re_D = \frac{4 * m}{\pi * D_i * \mu} \quad (\text{A.104})$$

Com os valores, determina-se U e calcula-se a área de troca térmica necessária. Por isso, primeiramente devem ser feitas as considerações para as temperaturas de saída e de entrada do fluido quente e frio, demonstradas na Tabela A.68. Com exceção da temperatura da água de

saída, os outros valores são temperaturas do processo, ou seja, são valores provenientes de outras operações.

Tabela A.68 – Temperaturas de saída e entrada consideradas para o E-201

| $T_{\text{DMC, ent}} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{DMC, sai}} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{Água, ent}} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{Água, sai}} (^{\circ}\text{C})$ |
|--|--|---|---|
| 91,00 | 91,00 | 25,00 | 70,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com isso, inicialmente calcula-se o calor transferido do fluido quente para o fluido frio (em módulo) com a Equação A.92 para a condensação do DMC, considerando a entalpia de vaporização do DMC para a variação de entalpia e a vazão mássica de DMC do balanço de massa. Após isso, calcula-se a vazão mássica de água necessária para a operação utilizando a Equação A.94 substituindo o valor de calor de transferência calculado anteriormente. Assim, utiliza-se a entalpia de vaporização retirada de Pokorný et al. (2017) e o calor específico da água para as condições de entrada e saída com a Figura A.5 do Anexo A.H para dados termofísicos da água. A Tabela A.69 demonstra os dados provenientes do balanço de massa e os dados termodinâmicos para os cálculos.

Tabela A.69 – Dados para os cálculos de troca térmica do E-201

| $m_{q, \text{ent}} (\text{kg/s})$ | $\Delta H_{\text{DMC}} (\text{kJ/kg})$ | $C_{p, \text{f, ent}} (\text{kJ/kg.K})$ |
|-----------------------------------|--|---|
| 0,88 | 369,23 | 4,18 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se assim:

$$q_{E-201} = 324,87 \text{ kW}$$

$$m_{f, E-201} = 1,73 \text{ kg/s} = 6217,20 \text{ kg/h} = 149212,80 \text{ kg/dia}$$

Considerando o DMC a ser condensado no casco e a água de condensação nos tubos, utiliza-se a Equação A.101 para o cálculo do Re. Após isso, calcula-se Pr com a Equação A.102 e escolhe-se a correlação ideal. Para isso, as propriedades do DMC são definidas, e estão presentes na Tabela A.70, com dados de densidade de vapor de Durbin et al. (2017). Não foram encontrados dados da viscosidade de vapor para o DMC na literatura, logo assume-se a

viscosidade para líquido. Para a condutividade térmica, utiliza-se dados de Jin et al. (2003), e para a velocidade do fluido considera-se um valor padrão para o escoamento.

Tabela A.70 – Dados para os cálculos de troca térmica do E-201

| $\rho_{\text{DMC,ent}}$ (kg/m ³) | $\mu_{\text{DMC,ent}}$ (cP) | $C_{p,\text{DMC}}$ (kJ/kg.K) | k (W/m.K) | V (m/s) |
|---|-----------------------------|---------------------------------|-------------|-----------|
| 3,10 | 0,63 | 1,32 | 0,14 | 1,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o diâmetro externo do tubo, retira-se o valor da Figura A.5 do Anexo A.H, considerado abaixo:

$$D_{i,E-201} = 20,93 \text{ mm} = 0,824 \text{ in}$$

$$D_{e,E-201} = 26,67 \text{ mm} = 1,05 \text{ in}$$

Tem-se assim para Re e Pr do escoamento externo:

$$Re_{e,E-201} = 131,23$$

$$Pr_{e,E-201} = 6,07$$

Assim, a correlação 7.52 da Figura A.1 do Anexo A.H satisfaz os valores, sendo escolhida para o cálculo do Nusselt. Para isso, utiliza-se a Figura A.2 do mesmo anexo para determinar as constantes da correlação definida. Tem-se assim a correlação na Equação A.105 e os valores das constantes nas Equações A.106 e A.107.

$$Nu_L = C * Re_D^m * Pr^{1/3} \quad (\text{A.105})$$

$$C_{E-201} = 0,683 \quad (\text{A.106})$$

$$m_{E-201} = 0,466 \quad (\text{A.107})$$

Tem-se assim:

$$Nu_L = 12,09$$

Com a Equação A.103 calcula-se o coeficiente convectivo externo, e assim tem-se o valor para o cálculo do coeficiente global de troca térmica.

$$h_{e,E-201} = 0,062 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

Para o cálculo do coeficiente interno, utiliza-se os dados da água para o escoamento nos tubos. A Tabela A.71 demonstra os dados retirados da Figura A.5 do Anexo A.H para os dados da água.

Tabela A.71 – Dados para os cálculos de troca térmica do E-201

| $\rho_{\text{Água,ent}}$ (kg/m ³) | $\mu_{\text{Água,ent}}$ (cP) | $C_{p,\text{Água}}$ (kJ/kg.K) | k (W/m.K) |
|--|------------------------------|----------------------------------|-----------|
| 997,01 | 0,897 | 4,18 | 0,61 |

Fonte: Autores (2022).

Com a Equação A.104 e com a vazão mássica de água calculada requisitada para a operação calcula-se Re, e com a Equação A.102 calcula-se Pr, e tem-se:

$$Re_{i,E-201} = 117182,24$$

$$Pr_{i,E-201} = 6,14$$

Da Figura A.4 do Anexo A.H, escolhe-se a correlação 8.60 e assim calcula-se Nusselt com a Equação A.108.

$$Nu_L = 0,023 * (Re_i^{4/5}) * Pr_i^{0,4} \quad (\text{A.108})$$

Tem-se assim:

$$Nu_L = 539,68$$

Com a Equação A.103 calcula-se o coeficiente convectivo interno, com o valor de:

$$h_{i,E-201} = 15,73 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

Com a Equação A.97, utilizam-se os coeficientes convectivos para o cálculo de U, e tem-se:

$$U_{E-201} = 0,062 \text{ kW}/m^2.K$$

Com as Equações A.99 e A.100 calcula-se ΔT_1 e ΔT_2 com os dados de temperatura da Tabela A.68 e assim calcula-se o ΔT_{ml} com a Equação A.98.

$$\Delta T_1 = 66,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 21,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml} = 39,23 \text{ K}$$

Com a Equação A.95 calcula-se a área de troca térmica (A), e tem-se assim:

$$A_{E-201} = 134,07 \text{ m}^2$$

A.2.2.5.2 Dimensionamento E-201

Para o dimensionamento do E-201, é necessário calcular o comprimento dos tubos considerando o número de tubos (N). Além disso, o número de passes (M) destes também deve ser considerado, estimando um comprimento para o trocador de calor. Assim, utiliza-se a Equação A.109 para o cálculo do comprimento dos tubos e troca térmica, e a Equação A.110 para o cálculo do número de passes com relação ao comprimento do trocador de calor estimado.

$$A = N * \pi * D_i * L \quad (\text{A.109})$$

$$C = \frac{L}{M} \quad (\text{A.110})$$

Com isso, as considerações para o número de tubos e para o comprimento estimado para o E-201 encontram-se na Tabela A.72.

Tabela A.72 – Dados para o dimensionamento do E-201

| C_{E-201} (m) | N_{E-201} | D_i (m) |
|-----------------|-------------|-----------|
| 3,00 | 30,00 | 0,021 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se assim o valor para o comprimento dos tubos no E-201 e para o número de passes requisitados.

$$L_{E-201} = 67,96 \text{ m}$$

$$M_{E-201} = 22,65 = 23$$

A.2.2.6 Resfriador (E-202)

Para o cálculo do E-202, faz-se boa parte das considerações feitas para o E-201. A grande diferença é que neste trocador de calor, recebe-se DMC na fase líquida e não há mudança de fase.

A.2.2.6.1 Balanço de energia E-202

Para os cálculos energéticos, utiliza-se a Equação A.111 analogamente ao que foi elaborado no E-201 para a determinação do calor transferido em módulo do DMC para a água. A Equação A.94 é utilizada para o cálculo da vazão mássica requisitada.

$$q = m_q * C_{p,q}(T_{q,ent} - T_{q,sai}) \quad (\text{A.111})$$

Onde:

$C_{p,q}$ - Calor específico do fluido quente, kJ/kg.K

As temperaturas de entrada e saída para o fluido quente e frio estão presentes na Tabela A.73. Percebe-se que a temperatura da água de entrada está menor que a temperatura ambiente, para tanto deve ser considerado um chiller para a diminuição da temperatura no projeto de utilidades.

Tabela A.73 – Temperaturas de saída e entrada consideradas para o E-202

| $T_{\text{DMC, ent}} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{DMC, sai}} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{Água, ent}} (^{\circ}\text{C})$ | $T_{\text{Água, sai}} (^{\circ}\text{C})$ |
|--|--|---|---|
| 91,00 | 35,00 | 15,00 | 30,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com os mesmos valores de calor específico e de vazão mássica do E-201, tem-se com a Equação A.111 o valor de calor transferido do fluido quente para o frio. Com esse valor, utiliza-se a Equação A.94 e determina-se a vazão mássica de água.

$$q_{E-202} = 64,86 \text{ kW}$$

$$m_f = 1,03 \text{ kg/s} = 3708,00 \text{ kg/h} = 88992,00 \text{ kg/dia}$$

Recalcula-se a variação de temperatura média logarítmica com a Equação A.98 a partir dos valores encontrados com as Equações A.99 e A.100 para as variações de temperatura de entrada e saída. Com esses valores, utiliza-se o U_{E-201} para o cálculo também da área do E-202. Tem-se assim:

$$\Delta T_1 = 76,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_2 = 5,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml} = 26,09 \text{ K}$$

$$U_{E-201} = U_{E-202} = 0,062 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

Com isso, utiliza-se a Equação A.95 e calcula-se a área de troca térmica, obtendo-se:

$$A_{E-202} = 40,31 \text{ m}^2$$

A.2.2.6.2 Dimensionamento E-202

Para o dimensionamento do E-202, é necessário calcular o comprimento dos tubos considerando o número de tubos (N). Além disso, o número de passes (M) destes também deve ser considerado, estimando um comprimento para o trocador de calor. Assim, utiliza-se a Equação A.109 para o cálculo do comprimento dos tubos de troca térmica, e a Equação A.110

para o cálculo do número de passes com relação ao comprimento do trocador de calor estimado. Com isso, as considerações para o número de tubos e para o comprimento estimado para o E-202 estão na Tabela A.74.

Tabela A.74 – Dados para o dimensionamento do E-202

| C_{E-202} (m) | N_{E-202} | D_i (m) |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 3,00 | 10,00 | 0,021 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se assim o valor para o comprimento dos tubos no E-202 e para o número de passes requisitados.

$$L_{E-202} = 61,31 \text{ m}$$

$$M_{E-202} = 20,44 = 21$$

A.2.2.7 Extrator misturador decantador (EX-202, EX-203, EX-204)

Com os mesmos critérios e equacionamentos utilizados para o dimensionamento do extrator EX-201, é possível calcular todas as propriedades dos demais extratores com agitação (EX-202, EX-203 e EX-204).

A.2.2.7.1 Dimensionamento EX-201, EX-203 e EX-204

Para o dimensionamento, os valores em vazão mássica de líquido e sólido podem ser considerados iguais para os 3 extratores, já que a massa de eletrólito é irrelevante nesses estágios. Assim, a Tabela A.75 demonstra os valores de líquido e sólido para os extratores considerados provenientes do balanço de massa.

Tabela A.75 – Vazão mássica para os extratores EX-202, EX-203 e EX-204

| Vazão mássica de DMC (kg/dia) | Vazão mássica de sólidos (kg/dia) |
|--------------------------------------|--|
| 100312,54 | 7716,29 |

Fonte: Autores (2022).

As Equações A.43 e A.44 são usadas então para o cálculo da vazão volumétrica de líquido e de sólido considerando a Tabela A.55 com as mesmas considerações do extrator EX-201. A Equação A.45 é usada para o cálculo da vazão volumétrica total passante pelos extratores.

$$V_{L,EX-202} = V_{L,EX-203} = V_{L,EX-204} = 93,93 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{S,EX-202} = V_{S,EX-203} = V_{S,EX-204} = 5,91 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_{t,EX-202} = Q_{t,EX-203} = Q_{t,EX-204} = 99,05 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Analogamente, aplica-se a Equação A.112 para o tempo de residência, e encontra-se o volume mínimo dos extratores.

$$V_{Rmin,EX-202} = V_{Rmin,EX-203} = V_{Rmin,EX-204} = 4,16 \text{ m}^3 \quad (\text{A.112})$$

Para estes, aplica-se a Equação A.113 considerando uma capacidade 30% acima do mínimo como fator de segurança.

$$V_R = V_{Rmin} * 1,30 \quad (\text{A.113})$$

$$V_{R,EX-202} = V_{R,EX-203} = V_{R,EX-204} = 5,41 \text{ m}^3$$

Utilizando os mesmos valores de modelo para o dimensionamento do reator EX-201, previsto nas Equações A.51, A.52, A.53, A.54 e A.55, e considerando a Equação A.57 para encontrar o diâmetro do extrator, tem-se o dimensionamento para os três extratores previstos na Tabela A.76, com as mesmas dimensões para cada um.

Tabela A.76 – Valores dimensionados para EX-202, EX-203 e EX204

| T (m) | H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,51 | 3,02 | 0,76 | 0,50 | 0,15 | 0,13 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.2.7.2 Cálculos energéticos EX-201, EX-203 e EX-204

Por também não possuir sistema de aquecimento ou resfriamento, e a extração ser realizada em temperatura ambiente, não há balanço de energia para os extratores. Assim, para o cálculo da potência do impelidor, considera-se as mesmas propriedades previstas na Tabela A.58 para o EX-201. Com isso, tem-se os valores de Re , N_p (a partir da Figura A.1 do Anexo A.B) e de P .

$$Re_{EX-202} = Re_{EX-203} = Re_{EX-204} = 966303,76$$

$$N_{p,EX-202} = N_{p,EX-203} = N_{p,EX-204} = 1,30$$

$$P_{EX-202} = P_{EX-203} = P_{EX-204} = 340,58 \text{ N.m/s} = 0,34 \text{ kW}$$

Após isso, calcula-se a velocidade de agitação com a suspensão completa a partir da Equação A.62 com as mesmas considerações, porém recalculando-se X com a Equação A.65, pois os extratores EX-202, EX-203 e EX-204 recebem mais DMC que o extrator EX-201. Portanto, a Tabela A.77 determina esses parâmetros.

Tabela A.77 – Considerações e cálculos para a velocidade de suspensão completa do EX-201

| X (%) | v (m²/s) | d (m) | S |
|--------------|----------------------------|-------------------|----------|
| 7,15 | $5,89 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-4}$ | 3,40 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se assim:

$$N_{js,EX-202} = N_{js,EX-203} = N_{js,EX-204} = 1,29 \text{ rps}$$

$$N_{js,EX-202} = N_{js,EX-203} = N_{js,EX-204} = 77,22 \text{ rpm}$$

$$Re_{js,EX-202} = Re_{js,EX-203} = Re_{js,EX-204} = 1245124,87$$

$$N_{p,js,EX-202} = N_{p,js,EX-203} = N_{p,js,EX-204} = 1,30$$

$$P_{js,EX-202} = P_{js,EX-203} = P_{js,EX-204} = 0,73 \text{ kW}$$

Com os mesmos dados e considerações feitos para o EX-201, calcula-se a velocidade de sedimentação das partículas. Os cálculos são os mesmos, pois nenhuma propriedade significativa variou nas equações aplicadas. Assim, as Equações A.68 e A.67 são aplicadas para a 1ª interação.

$$v_{t1,EX-202} = v_{t1,EX-203} = v_{t1,EX-204} = 0,64 \text{ m/s}$$

$$Re_{p1,EX-202} = Re_{p1,EX-203} = Re_{p1,EX-204} = 545,12$$

Pelo valor estar fora do regime de Stokes, recalcula-se a V_t em uma 2ª interação com a Equação A.69 e o Re_p com a Equação A.67:

$$v_{t2,EX-202} = v_{t2,EX-203} = v_{t2,EX-204} = 0,20 \text{ m/s}$$

$$Re_{p2,EX-202} = Re_{p2,EX-203} = Re_{p2,EX-204} = 171,37$$

Pelo valor estar fora do regime de Newton, recalcula-se a V_t em uma 3ª interação com a Equação A.70, A.71 e o Re_p com a Equação A.67:

$$C_{D,EX-202} = C_{D,EX-203} = C_{D,EX-204} = 0,84$$

$$v_{t3,EX-202} = v_{t3,EX-203} = v_{t3,EX-204} = 0,15 \text{ m/s}$$

$$Re_{p3,EX-202} = Re_{p3,EX-203} = Re_{p3,EX-204} = 124,43$$

Pelo valor da 3ª interação estar dentro do regime intermediário, o valor é aceito. Calcula-se a velocidade de sedimentação impedida com a Equação A.73, e utilizando a Equação A.75 para a constante n . O valor de X_v é calculado pela Equação A.77 novamente, pois o volume de DMC para esses extratores é maior.

$$X_{v,EX-202} = X_{v,EX-203} = X_{v,EX-204} = 0,06$$

$$n_{EX-202} = n_{EX-203} = n_{EX-204} = 2,87$$

$$v_{ts,EX-202} = v_{ts,EX-203} = v_{ts,EX-204} = 0,12 \text{ m/s}$$

$$v_{ts,EX-202} = v_{ts,EX-203} = v_{ts,EX-204} = 23,03 \text{ ft/min}$$

Com o valor obtido para a velocidade de sedimentação impedida, usa-se a tabela da Figura A.4 do Anexo A.B para determinar a dificuldade da uniformidade da suspensão destas no meio líquido e observa-se que o valor está na faixa de difícil suspensão completa ou parcial (boa sedimentação).

A.2.2.8 Extrator decantador (EX-205)

Para o EX-205 os cálculos requisitados são feitos da mesma forma como para os outros extratores. Porém, para o último extrator (em contracorrente e considerando o deslocamento do sólido pelos equipamentos) não é considerada agitação, para a melhor sedimentação dos sólidos para a passagem à centrífuga. A concentração de compostos fluorídricos neste estágio é baixíssima, e a agitação não faria muita diferença na extração do eletrólito, pois quase a totalidade já foi extraída nos equipamentos anteriores.

A.2.2.8.1 Dimensionamento EX-205

Para o dimensionamento repetem-se os passos anteriores, retirando os dados do balanço de massa para o cálculo da vazão volumétrica, presentes na Tabela A.78.

Tabela A.78 – Vazão mássica para os extratores EX-205

| Vazão mássica de DMC (kg/dia) | Vazão mássica de sólidos (kg/dia) |
|--------------------------------------|--|
| 100312,54 | 7716,29 |

Fonte: Autores (2022).

As Equações A.43 e A.44 são usadas então para o cálculo da vazão volumétrica de líquido e de sólido considerando a Tabela A.55 com as mesmas considerações do extrator EX-201. A Equação A.45 é usada para o cálculo da vazão volumétrica total passante pelo extrator.

$$V_{l,EX-205} = 93,93 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{s,EX-205} = 5,91 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_{t,EX-205} = 99,05 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,07 \text{ m}^3/\text{min}$$

Analogamente, aplica-se a Equação A.49 para o tempo de residência, e encontra-se o volume mínimo do equipamento extrator.

$$V_{R,EX-205} = 4,16 \text{ m}^3$$

Com a mesma consideração para os extratores EX-202, EX-203 e EX-204, aplica-se a Equação A.50 considerando uma capacidade 30% acima do mínimo como fator de segurança.

$$V_R = V_{R0} * 1,30$$

$$V_{R,EX-205} = 5,41 \text{ m}^3$$

Utilizando os mesmos valores de modelo para o dimensionamento do reator EX-201, previsto nas Equações A.51, A.52, A.53, A.54 e A.55, e considerando a Equação A.57 para encontrar o diâmetro do extrator, tem-se o dimensionamento do EX-205 previsto na Tabela A.79.

Tabela A.79 – Valores dimensionados para EX-205

| T (m) | H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,51 | 3,02 | 0,76 | 0,50 | 0,15 | 0,13 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.2.8.2 Cálculos energéticos EX-205

Pelo extrator não ter a necessidade de agitação, parte-se para o cálculo da velocidade de sedimentação. Com os mesmos dados e considerações feitos para o EX-201, calcula-se a velocidade de sedimentação das partículas. Os cálculos são os mesmos, pois nenhuma propriedade significativa variou nas equações aplicadas. Assim, as Equações A.68 e A.67 são aplicadas para a 1ª interação.

$$v_{t1,EX-205} = 0,64 \text{ m/s}$$

$$Re_{p1,EX-205} = 545,12$$

Pelo valor estar fora do regime de Stokes, recalcula-se a V_t em uma 2ª interação com a Equação A.69 e o Re_p com a Equação A.67:

$$v_{t2,EX-205} = 0,20 \text{ m/s}$$

$$Re_{p2,EX-205} = 171,37$$

Pelo valor estar fora do regime de Newton, recalcula-se a V_t em uma 3ª interação com a Equação A.70, A.71 e o Re_p com a Equação A.67:

$$C_{D,EX-205} = 0,84$$

$$v_{t3,EX-205} = 0,15 \text{ m/s}$$

$$Re_{p3,EX-205} = 124,43$$

Pelo valor da 3ª interação estar dentro do regime intermediário, o valor é aceito. Calcula-se a velocidade de sedimentação impedida com a Equação A.73, e utilizando a Equação A.75 para a constante n . O valor de X_v é calculado pela Equação A.77 novamente, pois o volume de DMC para esse extrator é maior.

$$X_{v,EX-205} = 0,06$$

$$n_{EX-205} = 2,87$$

$$v_{ts,EX-205} = 0,12 \text{ m/s} = 23,03 \text{ ft/min}$$

Com o valor obtido para a velocidade de sedimentação impedida, usa-se a tabela da Figura A.4 do Anexo A.B e observa-se que o valor está na faixa de difícil suspensão completa ou parcial (boa sedimentação). Logo, a saída dos sólidos misturados com o DMC se dá pela gravidade, sem a necessidade de bombeamento até a centrífuga CF-201. Uma válvula de controle pode ser instrumentada para o controle da vazão de entrada na centrífuga considerando o dimensionamento desta.

A.2.2.9 Centrífuga (CF-201)

Com a entrada por meio da gravidade dos sólidos misturados com DMC do EX-205 para a centrífuga, o dimensionamento desta deve considerar aspectos de vazão necessários para a eficiência da operação. Além disso, a escolha da centrífuga de rolos é interessante para uma operação contínua como a do presente processo.

A.2.2.9.1 Dimensionamento CF-201

Para o dimensionamento da CF-201, deve-se estimar com base no balanço de massa que uma parcela considerável de DMC seja transportada para o CF-201 com os sólidos. A Tabela A.80 demonstra os valores provenientes do balanço de massa.

Tabela A.80 – Vazão mássica de entrada no CF-201

| Vazão mássica de DMC (kg/dia) | Vazão mássica de sólidos (kg/dia) |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 23149,06 | 7716,29 |

Fonte: Autores (2022).

Calculando-se a vazão volumétrica com as Equações A.43 e A.44 para a fase líquida e fase sólida, respectivamente, e utilizando a Equação A.45 para o cálculo da vazão volumétrica total, tem-se vazão mínima de operação para a centrífuga:

$$V_{l,CF-201} = 21,67 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{s,CF-201} = 1,91 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$Q_{t,CF-201} = 23,58 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,00055 \text{ m}^3/\text{s} = 4,33 \text{ gal}/\text{min}$$

Com os valores de vazão calculados, é necessário estimar um aumento da capacidade para a centrífuga considerando eventuais variações no processo. Dessa forma, multiplica-se por 2 a vazão volumétrica e a vazão mássica, e recalcula-se os valores para ambos conforme as Equações A.114 e A.115, respectivamente.

$$m_i = m * 2 \quad (\text{A.114})$$

$$V_i = V * 2 \quad (\text{A.115})$$

Aplicando as equações para os valores conhecidos, tem-se:

$$m_{sc,CF-201} = 15432,58 \text{ kg/dia} = 0,64 \text{ t/h}$$

$$m_{lc,CF-201} = 46298,12 \text{ kg/dia} = 1,93 \text{ t/h}$$

$$V_{sc,CF-201} = 3,82 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,70 \text{ gal/min}$$

$$V_{lc,CF-201} = 43,35 \text{ m}^3/\text{dia} = 7,95 \text{ gal/min}$$

$$Q_{tc,CF-201} = 47,17 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,033 \text{ m}^3/\text{s} = 8,65 \text{ gal/min}$$

A.2.2.9.2 Cálculos energéticos e de eficiência CF-201

Com os valores dimensionados, utiliza-se a Figura A.1 presente no Anexo A.C para a determinação de parâmetros importantes para uma centrífuga de rolos. Com os valores de vazão volumétrica para o líquido e de vazão mássica para o sólido, retira-se da tabela presente na Figura A.1 do Anexo A.C os valores de diâmetro do compartimento, a velocidade de rotação do rolo e a potência típica do motor conforme Green & Southard (2019) para estimativas de operação de centrífugas. As Equações A.116, A.117 e A.118 contém os valores retirados da referência.

$$D_{c,CF-201} = 14 \text{ in} = 0,36 \text{ m} \quad (\text{A.116})$$

$$N_{c,CF-201} = 4000 \text{ rpm} = 66,67 \text{ rps} \quad (\text{A.117})$$

$$P_{c,CF-201} = 20 \text{ hp} = 14,92 \text{ kW} \quad (\text{A.118})$$

Para o cálculo do diâmetro de partícula separado, utiliza-se a Equação A.119 obtida de Cremasco (2014). Assim, calcula-se o diâmetro mínimo de partícula em que a centrífuga separa do líquido rearranjando a Equação A.119 para a Equação A.120 isolando-se o diâmetro de partícula.

$$Q = \frac{L * \pi * (\rho_p - \rho) * d_{p,min}^2 * N^2}{18 * \mu} * \left(\frac{R^2 - R_0^2}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \right) \quad (\text{A.119})$$

Onde:

L - Comprimento da centrífuga, m

N - Velocidade de rotação da centrífuga, rps

R - Raio do compartimento de centrifugação, m

R₀ - Raio da entrada da vazão de material alimentado, m

Q - Vazão alimentada, m³/s

$$d_{p,min} = \left(\frac{Q * 18 * \mu * \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{L * \pi * (\rho_p - \rho) * N^2 * (R^2 - R_0^2)} \right)^{1/2} \quad (\text{A.120})$$

Com isso, calcula-se os valores elaborando considerações importantes com relação ao projeto da centrífuga. A vazão volumétrica total consiste no valor da calculado anteriormente, e o valor da densidade dos sólidos é considerado o valor para a densidade média do meio calculada para o EX-201. Para o valor das propriedades do líquido, utiliza-se também os valores para o DMC presentes na Tabela A.58 do EX-201. Para considerações de projeto da centrífuga, utiliza-se a Equação A.121 para o cálculo do R.

$$R = \frac{D_c}{2} = \frac{D_{c,CF-301}}{2} \quad (\text{A.121})$$

Os valores considerados e calculados estão presentes na Tabela A.81, considerando o R₀ coerente para uma alimentação na centrífuga.

Tabela A.81 – Dimensões consideradas para a CF-201

| L (m) | R (m) | R₀ (m) |
|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,00 | 0,18 | 0,05 |

Fonte: Autores (2022).

Utilizando então a Equação A.120 para o cálculo do diâmetro mínimo separado pela centrífuga, tem-se:

$$d_{p,min} = 1,80 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 1,80 \text{ } \mu\text{m}$$

Considera-se que todas as partículas estão acima de 2 μm , já que a granulometria das partículas de cátodo e ânodo tendem a estar acima de 5 μm . Assim, a eficiência da centrífuga tende a ser bem próxima de 100% para a recuperação dos sólidos na corrente concentrada, já que estes possuem uma boa densidade média. O “lodo” contendo o concentrado de sólidos e

DMC remanescente é descarregado por gravidade da centrífuga até o secador DE-201 de esteiras por um cone de alimentação.

A.2.2.10 Secador de esteira (DE-201)

Com a alimentação dos sólidos, o secador de esteira é operado continuamente com uma vazão de ar constante entrando no compartimento. Algumas considerações a serem feitas utilizam equações compatíveis com a secagem de água, e não de DMC. Isso é aceitável, já que equações ou modelos para a secagem (ou evaporação) de solventes orgânicos não são bem definidos na literatura. Dessa forma, para o dimensionamento do secador em esteira deve-se primeiramente calcular a energia necessária a ser trocada para a evaporação completa do DMC. Com as Equações A.122 e A.123 é possível calcular o calor necessário para o aquecimento do sólido e a evaporação do solvente, respectivamente, conforme Mujumdar (2015) para secadores de esteira.

$$Q_s = m_s * C_{p,s} * (T_1 - T_0) \quad (\text{A.122})$$

$$Q_{l,evap} = m_l * (\Delta H_0 - (C_{pL} - C_{pV}) * (T_2)) \quad (\text{A.123})$$

Onde:

Q_s - Energia necessária para o aquecimento do sólido, kW

m_s - Vazão mássica de sólido seco, kg/s

$C_{p,s}$ - Calor específico do sólido seco, kJ/kg.K

T_1 - Temperatura de saída do sólido, K

T_0 - Temperatura ambiente (ou de entrada), K (298,15 K)

$Q_{l,evap}$ - Energia necessária para a evaporação do solvente, kW

m_l - Vazão mássica de solvente presente no lodo, kg/s

ΔH_0 - Calor latente de condensação a 3 °C para o DMC, kJ/kg

C_{pL} - Calor específico de líquido do solvente na T_0 , kJ/kg.K

C_{pV} - Calor específico de vapor do solvente na T_2 , kJ/kg.K

T_2 - Temperatura de entrada do ar, K

Para cálculo da vazão mássica de ar necessária para suprir as demandas energéticas, utiliza-se a Equação A.124, onde a energia transferida pelo ar é dada pela Equação A.125.

$$Q_{ar} = m_{ar} * C_{p,ar} * (T_2 - T_3) \quad (\text{A.124})$$

$$Q_{ar} = Q_s + Q_{l,evap} \quad (\text{A.125})$$

Onde:

$C_{p,ar}$ - Calor específico do ar na T_2 , kj/kg.K

T_3 - Temperatura de saída do ar, K

m_{ar} - Vazão mássica de ar, kg/s

Q_{ar} - Energia necessária transferida do ar para o produto de secagem, kW

A vazão volumétrica de ar requisitada pode ser calculada com a Equação A.126.

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar}}{V_{ar}} \quad (\text{A.126})$$

Para o cálculo da área de troca térmica necessária para o secador, algumas considerações devem ser feitas sobre as condições de operação: o fluxo de ar é paralelo com relação à esteira contendo o sólido para melhor transferência de calor, a temperatura de interface do sólido é a temperatura de saída do sólido (T_1), a temperatura média do ar é a temperatura de entrada deste (T_2) e o coeficiente de transferência de calor de superfície na interface material-ar (h_h) é regido pelas propriedades do ar. Dessa forma, utilizam-se as Equações A.127 e A.128, provenientes de Mujumdar (2015), para o cálculo da área de troca térmica necessária, e para a determinação do coeficiente de transferência e calor na superfície, respectivamente, com as considerações definidas.

$$Q_{ar} = h_h * A * (T_2 - T_1) \quad (\text{A.127})$$

Onde:

h_h - Coeficiente de transferência de calor de superfície na interface material-ar, kW/m².K

A - Área de troca térmica, m²

$$h_h = 0,0204 * G^{0,80} \quad (\text{A.128})$$

Onde:

G - Fluxo mássico de ar, kg/m².h

h_h - Coeficiente de transferência de calor de superfície na interface material-ar, W/m².K

Válido para:

$$0,68 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} < G < 8,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$45 \text{ }^\circ\text{C} < T_{ar} < 150^\circ\text{C}$$

Para o cálculo do fluxo mássico de ar, utiliza-se a Equação A.129 considerando a densidade do ar na temperatura de entrada no secador.

$$G = v_{ar} * \rho_{ar,(T_2)} \quad (\text{A.129})$$

A.2.2.10.1 Balanço de energia DE-201

Com os equacionamentos definidos, a Tabela A.82 considera os valores estimados para o sólido seco. Considera-se o $C_{p,s}$ do material ativo NMC por estar em maior quantidade e por ser o maior valor dentre os componentes, retirado da Tabela A.2 de dados para os componentes. Os valores de vazão mássica são obtidos do balanço de massa e as temperaturas são estimadas considerando a temperatura de ebulição do solvente e a temperatura ambiente.

Tabela A.82 – Propriedades para os sólidos do DE-201

| $C_{p,s}$ (kJ/kg.K) | T_1 (°C) | T_0 (°C) |
|---------------------|------------|------------|
| 0,83 | 92,00 | 25,00 |

Fonte: HSC chemistry® (2022); Autores (2022)

Do balanço de massa, os valores em vazão mássica mínima de líquido e de sólido estão presentes abaixo, respectivamente.

$$m_{l,min} = 1157,45 \text{ kg/dia} = 0,013 \text{ kg/s}$$

$$m_{s,min} = 7802,48 \text{ kg/dia} = 0,090 \text{ kg/s}$$

Para o dimensionamento do secador, considera-se uma vazão mássica 30% maior para fins de aumento de capacidade, e calcula-se com as Equações A.130 e A.131.

$$m_l = m_{l,min} * 1,30 \quad (\text{A.130})$$

$$m_{l,DE-201} = 1504,68 \text{ kg/dia} = 0,017 \text{ kg/s}$$

$$m_s = m_{s,min} * 1,30 \quad (\text{A.131})$$

$$m_{s,DE-201} = 10143,22 \text{ kg/dia} = 0,117 \text{ kg/s}$$

As considerações para o solvente estão presentes na Tabela A.83, e consideram também as estimativas procedidas para o ar de entrada. Assim, as informações para o DMC foram coletadas do estudo de Pokorný et al. (2017), que define o calor específico e a entalpia de condensação para diversos solventes, incluindo o DMC, e as tabelas estão presentes nas Figuras A.1 e A.2 do Anexo A.D. A temperatura de entrada do ar foi considerada relativamente próxima à temperatura de saída do sólido seco pela existência de polímeros na fração de sólidos, já que em temperaturas mais altas é possível que estes entrem em fusão e as partículas fiquem aderidas a estes, ocasionando problemas de separação. Isso acarretará um secador maior, mas é algo viável já que caso ocorresse os problemas descritos com polímeros em temperaturas mais altas, seria necessário um processo de moagem adicional ou outra etapa de separação destes. A temperatura de saída do ar foi considerada também relativamente maior que a temperatura de saída dos sólidos. Para as propriedades do ar, utilizou-se a tabela da Figura A.3 do Anexo A.D, obtida de Geankoplis (2018).

Tabela A.83 – Propriedades para o solvente e para o ar

| ΔH_0 (kJ/kg) | C_{pL} (kJ/kg.K) | C_{pV} (kJ/kg.K) | T_2 (°C) | T_3 (°C) | $C_{p,ar}$ (kJ/kg.K) | $\rho_{ar,(T_2)}$ (kg/m ³) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|-------------------------|---|
| 132,10 | 1,11 | 1,32 | 110,00 | 95,00 | 1,01 | 0,97 |

Fonte: Pokorný et al. (2017); HSC chemistry® (2022); Autores (2022).

Com as considerações procedidas, aplica-se as Equações A.122 e A.123 para o cálculo da energia transferida para o produto e para a evaporação do DMC.

$$Q_{s,DE-201} = 6,50 \text{ kW}$$

$$Q_{l,evap,DE-201} = 2,70 \text{ kW}$$

Com os valores obtidos, calcula-se a energia necessária de transferência do ar para o produto com a Equação A.125 e encontra-se a massa de ar quente necessária com a Equação A.124. Calcula-se assim o volume de ar quente necessário com a Equação A.126.

$$Q_{ar,DE-201} = 9,20 \text{ kW}$$

$$m_{ar,DE-201} = 0,61 \text{ kg/s}$$

$$V_{ar,DE-201} = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

A.2.2.10.2 Dimensionamento DE-201

Para o cálculo do fluxo mássico, considera-se uma velocidade de ar entrante de 4,00 m/s e assim calcula-se com a Equação A.129. Com o valor de fluxo mássico de ar, aplica-se a Equação A.128 e obtém-se o coeficiente de transferência de calor de superfície na interface material-ar para a aplicação deste na Equação A.127, e assim encontra-se a área necessária de troca térmica.

$$G_{DE-201} = 3,87 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 13944,96 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$h_{h,DE-201} = 42,19 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} = 0,042 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$A_{DE-201} = 12,12 \text{ m}^2$$

Com o valor da área, utiliza-se a Equação A.132 para uma área retangular, para definir o comprimento da esteira considerando uma largura de 1,50 metros.

$$A = C * L \tag{A.132}$$

$$C_{DE-201} = 8,08 \text{ m}$$

A.2.2.10.3 Cálculos energéticos DE-201

Com os valores de dimensão da esteira, pode-se calcular o fator de frequência, a tensão efetiva e a potência da esteira com as Equações A.14, A.15 e A.17, respectivamente, com as mesmas considerações feitas para as outras esteiras presentes na Tabela A.84.

Tabela A.84 – Considerações para o cálculo da Esteira do DE-201

| Largura (m) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|--------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| 1,50 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

A Equação A.133 define a capacidade da esteira conforme a alimentação desta utilizando os dados de projeto da esteira de vazão mássica presentes abaixo.

$$m_t = m_l + m_s \quad (\text{A.133})$$

$$m_{t,DE-201} = 0,135 \text{ kg/s} = 8,09 \text{ kg/min}$$

Com isso, o cálculo energético para a esteira é definido abaixo:

$$F_{f,DE-201} = 0,27 \text{ min}$$

$$T_{e,DE-201} = 569,81 \text{ kgf}$$

$$P_{DE-201} = 5587,94 \text{ W} = 5,59 \text{ kW}$$

A.2.2.11 Peneira vibratória (S-201)

A peneira vibratória recebe os materiais cominuídos e secos por gravidade com um alimentador após o secador de esteira DE-201. Com isso, as frações de até 10 mm devem ser separadas em finas e grossas com granulometria inferior e superior a 200 μm , respectivamente. As demandas energéticas para a vibração da peneira não são calculadas, pois é um fator do equipamento e não foram encontrados tabelas relacionadas na literatura.

A.2.2.11.1 Dimensionamento S-201

O principal dimensionamento para a peneira é a área de peneiramento, já que essa estimativa é importante para a escolha do equipamento. Assim, utiliza-se o método descrito por Flintoff et al. (2019) e Sullivan (2013), para o cálculo da área considerando métodos para frações grossas (partículas maiores que 2,54 mm) e frações finas (partículas menores que 2,40 mm), utiliza-se o último, pois a faixa de peneiramento está na granulometria fina. A Equação A.134 demonstra o cálculo da área considerando diversos fatores, retirado de Sullivan (2013).

$$A = \frac{F * U}{(100 * C_f * A_1 * B_1 * C_1 * D_1 * E_1 * F_1 * G_1 * X_1)} \quad (\text{A.134})$$

Onde:

A - Área da peneira, ft²

F - Vazão de alimentação, lb/h

U - Porcentagem abaixo da abertura da peneira, %

C_f - Capacidade da peneira, lb/h.ft²

A₁ - Fator de meio de tamanho (considerando a porcentagem alimentada abaixo da granulometria da peneira)

B₁ - Fator de densidade aparente (densidade aparente dividida por 100)

C₁ - Fator de forma da partícula

D₁ - Fator de localização da alimentação

E₁ - Fator de forma de abertura

F₁ - Fator de área aberta da peneira

G₁ - Fator de inclinação da peneira

X₁ - Fator para o ponto de corte dos finos (varia geralmente de 1,00 a 0,50)

L - Largura do espaçamento entre os blocos de peneiramento, mm

t - Granulometria do peneiramento, mm

Considerando a alimentação para a peneira obtida do balanço de massa, tem-se a vazão de alimentação. Com a vazão de finos (F_f) esperada com relação à eficiência do peneiramento estimado no balanço de massa, calcula-se a fração de finos passantes com a Equação A.135. Com isso, estima-se a capacidade da peneira com o gráfico da Figura A.1 do Anexo A.G para a peneira vibratória, obtendo-se o valor presente na Equação A.136.

$$F_{S-201} = 7801,48 \text{ kg/dia} = 325,06 \text{ kg/h} = 716,64 \text{ lb/h}$$

$$F_{f,S-201} = 6217,71 \text{ kg/dia} = 259,07 \text{ kg/h} = 571,15 \text{ lb/h}$$

$$U = \frac{F_f}{F} * 100 \quad (\text{A.135})$$

$$U_{S-201} = 79,70 \%$$

$$C_{f,S-201} = 269,97 \text{ lb/h.ft}^2 \quad (\text{A.136})$$

Considerando-se U_{S-201} , utiliza-se a Figura A.2 do Anexo A.G para a determinação de A_1 . Considerando também a densidade aparente dos sólidos cominuídos com as mesmas considerações feitas para os outros equipamentos (como a densidade aparente do módulo, 1306 kg/m^3 ou $81,53 \text{ lb/ft}^3$) divide-se por 100 e encontra-se B_1 . Para o C_1 , utiliza-se a Figura A.3 do Anexo A.G considerando partículas ásperas e angulares. Para o D_1 , utiliza-se a Figura A.4 do Anexo A.G considerando alimentação no topo. Para E_1 , considera-se uma abertura quadrada e utiliza-se a Figura A.5 do Anexo A.G. Para F_1 , utiliza-se a consideração de que o comprimento entre os blocos da peneira é igual à granulometria da peneira ($L = t$), e assim retira-se da Figura A.6 do Anexo A.G o valor. Para o valor de G_1 , considera-se um valor de porcentagem entre a abertura e o tamanho médio das partículas em 5% por não existir dados experimentais, e assim obtém-se o valor de G_1 da Figura A.7 do Anexo A.G. Por fim, para X_1 considera-se o valor de 1,00. Assim, a Tabela A.85 demonstra os valores dos coeficientes encontrados.

Tabela A.85 – Fatores para o cálculo da área da peneira

| A₁ | B₁ | C₁ | D₁ | E₁ | F₁ | G₁ | X₁ |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1,51 | 0,81 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,61 | 1,56 | 1,00 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da área, considera-se a alimentação com um valor 50% maior com a Equação A.137. Assim, utiliza-se a Equação A.134 com o valor de alimentação maior para possíveis aumentos do processo.

$$F_{t,S-201} = F_{S-201} * 1,50 \quad (\text{A.137})$$

$$F_{t,S-201} = 1074,96 \text{ lb/h}$$

$$A_{S-201} = 2,70 \text{ ft}^2 = 0,25 \text{ m}^2$$

Considerando uma peneira circular, utiliza-se a Equação A.138 para o cálculo do diâmetro da área de peneiramento.

$$A = \frac{D^2}{4} * \pi \quad (\text{A.138})$$

$$D_{S-201} = 0,56 \text{ m}$$

A.2.2.12 Transportadores de esteira (C-201, C-202, C-203 e C-204)

A.2.2.12.1 Dimensionamento C-201, C-202, C-203 e C-204

Para o dimensionamento das esteiras comuns presentes na Área 200, estima-se uma capacidade ideal para todas, considerando os mesmos critérios de projeto. Com exceção da esteira C-201, para o comprimento das outras esteiras é considerado um valor igual, e com base no balanço de massa em que a vazão mássica de sólidos é de, no máximo, 1,10 kg/min, considera-se para fins de projeto uma capacidade maior. As considerações estão presentes na Tabela A.87. Para a esteira C-201, as considerações estão presentes na Tabela A.86, e também é deduzido que essa esteira precisa possuir um isolamento da atmosfera fabril pelo risco de contaminação com DMC.

Tabela A.86 – Considerações para o cálculo da C-201

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|----------------------------|------------------------|---|--------------|------------------|-------------------------------|
| 20,00 | 0,50 | 20,00 | -3,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.87 – Considerações para o cálculo da C-202, C-203 e C-204

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|----------------------------|------------------------|---|--------------|------------------|-------------------------------|
| 5,00 | 0,50 | 20,00 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.2.12.1 Cálculos energéticos C-201, C-202, C-203 e C-204

Com o dimensionamento, utilizam-se as Equações A.14, A.15 e A.17 para o cálculo energético para cada esteira considerando os valores demonstrados na Tabela A.86 e A.87.

$$F_{f,C-201} = 0,67 \text{ min}$$

$$F_{f,C-202} = F_{f,C-203} = F_{f,C-204} = 0,17 \text{ min}$$

$$T_{e,C-201} = 375,40 \text{ kgf}$$

$$T_{e,C-202} = T_{e,C-203} = T_{e,C-204} = 120,40 \text{ kgf}$$

$$P_{C-201} = 3681,42 \text{ W} = 3,68 \text{ kW}$$

$$P_{C-202} = P_{C-203} = P_{C-204} = 1180,72 \text{ W} = 1,18 \text{ kW}$$

A.2.2.13 Separador magnético e eletrostático (MS-201 e ES-201)

Para os equipamentos de separação magnética e eletrostática, considera-se a movimentação dos sólidos por meio destes com as esteiras de alimentação provenientes do transporte (C-202, C-203 e C-204). Assim, os equipamentos de separação podem ser alimentados continuamente com as esteiras e suas frações despejadas no andamento do processo. Para o separador magnético, a esteira C-202 faz a alimentação e movimentação dos sólidos com relação ao rolo de separação, e os sólidos são separados por suas forças magnéticas na retirada de materiais ferrosos. Assim, a fração de ferrosos é retirada após o rolo com o despejo destes por gravidade em um alimentador cônico para o TK-204 e a fração não magnética é despejada em um alimentador cônico para a esteira C-203.

Para o separador eletrostático, a esteira C-203 faz a alimentação e movimentação dos sólidos para o equipamento, onde são separados por diferença de condutividade e a fração condutiva segue através do rolo em um alimentador cônico para o TK-205. As frações menos ou não-condutivas seguem com um alimentador cônico para a esteira C-204 para o TK-206.

A.2.2.14 Tanques de sólidos (TK-204, TK-205 e TK-206)

Os tanques de sólidos TK-204, TK-205 e TK-206 obtêm as frações obtidas do MS-201 e ES-201. Assim, um tanque quadrado de 1 m³ é suficiente para a retenção desses materiais, descarregados assim que necessário. O tanque deve possuir um fundo em forma de poliedro para o melhor escoamento e descarga dos sólidos através da abertura inferior por meio da gravidade.

A.2.2.15 Tanque de dosagem (TK-207)

O TK-207 desempenha a função de dosar água e querosene para o flutador, considerando uma concentração baixíssima de querosene. Assim, o tanque deve ser de uma forma comum, para a retenção do fluido.

A.2.2.15.1 Dimensionamento TK-207

A partir da alimentação da solução aquosa, tem-se a vazão mássica de água requisitada para a dosagem ao FL-201. Considerando a densidade do meio e como a densidade da água, pela baixíssima concentração de querosene, calcula-se a vazão volumétrica de líquido com a densidade da água retirada da Figura A.5 do Anexo A.H para a temperatura ambiente (25°C).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A.139})$$

$$\rho_{\text{Água}, 25^{\circ}\text{C}} = 997,01 \text{ kg/m}^3$$

Do balanço de massa, tem-se a vazão mássica presente abaixo, e assim calcula-se a vazão volumétrica com a Equação A.139 e com o tempo de residência de 30 minutos calcula-se o volume do tanque com a Equação A.50.

$$m_{TK-207} = 12447,86 \text{ kg/dia} = 8,64 \text{ kg/min}$$

$$V_{l,TK-207} = Q_{l,TK-207} = 12,48 \text{ m}^3/\text{dia}$$

$$V_{l,TK-207} = Q_{l,TK-207} = 0,009 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$V_{Rmin,TK-207} = 0,26 \text{ m}^3$$

Considera-se uma sobrecapacidade de 50% com a Equação A.140 e calcula-se o diâmetro do tanque com a Equação A.57 para a mesma consideração do EX-201 ($H = 2 * D$).

$$V_R = V_{Rmin} * 1,50 \quad (\text{A.140})$$

$$V_{R,TK-207} = 0,39 \text{ m}^3$$

$$D_{TK-207} = 0,63 \text{ m}$$

$$H_{TK-207} = 1,26 \text{ m}$$

A.2.2.16 Flotador (FL-201)

Para o flotador (FL-201), utilizam-se dados de fabricantes para a realização do seu dimensionamento de uma forma mais direta, em decorrência da ausência de parâmetros mais concretos a respeito da mistura de materiais que o mesmo recebe em seu interior para o processo descrito em tópicos anteriores. Considera-se uma densidade média de 2000 kg/m^3 com base nos materiais que adentram e permanecem no flotador por um tempo de residência extrapolado de 10 minutos, com relação aos 4 minutos apresentados anteriormente na descrição do processo produtivo. Assim, por meio da Equação A.141, encontra-se a vazão volumétrica para o flotador.

$$Q_{mistura} = \frac{m_{mistura}}{\rho_{mistura}} \quad (\text{A.141})$$

$$Q_{mistura} = 6,48 \text{ m}^3/\text{min}$$

Com a vazão encontrada e com o tempo de residência estimado, utiliza-se a Equação A.142, com isso tem-se o volume total do flotador.

$$t_R = \frac{V_{R0}}{Q_{mistura}} \quad (\text{A.142})$$

$$V_{R0} = 64,81 \text{ m}^3$$

$$V_R = 1,30 * V_{R0} \quad (\text{A.143})$$

$$V_R = 84,25 \text{ m}^3$$

Com o volume estimado, buscam-se fabricantes com modelos de flotador por espuma cujos equipamentos atendam ao volume dimensionado, logo, opta-se por um flotador Wemco 1+1 Modelo 225 da FLSmidth com $84,95 \text{ m}^3$ de volume útil, ou similar, com uma altura total de 6,68 m, largura de 4,16 m e comprimento de 5,72 m com um motor instalado de 150 kW. Tal flotador encontra-se presente no Anexo J, ressalta-se que o mesmo funciona por ar induzido e não por ar forçado como seria no caso de um fornecimento de ar externo, ou seja, o ar ambiente é aspirado para dentro da célula de forma uniforme por toda a “polpa”, proporcionando um ótimo contato ar/ partícula (LUZ, SAMPAIO & FRANÇA, 2010; FLSmidth, 2023).

A.2.3 Área 300

A.2.3.1 Reatores de lixiviação (R-301, R-302 e R-303)

Os reatores de lixiviação são basicamente reatores CSTR operados continuamente em estado estacionário com a entrada de reagentes e a saída de produtos de forma contínua. A lixiviação é um processo rápido, principalmente pela demonstração da cinética considerada no balanço de massa. Assim, um tempo de residência aceitável com chicanas para esta, com uma mistura relevante em um misturador adequado devem ser considerados.

A.2.3.1.1 Balanço de energia R-301, R-302 e R-303

Para o balanço de energia dos reatores, parte-se da Equação A.144 com os cálculos energéticos adequados utilizando a descrição de Fogler (2018).

$$\frac{d\hat{E}}{dt} = \underline{Q} - \underline{W} + \sum F_{ent} * E_{ent} - \sum F_{sai} * E_{sai} \quad (\text{A.144})$$

Onde:

$\frac{d\hat{E}}{dt}$ - Taxa de acúmulo de energia dentro do sistema, kJ/s

\underline{Q} - Taxa de fluxo de calor para o sistema, kJ/s

\underline{W} - Taxa de trabalho feito pelo sistema, kJ/s

$F_{ent} * E_{ent}$ - Taxa de energia adicionado a sistema em vazão mássica, kJ/s

$F_{sai} * E_{sai}$ - Taxa de energia saindo do sistema em vazão mássica, kJ/s

Definindo a energia (E) em termos de entalpia e considerando a vazão molar, tem-se uma série de considerações descritas por Fogler (2018) para a determinação do balanço de energia em um reator CSTR com trocador de calor. Assim, considerando a Equação A.147 para o estado estacionário ($\frac{d\hat{E}}{dt} = 0$), o qual é proveniente do rearranjo das vazões para vazões molares considerando a fração de cada componente de reação com a Equação A.145 e A.146.

$$\sum F_{ent} * E_{ent} - \sum F_{sai} * E_{sai} = F_{A0} * \sum x_i * (H_{i0} - H_i) - \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X \quad (\text{A.145})$$

$$x_i = \frac{F_{i0}}{F_{A0}} \quad (\text{A.146})$$

$$0 = \underline{Q} - \underline{W} + F_{A0} * \sum x_i * (H_{i0} - H_i) - \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X \quad (\text{A.147})$$

Onde:

F_{A0} - Vazão molar do componente A, mol/s

F_{i0} - Vazão molar do componente i, mol/s

x_i - Relação molar do componente i na entrada sobre o componente de entrada A

H_{i0} - Entalpia do componente i na entrada, kJ/mol

H_i - Entalpia do componente i na saída, kJ/mol

$\Delta H_{Rx, (T)}$ - Entalpia de formação da reação na temperatura de operação, kJ/mol

X - Conversão dos reagentes

Unindo-se a Equação A.148 e a Equação A.149, Fogler (2018) apresenta o balanço de energia em torno do calor específico de cada componente ($C_{p,i}$) na Equação A.151 substituindo na entalpia inicial do componente i (H_{i0}) e na entalpia do componente i (H_i) com a relação para as Equações A.148 e A.149 apresentada na Equação A.150.

$$\Delta H_{Qi} = \int_{T_1}^{T_2} C_{p,i} * dT \quad (\text{A.148})$$

$$H_i(T) = H_i^0(T_R) + \int_{T_R}^T C_{p,i} * dT \quad (\text{A.149})$$

$$H_i - H_{i0} = C_{p,i} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.150})$$

$$\underline{Q} - \underline{W} - F_{A0} * \sum x_i * C_{p,i} * (T - T_{i0}) - \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X = 0 \quad (\text{A.151})$$

Onde:

T - Temperatura de reação do reator, K

T_{i0} - Temperatura de entrada do componente i, K

T_R - Temperatura de referência, K

H_i^0 - Entalpia parcial do componente na temperatura de referência, kJ/mol

$C_{p,i}$ - Calor específico do componente i, kJ/mol.K

Para o cálculo da entalpia de formação da reação, utiliza-se a Equação A.152 também definida por Fogler (2018).

$$\Delta H_{Rx(T)} = \left[\sum \frac{n_i}{a} * H_{Pr,i}^0(T_R) - \sum \frac{m_i}{a} * H_{Re,i}^0(T_R) \right] + \left[\sum \frac{n_i}{a} * C_{p,Pr,i} - \sum \frac{m_i}{a} * C_{p,Re,i} \right] * (T - T_R) \quad (\text{A.152})$$

Onde:

n_i - Fator de balanceamento estequiométrico do componente i dos produtos

$H_{Pr,i}^0$ - Entalpia parcial de formação do componente i nos produtos, kJ/mol

$H_{Re,i}^0$ - Entalpia parcial de formação do componente i nos reagentes, kJ/mol

$C_{p,Pr,i}$ - Calor específico do componente i nos produtos, kJ/mol.K

$C_{p,Re,i}$ - Calor específico do componente i nos reagentes, kJ/mol.K

A Equação A.153 define o cálculo do calor específico médio de uma mistura onde não há reação, e pode ser utilizado para fins de balanço energético dos componentes inertes.

$$C_{p,m} = \sum y_i * C_{p,i} \quad (\text{A.154})$$

Onde:

y_i - Fração mássica ou molar do componente

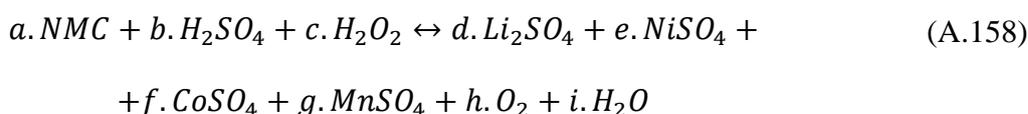
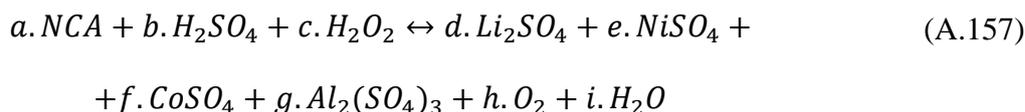
Para o balanço energético do R-302, não é considerado reação nessa etapa, já que a concentração de ácido é baixa comparada à concentração de metais. O objetivo do R-302 é a mistura das alimentações de reciclo lixiviado e de topo do FL-201, já que por ser um tanque de pré-lixiviação a ideia é a pré-reação química de superfície, gelatinizando o metal no meio levemente ácido. Por isso, o balanço energético dessa etapa serve para definir a temperatura da mistura que entrará no R-303, afetando diretamente na troca térmica para o reator principal de lixiviação. A Equação A.155 demonstra o balanço de energia para o R-302.

$$\underline{Q} - m_{R-301} * C_{p,m,R-301} * (T - T_{i0}) - m_{FL-301} * C_{p,m,FL-201} * (T - T_{i0}) = 0 \quad (\text{A.155})$$

Assim, calcula-se a energia da mistura com os dados de temperatura especificados para cada alimentação proveniente do misturador e do R-301, e assim utiliza-se a Equação A.156 para o cálculo da temperatura da corrente de saída do R-302.

$$\underline{Q} = q_{R-302} = m_{mist,R-302} * C_{p,m,R-302} * (T_{R-302} - T_{i0}) \quad (\text{A.156})$$

Iniciando-se com o balanço energético do reator R-301 e do R-303, utiliza-se a reação balanceada para o cátodo NCA e NMC definido no balanço de massa, e demonstrado novamente nas Equações A.157 e A.158 para a Reação 1 e Reação 2, respectivamente. Desconsideram-se as reações para outros metais presentes, pela pouca influência destes no balanço energético do reator, pela baixa concentração nessa etapa.



Os fatores de balanceamento recalculados estão definidos na Tabela A.88, e os valores representam o balanceamento exato considerando a entrada do material com a razão molar definida, que deverão ser utilizados para o cálculo de entalpias de formação e demais entalpias.

Tabela A.88 – Balanceamento das reações

| Fator | Reação 1 | Reação 2 |
|--------------|-----------------|-----------------|
| a | 2,00 | 6,00 |
| b | 3,05 | 8,81 |
| c | 0,95 | 1,19 |
| d | 0,99 | 3,16 |
| e | 1,60 | 1,88 |
| f | 0,30 | 1,89 |
| g | 0,05 | 1,88 |
| h | 0,95 | 2,21 |
| i | 4,00 | 10,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com base nisso, utiliza-se a vazão molar dos componentes na reação definidos no Apêndice A.1 do Balanço de Massa e usa-se valores com relação aos componentes definidos na Tabela A.2 de dados energéticos, com valores de entalpia de formação para cada componente presente na Reação 1 e 2, e nos calores específicos de cada componente. A Tabela A.89 demonstra as temperaturas consideradas para a operação.

Tabela A.89 – Considerações de temperatura para o R-301

| T_{R-301} (°C) | $T_{i0,R-301}$ (°C) | T_{Ref} (°C) | $T_{q,ent}$ (°C) | $T_{q,sai}$ (°C) |
|------------------|---------------------|----------------|------------------|------------------|
| 80,00 | 25,00 | 25,00 | 95,00 | 85,00 |

Fonte: Autores (2022).

Utiliza-se assim a Equação A.152 e o valor da entalpia de formação é obtido.

$$\Delta H_{RxR1,R-301} = -22,97 \text{ kJ/mol de NCA}$$

$$\Delta H_{RxR2,R-301} = -186,99 \text{ kJ/mol de NMC}$$

Pela não entrada dos principais componentes presentes nos produtos da reação, a fração molar de entrada só é prevista pelo material ativo do cátodo, H_2SO_4 e H_2O_2 . Assim, não se considera a entrada de água no cálculo energético para as reações, a qual será incluída no balanço energético para inertes. Do balanço de massa, tem-se a vazão molar dos componentes da Reação 1 e 2 e assim calcula-se com a Equação A.146 as razões molares para os componentes, com os valores presentes na Tabela A.90 para cada reação.

Tabela A.90 – Balanceamento das reações

| Relação molar | Reação 1 | Reação 2 |
|---------------|----------|----------|
| x_A | 1,00 | 1,00 |
| x_B | 1,52 | 1,47 |
| x_C | 0,47 | 0,20 |

Fonte: Autores (2022).

Do balanço de massa, a vazão molar do componente A de entrada (F_{A0}) está presente na Tabela A.91 para o cálculo energético de cada reação. Além disso, o valor de conversão (X) em fração também está relacionado na Tabela A.91.

Tabela A.91 – Vazões molares de entrada no R-301

| X | F_{A0, R1} (mol/s) | F_{A0, R2} (mol/s) |
|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0,9999 | 0,00926 | 0,03805 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de calor específico para cada componente na Tabela A.2 de dados considerados de BE para os valores de entrada, e também com os valores de entalpia de formação, razões molares e vazões molares de alimentação, aplica-se a Equação A.151 para o cálculo da energia de reação desprezando-se o trabalho de eixo (W). Tem-se assim para cada reação:

$$\underline{Q}_{R1,R-301} = -0,038 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R2,R-301} = -6,485 \text{ kJ/s}$$

Para o cálculo do R-303 deve-se usar primeiramente a Equação A.154 para descobrir a energia da mistura de saída do R-302 (e de entrada no R-303), e conseqüentemente a temperatura de entrada da mistura no R-303. Através da Equação A.153 calcula-se novamente o calor específico médio para cada corrente com as frações mássicas provenientes do balanço de massa, e com o calor específico para cada componente *i* proveniente da Tabela A.2 de dados. Tem-se assim para cada corrente os valores abaixo.

$$C_{p,m,R-301} = 2,52 \text{ kJ/kg.K}$$

$$C_{p,m,FL-201} = 3,09 \text{ kJ/kg.K}$$

Com os valores de vazão mássica provenientes do balanço de massa abaixo e da Tabela A.92.

$$m_{R-301} = 6131,50 \text{ kg/dia} = 4,26 \text{ kg/min} = 0,071 \text{ kg/s}$$

$$m_{FL-201} = 18665,57 \text{ kg/dia} = 12,96 \text{ kg/min} = 0,22 \text{ kg/s}$$

Tabela A.92 – Considerações de temperatura para o R-302

| T_{R-301} (°C) | $T_{i0,R-301}$ (°C) | T_{FL-201} (°C) | $T_{i0,FL-201}$ (°C) |
|------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| 80,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 |

Fonte: Autores (2022).

Calcula-se assim o valor de energia presente na mistura do R-302 com a Equação A.154, e conseqüentemente a temperatura da mistura com a Equação A.155, considerando o valor do calor específico médio da mistura para o R-302 na Equação A.159, considerando a saída em vazão mássica como a soma dos dois valores.

$$\underline{Q}_{R-302} = q_{R-302} = 9,85 \text{ kJ/s}$$

$$C_{p,m,R-302} = 2,95 \text{ kJ/kg.K} \quad (\text{A.159})$$

$$T_{R-302} = 309,79 \text{ K} = 36,64 \text{ °C}$$

Com isso, calcula-se o calor de reação desenvolvido pela Reação 1 e 2 (Equações A.157 e A.158) com a mesma estequiometria para o R-303. Despreza-se o calor de reação desenvolvido por reações secundárias (como a lixiviação do Al e do Cu, e demais possíveis impurezas) pela baixa concentração destes compostos no meio. Com o valor de calor específico para cada componente na Tabela A.2 de dados considerados de BE para os valores de entrada, e também com os valores de entalpia de formação calculados anteriormente para as Equações A.157 e A.158, razões molares (Tabela A.90) e vazões molares de alimentação (Tabela A.93), aplica-se a Equação A.151 para o cálculo da energia de reação desprezando-se o trabalho de eixo (W).

Tabela A.93 – Vazões molares de entrada no R-303

| X | $F_{A0, R1}$ (mol/s) | $F_{A0, R2}$ (mol/s) |
|--------|----------------------|----------------------|
| 0,9999 | 0,083 | 0,342 |

Fonte: Autores (2022).

A Tabela A.94 apresenta os valores de temperatura considerados para o R-303, considerando a entrada de reagentes a 40°C do M-302.

Tabela A.94 – Considerações de temperatura para o R-303

| T_{R-303} (°C) | $T_{i0,R-303}$ (°C) | T_{M-302} (°C) | $T_{i0,M-302}$ (°C) | $T_{q,ent}$ (°C) | $T_{q,sai}$ (°C) |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|------------------|
| 80,00 | 36,64 | 40,00 | 25,00 | 95,00 | 85,00 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se assim para cada reação o valor de energia liberado parcialmente pela transformação dos reagentes em sulfatos metálicos solubilizados. Para o cálculo da energia na entrada dos reagentes provenientes de temperaturas do R-302 e do M-302, faz-se uma média entre $T_{i0,R-303}$ e T_{M-302} pela proximidade dos valores, tendo-se então o valor abaixo.

$$T_{i0,m,R-303} = 38,32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Desconsidera-se a entrada de componentes transformados no R-301 para esse resultado, levando-se em consideração isso apenas para a energia de componentes não reacionais no R-303. Assim, considera-se os valores de calor específico apenas para o H_2SO_4 , H_2O_2 e material ativo. Aplica-se então a Equação A.151 e tem-se:

$$\underline{Q}_{R1,R-303} = -0,722 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R2,R-303} = -59,727 \text{ kJ/s}$$

Para o cálculo energético de componentes inertes, utiliza-se a Equação A.151 desprezando o trabalho de eixo (W) e desprezando a entalpia de reação (ΔH_{Rx}). Também é transformada a vazão molar em vazão mássica para melhor manipulação dos dados do balanço de massa, e tem-se a Equação A.159. Utiliza-se a Tabela A.2 de dados para o uso dos dados de calor específico, e assim calcula-se um valor de calor específico médio com a Equação A.154 considerando uma mistura compacta dentro do R-301 e do R-303 (FOGLER, 2018). Desconsidera-se no R-301 a temperatura de entrada do H_2SO_4 diluído proveniente do M-301, já que a dissociação do ácido em água provoca uma reação exotérmica, aquecendo a mistura. Porém, isso é considerado no R-303 com a temperatura média de entrada ($T_{i0,m}$) proveniente da média entre a entrada advinda do R-302 e do M-302, calculado anteriormente.

Com isso, tem-se o calor necessário para elevar a temperatura continuamente da temperatura de entrada em cada reator considerado, até a temperatura de processo (80°C), pela Equação A.160.

$$\underline{Q}_{inerte} = m_t * C_{p,m} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.160})$$

Onde:

m_t - Vazão mássica total de entrada no reator, kg/s

$$C_{p,m,R-301} = 2,52 \text{ kJ/kg.K}$$

$$C_{p,m,R-303} = 3,31 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\underline{Q}_{inerte,R-301} = 9,85 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{inerte,R-303} = 62,33 \text{ kJ/s}$$

Com a Equação A.160 calcula-se o calor necessário de transferência do trocador de calor para o reator R-301 e R-303, considerando o calor gerado pela reação de lixiviação.

$$q = \underline{Q}_{R1} + \underline{Q}_{R2} + \underline{Q}_{inerte} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (\text{A.160})$$

$$q_{R-301} = 3,33 \text{ kJ/s} = 3,33 \text{ kW} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

$$q_{R-303} = 1,89 \text{ kJ/s} = 1,89 \text{ kW} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml}$$

Considerando o valor do coeficiente global de troca térmica (U) como padrão para um trocador de calor presente na Figura A.1 do Anexo A.I, utiliza-se o valor mínimo para o tipo de trocador de calor com água nos tubos. O valor está presente na Equação A.161.

$$U_{R-301} = U_{R-303} = 0,85 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{A.161})$$

Para o cálculo da variação de temperatura média logarítmica, utilizam-se as Equações A.98, A.99 e A.100 do E-201, que também é um trocador de calor. Assim, os valores de temperatura do fluido frio e para o fluido quente são considerados na Tabela A.92. Tem-se assim os valores de variação de temperatura.

$$\Delta T_{1,R-301} = 70,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{1,R-303} = 56,68 \text{ K}$$

$$\Delta T_{2,R-301} = \Delta T_{2,R-303} = 5,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml,R-301} = 24,63 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml,R-303} = 21,28 \text{ K}$$

Com a Equação A.160 calcula-se a área de troca térmica necessária para o trocador de calor do reator, e também com a Equação A.92 do E-201 calcula-se a vazão mássica de vapor com as entalpias retiradas da Figura A.5 do Anexo A.F para os dados termodinâmicos da água, observados na Equação A.161 e A.162. Assim, o valor em vazão mássica de vapor está presente abaixo.

$$A_{R-301} = 0,115 \text{ m}^2$$

$$A_{R-303} = 0,104 \text{ m}^2$$

$$h_{q,ent,R-301} = 395,02 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.161})$$

$$h_{q,sai,R-301} = 355,95 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.162})$$

$$m_{q,R-301} = 0,079 \text{ kg/s} = 6833,72 \text{ kg/dia}$$

$$m_{q,R-303} = 0,045 \text{ kg/s} = 3873,03 \text{ kg/dia}$$

A.2.3.1.2 Dimensionamento R-301, R-302 e R-303

Considerando-se a Equação A.109 do E-201, calcula-se o comprimento dos tubos de troca térmica. As considerações estão presentes na Tabela A.95, considerando apenas 1 tubo de passagem de líquido quente com um diâmetro pequeno em forma de uma camisa com serpentina, e feito de material anticorrosivo pela acidificação dos reatores.

Tabela A.95 – Dados para o dimensionamento do R-301

| $N_{R-301,R-303}$ | D_i (m) |
|-------------------|-----------|
| 1,00 | 0,00925 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se, assim, o comprimento do encamisamento em serpentina dentro do R-301, escolhido considerando o projeto de um agitador, já que as camisas com serpentinas possuem um projeto interessante para essas considerações. Não é calculada a altura da serpentina, por questões de escolha de equipamento e de design do mesmo.

$$L_{R-301} = 3,95 \text{ m}$$

$$L_{R-303} = 3,59 \text{ m}$$

Para o dimensionamento do reator, consideram-se os modelos de forma padrão para um CSTR definidos por Green & Southard (2019). Assim, calcula-se o volume do reator e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170.

$$t_R = \frac{V_{R,min}}{Q_R} \quad (\text{A.163})$$

$$V_R = 1,50 * V_{R,min} \quad (\text{A.164})$$

$$\frac{H}{T} = 1,50 \quad (\text{A.165})$$

$$\frac{D_i}{T} = 0,50 \quad (\text{A.166})$$

$$\frac{C}{H} = 0,17 \quad (\text{A.167})$$

$$\frac{W}{D_i} = 0,125 \quad (\text{A.168})$$

$$\frac{W_b}{T} = 0,0833 \quad (\text{A.169})$$

Onde:

H - Altura do tanque, m

T - Diâmetro do tanque, m

D_i - Diâmetro do impelidor, m

C - Altura do impelidor com relação ao fundo, m

W - Espessura do impelidor, m

W_b - Espessura das chicanas, m

Substitui-se a Equação A.165 na Equação A.170 do volume de um cilindro, e tem-se a Equação A.171.

$$V = \frac{T^2}{4} * \pi * H \quad (\text{A.170})$$

$$V = \frac{T^3}{2,67} * \pi \quad (\text{A.171})$$

Para fins de cálculo, utiliza-se boa parte de propriedades da água para o cálculo de parâmetros operacionais para os reatores, pela complexidade do sistema, uma vez que muitos sais estão em dissolução contínua e sólidos não solúveis também. Considerando-se uma mistura homogênea, a densidade média da solução pode ser calculada pela Equação A.172. Com o valor de densidade média, calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.173.

$$\rho = \sum \rho_i * y_i \quad (\text{A.172})$$

$$\rho = \frac{m}{Q} \quad (\text{A.173})$$

Assim, os valores considerados e calculados para as propriedades do R-301, R-302 e R-303 estão presentes na Tabela A.96. Os dados considerados os da água foram retirados da Figura A.5 do Anexo A.H.

Tabela A.96 – Propriedades e considerações para o R-301, R-302 e R-303

| Densidade do meio (kg/m ³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|--|--------------------------|-------------------------|----------------|
| 1531,80 | 0,35 | 2,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade e de tempo de residência estimado no balanço de massa, calcula-se a vazão e o volume mínimo dos reatores, e assim o volume considerando a margem de segurança. Os dados de vazão mássica são retirados do balanço de massa.

$$Q_{R-301} = 4,00 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,167 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{R-302} = 12,65 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,53 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{R-303} = 24,48 \text{ m}^3/\text{dia} = 1,02 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,R-301} = 0,33 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,R-302} = 1,05 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,R-303} = 2,04 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-301} = 0,50 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-302} = 1,58 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-303} = 3,06 \text{ m}^3$$

Com os valores de volume para os reatores, calcula-se o diâmetro do tanque (T) com a relação da Equação A.171, e tem-se:

$$T_{R-301} = 0,75 \text{ m}$$

$$T_{R-302} = 1,39 \text{ m}$$

$$T_{R-303} = 1,41 \text{ m}$$

Com os valores de diâmetro para cada reator, calculam-se suas relações e obtém-se o valor de dimensionamento para cada reator com as Tabelas A.97, A.98 e A.99.

Tabela A.97 – Valores dimensionados para o reator R-301

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,13 | 0,38 | 0,19 | 0,05 | 0,06 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.98 – Valores dimensionados para o reator R-302

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,08 | 0,69 | 0,35 | 0,09 | 0,11 |

Fonte: Autores (2022)

Tabela A.99 – Valores dimensionados para o reator R-303

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,11 | 0,70 | 0,35 | 0,09 | 0,12 |

Fonte: Autores (2022)

A.2.3.1.3 Cálculos energéticos R-301, R-302 e R-303

Para os cálculos energéticos, repetem-se os cálculos feitos para EX-201 com relação à potência de agitação. Porém, para os reatores e misturadores o cálculo é feito desconsiderando a presença dos sólidos. É uma consideração coerente, já que os sólidos estão em um processo de transformação nos reatores, e nos misturadores eles não estão presentes. O Número de Reynolds e a Potência do Impelidor podem ser calculados com as Equações A.174 e A.175, respectivamente.

$$Re = \frac{D^2 * N * \rho}{\mu} \quad (\text{A.174})$$

$$N_p = \frac{P}{\rho * N^3 * D^5} \quad (\text{A.175})$$

Onde:

$Re \geq 20000$ - Turbulento

$20000 > Re > 10$ - Transição

$Re \leq 10$ - Laminar

D - Diâmetro do impelidor, m

N - Velocidade de agitação, rps

μ - Viscosidade do meio, Pa.s

ρ - Densidade do meio, kg/m³

P - Potência do impelidor, N.m/s

Com os valores e condições descritos na Tabela A.96 para o meio, e considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p segundo o Re calculado. Para o R-301, R-302 e R-303 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado, respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{R-301} = 616203,03$$

$$Re_{R-302} = 2103788,67$$

$$Re_{R-303} = 2169077,30$$

$$N_{p,R-301} = N_{p,R-302} = N_{p,R-303} = 1,30$$

$$P_{R-301} = 14,93 \text{ N.m/s} = 0,015 \text{ kW}$$

$$P_{R-302} = 321,62 \text{ N.m/s} = 0,32 \text{ kW}$$

$$P_{R-303} = 347,16 \text{ N.m/s} = 0,35 \text{ kW}$$

A.2.3.2 Misturadores de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio (M-301 e M-302)

A.2.3.2.1 Balanço energético do M-301 e M-302

Para o cálculo energético, considera-se a Equação A.151 do balanço energético para os reatores. Assim, consideram-se temperaturas de entrada nos misturadores, e um valor para a variação da entalpia de formação (no caso, entalpia de diluição) para o H_2SO_4 . Rearranjando a Equação A.151 para os misturadores desprezando possíveis trabalhos de eixo, tem-se a Equação A.176.

$$\underline{Q} - F_{A0} * \sum x_i * C_{p,i} * (T - T_{i0}) - \Delta H_{mist} * F_{A0} * X = 0 \quad (\text{A.176})$$

A Tabela A.100 demonstra os dados considerados para o cálculo do M-301 e do M-302 para o balanço de energia da reação de dissociação do ácido. A entalpia de dissociação do ácido sulfúrico foi retirada de Zeleznik (1991). Considera-se apenas a reação da Equação A.177, e por isso o valor de x_i é unitário.

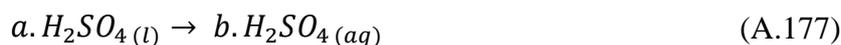


Tabela A.100 – Valores para o M-301 e M-302

| T (°C) | T_{i0} (°C) | ΔH_{mist} (kJ/mol) | x_A | X | C_{p,H2SO4} (kJ/mol.K) |
|---------------|----------------------------|---|----------------------|----------|---|
| 40,00 | 25,00 | -77,02 | 1,00 | 1,00 | 0,14 |

Fonte: Autores (2022).

É importante destacar que não é considerada a influência da dissolução do H₂O₂ pela baixa influência deste em termos de concentração e de entalpia de dissolução. Assim, considera-se as entradas em vazão molar presentes na Tabela A.101 e A.102 para os dois misturadores de ácido.

Tabela A.101 – Valores de reação para o M-301

| F_{A0} (mol/s) | m_{mist} (kg/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 0,074 | 0,017 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.102 – Valores de reação para o M-302

| F_{A0} (mol/s) | m_{mist} (kg/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 0,69 | 0,15 |

Fonte: Autores (2022).

Calcula-se assim o valor de calor liberado pela dissociação do ácido no misturador considerando uma entalpia de dissolução média.

$$\underline{Q}_{R,M-301} = -5,56 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R,M-302} = -51,93 \text{ kJ/s}$$

Calculando-se o calor específico da mistura com a Equação A.153, com os valores do balanço de massa, e com os valores presentes na Tabela A.2 de dados termodinâmicos para espécies, tem-se o valor abaixo para o M-302, que é o mesmo para o M-301.

$$C_{p,m,mist,M-302} = C_{p,m,mist,M-301} = 2,85 \text{ kJ/kg.K}$$

Com o valor do calor específico médio da mistura, utiliza-se a Equação A.176 sem reação e em base mássica, e assim calcula-se a energia necessária para a mistura sair em pelo menos 40 °C para o R-303. Assim, a Equação A.178 define o calor para inertes (considerando sem interação de dissolução iônica e demais interações).

$$\underline{Q}_{inerte} = m_{mist} * C_{p,m,mist} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.178})$$

$$\underline{Q}_{inerte,M-301} = 0,74 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{inerte,M-302} = 6,38 \text{ kJ/s}$$

Calcula-se então a energia total do sistema com a Equação A.179.

$$\underline{Q}_{M-302} = \underline{Q}_{inerte} + \underline{Q}_R = q_{M-302} \quad (\text{A.179})$$

$$\underline{Q}_{M-301} = -4,82 \text{ kJ/s} = -q_{M-301} = U.A.\Delta T_{ml} \quad (\text{A.180})$$

$$\underline{Q}_{M-302} = -45,56 \text{ kJ/s} = -q_{M-302} = U.A.\Delta T_{ml} \quad (\text{A.181})$$

Percebe-se assim que muita energia está sendo liberada com as considerações e dissolução do H₂SO₄, e por isso é necessário arrefecimento do sistema para não ocasionar problemas no processo, e manter a temperatura de saída em 40°C. Assim, calcula-se a vazão mássica de água de entrada necessária nos tubos do trocador de calor do M-301 e M-302 para o arrefecimento do equipamento com a Equação A.94 considerando água fria para a troca térmica. Os dados da temperatura de entrada e saída de água, bem como o calor específico está na Tabela A.103.

Tabela A.103 – Considerações de temperatura para o M-301 e M-302

| C_{p,Água} (kJ/kg.K) | T_{f,ent} (°C) | T_{f,sai} (°C) | T_q (°C) |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 4,175 | 25,00 | 35,00 | 40,00 |

Fonte: Autores (2022).

Calculando-se então a vazão mássica de água fria para a troca térmica, tem-se:

$$m_{f,M-301} = 0,115 \text{ kg/s}$$

$$m_{f,M-302} = 1,09 \text{ kg/s}$$

Como visto na Tabela A.103, considera-se o valor do fluido quente como constante, mesmo sem existir mudança de fase. É uma consideração aceitável, visto a complexidade da estimativa de uma temperatura para uma reação instantânea. Dessa forma, utiliza-se a Equação A.180 e A.181 para a estimativa da área de troca térmica do trocador de calor do M-301 e M-302. Considera-se o U para água com água da Figura A.1 do Anexo A.I, com o valor presente abaixo. Além disso, calculam-se as variações de temperatura e a variação de temperatura logarítmica com as Equações A.99, A.100 e A.98.

$$U_{M-301} = U_{M-302} = 0,85 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\Delta T_{1,M-301} = \Delta T_{1,M-302} = 15,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{2,M-301} = \Delta T_{2,M-302} = 5,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml,M-301} = \Delta T_{ml,M-302} = 9,10 \text{ K}$$

Calculando-se a área de troca térmica, tem-se:

$$A_{M-301} = 0,62 \text{ m}^2$$

$$A_{M-302} = 5,89 \text{ m}^2$$

A.2.3.2.2 Dimensionamento M-301 e M-302

Considerando-se a Equação A.109 do E-201, calcula-se o comprimento dos tubos de troca térmica. As considerações estão presentes na Tabela A.104, considerando vários tubos de passagem de líquido quente com um diâmetro pequeno em forma de uma camisa com serpentina, e feito de material anticorrosivo pela acidificação do M-301 e M-302.

Tabela A.104 – Dados para o dimensionamento do M-301 e M-302

| N_{M-301} | N_{M-302} | D_i (m) |
|-------------|-------------|-----------|
| 5,00 | 10,00 | 0,0125 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se, assim, o comprimento do encamisamento em serpentina dentro do M-301 e M-302, escolhido considerando o projeto de um agitador, já que as camisas com serpentinas possuem um projeto interessante para essas considerações. Não é calculada a altura da serpentina, por questões de escolha de equipamento e de design do mesmo.

$$L_{M-301} = 3,17 \text{ m}$$

$$L_{M-302} = 14,97 \text{ m}$$

Para o dimensionamento do misturador, consideram-se os modelos de forma padrão do mesmo modelo considerado para os reatores. Assim, calcula-se o volume do reator e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170. Usa-se a Equação A.171 para o cálculo do diâmetro do tanque, e assim calcula-se o restante dos dimensionamentos.

Para fins de cálculo, utiliza-se a viscosidade da água na temperatura de operação do misturador, e considerando-se uma mistura homogênea nos misturadores, a densidade média da solução pode ser calculada pela Equação A.172. Os valores considerados e calculados para a propriedade do fluido e do misturador estão presentes na Tabela A.105.

Tabela A.105 – Propriedades e considerações para o M-301 e M-302

| Densidade do meio (kg/m³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1400,95 | 0,66 | 2,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade média, calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.172 e o volume mínimo e o volume real do tanque com a Equação A.163 e A.164, e tem-se assim os valores abaixo.

$$Q_{M-301} = 1,07 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,045 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{M-302} = 9,20 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,383 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,M-301} = 0,09 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,M-302} = 0,77 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-301} = 0,134 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-302} = 1,15 \text{ m}^3$$

Calcula-se assim o diâmetro do tanque com a Equação A.171.

$$T_{M-301} = 0,48 \text{ m}$$

$$T_{M-302} = 0,99 \text{ m}$$

Assim, os valores dimensionados para o M-301 e M-302 estão presentes na Tabela A.106 e A.107.

Tabela A.106 – Valores dimensionados para o misturador M-301

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 0,73 | 0,24 | 0,12 | 0,03 | 0,04 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.107 – Valores dimensionados para o misturador M-302

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,49 | 0,50 | 0,25 | 0,06 | 0,08 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.3.2.3 Cálculos energéticos M-301 e M-302

Com os valores e condições descritos na Tabela A.105 para o meio dos misturadores, utilizam-se as Equações A.174 e A.175, e considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p segundo o Re calculado. Para o M-301 e M-302 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{M-301} = 124934,91$$

$$Re_{M-302} = 524875,91$$

$$N_{p,M-301} = N_{p,M-302} = 1,30$$

$$P_{M-301} = 1,51 \text{ N.m/s} = 0,0015 \text{ kW}$$

$$P_{M-302} = 54,66 \text{ N.m/s} = 0,055 \text{ kW}$$

A.2.3.3 Reatores de precipitação com hidróxido (R-304, R-305 e R-306)

Os reatores de precipitação também são basicamente reatores CSTR operados continuamente em estado estacionário com a entrada de reagentes e a saída de produtos de forma contínua. A precipitação é um processo mais lento, principalmente pela formação do cristal. Assim, um tempo de residência aceitável com chicanas para esta, com uma mistura relevante com um misturador adequado devem ser considerados.

A.2.3.3.1 Balanço de energia R-304, R-305 e R-306

Para o balanço de energia dos reatores R-304, R-305 e R-306, usa-se a Equação A.151 que também foi usada para os reatores R-301, R-302 e R-303, considerando as mesmas definições para a etapa de lixiviação.

$$\underline{Q} - \underline{W} - F_{A0} * \sum x_i * C_{p,i} * (T - T_{i0}) - \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X = 0 \quad (\text{A.151})$$

Onde:

T - Temperatura de reação do reator, K

T_{i0} - Temperatura de entrada do componente i, K

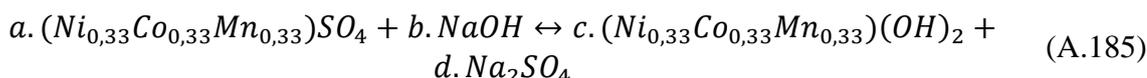
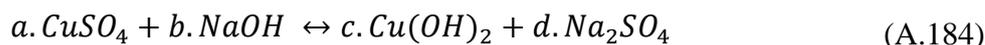
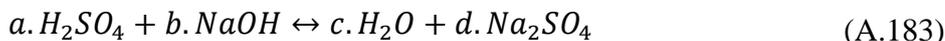
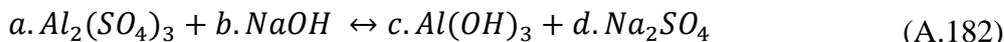
T_R - Temperatura de referência, K

H_i⁰ - Entalpia parcial do componente na temperatura de referência, kJ/mol

C_{p,i} - Calor específico do componente i, kJ/mol.K

Para o cálculo da entalpia de formação da reação, utiliza-se a Equação A.152 também definida por Fogler (2018). A Equação A.153 define o cálculo do calor específico médio de uma mistura onde não há reação, e pode ser utilizado para fins de balanço energético dos

componentes inertes. A Reação 1, Reação 2, Reação 3 e Reação 4 são descritas pelas Equações A.182, A.183, A.184 e A.185, respectivamente.



Os fatores de balanceamento recalculados estão definidos na Tabela A.108, e os valores representam o balanceamento exato considerando a entrada do material com a razão molar definida, que deverão ser utilizados para o cálculo de entalpias de formação e demais entalpias.

Tabela A.108 – Balanceamento das reações R-304, R-305 e R-306

| Fator | Reação 1 | Reação 2 | Reação 3 | Reação 4 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| a | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| b | 6,00 | 2,00 | 2,00 | 2,00 |
| c | 2,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 |
| d | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com base nisso, utiliza-se a vazão molar dos componentes na reação definidos no Apêndice A.1 do Balanço de Massa e usa-se valores com relação aos componentes definidos na Tabela A.2 de dados energéticos, com valores de entalpia de formação para cada componente presente na Reação 1 e 2, e nos calores específicos de cada componente. A Tabela A.109 demonstra as temperaturas consideradas para a operação.

Tabela A.109 – Considerações de temperatura para o R-304, R-305 e R-306

| $T_{R-304,R-305,R-306}$ (°C) | $T_{i0,R-304,R-305,R-306}$ (°C) | $T_{i0,M-303,M-304,M-306}$ (°C) | T_{Ref} (°C) | $T_{f,ent}$ (°C) | $T_{f,sai}$ (°C) |
|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|------------------|
| 80,00 | 80,00 | 80,00 | 25,00 | 25,00 | 40,00 |

Fonte: Autores (2022).

Utiliza-se assim a Equação A.152 e o valor da entalpia de formação é obtido. Para todos os reatores de precipitação por hidróxido (R-304, R-305 e R-306), a temperatura de precipitação é em 80 °C, portanto, em um sistema estacionário e contínuo entre os processos a única variação de energia é com relação ao calor desenvolvido pela reação exotérmica de precipitação e de neutralização ácido-base. Assim, desprezando-se também o trabalho de eixo dos reatores, percebe-se que as temperaturas de entrada e de operação (T e T_{i0}) são iguais, logo, a Equação A.186 demonstra a relação entre as temperaturas. A Equação A.151 com as considerações mencionadas apresenta-se na Equação A.187.

$$T - T_{i0} = 0 \quad (\text{A.186})$$

$$\underline{Q} - \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X = 0 \quad (\text{A.187})$$

Considerando-se o balanceamento de cada reação na Tabela A.108, e os valores de entalpia de formação e calor específico de cada componente presente na Tabela A.2, calcula-se a entalpia de reação de cada reação considerando o componente A como o componente de referência. Dessa forma, tem-se os valores abaixo para a entalpia de reação de cada reação.

$$\Delta H_{RxR1} = -768,30 \text{ kJ/mol de } Al_2(SO_4)_3$$

$$\Delta H_{RxR2} = -313,22 \text{ kJ/mol de } H_2SO_4$$

$$\Delta H_{RxR3} = -235,01 \text{ kJ/mol de } CuSO_4$$

$$\Delta H_{RxR4} = -283,29 \text{ kJ/mol de } (Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33})SO_4$$

Do balanço de massa, a vazão molar do componente A de entrada (F_{A0}) para cada reação estão presentes na Tabela A.110, A.111 e A.112 para os reatores R-304, R-305 e R-306, para o cálculo energético de cada reação. Além disso, o valor de conversão (X) em fração também está relacionado nas tabelas para cada reação. Os valores de F_{A0} zerados significam que a reação não ocorre no respectivo reator.

Tabela A.110 – Vazões molares de entrada no R-304

| X | F_{A0, R1} (mol/s) | F_{A0, R2} (mol/s) | F_{A0, R3} (mol/s) | F_{A0, R4} (mol/s) |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0,999 | 0,013 | 0,029 | 0,00 | 0,00 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.111 – Vazões molares de entrada no R-305

| X | F_{AO, R1} (mol/s) | F_{AO, R2} (mol/s) | F_{AO, R3} (mol/s) | F_{AO, R4} (mol/s) |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0,999 | 0,00 | 0,00 | 0,008 | 0,00 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.112 – Vazões molares de entrada no R-306

| X | F_{AO, R1} (mol/s) | F_{AO, R2} (mol/s) | F_{AO, R3} (mol/s) | F_{AO, R4} (mol/s) |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 0,999 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,579 |

Fonte: Autores (2022).

Aplica-se então a Equação A.187 com os valores para cada reator, e calcula-se a energia liberada para cada reação em cada reator.

$$\underline{Q}_{R1,R-304} = -9,69 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R2,R-304} = -8,95 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R3,R-304} = \underline{Q}_{R4,R-304} = 0,00 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R3,R-305} = -1,87 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R1,R-305} = \underline{Q}_{R2,R-305} = \underline{Q}_{R4,R-305} = 0,00 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R4,R-306} = -163,93 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R1,R-306} = \underline{Q}_{R2,R-306} = \underline{Q}_{R3,R-306} = 0,00 \text{ kJ/s}$$

Como o calor de entrada para inertes e para o hidróxido de sódio diluído proveniente dos misturadores é igual a zero, já que a temperatura de saída dos misturadores de hidróxido (M-303, M-304 e M-306) e dos reatores em sequência (R-304, R-305 e R-306) estão na mesma temperatura (80°C), o sistema só depende do calor de reação envolvido para cada reator. As Equações A.188, A.189 e A.190 definem a perspectiva definida para as considerações envolvidas.

$$\underline{Q}_{inerte} = m_t * C_{p,m} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.188})$$

$$T - T_{i0} = 0 \quad (\text{A.189})$$

$$\underline{Q}_{inerte} = 0 \quad (\text{A.190})$$

Portanto, pela Tabela A.109 percebe-se que não há variação de temperatura entre os reatores e misturadores, e assim necessita-se de um sistema de arrefecimento considerando o calor de reação. Porém, o sistema deve considerar um possível aquecimento em caso de possibilidades de diminuição de temperatura por desvios do processo, e por isso um sistema de água quente e água fria deve ser projetado para o trocador de calor do R-304, R-305 e R-306. Dessa forma, com a Equação A.191 calcula-se o calor necessário de transferência do trocador de calor para o reator R-304, R-305 e R-306, considerando o calor gerado pela reação de precipitação em módulo.

$$\begin{aligned} q &= \underline{Q}_{R1} + \underline{Q}_{R2} + \underline{Q}_{R3} + \underline{Q}_{R4} + \underline{Q}_{inerte} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} & (\text{A.191}) \\ q_{R-304} &= 18,64 \text{ kJ/s} = 18,64 \text{ kW} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \\ q_{R-305} &= 1,89 \text{ kJ/s} = 1,89 \text{ kW} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \\ q_{R-306} &= 163,93 \text{ kJ/s} = 163,93 \text{ kW} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \end{aligned}$$

Considerando o valor do coeficiente global de troca térmica (U) como padrão para um trocador de calor presente na Figura A.1 do Anexo A.I, utiliza-se o valor mínimo para o tipo de trocador de calor com água nos tubos. O valor está presente na Equação A.192.

$$U_{R-304} = U_{R-305} = U_{R-306} = 0,85 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{A.192})$$

Para o cálculo da variação de temperatura média logarítmica, utilizam-se as Equações A.98, A.99 e A.100 do E-201, que também é um trocador de calor. Assim, os valores de temperatura do fluido frio e para o fluido quente são considerados na Tabela A.109. Tem-se assim os valores de variação de temperatura.

$$\begin{aligned} \Delta T_{1,R-304} &= \Delta T_{1,R-305} = \Delta T_{1,R-306} = 55,00 \text{ K} \\ \Delta T_{2,R-304} &= \Delta T_{2,R-305} = \Delta T_{2,R-306} = 40,00 \text{ K} \\ \Delta T_{ml,R-304} &= \Delta T_{ml,R-305} = \Delta T_{ml,R-306} = 47,10 \text{ K} \end{aligned}$$

Com a Equação A.191 calcula-se a área de troca térmica necessária para o trocador de calor do reator, e também com a Equação A.93 do E-201 calcula-se a vazão mássica de água

fria com as entalpias retiradas da Figura A.5 do Anexo A.F para os dados termodinâmicos da água na temperatura de entrada e saída definida na Tabela A.109, observados na Equação A.193 e A.194. Assim, o valor em vazão mássica de água fria está presente abaixo.

$$A_{R-304} = 0,466 \text{ m}^2$$

$$A_{R-305} = 0,05 \text{ m}^2$$

$$A_{R-306} = 4,09 \text{ m}^2$$

$$h_{q,ent,R-304} = h_{q,ent,R-305} = h_{q,ent,R-306} = 104,84 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.193})$$

$$h_{q,sai,R-304} = h_{q,sai,R-305} = h_{q,sai,R-306} = 167,54 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.194})$$

$$m_{f,R-304} = 0,30 \text{ kg/s} = 25683,85 \text{ kg/dia}$$

$$m_{f,R-305} = 0,03 \text{ kg/s} = 2596,98 \text{ kg/dia}$$

$$m_{f,R-306} = 2,61 \text{ kg/s} = 225888,62 \text{ kg/dia}$$

A.2.3.3.2 Dimensionamento R-304, R-305 e R-306

Considerando-se a Equação A.109 do E-201, calcula-se o comprimento dos tubos de troca térmica. As considerações estão presentes na Tabela A.113, considerando tubos de passagem de líquido frio ou quente (se necessário) em forma de uma camisa com serpentina, e feito de material resistente pelas variações de pH nos reatores.

Tabela A.113 – Dados para o dimensionamento do R-304, R-305 e R-306

| N_{R-304} | N_{R-305} | N_{R-306} | D_i (m) |
|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 2,00 | 1,00 | 20,00 | 0,016 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se, assim, o comprimento do encamisamento em serpentina dentro dos reatores, escolhido considerando o projeto de um agitador, já que as camisas com serpentinas possuem um projeto interessante para essas considerações. Não é calculada a altura da serpentina, por questões de escolha de equipamento e de design do mesmo.

$$L_{R-304} = 4,69 \text{ m}$$

$$L_{R-305} = 0,95 \text{ m}$$

$$L_{R-306} = 4,12 \text{ m}$$

Para o dimensionamento do reator, consideram-se os modelos de forma padrão para um CSTR definidos por Green & Southard (2019). Assim, calcula-se o volume do reator e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170. Para fins de cálculo, utiliza-se boa parte de propriedades da água para o cálculo de parâmetros operacionais para os reatores, pela complexidade do sistema, uma vez que muitos sais estão em dissolução contínua e sólidos não solúveis também. Considerando-se uma mistura homogênea, a densidade média da solução pode ser calculada pela Equação A.171. Com o valor de densidade média, calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.172. Assim, os valores considerados e calculados para as propriedades do R-304, R-305 e R-306 estão presentes na Tabela A.114. Os dados considerados os da água foram retirados da Figura A.5 do Anexo A.H.

Tabela A.114 – Propriedades e considerações para o R-304, R-305 e R-306

| Densidade do meio (kg/m³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1313,05 | 0,35 | 2,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade e de tempo de residência estimado no balanço de massa, calcula-se a vazão e o volume mínimo dos reatores, e assim o volume considerando a margem de segurança. Os dados de vazão mássica são retirados do balanço de massa.

$$Q_{R-304} = 50,01 \text{ m}^3/\text{dia} = 2,08 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{R-305} = 60,38 \text{ m}^3/\text{dia} = 2,52 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{R-306} = 88,57 \text{ m}^3/\text{dia} = 3,69 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,R-304} = 4,17 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,R-305} = 5,03 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,R-306} = 7,38 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-304} = 6,25 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-305} = 7,55 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-306} = 11,07 \text{ m}^3$$

Com os valores de volume para os reatores, calcula-se o diâmetro do tanque (T) com a relação da Equação A.171, e tem-se:

$$T_{R-304} = 1,74 \text{ m}$$

$$T_{R-305} = 1,86 \text{ m}$$

$$T_{R-306} = 2,11 \text{ m}$$

Com os valores de diâmetro para cada reator, calculam-se suas relações e obtém-se o valor de dimensionamento para cada reator com as Tabelas A.115, A.116 e A.117.

Tabela A.115 – Valores dimensionados para o reator R-304

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,62 | 0,87 | 0,44 | 0,11 | 0,14 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.116 – Valores dimensionados para o reator R-305

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,79 | 0,93 | 0,47 | 0,12 | 0,16 |

Fonte: Autores (2022)

Tabela A.117 – Valores dimensionados para o reator R-306

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 3,16 | 1,06 | 0,54 | 0,13 | 0,18 |

Fonte: Autores (2022)

A.2.3.3.3 Cálculos energéticos R-304, R-305 e R-306

Para os cálculos energéticos, repetem-se os cálculos feitos para os reatores de lixiviação com relação à potência de agitação. Porém, para os reatores e misturadores o cálculo é feito desconsiderando a presença dos sólidos. O Número de Reynolds e a Potência do Impelidor podem ser calculados com as Equações A.174 e A.174, respectivamente. Com os valores e condições descritos na Tabela A.114 para o meio, considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p conforme o Re calculado. Para o R-304, R-305 e R-306 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{R-304} = 2853405,80$$

$$Re_{R-305} = 3235338,35$$

$$Re_{R-306} = 4176773,38$$

$$N_{p,R-304} = N_{p,R-305} = N_{p,R-306} = 1,30$$

$$P_{R-304} = 861,19 \text{ N.m/s} = 0,86 \text{ kW}$$

$$P_{R-305} = 1178,93 \text{ N.m/s} = 1,18 \text{ kW}$$

$$P_{R-306} = 2232,51 \text{ N.m/s} = 2,23 \text{ kW}$$

A.2.3.4 Misturadores de diluição de hidróxidos (M-303, M-304 e M-306)

A.2.3.4.1 Balanço energético do M-303, M-304 e M-306

Para o cálculo energético, considerando entalpia de diluição para o NaOH e desprezando possíveis trabalhos de eixo dos misturadores, usa-se a Equação A.176 para o cálculo. A Tabela A.118 demonstra os dados considerados para o cálculo do M-303, M-304 e do M-306 para o balanço de energia da reação de dissociação da base. A entalpia de dissociação do NaOH foi retirada do livro de Haynes et al. (2017). Considera-se apenas a reação da Equação A.195, e por isso o valor de x_i é unitário.



Tabela A.118 – Valores para o M-303, M-304 e M-306

| T (°C) | T_{i0} (°C) | ΔH_{mist} (kJ/mol) | x_A | X | C_{p,NaOH} (kJ/mol.K) |
|---------------|----------------------------|---|----------------------|----------|--|
| 80,00 | 25,00 | -44,51 | 1,00 | 1,00 | 0,087 |

Fonte: Autores (2022).

Considera-se as entradas em vazão molar presentes na Tabela A.119, A.120 e A.121 para os dois misturadores de base.

Tabela A.119 – Valores de reação para o M-303

| F_{A0} (mol/s) | m_{mist} (kg/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 0,133 | 0,334 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.120 – Valores de reação para o M-304

| F_{A0} (mol/s) | m_{mist} (kg/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 0,016 | 0,159 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.121 – Valores de reação para o M-306

| F_{A0} (mol/s) | m_{mist} (kg/s) |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1,16 | 0,41 |

Fonte: Autores (2022).

Calcula-se assim o valor de calor liberado pela dissociação da base no misturador considerando uma entalpia de dissolução média.

$$\underline{Q}_{R,M-303} = -5,28 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R,M-304} = -0,64 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{R,M-306} = -46,06 \text{ kJ/s}$$

Usa-se o calor específico da água como um valor médio e aproximado com os valores presentes na Tabela A.2 de dados termodinâmicos para espécies, tem-se o valor abaixo para o M-303, M-304 e M-306.

$$C_{p,m,mist,M-303} = C_{p,m,mist,M-304} = C_{p,m,mist,M-306} = 4,175 \text{ kJ/kg.K}$$

Com o valor do calor específico da mistura, utiliza-se a Equação A.176 sem reação e em base mássica, e assim calcula-se a energia necessária para a mistura sair em pelo menos 80 °C para o R-304, R-305 e R-306. Assim, a Equação A.196 define o calor para inertes (considerando sem interação de dissolução iônica e demais interações).

$$\underline{Q}_{inerte} = m_{mist} * C_{p,m,mist} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.196})$$

$$\underline{Q}_{inerte,M-303} = 76,74 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{inerte,M-304} = 36,62 \text{ kJ/s}$$

$$\underline{Q}_{inerte,M-306} = 94,07 \text{ kJ/s}$$

Calcula-se então a energia total do sistema com a Equação A.197.

$$\underline{Q} = \underline{Q}_{inerte} + \underline{Q}_R = q \quad (\text{A.197})$$

$$\underline{Q}_{M-303} = 71,46 \text{ kJ/s} = q_{M-303} = U.A.\Delta T_{ml}$$

$$\underline{Q}_{M-304} = 35,98 \text{ kJ/s} = q_{M-304} = U.A.\Delta T_{ml}$$

$$\underline{Q}_{M-306} = 48,01 \text{ kJ/s} = q_{M-306} = U.A.\Delta T_{ml}$$

Percebe-se assim que pouca energia está sendo liberada com relação ao valor de temperatura necessário para a saída da mistura, e por isso é necessário o aquecimento do sistema para não ocasionar problemas no processo, e manter a temperatura de saída em 80°C. Assim, calcula-se a vazão mássica de vapor de água de entrada necessária nos tubos do trocador de calor do M-303, M-304 e M-306 para o aquecimento do equipamento com a Equação A.93 considerando vapor saturado de água para a troca térmica. Os dados da temperatura de entrada e saída de vapor, bem como o calor específico, estão na Tabela A.122.

| $C_{p,Água} \text{ (kJ/kg.K)}$ | $T_{q,ent} \text{ (}^\circ\text{C)}$ | $T_{q,sai} \text{ (}^\circ\text{C)}$ | $T_{f,ent} \text{ (}^\circ\text{C)}$ | $T_{f,sai} \text{ (}^\circ\text{C)}$ |
|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 4,175 | 130,00 | 130,00 | 25,00 | 80,00 |

Fonte: Autores (2022).

Calculando-se a vazão mássica de vapor com a Equação A.93, considerando os dados de entalpia para a temperatura de vapor retirados da Figura A.5 do Anexo A.F, presentes na Equação A.198 e A.199.

$$h_{q,ent,M-303} = h_{q,ent,M-304} = h_{q,ent,M-306} = 2720,10 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.198})$$

$$h_{q,sai,M-303} = h_{q,sai,M-304} = h_{q,sai,M-306} = 546,39 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.199})$$

$$m_{q,M-303} = 0,033 \text{ kg/s} = 2840,35 \text{ kg/dia}$$

$$m_{q,M-304} = 0,017 \text{ kg/s} = 1430,16 \text{ kg/dia}$$

$$m_{q,M-306} = 0,022 \text{ kg/s} = 1908,20 \text{ kg/dia}$$

Considera-se o U para condensador de vapor de água com água da Figura A.1 do Anexo A.I, com o valor presente na Equação A.200. Além disso, calculam-se as variações de temperatura e a variação de temperatura logarítmica com as Equações A.99, A.100 e A.98.

$$U_{M-303} = U_{M-304} = U_{M-306} = 1,00 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K} \quad (\text{A.200})$$

$$\Delta T_{1,M-303} = \Delta T_{1,M-304} = \Delta T_{1,M-306} = 105,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{2,M-303} = \Delta T_{2,M-304} = \Delta T_{2,M-306} = 50,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml,M-303} = \Delta T_{ml,M-304} = \Delta T_{ml,M-306} = 74,13 \text{ K}$$

Calculando-se a área de troca térmica, tem-se:

$$A_{M-303} = 0,96 \text{ m}^2$$

$$A_{M-304} = 0,48 \text{ m}^2$$

$$A_{M-306} = 0,65 \text{ m}^2$$

A.2.3.4.2 Dimensionamento M-303, M-304 e M-306

Considerando-se a Equação A.109 do E-201, calcula-se o comprimento dos tubos de troca térmica. As considerações estão presentes na Tabela A.123, considerando alguns tubos de vapor de água com um diâmetro médio em forma de uma camisa com serpentina, e feito de material resistente a líquidos básicos do M-303, M-304 e M-306.

Tabela A.123 – Dados para o dimensionamento do M-303 e M-304 e M-306

| $N_{M-303,M-304,M-306}$ | D_i (m) |
|-------------------------|-----------|
| 2,00 | 0,016 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se, assim, o comprimento do encamisamento em serpentina dentro do M-303, M-304 e M-306, visando a utilização de um agitador. Não é calculada a altura da serpentina, por questões de escolha de equipamento e de design do mesmo.

$$L_{M-303} = 9,71 \text{ m}$$

$$L_{M-304} = 4,89 \text{ m}$$

$$L_{M-306} = 6,52 \text{ m}$$

Para o dimensionamento do misturador, consideram-se os modelos de forma padrão do mesmo modelo considerado para os reatores. Assim, calcula-se o volume do misturador e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170. Usa-se a Equação A.171 para o cálculo do diâmetro do tanque, e assim calcula-se o restante dos dimensionamentos.

Para fins de cálculo, utiliza-se a viscosidade da água na temperatura de operação do misturador (80°C) retirado da Figura A.5 do Anexo A.H, com uma mistura homogênea no misturador, a densidade média da solução pode ser calculada pela Equação A.172. Os valores considerados e calculados para a propriedade do fluido e do misturador está presente na Tabela A.124.

Tabela A.124 – Propriedades e considerações para o M-303, M-304 e M-306

| Densidade do meio (kg/m ³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|--|--------------------------|-------------------------|----------------|
|--|--------------------------|-------------------------|----------------|

1047,29

0,35

2,00

60,00

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade média, calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.173 e o volume mínimo e o volume real do tanque com a Equação A.163 e A.164, e tem-se assim os valores abaixo.

$$Q_{M-303} = 27,57 \text{ m}^3/\text{dia} = 1,15 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{M-304} = 13,16 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,55 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{M-306} = 33,80 \text{ m}^3/\text{dia} = 1,41 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,M-303} = 2,30 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,M-304} = 1,10 \text{ m}^3$$

$$V_{R,min,M-306} = 2,82 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-303} = 3,45 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-304} = 1,65 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-306} = 4,23 \text{ m}^3$$

Calcula-se assim o diâmetro do tanque com a Equação A.170.

$$T_{M-303} = 1,43 \text{ m}$$

$$T_{M-304} = 1,12 \text{ m}$$

$$T_{M-306} = 1,53 \text{ m}$$

Assim, os valores dimensionados para o M-303, M-304 e M-306 estão presentes na Tabela A.125, A.126 e A.127.

Tabela A.125 – Valores dimensionados para o misturador M-303

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,15 | 0,72 | 0,36 | 0,09 | 0,12 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.126 – Valores dimensionados para o misturador M-304

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,68 | 0,56 | 0,28 | 0,07 | 0,09 |

Fonte: Autores (2022).

Tabela A.127 – Valores dimensionados para o misturador M-306

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,68 | 0,56 | 0,28 | 0,07 | 0,09 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.3.4.3 Cálculos energéticos M-303, M-304 e M-306

Com os valores e condições descritos na Tabela A.124 para o meio dos misturadores, utilizam-se as Equações A.173 e A.174, e considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p segundo o Re calculado. Para o M-303, M-304 e M-306 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{M-303} = 1530114,05$$

$$Re_{M-304} = 934368,82$$

$$Re_{M-306} = 1752565,32$$

$$N_{p,M-303} = N_{p,M-304} = N_{p,M-306} = 1,30$$

$$P_{M-303} = 254,58 \text{ N.m/s} = 0,25 \text{ kW}$$

$$P_{M-304} = 74,18 \text{ N.m/s} = 0,074 \text{ kW}$$

$$P_{M-306} = 357,44 \text{ N.m/s} = 0,36 \text{ kW}$$

A.2.3.5 Misturador do ajuste de razão (M-305)

Para o misturador de ajuste de razão, não há alteração de temperatura nem adição de energia ao sistema. A única função é ser um tanque de retenção onde os sulfatos são adicionados continuamente com relação a necessidade do ajuste de razão.

.2.3.5.1 Dimensionamento M-305

Para o dimensionamento do misturador, consideram-se os modelos de forma padrão do mesmo modelo considerado para os reatores. Assim, calcula-se o volume do misturador e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170. Usa-se a Equação A.171 para o cálculo do diâmetro do tanque, e assim calcula-se o restante dos dimensionamentos.

Para fins de cálculo, utiliza-se a viscosidade da água na temperatura de operação do misturador (80°C) retirado da Figura A.5 do Anexo A.H, com uma mistura homogênea no misturador, a densidade média da solução pode ser calculada pela Equação A.172. Os valores considerados e calculados para a propriedade do fluido e do misturador está presente na Tabela A.128.

Tabela A.128 – Propriedades e considerações para o M-305

| Densidade do meio (kg/m ³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|--|--------------------------|-------------------------|----------------|
| 1302,16 | 0,35 | 2,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade média, calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.173 e o volume mínimo e o volume real do tanque com a Equação A.163 e A.164, e tem-se assim os valores abaixo.

$$Q_{M-305} = 62,13 \text{ m}^3/\text{dia} = 2,59 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,M-305} = 5,18 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-305} = 7,77 \text{ m}^3$$

Calcula-se assim o diâmetro do tanque com a Equação A.170.

$$T_{M-305} = 1,43 \text{ m}$$

Assim, os valores dimensionados para o M-305 estão presentes na Tabela A.129.

Tabela A.129 – Valores dimensionados para o misturador M-305

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 2,81 | 0,94 | 0,47 | 0,12 | 0,16 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.3.5.2 Cálculos energéticos M-305

Com os valores e condições descritos na Tabela A.128 para o meio dos misturadores, utilizam-se as Equações A.174 e A.175, e considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p segundo o Re calculado. Para o M-305 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{M-305} = 3270142,98$$

$$N_{p,M-305} = 1,30$$

$$P_{M-303} = 986,13 \text{ N.m/s} = 0,99 \text{ kW}$$

A.2.3.6 Reator de precipitação com carbonato (R-307)

A.2.3.6.1 Balanço de energia R-307

Para o balanço de energia do reator R-307, usa-se a Equação A.201 que também foi usada para os reatores anteriores.

$$\underline{Q} - \underline{W} - F_{A0} * \sum x_i * C_{p,i} * (T - T_{i0}) - \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X = 0 \quad (\text{A.201})$$

Onde:

T - Temperatura de reação do reator, K

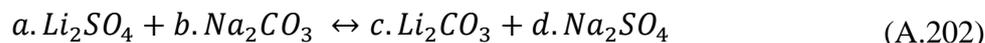
T_{i0} - Temperatura de entrada do componente i, K

T_R - Temperatura de referência, K

H_i⁰ - Entalpia parcial do componente na temperatura de referência, kJ/mol

C_{p,i} - Calor específico do componente i, kJ/mol.K

Para o cálculo da entalpia de formação da reação, utiliza-se a Equação A.152 também definida por Fogler (2018). A Equação A.153 define o cálculo do calor específico médio de uma mistura onde não há reação, e pode ser utilizado para fins de balanço energético dos componentes inertes. A Reação 1 é descrita pela Equação A.202.



Os fatores de balanceamento recalculados estão definidos na Tabela A.130, e os valores representam o balanceamento exato considerando a entrada do material com a razão molar definida, que deverão ser utilizados para o cálculo de entalpias de formação e demais entalpias.

Tabela A.130 – Balanceamento das reações R-307

| Fator | Reação 1 |
|--------------|-----------------|
| A | 1,00 |
| B | 1,00 |
| C | 1,00 |
| D | 1,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com base nisso, utiliza-se a vazão molar dos componentes na reação definidos no Apêndice A.1 do Balanço de Massa e usa-se valores com relação aos componentes definidos na Tabela A.2 de dados energéticos, com valores de entalpia de formação para cada componente presente na Reação 1 e 2, e nos calores específicos de cada componente. A Tabela A.131 demonstra as temperaturas consideradas para a operação.

Tabela A.131 – Considerações de temperatura para o R-307

| T_{R-307} (°C) | T_{i0,R-307}(°C) | T_{i0,M-307} (°C) | T_{Ref} (°C) | T_{f,ent} (°C) | T_{f,sai} (°C) |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 40,00 | 80,00 | 40,00 | 25,00 | 25,00 | 35,00 |

Fonte: Autores (2022).

Utiliza-se assim a Equação A.152 e o valor da entalpia de formação é obtido. Para o reator de precipitação por carbonato (R-307), a temperatura de precipitação é em 40 °C, portanto, em um sistema estacionário e contínuo entre os processos as variações de energia são entre a mistura de alimentações com diferentes temperaturas (provenientes do R-306 e do M-307). Assim, desprezando-se também o trabalho de eixo dos reatores, estabelecem-se as condições para o cálculo da energia do processo com a Equação A.151. Considerando-se o balanceamento de cada reação na Tabela A.130, e o valor de entalpia de formação e calor específico de cada componente presente na Tabela A.2, calcula-se a entalpia de reação da reação 1 com o componente A como o componente de referência. Dessa forma, tem-se o valor abaixo para a entalpia de reação.

$$\Delta H_{Rx_R} = -36,79 \text{ kJ/mol de } Li_2SO_4$$

Do balanço de massa, a vazão molar do componente A de entrada (F_{A0}) para a reação está presente na Tabela A.132 para o reator R-307. Além disso, o valor de conversão (X) em fração também está relacionado na Tabela A.132 para a reação.

Tabela A.132 – Vazões molares de entrada no R-307

| X | $F_{A0, R}$ (mol/s) |
|-------|---------------------|
| 0,999 | 0,245 |

Fonte: Autores (2022).

Aplica-se então a Equação A.151 com os valores para o reator, e calcula-se a energia liberada para a reação no reator.

$$\underline{Q}_{R,R-307} = -8,57 \text{ kJ/s}$$

Como o calor de entrada para inertes e para o hidróxido de sódio diluído proveniente dos misturadores é igual a zero, já que a temperatura de saída do misturador de carbonato (M-307) e do reator (R-307) estão na mesma temperatura (40°C), o sistema só depende do calor de reação envolvido para cada reator e da energia contida proveniente dos reatores anteriores a 80°C. Assim, a Equação A.203 define o calor de inertes provenientes dos reatores de precipitação por hidróxido. A estimativa é interessante do ponto de vista prático, já que o sistema deve conter um arrefecimento tanto para o calor de reação desenvolvido pela reação

exotérmica, quanto para a alimentação quente dos reatores anteriores. Antes do cálculo do calor de inertes, utiliza-se a Equação A.153 para o cálculo do calor específico médio com o valor abaixo.

$$C_{p,m,R-307} = 3,81 \text{ kJ/kg.K}$$

$$\underline{Q}_{inerte} = m_t * C_{p,m} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.203})$$

$$\underline{Q}_{inerte,R-307} = -209,12 \text{ kJ/s}$$

Dessa forma, a energia desenvolvida pelo sistema é definida pela equação A.204, e assim é possível calcular a área de troca térmica necessária para o resfriamento da solução até 40 °C.

$$q = \underline{Q}_R + \underline{Q}_{inerte} = U.A.\Delta T_{ml} \quad (\text{A.205})$$

$$-q_{R-307} = -217,69 \text{ kJ/s} = 217,69 \text{ kW} = U.A.\Delta T_{ml}$$

Assim, com o calor liberado pelo processo, considera-se o valor do coeficiente global de troca térmica (U) como padrão para um trocador de calor presente na Figura A.1 do Anexo A.I, e utiliza-se o valor mínimo para o tipo de trocador de calor com água no casco e água no tubo. O valor está presente na Equação A.206.

$$U_{R-307} = 0,85 \text{ kW/m}^2.\text{K} \quad (\text{A.206})$$

Para o cálculo da variação de temperatura média logarítmica, utilizam-se as Equações A.98, A.99 e A.100 do E-201, que também é um trocador de calor. Assim, os valores de temperatura do fluido frio e para o fluido quente são considerados na Tabela A.131. Tem-se assim os valores de variação de temperatura.

$$\Delta T_{1,R-307} = 55,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{2,R-307} = 5,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml,R-307} = 20,85 \text{ K}$$

Com a Equação A.205 calcula-se a área de troca térmica necessária para o trocador de calor do reator, e também com a Equação A.93 do E-201 calcula-se a vazão mássica de água fria com as entalpias retiradas da Figura A.5 do Anexo A.F para os dados termodinâmicos da

água na temperatura de entrada e saída definida na Tabela A.131, observados na Equação A.206 e A.207. Assim, o valor em vazão mássica de água fria está presente abaixo.

$$A_{R-307} = 12,28 \text{ m}^2$$

$$h_{q,ent,R-307} = 104,84 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.206})$$

$$h_{q,sai,R-307} = 146,86 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.207})$$

$$m_{f,R-307} = 5,18 \text{ kg/s} = 447604,67 \text{ kg/dia}$$

A.2.3.6.2 Dimensionamento R-307

Considerando-se a Equação A.109 do E-201, calcula-se o comprimento dos tubos de troca térmica. As considerações estão presentes na Tabela A.133, considerando tubos de passagem de líquido frio em forma de uma camisa com serpentina, e feito de material resistente pelas variações de pH nos reatores.

Tabela A.133 – Dados para o dimensionamento do R-307

| N_{R-307} | D_i (m) |
|-------------|-----------|
| 25,00 | 0,016 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se, assim, o comprimento do encamisamento em serpentina dentro dos reatores, escolhido considerando o projeto de um agitador.

$$L_{R-307} = 9,77 \text{ m}$$

Para o dimensionamento do reator, consideram-se os modelos de forma padrão para um CSTR definidos por Green & Southard (2019). Assim, calcula-se o volume do reator e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170. Para fins de cálculo, utiliza-se boa parte de propriedades da água para o cálculo de parâmetros operacionais para os reatores, pela complexidade do sistema, uma vez que muitos sais estão em

dissolução contínua e sólidos não solúveis também. A densidade média pode ser definida como igual a dos reatores R-304, R-305 e R-306, e assim calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.173. Assim, os valores considerados e calculados para as propriedades do R-307 estão presentes na Tabela A.134. Os dados considerados os da água foram retirados da Figura A.5 do Anexo A.H.

Tabela A.134 – Propriedades e considerações para o R-307

| Densidade do meio (kg/m ³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|--|--------------------------|-------------------------|----------------|
| 1313,05 | 0,65 | 2,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade e de tempo de residência estimado no balanço de massa, calcula-se a vazão e o volume mínimo do reator, e assim o volume considerando a margem de segurança. Os dados de vazão mássica são retirados do balanço de massa.

$$Q_{R-307} = 90,32 \text{ m}^3/\text{dia} = 3,76 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,R-307} = 7,53 \text{ m}^3$$

$$V_{R,R-307} = 11,29 \text{ m}^3$$

Com o valor de volume para o reator, calcula-se o diâmetro do tanque (T) com a relação da Equação A.171, e tem-se:

$$T_{R-307} = 2,12 \text{ m}$$

Com o valor de diâmetro para o reator, calculam-se suas relações e obtém-se o valor de dimensionamento para este, demonstrado na Tabela A.135.

Tabela A.135 – Valores dimensionados para o reator R-307

| H (m) | D _i (m) | C (m) | W (m) | W _b (m) |
|-------|--------------------|-------|-------|--------------------|
| 3,20 | 1,06 | 0,53 | 0,13 | 0,18 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.3.6.3 Cálculos energéticos R-307

Para os cálculos energéticos, repetem-se os cálculos feitos para os reatores anteriores com relação à potência de agitação. O Número de Reynolds e a Potência do Impelidor podem ser calculados com as Equações A.174 e A.175, respectivamente. Com os valores e condições descritos na Tabela A.134 para o meio, e considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p conforme o Re calculado. Para o R-307 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{R-307} = 2278433,93$$

$$N_{p,R-307} = 1,30$$

$$P_{R-307} = 1839,42 \text{ N.m/s} = 1,84 \text{ kW}$$

A.2.3.7 Misturador de carbonatos (M-307)

A.2.3.7.1 Balanço energético do M-307

Para o cálculo energético, considerando entalpia de diluição para o Na_2CO_3 e desprezando possíveis trabalhos de eixo dos misturadores, usa-se a Equação A.176 para o cálculo. A Tabela A.136 demonstra os dados considerados para o cálculo do M-307 para o balanço de energia da reação de dissociação da base. A entalpia de dissociação do Na_2CO_3 foi retirada do estudo de Vanderzee et al. (1981). Considera-se apenas a reação da Equação A.208, e por isso o valor de x_i é unitário.

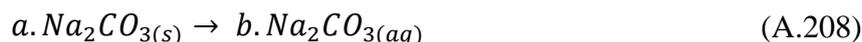


Tabela A.136 – Valores para o M-307

| T (°C) | T _{io} (°C) | ΔH_{mist} (kJ/mol) | x _A | X | C _{p,Na2CO3} (kJ/mol.K) |
|--------|----------------------|--------------------------------------|----------------|------|-------------------------------------|
| 40,00 | 25,00 | -26,78 | 1,00 | 1,00 | 0,111 |

Fonte: Autores (2022).

Considera-se as entradas em vazão molar presentes na Tabela A.137 para o misturador de carbonato.

Tabela A.137 – Valores de reação para o M-307

| F_{A0} (mol/s) | m_{mist} (kg/s) |
|------------------|-------------------|
| 0,294 | 0,07 |

Fonte: Autores (2022).

Calcula-se assim o valor de calor liberado pela dissociação da base no misturador considerando uma entalpia de dissolução média.

$$\underline{Q}_{R,M-307} = -7,39 \text{ kJ/s}$$

Usa-se o calor específico da água como um valor médio e aproximado com os valores presentes na Tabela A.2 de dados termodinâmicos para espécies, tem-se o valor abaixo para o M-303, M-304 e M-306.

$$C_{p,m,mist,M-307} = 4,175 \text{ kJ/kg.K}$$

Com o valor do calor específico da mistura, utiliza-se a Equação A.176 sem reação e em base mássica, e assim calcula-se a energia necessária para a mistura sair em pelo menos 40 °C para o R-307. Assim, a Equação A.178 define o calor para inertes (considerando sem interação de dissolução iônica e demais interações).

$$\underline{Q}_{inerte} = m_{mist} * C_{p,m,mist} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.178})$$

$$\underline{Q}_{inerte,M-307} = 2,29 \text{ kJ/s}$$

Calcula-se então a energia total do sistema com a Equação A.209.

$$\underline{Q} = \underline{Q}_{inerte} + \underline{Q}_R = q \quad (\text{A.209})$$

$$\underline{Q}_{M-307} = -5,10 \text{ kJ/s} = -q_{M-303} = U.A.\Delta T_{ml}$$

É perceptível então que mais energia do que o requisitado está sendo liberada pela reação, logo necessita-se de resfriamento para o M-307. Assim, usa-se água fria para a troca

térmica, e os dados da temperatura de entrada e saída, bem como o calor específico, estão na Tabela A.138.

Tabela A.138 – Considerações de temperatura para o M-307

| $C_{p,Água}$ (kJ/kg.K) | $T_{q,ent}$ (°C) | $T_{q,sai}$ (°C) | $T_{f,ent}$ (°C) | $T_{f,sai}$ (°C) |
|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 4,175 | 40,00 | 40,00 | 25,00 | 30,00 |

Fonte: Autores (2022).

Calculando-se a vazão mássica de água com a Equação A.93, considerando os dados de entalpia para a temperatura de água retirados da Figura A.5 do Anexo A.F, presentes na Equação A.210 e A.211.

$$h_{f,ent,M-307} = 2720,10 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.210})$$

$$h_{f,sai,M-307} = 546,39 \text{ kJ/kg} \quad (\text{A.211})$$

$$m_{f,M-307} = 0,033 \text{ kg/s} = 2840,35 \text{ kg/dia}$$

Considera-se o U para troca térmica de água no casco com água nos tubos da Figura A.1 do Anexo A.I, com o valor presente na Equação A.212. Além disso, calculam-se as variações de temperatura e a variação de temperatura logarítmica com as Equações A.99, A.100 e A.98, e com isso calcula-se o valor da área de troca térmica.

$$U_{M-307} = 0,85 \text{ kW/m}^2 \cdot K \quad (\text{A.212})$$

$$\Delta T_{1,M-307} = 15,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{2,M-307} = 10,00 \text{ K}$$

$$\Delta T_{ml,M-307} = 12,33 \text{ K}$$

$$A_{M-307} = 0,49 \text{ m}^2$$

A.2.3.7.2 Dimensionamento M-307

Considerando-se a Equação A.109 do E-201, calcula-se o comprimento dos tubos de troca térmica. As considerações estão presentes na Tabela A.139, considerando alguns tubos de

vapor de água com um diâmetro médio em forma de uma camisa com serpentina, e feito de material resistente a líquidos básicos do M-307.

Tabela A.139 – Dados para o dimensionamento do M-307

| N_{M-307} | D_i (m) |
|--------------------------|--------------------------|
| 2,00 | 0,016 |

Fonte: Autores (2022).

Tem-se, assim, o comprimento do encamisamento em serpentina dentro do M-307, visando a utilização de um agitador.

$$L_{M-307} = 4,84 \text{ m}$$

Para o dimensionamento do misturador, consideram-se os modelos de forma padrão do mesmo modelo considerado para os reatores. Assim, calcula-se o volume do misturador e o volume de operação (considerando uma capacidade 50% superior ao volume mínimo) destes com as Equações A.163 e A.164. Com isso, calcula-se o dimensionamento considerando os fatores de forma citados anteriormente com as Equações A.165, A.166, A.167, A.168, A.169 e A.170. Usa-se a Equação A.171 para o cálculo do diâmetro do tanque, e assim calcula-se o restante dos dimensionamentos.

Para fins de cálculo, utiliza-se a viscosidade da água na temperatura de operação do misturador (40°C) retirado da Figura A.5 do Anexo A.H, com uma mistura homogênea no misturador, a densidade média da solução pode ser calculada pela Equação A.172. Os valores considerados e calculados para a propriedade do fluido e do misturador estão presentes na Tabela A.140.

Tabela A.140 – Propriedades e considerações para o M-307

| Densidade do meio (kg/m³) | Viscosidade do meio (cP) | Tempo de residência (h) | Agitação (rpm) |
|---|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1703,06 | 0,65 | 2,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Com o valor de densidade média, calcula-se a vazão volumétrica considerando a Equação A.173 e o volume mínimo e o volume real do tanque com a Equação A.163 e A.164, e tem-se assim os valores abaixo.

$$Q_{M-307} = 3,44 \text{ m}^3/\text{dia} = 0,14 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{R,min,M-307} = 0,29 \text{ m}^3$$

$$V_{R,M-307} = 0,43 \text{ m}^3$$

Calcula-se assim o diâmetro do tanque com a Equação A.171.

$$T_{M-307} = 0,71 \text{ m}$$

Assim, os valores dimensionados para o M-307 estão presentes na Tabela A.141.

Tabela A.141 – Valores dimensionados para o misturador M-307

| H (m) | D_i (m) | C (m) | W (m) | W_b (m) |
|--------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1,07 | 0,36 | 0,18 | 0,04 | 0,06 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.3.7.3 Cálculos energéticos M-307

Com os valores e condições descritos na Tabela A.140 para o meio do misturador, utilizam-se as Equações A.174 e A.175, e considerando uma turbina de pás inclinadas no gráfico da Figura A.1 do Anexo A.B, usa-se a linha número 3 para a plotagem do valor do N_p segundo o Re calculado. Para o M-307 tem-se o valor de Re definido abaixo, e o N_p retirado destacado respectivamente, e assim um valor de P calculado é obtido.

$$Re_{M-307} = 334539,20$$

$$N_{p,M-307} = 1,30$$

$$P_{M-307} = 12,90 \text{ N.m/s} = 0,013 \text{ kW}$$

A.2.3.8 Filtros rotativos a vácuo (FG-301, FG-302, FG-303, FG-304, FG-305 e FG-306)

Todos os filtros rotativos a vácuo do FG-301 ao FG-306 funcionam da mesma maneira, recolhendo a torta por meio do raspador e encaminhando para a respectiva esteira, enquanto recolhe o filtrado que passa para as etapas seguintes. Na ausência de dados que possibilitem o correto dimensionamento de tais filtros, opta-se por extrapolar ao escolher um modelo disponível comercialmente e que atenda às necessidades aqui requeridas, mas ressaltando a necessidade de um ensaio de filtração para a real determinação dos requisitos a serem atendidos pelos filtros. Tal ensaio deve ser realizado no período correspondente à aquisição dos equipamentos. Portanto, em vistas do balanço de massa destes filtros, escolher o filtro modelo GYW-3, ou similar, presente no Anexo A.L, com uma potência de motor de 1,5 kW.

A.2.3.9 Tanques de retenção de sólidos (TK-301, TK-302, TK-303, TK-304 e TK-305)

Para os tanques de retenção de sólidos da área 300, do balanço de massa percebe-se que a vazão mássica é baixa e que boa parte do sólido está na forma de cristal. Logo, é perceptível que a capacidade do tanque deverá ser muito baixa, sem a necessidade de um dimensionamento detalhado. Por isso, confere-se um valor para tanques quadrados de 1 m³ para cada tanque de retenção, possuindo um fundo piramidal para o pleno escoamento e descarga dos tanques quando necessário. A descarga se dá pela gravidade, sem a necessidade do uso de bombas para sólidos. Assim, o valor dos lados dos tanques está presente abaixo:

$$l_{TK-301} = l_{TK-302} = l_{TK-303} = l_{TK-304} = l_{TK-305} = 1,00 \text{ m}$$

A.2.3.10 Transportadores de correia (C-301, C-302, C-303, C-304, C-305 e C-306)

Os transportadores de correia são necessários para o transporte de sólidos precipitados até o tanque de retenção, e sua devida retirada do processo.

A.2.3.10.1 Dimensionamento C-301, C-302, C-303, C-304, C-305 e C-306

De modo geral, as esteiras seguem o mesmo equacionamento feito para as outras esteiras do processo. Assim, as esteiras C-301, C-302, C-303, C-304, C-305 e C-306 seguem um mesmo padrão de considerações para elevação e comprimento por se tratarem de uma retirada de sólidos repetitivas. Do balanço de massa, percebe-se que a vazão mássica retirada destas possui valores de até 2 kg/min, e assim dimensiona-se a esteira para um valor bem acima da mesma

para possíveis diferenças do processo. O comprimento da esteira é definido pela Equação A.23 da esteira C-103, e os valores considerados estão presentes na Tabela A.142.

Tabela A.142 – Considerações para a C-301, C-302, C-303, C-304, C-305 e C-306

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) | Inclinação (°) |
|-----------------|-------------|--------------------------------|-------|-----------|--------------------|----------------|
| 8,77 | 0,50 | 30,00 | 3,00 | 5,00 | 60,00 | 20 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.3.10.2 Cálculos energéticos C-301, C-302, C-303, C-304, C-305 e C-306

Utilizando a Equação A.14 para o cálculo do fator de frequência, encontra-se:

$$F_{f,C-301} = 0,29 \text{ min}$$

$$F_{f,C-301} = F_{f,C-302} = F_{f,C-303} = F_{f,C-304} = F_{f,C-305} = F_{f,C-306}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,C-301} = 212,73 \text{ kgf}$$

$$T_{e,C-301} = T_{e,C-302} = T_{e,C-303} = T_{e,C-304} = T_{e,C-305} = T_{e,C-306}$$

Para o cálculo da potência, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{C-301} = 12763,73 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 2086,16 \text{ W} = 2,09 \text{ kW}$$

$$P_{C-301} = P_{C-302} = P_{C-303} = P_{C-304} = P_{C-305} = P_{C-306}$$

A.2.4 Área 400

A.2.4.1 Tanques de retenção de sólidos (TK-401, TK-402 e TK-403)

Para os tanques de retenção de sólidos da área 400, do balanço de massa percebe-se também que a vazão mássica é razoavelmente baixa e que boa parte do sólido está na forma de cristal. Logo, é perceptível que a capacidade do tanque deverá ser muito baixa, sem a necessidade de um dimensionamento detalhado. Por isso, confere-se um valor para tanques

quadrados de 2 m³ para cada tanque de retenção, possuindo um fundo piramidal para o pleno escoamento e descarga dos tanques quando necessário. A descarga se dá pela gravidade, sem a necessidade do uso de bombas para sólidos e considerando o estado estacionário, ou seja, os sólidos são retirados continuamente para a alimentação no restante do processo. Assim, o valor dos lados iguais dos tanques está presente abaixo:

$$l_{TK-401} = l_{TK-402} = l_{TK-403} = 1,26 \text{ m}$$

A.2.4.2 Transportadores de correia (C-401, C-402, C-403, C-404, C-405 e C-406)

A.2.4.2.1 Dimensionamento C-401, C-402, C-403, C-404, C-405 e C-406

De modo geral, as esteiras seguem o mesmo equacionamento feito para as outras esteiras do processo. Assim, as esteiras C-401, C-402 e C-403 seguem um mesmo padrão de considerações para elevação e comprimento por serem processos repetitivos de retroalimentação em processos posteriores. Do balanço de massa, percebe-se que a vazão mássica retirada destas possui valores de até no máximo 4 kg/min, e assim dimensiona-se a esteira para um valor bem acima da mesma para possíveis diferenças do processo. O comprimento da esteira é definido pela Equação A.21 da esteira C-103, e os valores considerados estão presentes na Tabela A.143.

Tabela A.143 – Considerações para as Esteiras C-401, C-402 e C-403

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) | Inclinação (°) |
|----------------------------|------------------------|---|------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 8,77 | 0,50 | 60,00 | 3,00 | 5,00 | 60,00 | 20 |

Fonte: Autores (2022).

Para as esteiras de transporte até o forno de sinterização/calцинаção, não há elevação de sólidos pelas esteiras. Dessa forma, utilizam-se as considerações da Tabela A.144 para estas.

Tabela A.144 – Considerações para as Esteiras C-404, C-405 e C-406

| Comprimento (m) | Largura (m) | Capacidade da esteira (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|--------------------|----------------|-----------------------------------|----------|--------------|-----------------------|
| 10,00 | 0,50 | 60,00 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

A.2.4.2.2 Cálculos energéticos C-401, C-402, C-403, C-404, C-405 e C-406

Utilizando a Equação A.14 para o cálculo do fator de frequência, encontra-se:

$$F_{f,C-401} = 0,292 \text{ min}$$

$$F_{f,C-401} = F_{f,C-402} = F_{f,C-403}$$

$$F_{f,C-404} = 0,33 \text{ min}$$

$$F_{f,C-404} = F_{f,C-405} = F_{f,C-406}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,C-401} = 274,59 \text{ kgf}$$

$$T_{e,C-401} = T_{e,C-402} = T_{e,C-403}$$

$$T_{e,C-404} = 275,20 \text{ kgf}$$

$$T_{e,C-404} = T_{e,C-405} = T_{e,C-406}$$

Para o cálculo da potência, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{C-401} = 16475,371 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 2692,80 \text{ W} = 2,69 \text{ kW}$$

$$P_{C-401} = P_{C-402} = P_{C-403}$$

$$P_{C-404} = 16512,00 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 2698,79 \text{ W} = 2,70 \text{ kW}$$

$$P_{C-404} = P_{C-405} = P_{C-406}$$

A.2.4.3 Moinhos (SR-401 e SR-402)

A.2.4.3.1 Dimensionamento SR-401 e SR-402

Considerando a alimentação dos moinhos como partículas granuladas em forma de cristal, estimam-se dimensões para os moinhos SR-401 e SR-402. O tamanho do equipamento depende diretamente do fornecedor e do modelo escolhido, e por isso, também é feita uma estimativa de valores de largura e comprimento para a área isolada do processo, considerados na Tabela A.145.

Tabela A.145 – Estimativa de dimensões para o moinho SR-401 e SR-402

| Altura da entrada (m) | Comprimento da câmara de moagem (m) | Largura da entrada (m) | Largura da área isolada (m) | Comprimento da área isolada (m) |
|------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------------|--|
| 0,50 | 1,00 | 0,50 | 5,00 | 5,00 |

Fonte: Autores (2022).

Calculando a área isolada para os moinhos com a Equação A.213:

$$A_{t,SR-401} = C_{t,SR-401} * L_{t,SR-401} \quad (\text{A.213})$$

$$A_{t,SR-401} = A_{t,SR-402} = 25,00 \text{ m}^2$$

A.2.4.3.2 Cálculos energéticos SR-401 e SR-402

Para o cálculo da potência necessária para os moinhos deixarem os granulados em partículas finas, considera-se os dados de energia específica também utilizados para o SR-101. Assim, a partir dos estudos realizados por Wuschke et al. (2018) para a trituração de células das baterias de íons de lítio, é possível estimar a energia necessária para o moinho do tipo shredder, com o valor definido de 4,50 kWh/t. Assim, com a vazão mássica mínima proveniente do balanço de massa (em t/h) para estimar a potência de eixo do moinho, utiliza-se um valor em vazão de 50% acima do mínimo calculando com a Equação A.214.

$$m_{min,SR-401} = 4462,89 \text{ kg/dia} = 0,19 \text{ t/h}$$

$$m_{min,SR-402} = 2268,20 \text{ kg/dia} = 0,095 \text{ t/h}$$

$$m_R = 1,50 * m_{min} \quad (\text{A.214})$$

$$m_{R,SR-401} = 6694,33 \text{ kg/dia} = 0,28 \text{ t/h}$$

$$m_{R,SR-402} = 3402,30 \text{ kg/dia} = 0,14 \text{ t/h}$$

Com os valores obtidos, calcula-se com a Equação A.215 o valor da potência de cada moinho.

$$P_M = E_G * m_R \quad (\text{A.215})$$

$$P_{M,SR-401} = 1,25 \text{ kW}$$

$$P_{M,SR-402} = 0,64 \text{ kW}$$

A.2.4.4 Misturador (M-401 e M-402)

Os misturadores M-401 e M-402 objetivam proporcionar a oportunidade de novamente realizar qualquer ajuste de razão que possa ser necessário para a obtenção do produto final, além de também homogeneizar a mistura de pós, já que é necessário distribuir uniformemente o produto para ter as características desejadas, que passará pelo processo de conformação por rolos e por fim para o forno de sinterização. Tal processo pode ser realizado primeiramente para o M-401 por um misturador tipo ribbon como o apresentado no Anexo A.J, o mesmo opera de forma contínua podendo ser configurado vertical ou horizontalmente, possui duas entradas no próprio equipamento o que se ajusta ao processo tendo em vista os dois moinhos que antecedem este misturador. Além disso, a potência do motor varia de 2,2 kW a 132 kW, tendo uma capacidade mínima de 40 L e máxima de 18000 L.

Para o M-402 sugere-se um misturador de pás como o apresentado no Anexo A.K, tal equipamento opera de forma contínua, sendo aplicado na mineração assim como em indústrias de reciclagem, possui uma potência do motor que varia de 2,2 kW a 22 kW e atende a uma vazão de 3 m³/h a 70 m³/h, satisfazendo aos requisitos deste processo, demais informações podem ser encontradas no próprio anexo.

A.2.4.5 Compactador de rolos (JC-401)

O compactador de rolos tem por objetivo compactar o pó em uma forma laminar, para poder adentrar o forno de sinterização e, em decorrência da compactação, melhorar a densidade do produto final e, conseqüentemente, as propriedades finais, como discutido na análise das tecnologias. Os rolos devem formar lâminas de tamanho ligeiramente inferior à largura dos transportadores, para que não se perca material pelas laterais destes, tais lâminas devem estar conformes também com a abertura do forno de esteira de calcinação/sinterização, o compactador de rolos é instalado entre os transportadores de correia C-404 e C-405.

A.2.4.6 Forno de esteira de calcinação/sinterização (B-401)

O forno de calcinação e sinterização é a última etapa do processo, e é uma operação crucial para a construção do alto valor agregado do material ativo. A operação é dividida em 3 etapas cruciais para o processo: calcinação a 450 °C, sinterização a 850 °C, e resfriamento do material até a temperatura ambiente. Dessa forma, o projeto do forno prevê um forno em esteira, com o andamento lento do material pela câmara que eleva a temperatura do processo passando pela área de reação (calcinação) liberando gases, agregamento das partículas com a temperatura mais elevada, e o resfriamento em esteira com ar ambiente usando compressores de ar.

O forno consiste basicamente em um forno elétrico de esteira, que pode ser operado continuamente ou semi continuamente com relação à necessidade da operação. A esteira deve ser projetada para todo o comprimento do forno, e ela deve considerar uma velocidade muito baixa, a alta, para casos de descarga de produto. As 3 etapas básicas são muito importantes para o acabamento do produto, já que a transformação da sinterização em estado sólido garante um produto de alto valor agregado.

A.2.4.6.1 Balanço de energia B-401

O balanço energético do B-401 considera o material na forma de uma placa plana no forno de aquecimento. Porém, assume-se que a espessura do material é desprezível por ser um pó, e estar muito bem distribuído na esteira. Assim, a condução transiente entre a superfície do material e o fundo não possui necessidade de cálculos, já que o tempo resultante seria praticamente desprezível com relação ao valor total da operação. O método da capacitância poderia ser usado em uma vazão mássica maior de material ativo, para o cálculo da influência do tempo na temperatura de fundo da placa (INCROPERA, 2011).

Dessa forma, para o balanço energético utiliza-se a Equação A.216 para o balanço energético geral. A Equação A.216 define diferentes energias provenientes de diferentes características da sinterização, retirado de Bizhanov et al. (2020).

$$Q_c + Q_{ex} + Q_g = Q_{end} + Q_a + Q_{sc} \quad (\text{A.216})$$

Onde:

Q_c - Calor de combustão do combustível, kJ/s

Q_{ex} - Calor de reações exotérmicas do sistema, kJ/s

Q_g - Energia do gás, kJ/s

Q_{end} - Calor de reações endotérmicas do sistema, kJ/s

Q_a - Energia do ar que flui para a zona de combustão a partir da camada de resfriamento da torta, kJ/s

Q_{sc} - Energia da carga sinterizada na zona de combustão, kJ/s

Para a operação do forno, deve-se considerar a energia do gás de sinterização (Q_g) e de como o calor necessário para as resistências do forno elétrico são transferidas para o ar, e do ar, conseqüentemente, para a massa sólida de material ativo na esteira. Por ser uma reação endotérmica, a calcinação deve receber muita energia para o processamento de desprendimento dos gases. A Equação A.217 define o balanço energético para a área de aquecimento intenso, também retirada de Bizhanov et al. (2020). Assim, são desconsiderados outros termos para a etapa de calcinação, e ela descreve exatamente isso: a variação de energia do processo de calcinação. Desconsiderando então Q_{ex} e Q_c por não fazerem parte das considerações (reação endotérmica) e/ou não serem adequados ao forno elétrico, e o Q_{sc} por não ocorrer sinterização na etapa de calcinação, tem-se a Equação A.217.

$$Q_g = Q_{end} + Q_a \quad (\text{A.217})$$

O calor requisitado para a reação endotérmica e o calor requisitado para o aquecimento do ar podem ser calculados com as Equações A.218 e A.219. Assim, utiliza-se esses valores para o projeto das demandas energéticas da câmara de calcinação. A etapa de calcinação necessita de pelo menos 6 horas para a otimização das reações de desprendimento gasoso.

$$Q_{end} = F_{A0} * \sum x_i * C_{p,i} * (T - T_{i0}) + \Delta H_{Rx(T)} * F_{A0} * X \quad (\text{A.218})$$

$$Q_a = m_{ar} * C_{p,ar} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.219})$$

Após isso, calcula-se o calor requisitado pela câmara de sinterização que é a etapa crucial para o processo. Assim, com a Equação A.217 considerando agora o Q_{sc} define o calor para a sinterização do componente. Dessa forma, tem-se a Equação A.220.

Após isso, calcula-se o calor requisitado pela câmara de sinterização que é a etapa crucial para o processo. Assim, com a Equação A.217 considerando agora o Q_{sc} define o calor para a sinterização do componente. Dessa forma, tem-se a Equação A.220.

$$Q_g = Q_{end} + Q_{sc} + Q_a \quad (\text{A.220})$$

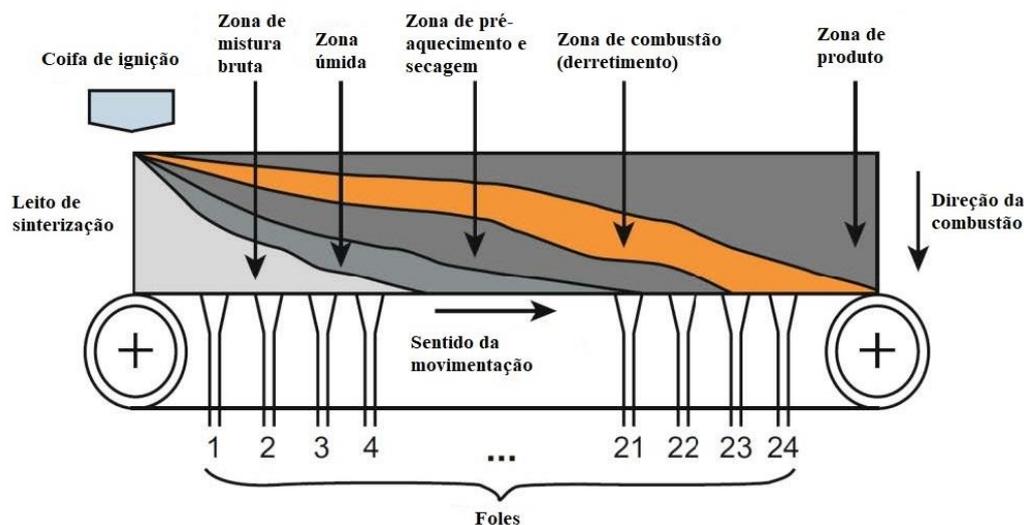
O Q_{sc} pode ser calculado com a Equação A.221 considerando as propriedades do material a ser processado (NMC).

$$Q_{sc} = C_{p,NMC} * m_{NMC} * (T - T_{i0}) \quad (\text{A.221})$$

O Q_{end} pode ser calculado considerando a reação para o excesso de Li_2CO_3 , que só ocorre após os 723°C com o carbonato em estado líquido. Assim, usa-se a Equação A.218 para tal considerando as temperaturas de entrada e saída.

A sinterização pode ser definida pela Figura A.2, onde o processo ocorre de forma contínua. A grande diferença entre processos de sinterização convencionais e o adequado ao material ativo NMC é que para o material ativo não há a necessidade de fusão dos componentes. A aglomeração se dá pela diminuição de espaços entre a estrutura cristalina do material, formando assim um componente ideal para o uso em baterias de íons de lítio. O processo de sinterização necessita de pelo menos 20 horas para um material ativo com boas propriedades.

Figura A.2 – Modelo de sinterização adequado ao processo



Fonte: Bizhanov et al. (2020).

Após a sinterização, o material deve ser resfriado para o processo de retirada e embalagem do material. Assim, um fluxo de ar a temperatura ambiente deve resfriar o material até pelo menos 40°C, por ser uma temperatura segura para o manuseio do material. A Equação A.220 pode ser usada com as temperaturas entrantes em cada etapa, desprezando o valor de Q_g , pois não há aquecimento na câmara de resfriamento, e assim tem-se a Equação A.222.

$$Q_{sc} = -Q_a \quad (\text{A.222})$$

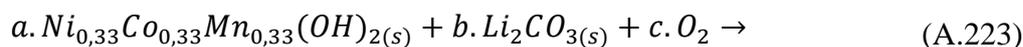
Para o cálculo da câmara de calcinação, tem-se os valores de temperatura e dados presentes na Tabela A.146. Os valores para o calor específico do ar foram retirados da Figura A.1 do Anexo A.M.

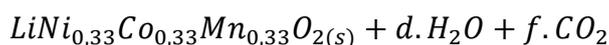
Tabela A.146 – Considerações para a calcinação no B-401

| $T_{cal,B-401}$ (°C) | $T_{i0,cal,B-401}$ (°C) | $C_{p,ar}$ (kJ/kg.K) |
|----------------------|-------------------------|----------------------|
| 450,00 | 25,00 | 1,08 |

Fonte: Autores (2022).

Para o cálculo da entalpia de formação da reação, utiliza-se a Equação A.152 também definida por Fogler (2018). A reação de calcinação é descrita pela Equação A.223.





Os fatores de balanceamento recalculados estão definidos na Tabela A.147, e os valores representam o balanceamento exato considerando a entrada do material com a razão molar definida, que deverão ser utilizados para o cálculo de entalpias de formação e demais entalpias.

Tabela A.147 – Balanceamento da reação em calcinação no B-401

| Fator | Reação 1 |
|--------------|-----------------|
| a | 1,00 |
| b | 0,50 |
| c | 0,25 |
| d | 1,00 |
| e | 1,00 |
| f | 0,50 |

Fonte: Sastre (2021).

Assim, tem-se a entalpia de formação da reação de calcinação calculada abaixo, considerando dados retirados da Tabela A.2 de dados energéticos.

$$\Delta H_{Rx(T),B-401} = 7,50 \text{ kJ/mol de } Ni_{0,33}Co_{0,33}Mn_{0,33}(OH)_{2(s)}$$

Para o cálculo da energia do sistema, utiliza-se a vazão molar do componente hidróxido para a reação proveniente do balanço de massa, resultante na Tabela A.148. A vazão mássica de ar proveniente do balanço de massa também é definida abaixo.

Tabela A.148 – Vazões molares e mássicas para a calcinação no B-401

| F_{A0,cal,B-401} (mol/s) | m_{ar,cal} (kg/s) |
|---|----------------------------------|
| 0,58 | 0,022 |

Fonte: Autores (2022).

Com os valores definidos, calcula-se a energia de reação endotérmica da calcinação com a Equação A.218, e a energia necessária para o ar dentro da câmara para a aeração da reação com a Equação A.219. Com a Equação A.220, calcula-se a energia total necessária para a câmara de calcinação.

$$Q_{end,cal,B-401} = 81,71 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{a,cal,B-401} = 10,10 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{g,cal,B-401} = 91,14 \text{ kJ/s} = 91,14 \text{ kW}$$

Para o cálculo da etapa da sinterização, utiliza-se a Equação A.221 com os dados termodinâmicos presentes na Tabela A.149 retirados da Tabela A.2 de dados energéticos para o NMC, da Figura A.1 do Anexo A.L para o ar, e os valores de temperatura de entrada e saída na câmara de sinterização com os valores de vazão mássica total provenientes do balanço de massa.

Tabela A.149 – Considerações para a sinterização no B-401

| $T_{sin,B-401}$ (°C) | $T_{i0,sin,B-401}$ (°C) | $C_{p,ar}$ (kJ/kg.K) | $C_{p,NMC}$ (kJ/kg.K) | m_{ar} (kg/s) | m_{NMC} (kg/s) |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|
| 850,00 | 450,00 | 1,145 | 0,83 | 0,022 | 0,057 |

Fonte: Autores (2022).

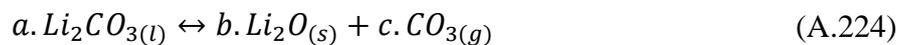
Tem-se assim os valores necessários de energia abaixo para o ar e o material inerte na câmara de sinterização, utilizando-se as Equações A.219, A.221.

$$Q_{sc,sin,B-401} = 18,81 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{a,sin,B-401} = 10,07 \text{ kJ/s}$$

$$Q_{g,sin,B-401} = 28,88 \text{ kJ/s} = 28,88 \text{ kW}$$

Para o cálculo da entalpia de formação da reação de decomposição térmica do Li_2CO_3 , utiliza-se a Equação A.152 também definida por Fogler (2018). A reação de decomposição na sinterização é descrita pela Equação A.224, também descrita na Equação 48 do Projeto do Processo com as considerações para a definição de tal.



Os fatores de balanceamento recalculados estão definidos na Tabela A.150, e os valores representam o balanceamento exato considerando a entrada do material com a razão molar definida, que deverão ser utilizados para o cálculo de entalpias de formação e demais entalpias.

Tabela A.150 – Balanceamento da reação em sinterização no B-401

| Fator | Reação 1 |
|--------------|-----------------|
| a | 1,00 |
| b | 1,00 |
| c | 1,0 |

Fonte: Sastre (2021).

Assim, tem-se a entalpia de formação da reação de sinterização calculada abaixo, considerando dados retirados da Tabela A.2 de dados energéticos.

$$\Delta H_{Rx(T),B-401} = 222,64 \text{ kJ/mol de } Li_2CO_3(l)$$

Para o cálculo da energia do sistema, utiliza-se a vazão molar do componente carbonatado para a reação proveniente do balanço de massa, abaixo

$$F_{A0,sin,B-401} = 0,0144 \text{ mol/s}$$

Com os valores definidos, calcula-se a energia de reação endotérmica da sinterização com a Equação A.218.

$$Q_{end,sin,B-401} = 2,13 \text{ kJ/s}$$

Assim, com os 3 valores de energia requisitados pela câmara, calcula-se a energia total para a sinterização com a Equação A.220 e tem-se o valor abaixo.

$$Q_{g,sin,B-401} = 30,86 \text{ kJ/s} = 30,86 \text{ kW}$$

Para a etapa de resfriamento, utiliza-se a Equação A.222 em combinação com a Equação A.221 e a Equação A.219, considerando, dados da Tabela A.151 para as temperaturas de entrada e saída no processo.

Tabela A.151 – Considerações para o resfriamento no B-401

| $T_{i0,ar}$ (°C) | $T_{resf,B-401}$ (°C) | $T_{i0,resf,B-401}$ (°C) | $C_{p,ar}$ (kJ/kg.K) | $C_{p,NMC}$ (kJ/kg.K) | m_{ar} (kg/s) | m_{NMC} (kg/s) |
|------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|------------------|
| 25,00 | 40,00 | 850,00 | 1,145 | 0,83 | 0,022 | 0,057 |

Fonte: Autores (2022).

Assim, calcula-se a energia liberada para o resfriamento do sólido até 40°C com a Equação A.221, e calcula-se também a massa de ar a temperatura ambiente com a Equação A.219, necessário para a injeção na câmara de resfriamento.

$$Q_{sc,resf,B-401} = -38,09 \text{ kJ/s}$$

$$m_{ar,resf,B-401} = 3,35 \text{ kg/s}$$

Salienta-se a criação de um sistema para a exaustão dos gases formados durante este processo.

A.2.4.6.2 Dimensionamento B-401

Para o dimensionamento, o principal e importante projeto está relacionado com as esteiras, que devem ser projetadas para definir um tempo de residência interessante para o material ativo ao longo do comprimento do forno. Além disso, a esteira deve suportar operar em velocidades bem baixas, garantindo um processo contínuo de alimentação, processamento e saída de material. Assim, a Tabela A.152 define o valor para o dimensionamento com relação às diferentes áreas de processo do forno. A capacidade da esteira é definida em um valor ideal para o processamento considerando o balanço de massa.

Tabela A.152 – Considerações para o cálculo da Esteira do B-401

| $C_{cal,B-401}$ (m) | $C_{sin,B-401}$ (m) | $C_{resf,B-401}$ (m) | Largura (m) | Capacidade (kg/min) | H (m) | Wb (kg/m) | Velocidade (m/min) |
|---------------------|---------------------|----------------------|-------------|---------------------|-------|-----------|--------------------|
| 5,00 | 10,00 | 5,00 | 2,00 | 20,00 | 0,00 | 5,00 | 60,00 |

Fonte: Autores (2022).

Dessa forma, com a Equação A.225 calcula-se o valor do comprimento total da esteira do forno.

$$C_{t,B-401} = C_{cal,B-401} + C_{sin,B-401} + C_{resf,B-401} \quad (\text{A.225})$$

$$C_{t,B-401} = 20,00 \text{ m}$$

Dessa forma, o forno segue o mesmo dimensionamento de comprimento e largura, considerando-se ideal para o processamento dos materiais. A camada de material ativo não deve passar de 1 cm (0,01 m) na esteira do forno, já que assim não há implicância com condução de calor pela placa plana de material ativo. Além disso, considerando os valores em hora para o processamento em cada etapa na Tabela A.153, a velocidade das esteiras deve ser definida conforme o tempo necessário para cada etapa.

Tabela A.153 – Tempo de processamento no B-401

| t_{cal} (h) | t_{sin} (h) | t_{resf} (h) |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 6,00 | 20,00 | 2,00 |

Fonte: Autores (2022).

Assim, calcula-se a velocidade ideal para cada esteira com a Equação A.226.

$$t_i = \frac{C_i}{v_i} \quad (\text{A.226})$$

$$v_{cal,B-401} = 0,83 \text{ m/h}$$

$$v_{sin,B-401} = 0,50 \text{ m/h}$$

$$v_{resf,B-401} = 2,50 \text{ m/h}$$

A.2.4.6.3 Cálculos energéticos B-401

Considera-se a velocidade máxima padrão presente na Tabela A.152 para as esteiras. Utilizando a Equação A.14 para o cálculo do fator de frequência, encontra-se:

$$F_{f,cal,B-401} = 0,17 \text{ min}$$

$$F_{f,sin,B-401} = 0,33 \text{ min}$$

$$F_{f,resf,B-401} = 0,17 \text{ min}$$

Utilizando a Equação A.17, tem-se uma tensão efetiva de:

$$T_{e,cal,B-401} = 140,40 \text{ kgf}$$

$$T_{e,sin,B-401} = 216,40 \text{ kgf}$$

$$T_{e,resf,B-401} = 140,40 \text{ kgf}$$

Para o cálculo da potência máxima, a Equação A.15 é utilizada novamente e tem-se:

$$P_{cal,B-401} = 8424,00 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 1376,85 \text{ W} = 1,38 \text{ kW}$$

$$P_{sin,B-401} = 12984,00 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 2122,16 \text{ W} = 2,12 \text{ kW}$$

$$P_{resf,B-401} = 8424,00 \text{ kgf} \cdot \text{m}/\text{min} = 1376,85 \text{ W} = 1,38 \text{ kW}$$

APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO DAS INSTALAÇÕES

As instalações industriais compreendem as mais diversas utilidades e linhas do processo, as mesmas são destacadas e apresentadas no Apêndice D que corresponde a planta baixa da unidade industrial.

B.1 INSTALAÇÕES DE ÁGUA POTÁVEL

B.1.1 Dimensionamento das linhas de água fria

Realizou-se o dimensionamento das tubulações de água fria conforme o método das velocidades, adotando-se 2,5 m/s como velocidade recomendada, em uma faixa de 2 a 3 m/s, para o cálculo do dimensionamento das tubulações de água fria. A Equação B.1 foi utilizada para calcular o diâmetro das tubulações.

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (\text{B.1})$$

onde, D é o diâmetro em metros (m) e A é a área do escoamento em metros quadrados (m²), sendo “A” o resultado do quociente entre a vazão (Q) em m³/s pela velocidade de escoamento (v) em m/s que corresponde à velocidade recomendada de 2,5 m/s, como demonstrado na Equação B.2.

$$A = \frac{Q}{v} \quad (\text{B.2})$$

Portanto, com os diâmetros calculados, foi possível selecionar os diâmetros inferior e superior disponíveis comercialmente para cada um dos trechos da tubulação de água fria, por meio do Anexo B.A, considerando o material selecionado (aço carbono SCH 40), tais valores estão apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Dimensionamento das tubulações de água fria

(continua)

| Trecho | Vazão (m ³ /s) | Área (m ²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|--------|---------------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 1-2 | 0,018380 | 0,007352 | 0,09675 | 3,81 | 3 | 4 |
| 3-4 | 0,000021 | 0,000008 | 0,00326 | 0,13 | - | 1/4 |

(continua)

| Trecho | Vazão (m³/s) | Área (m²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|---------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 5-6 | 0,018359 | 0,007344 | 0,09670 | 3,81 | 3 | 4 |
| 6-7 | 0,005350 | 0,002140 | 0,05220 | 2,06 | 2 | 2 1/2 |
| 7-8 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 7-9 | 0,005150 | 0,002060 | 0,05121 | 2,02 | 2 | 2 1/2 |
| 9-10 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 9-11 | 0,004950 | 0,001980 | 0,05021 | 1,98 | 1 1/2 | 2 |
| 11-12 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 11-13 | 0,004750 | 0,001900 | 0,04918 | 1,94 | 1 1/2 | 2 |
| 13-14 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 14-15 | 0,000050 | 0,000020 | 0,00505 | 0,20 | - | 1/4 |
| 14-16 | 0,000100 | 0,000040 | 0,00714 | 0,28 | 1/4 | 3/8 |
| 16-17 | 0,000050 | 0,000020 | 0,00505 | 0,20 | - | 1/4 |
| 16-18 | 0,000050 | 0,000020 | 0,00505 | 0,20 | - | 1/4 |
| 13-19 | 0,004600 | 0,001840 | 0,04840 | 1,91 | 1 1/2 | 2 |
| 19-20 | 0,002350 | 0,000940 | 0,03460 | 1,36 | 1 1/4 | 1 1/2 |
| 20-21 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 20-22 | 0,002150 | 0,000860 | 0,03309 | 1,30 | 1 1/4 | 1 1/2 |
| 22-23 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 22-24 | 0,001950 | 0,000780 | 0,03151 | 1,24 | 1 | 1 1/4 |
| 24-25 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 24-26 | 0,001750 | 0,000700 | 0,02985 | 1,18 | 1 | 1 1/4 |
| 26-27 | 0,000900 | 0,000360 | 0,02141 | 0,84 | 3/4 | 1 |
| 27-28 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 27-29 | 0,000700 | 0,000280 | 0,01888 | 0,74 | 1/2 | 3/4 |
| 29-30 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 29-31 | 0,000500 | 0,000200 | 0,01596 | 0,63 | 1/2 | 3/4 |
| 31-32 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 31-33 | 0,000300 | 0,000120 | 0,01236 | 0,49 | 3/8 | 1/2 |
| 26-34 | 0,001050 | 0,000420 | 0,02312 | 0,91 | 3/4 | 1 |
| 34-35 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 34-36 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |

(continua)

| Trecho | Vazão (m³/s) | Área (m²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|---------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 34-37 | 0,000700 | 0,000280 | 0,01888 | 0,74 | 1/2 | 3/4 |
| 37-38 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 37-39 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | ¼ | 3/8 |
| 37-40 | 0,000350 | 0,000140 | 0,01335 | 0,53 | 1/2 | 3/4 |
| 40-41 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 40-42 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 19-43 | 0,002250 | 0,000900 | 0,03385 | 1,33 | 1 1/4 | 1 1/2 |
| 43-44 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 43-45 | 0,002100 | 0,000840 | 0,03270 | 1,29 | 1 1/4 | 1 1/2 |
| 45-46 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 45-47 | 0,001950 | 0,000780 | 0,03151 | 1,24 | 1 | 1 1/4 |
| 47-48 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 47-49 | 0,001800 | 0,000720 | 0,03028 | 1,19 | 1 | 1 1/4 |
| 49-50 | 0,001050 | 0,000420 | 0,02312 | 0,91 | 3/4 | 1 |
| 50-51 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 50-52 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 50-53 | 0,000700 | 0,000280 | 0,01888 | 0,74 | 1/2 | 3/4 |
| 53-54 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 53-55 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 53-56 | 0,000350 | 0,000140 | 0,01335 | 0,53 | 1/2 | 3/4 |
| 56-57 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 56-58 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 49-59 | 0,000750 | 0,000300 | 0,01954 | 0,77 | 3/4 | 1 |
| 59-60 | 0,000150 | 0,000060 | 0,00874 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 60-61 | 0,000050 | 0,000020 | 0,00505 | 0,20 | - | 1/4 |
| 60-62 | 0,000100 | 0,000040 | 0,00714 | 0,28 | 1/4 | 3/8 |
| 62-63 | 0,000050 | 0,000020 | 0,00505 | 0,20 | - | 1/4 |
| 62-64 | 0,000050 | 0,000020 | 0,00505 | 0,20 | - | 1/4 |
| 59-65 | 0,000600 | 0,000240 | 0,01748 | 0,69 | 1/2 | 3/4 |
| 65-66 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 65-67 | 0,000400 | 0,000160 | 0,01427 | 0,56 | 1/2 | 3/4 |

(continua)

| Trecho | Vazão (m³/s) | Área (m²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|---------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 67-68 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 67-69 | 0,000200 | 0,000080 | 0,01009 | 0,40 | 3/8 | 1/2 |
| 6-70 | 0,013009 | 0,005204 | 0,08140 | 3,20 | 2 1/2 | 3 |
| 70-71 | 0,000005 | 0,000002 | 0,00160 | 0,06 | - | 1/4 |
| 70-72 | 0,013004 | 0,005202 | 0,08138 | 3,20 | 2 1/2 | 3 |
| 72-73 | 0,001731 | 0,000693 | 0,02969 | 1,17 | 1 | 1 1/4 |
| 74-75 | 0,001731 | 0,000693 | 0,02969 | 1,17 | 1 | 1 1/4 |
| 72-76 | 0,011272 | 0,004509 | 0,07577 | 2,98 | 2 1/2 | 3 |
| 76-77 | 0,001033 | 0,000413 | 0,02293 | 0,90 | 3/4 | 1 |
| 78-79 | 0,001033 | 0,000413 | 0,02293 | 0,90 | 3/4 | 1 |
| 76-80 | 0,010240 | 0,004096 | 0,07222 | 2,84 | 2 | 2 1/2 |
| 80-81 | 0,000144 | 0,000058 | 0,00857 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 80-82 | 0,010096 | 0,004038 | 0,07171 | 2,82 | 2 | 2 1/2 |
| 82-83 | 0,000010 | 0,000004 | 0,00229 | 0,09 | - | 1/4 |
| 82-84 | 0,010085 | 0,004034 | 0,07167 | 2,82 | 2 | 2 1/2 |
| 84-85 | 0,000125 | 0,000050 | 0,00797 | 0,31 | 1/4 | 3/8 |
| 84-86 | 0,009960 | 0,003984 | 0,07122 | 2,80 | 2 | 2 1/2 |
| 86-87 | 0,000005 | 0,000002 | 0,00154 | 0,06 | - | 1/4 |
| 86-88 | 0,009956 | 0,003982 | 0,07121 | 2,80 | 2 | 2 1/2 |
| 88-89 | 0,000061 | 0,000024 | 0,00556 | 0,22 | 1/4 | 3/8 |
| 88-90 | 0,009895 | 0,003958 | 0,07099 | 2,79 | 2 | 2 1/2 |
| 90-91 | 0,001168 | 0,000467 | 0,02439 | 0,96 | 3/4 | 1 |
| 90-92 | 0,008728 | 0,003491 | 0,06667 | 2,62 | 2 | 2 1/2 |
| 92-93 | 0,000001 | 0,000000 | 0,00060 | 0,02 | - | 1/4 |
| 92-94 | 0,008727 | 0,003491 | 0,06667 | 2,62 | 2 | 2 1/2 |
| 94-95 | 0,000330 | 0,000132 | 0,01296 | 0,51 | 1/2 | 3/4 |
| 94-96 | 0,008397 | 0,003359 | 0,06540 | 2,57 | 2 | 2 1/2 |
| 96-97 | 0,000298 | 0,000119 | 0,01232 | 0,49 | 3/8 | 1/2 |
| 96-98 | 0,008099 | 0,003240 | 0,06422 | 2,53 | 2 | 2 1/2 |
| 98-99 | 0,000001 | 0,000000 | 0,00053 | 0,02 | - | 1/4 |
| 98-100 | 0,008099 | 0,003239 | 0,06422 | 2,53 | 2 | 2 1/2 |

(conclusão)

| Trecho | Vazão (m³/s) | Área (m²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|---------|--------------|-----------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 100-101 | 0,000159 | 0,000064 | 0,00901 | 0,35 | 1/4 | 3/8 |
| 100-102 | 0,007939 | 0,003176 | 0,06359 | 2,50 | 2 | 2 1/2 |
| 102-103 | 0,000030 | 0,000012 | 0,00392 | 0,15 | - | 1/4 |
| 102-104 | 0,007909 | 0,003164 | 0,06347 | 2,50 | 2 | 2 1/2 |
| 104-105 | 0,000010 | 0,000004 | 0,00230 | 0,09 | - | 1/4 |
| 104-106 | 0,007899 | 0,003160 | 0,06343 | 2,50 | 2 1/2 | 3 |
| 106-107 | 0,002621 | 0,001048 | 0,03654 | 1,44 | 1 1/4 | 1 1/2 |
| 106-108 | 0,005278 | 0,002111 | 0,05185 | 2,04 | 2 1/2 | 3 |
| 108-109 | 0,000010 | 0,000004 | 0,00230 | 0,09 | - | 1/4 |
| 108-110 | 0,005267 | 0,002107 | 0,05179 | 2,04 | 2 1/2 | 3 |
| 110-111 | 0,000070 | 0,000028 | 0,00596 | 0,23 | - | 1/4 |
| 110-112 | 0,005198 | 0,002079 | 0,05145 | 2,03 | 2 | 2 1/2 |
| 112-113 | 0,005194 | 0,002077 | 0,05143 | 2,02 | 2 | 2 1/2 |
| 112-114 | 0,000004 | 0,000002 | 0,00147 | 0,06 | 1 1/4 | 1 1/2 |

Fonte: Autores (2023).

Com os diâmetros inferiores e superiores comerciais, calculou-se a velocidade através da Equação B.3 para os diâmetros superiores e inferiores.

$$v = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad (\text{B.3})$$

Foi selecionado o diâmetro cuja velocidade estivesse dentro da faixa recomendada, para velocidades fora da faixa recomendada escolheu-se o menor diâmetro, gerando a menor perda de carga. Os diâmetros escolhidos estão apresentados na Tabela B.2.

Tabela B.2 – Diâmetro escolhido para cada trecho (água fria)

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|--------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1-2 | 77,9 | 3,86 | 102,3 | 2,24 | 4 |
| 3-4 | - | - | 9,2 | 0,31 | 1/4 |
| 5-6 | 77,9 | 3,85 | 102,3 | 2,23 | 4 |

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|---------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 6-7 | 52,5 | 2,47 | 62,7 | 1,73 | 2 |
| 7-8 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 7-9 | 52,5 | 2,38 | 62,7 | 1,67 | 2 |
| 9-10 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 9-11 | 40,8 | 3,79 | 52,5 | 2,29 | 2 |
| 11-12 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 11-13 | 40,8 | 3,63 | 52,5 | 2,19 | 2 |
| 13-14 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 14-15 | - | - | 9,2 | 0,75 | 1/4 |
| 14-16 | 9,2 | 1,50 | 12,5 | 0,81 | 1/4 |
| 16-17 | - | - | 9,2 | 0,75 | 1/4 |
| 16-18 | - | - | 9,2 | 0,75 | 1/4 |
| 13-19 | 40,8 | 3,52 | 52,5 | 2,12 | 2 |
| 19-20 | 35 | 2,44 | 40,8 | 1,80 | 1 1/4 |
| 20-21 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 20-22 | 35 | 2,23 | 40,8 | 1,64 | 1 1/4 |
| 22-23 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 22-24 | 26,6 | 3,51 | 35 | 2,03 | 1 1/4 |
| 24-25 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 24-26 | 26,6 | 3,15 | 35 | 1,82 | 1 1/4 |
| 26-27 | 20,9 | 2,62 | 26,6 | 1,62 | 3/4 |
| 27-28 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 27-29 | 15,8 | 3,57 | 20,9 | 2,04 | 3/4 |
| 29-30 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 29-31 | 15,8 | 2,55 | 20,9 | 1,46 | 1/2 |
| 31-32 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 31-33 | 12,5 | 2,44 | 15,8 | 1,53 | 3/8 |
| 26-34 | 20,9 | 3,06 | 26,6 | 1,89 | 1 |
| 34-35 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 34-36 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 34-37 | 15,8 | 3,57 | 20,9 | 2,04 | 3/4 |

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|---------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 37-38 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 37-39 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 37-40 | 15,8 | 1,79 | 20,9 | 1,02 | 1/2 |
| 40-41 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 40-42 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 19-43 | 35 | 2,34 | 40,8 | 1,72 | 1 1/4 |
| 43-44 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 43-45 | 35 | 2,18 | 40,8 | 1,61 | 1 1/4 |
| 45-46 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 45-47 | 26,6 | 3,51 | 35 | 2,03 | 1 1/4 |
| 47-48 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 47-49 | 26,6 | 3,24 | 35 | 1,87 | 1 1/4 |
| 49-50 | 20,9 | 3,06 | 26,6 | 1,89 | 1 |
| 50-51 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 50-52 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 50-53 | 15,8 | 3,57 | 20,9 | 2,04 | 3/4 |
| 53-54 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 53-55 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 53-56 | 15,8 | 1,79 | 20,9 | 1,02 | 1/2 |
| 56-57 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 56-58 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 49-59 | 20,9 | 2,19 | 26,6 | 1,35 | 3/4 |
| 59-60 | 9,2 | 2,26 | 12,5 | 1,22 | 1/4 |
| 60-61 | - | - | 9,2 | 0,75 | 1/4 |
| 60-62 | 9,2 | 1,50 | 12,5 | 0,81 | 1/4 |
| 62-63 | - | - | 9,2 | 0,75 | 1/4 |
| 62-64 | - | - | 9,2 | 0,75 | 1/4 |
| 59-65 | 15,8 | 3,06 | 20,9 | 1,75 | 3/4 |
| 65-66 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 65-67 | 15,8 | 2,04 | 20,9 | 1,17 | 1/2 |
| 67-68 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|---------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 67-69 | 12,5 | 1,63 | 15,8 | 1,02 | 3/8 |
| 6-70 | 62,7 | 4,21 | 77,9 | 2,73 | 3 |
| 70-71 | - | - | 9,2 | 0,08 | 1/4 |
| 70-72 | 62,7 | 4,21 | 77,9 | 2,73 | 3 |
| 72-73 | 26,6 | 3,12 | 35 | 1,80 | 1 1/4 |
| 74-75 | 26,6 | 3,12 | 35 | 1,80 | 1 1/4 |
| 72-76 | 62,7 | 3,65 | 77,9 | 2,37 | 2 1/2 |
| 76-77 | 20,9 | 3,01 | 26,6 | 1,86 | 1 |
| 78-79 | 20,9 | 3,01 | 26,6 | 1,86 | 1 |
| 76-80 | 52,5 | 4,73 | 62,7 | 3,32 | 2 1/2 |
| 80-81 | 9,2 | 2,17 | 12,5 | 1,18 | 1/4 |
| 80-82 | 52,5 | 4,66 | 62,7 | 3,27 | 2 1/2 |
| 82-83 | - | - | 9,2 | 0,15 | 1/4 |
| 82-84 | 52,5 | 4,66 | 62,7 | 3,27 | 2 1/2 |
| 84-85 | 9,2 | 1,88 | 12,5 | 1,02 | 1/4 |
| 84-86 | 52,5 | 4,60 | 62,7 | 3,23 | 2 1/2 |
| 86-87 | - | - | 9,2 | 0,07 | 1/4 |
| 86-88 | 52,5 | 4,60 | 62,7 | 3,22 | 2 1/2 |
| 88-89 | 9,2 | 0,91 | 12,5 | 0,49 | 1/4 |
| 88-90 | 52,5 | 4,57 | 62,7 | 3,20 | 2 1/2 |
| 90-91 | 20,9 | 3,40 | 26,6 | 2,10 | 1 |
| 90-92 | 52,5 | 4,03 | 62,7 | 2,83 | 2 |
| 92-93 | - | - | 9,2 | 0,01 | 1/4 |
| 92-94 | 52,5 | 4,03 | 62,7 | 2,83 | 2 |
| 94-95 | 15,8 | 1,68 | 20,9 | 0,96 | 1/2 |
| 94-96 | 52,5 | 3,88 | 62,7 | 2,72 | 2 |
| 96-97 | 12,5 | 2,43 | 15,8 | 1,52 | 3/8 |
| 96-98 | 52,5 | 3,74 | 62,7 | 2,62 | 2 |
| 98-99 | - | - | 9,2 | 0,01 | 1/4 |
| 98-100 | 52,5 | 3,74 | 62,7 | 2,62 | 2 |
| 100-101 | 9,2 | 2,40 | 12,5 | 1,30 | 1/4 |

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|---------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| 100-102 | 52,5 | 3,67 | 62,7 | 2,57 | 2 |
| 102-103 | - | - | 9,2 | 0,45 | 1/4 |
| 102-104 | 52,5 | 3,65 | 62,7 | 2,56 | 2 |
| 104-105 | - | - | 9,2 | 0,16 | 1/4 |
| 104-106 | 62,7 | 2,56 | 77,9 | 1,66 | 3 |
| 106-107 | 35 | 2,72 | 40,8 | 2,00 | 1 1/4 |
| 106-108 | 62,7 | 1,71 | 77,9 | 1,11 | 2 1/2 |
| 108-109 | - | - | 9,2 | 0,16 | 1/4 |
| 108-110 | 62,7 | 1,71 | 77,9 | 1,11 | 2 1/2 |
| 110-111 | - | - | 9,2 | 1,05 | 1/4 |
| 110-112 | 52,5 | 2,40 | 62,7 | 1,68 | 2 1/2 |
| 112-113 | 52,5 | 2,40 | 62,7 | 1,68 | 2 |
| 112-114 | 35 | 0,00 | 40,8 | 0,00 | 1 1/4 |

Fonte: Autores (2023).

B.1.1.1 Acessórios (água fria)

Com relação aos acessórios presentes na linha de água fria, estima-se conforme indicam as mudanças de direção e divisões da tubulação na planta baixa, 12 curvas de 90°, 46 tês, 82 válvulas e 4 divisões em 4.

B.1.2 Dimensionamento das linhas de água quente

As linhas de água quente foram dimensionadas tal como as linhas de água fria, seguindo a mesma lógica de cálculo, a tubulação será de aço carbono SCH 40 e receberá um isolamento térmico à base de hidrossilicato de cálcio. Assim como para a água fria, adotou-se uma velocidade recomendada de 2,5 m/s. A Tabela B.3 corresponde ao dimensionamento das tubulações de água quente.

Tabela B.3 – Dimensionamento das tubulações de água quente

| Trecho | Vazão (m ³ /s) | Área (m ²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|--------|---------------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 1-2 | 0,009384 | 0,003753 | 0,069 | 2,72 | 2 1/2 | 3 |
| 2-3 | 0,000115 | 0,000046 | 0,008 | 0,30 | 1/4 | 3/8 |
| 2-4 | 0,009268 | 0,003707 | 0,069 | 2,70 | 2 1/2 | 3 |
| 4-5 | 0,001093 | 0,000437 | 0,024 | 0,93 | 3/4 | 1 |
| 4-6 | 0,008176 | 0,003270 | 0,065 | 2,54 | 2 1/2 | 3 |
| 6-7 | 0,000298 | 0,000119 | 0,012 | 0,49 | 3/8 | 1/2 |
| 6-8 | 0,007878 | 0,003151 | 0,063 | 2,49 | 2 1/2 | 3 |
| 8-9 | 0,000030 | 0,000012 | 0,004 | 0,15 | - | 1/4 |
| 8-10 | 0,007848 | 0,003139 | 0,063 | 2,49 | 2 1/2 | 3 |
| 10-11 | 0,002621 | 0,001048 | 0,037 | 1,44 | 1 1/4 | 1 1/2 |
| 10-12 | 0,005227 | 0,002091 | 0,052 | 2,03 | 2 | 2 1/2 |
| 12-13 | 0,000033 | 0,000013 | 0,004 | 0,16 | - | 1/4 |
| 12-14 | 0,005194 | 0,002077 | 0,051 | 2,02 | 2 | 2 1/2 |

Fonte: Autores (2023).

Para a seleção do diâmetro para a tubulação, optou-se pelo diâmetro comercial cuja velocidade correspondente fosse a mais próxima da velocidade recomendada, escolhendo para tanto um diâmetro inferior e um superior ao diâmetro calculado anteriormente. A Tabela B.4 apresenta os valores calculados, assim como o diâmetro escolhido.

Tabela B.4 – Diâmetro escolhido para cada trecho (água quente)

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro escolhido (in) |
|---------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1-2 | 62,7 | 3,04 | 77,9 | 1,97 | 3 |
| 2-3 | 9,2 | 1,73 | 12,5 | 0,94 | 1/4 |
| 2-4 | 62,7 | 3,00 | 77,9 | 1,94 | 3 |
| 4-5 | 20,9 | 3,19 | 26,6 | 1,97 | 1 |
| 4-6 | 62,7 | 2,65 | 77,9 | 1,72 | 2 1/2 |
| 6-7 | 12,5 | 2,43 | 15,8 | 1,52 | 3/8 |
| 6-8 | 62,7 | 2,55 | 77,9 | 1,65 | 2 1/2 |
| 8-9 | - | - | 9,2 | 0,45 | 1/4 |
| 8-10 | 62,7 | 2,54 | 77,9 | 1,65 | 2 1/2 |
| 10-11 | 35 | 2,72 | 40,8 | 2,00 | 1 1/4 |
| 10-12 | 52,5 | 2,41 | 62,7 | 1,69 | 2 |
| 12-13 | - | - | 9,2 | 0,50 | 1/4 |
| 12-14 | 52,5 | 2,40 | 62,7 | 1,68 | 2 |

Fonte: Autores (2023).

B.1.2.1 Acessórios (água quente)

Com relação aos acessórios presentes na linha de água quente, estima-se conforme indicam as mudanças de direção e divisões da tubulação na planta baixa, 11 curvas de 90°, 6 tê e 14 válvulas.

B.1.2.2 Isolamento térmico das tubulações de água quente

Como comentado anteriormente, a tubulação de água quente contará com um revestimento de um isolante a base de hidrossilicato de cálcio. A Tabela B.5 apresenta as espessuras adotadas para o isolamento térmico com base no diâmetro de cada um dos trechos e da temperatura de operação, utilizando as informações que constam no Anexo B.B.

Tabela B.5 – Espessura do isolamento térmico para as tubulações de água quente

| Trecho | Diâmetro (in) | Espessura recomendada (in) |
|--------|---------------|----------------------------|
| 1-2 | 3 | 1 |
| 2-3 | 1/4 | 1 |
| 2-4 | 3 | 1 |
| 4-5 | 1 | 1 |
| 4-6 | 2 1/2 | 1 |
| 6-7 | 3/8 | 1 |
| 6-8 | 2 1/2 | 1 |
| 8-9 | 1/4 | 1 |
| 8-10 | 2 1/2 | 1 |
| 10-11 | 1 1/4 | 1 |
| 10-12 | 2 | 1 |
| 12-13 | 1/4 | 1 |
| 12-14 | 2 | 1 |

Fonte: Autores (2023).

B.1.3 Dimensionamento da torre de resfriamento (TR-201)

A torre de resfriamento foi pensada e dimensionada para atender ao condensador (EL-201), para tanto algumas considerações são tomadas, como uma temperatura de bulbo seco (TBS) de 40,1 °C com uma umidade relativa de 19,5% para o ar utilizado na torre, considerado o pior cenário de operação para a torre de resfriamento, tida como a maior temperatura já registrada pelo Instituto Agrônômico de Campinas (IAC) na série histórica da instituição (G1, 2020). O que acarreta uma umidade absoluta de 0,00901 kg_{água}/kg_{ar seco} e uma temperatura de bulbo úmido (TBU) de 22,0 °C. A água entra no EL-201 a 25 °C (T_{L1}) e sai a 70 °C (T_{L2}). Além disso, considera-se uma relação ar/água de 1,5 vezes a mínima (1,5 G_{min}).

Para o cálculo da altura da torre de resfriamento, considerou-se um coeficiente de transferência de massa (K_{Ga}) estimado em 3230 kg/h.m³.atm, contanto que a vazão mássica da água seja no mínimo 9820 kg/h.m² (L_{min}) e a do gás 7360 kg/h.m² (G_{min}) (MCCABE, SMITH & HARRIOTT, 1985). Com a relação ar/água de 1,5 vezes a mínima, tem-se um fluxo de ar de 11040 kg/h.m². Com isto, é possível calcular a área da torre de resfriamento ao dividir a vazão

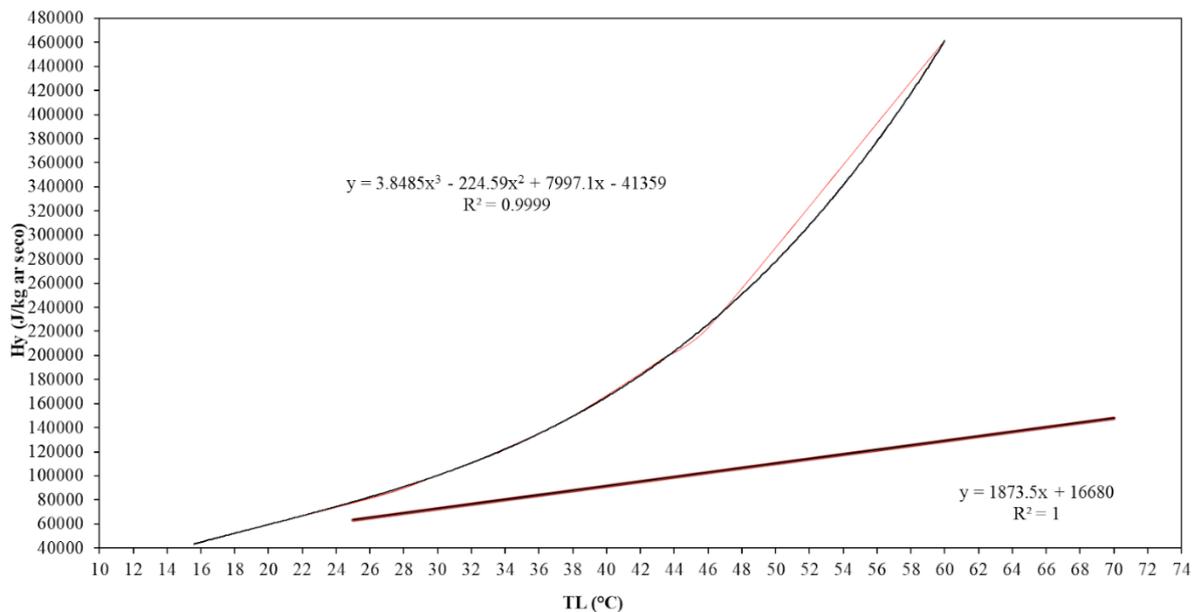
mássica de água que adentra a torre (6217,20 kg/h) pela L_{\min} considerada, resultando em uma área de 0,63 m² com um diâmetro de 0,90 m tendo em vista uma construção cilíndrica da torre.

Para o cálculo da altura da torre, utilizou-se a Equação B.4, por meio dos passos para o projeto que utilizam do coeficiente de transferência de massa global.

$$Z = \frac{G}{M_B K_G a P} \int_{H_{y1}}^{H_{y2}} \frac{dH_y}{H_{y^*} - H_y} \quad (\text{B.4})$$

onde, P é a pressão tida como a atmosférica (1 atm) e M_B é massa molecular média do ar (28,97 g/mol). O gráfico H_y vs T_L utilizado é apresentado na Figura B.1. O resultado para altura da torre é de 6,05 m e sugere-se torres de resfriamento da Alpina Equipamentos, ou similares.

Figura B.1 – Gráfico H_y vs T_L



Fonte: Autores (2023).

As perdas de água foram estimadas por meio da Equação B.5, acarretando uma perda de aproximadamente 7%, necessitando assim de uma reposição de água de 435,21 kg/h. Tanto para a torre de resfriamento quanto para o chiller dimensionado a seguir, considerou-se que as tubulações sejam duplas, ou seja, elas vão e retornam do equipamento ao qual estão interligadas.

$$\text{Perdas de água} = 0,00085 * 1,8 * \text{faixa de resfriamento} \quad (\text{B.5})$$

B.1.3 Dimensionamento do chiller (CH-201)

O chiller é dimensionado para atender o resfriador (E-202), o chiller deve reduzir a temperatura da água de 30 °C a 15 °C. A vazão mássica de água é de 1,03 kg/s e o $C_{p,Água}$ é de 4,18 kJ/kg.K. Com isto, é possível calcular a demanda energética do chiller através da Equação B.6.

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (B.6)$$

Assim, a demanda energética do chiller é de 64,58 kW ou de 18,36 TR (Tonelada de Refrigeração), que é uma unidade usual para a demanda energética de chillers. O equipamento sugerido é o chiller scroll YCAL da York, com capacidade de 15 - 65 TR (YORK, 2023), ou similar.

B.2 INSTALAÇÕES DO PROCESSO

B.2.1 Dimensionamento das linhas do processo

As linhas correspondentes ao processo foram dimensionadas da mesma forma que para a tubulação de água fria, seguindo a mesma lógica de cálculo, exceto para o ar quente carregado com DMC cuja velocidade recomendada foi de 27,5 m/s, o mesmo é encaminhado para a caldeira a fim de servir como combustível para a caldeira em uma forma de alimentação mista junta do gás natural. O dimensionamento para as tubulações do processo é apresentado na Tabela B.6 e o diâmetro escolhido para cada trecho na Tabela B.7. Ressalta-se a criação de um sistema para recolhimento dos gases provenientes das correntes 52, 58, 63, 71, 79, 91 e 101, para tornar o processo seguro aos trabalhadores.

Tabela B.6 – Dimensionamento das tubulações do processo

(continua)

| Trecho | Vazão (m ³ /s) | Área (m ²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|--------|---------------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 1-2 | 0,00033 | 0,0001 | 0,0131 | 0,51 | 1/2 | ¾ |
| 3-4 | 0,00033 | 0,0001 | 0,0131 | 0,51 | 1/2 | ¾ |
| 5-6 | 0,00033 | 0,0001 | 0,0131 | 0,51 | 1/2 | ¾ |
| 7-8 | 0,00033 | 0,0001 | 0,0131 | 0,51 | 1/2 | ¾ |

(continua)

| Trecho | Vazão (m ³ /s) | Área (m ²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|--------|---------------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 9-10 | 0,00084 | 0,0003 | 0,0206 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 11-12 | 0,00084 | 0,0003 | 0,0206 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 13-14 | 0,00084 | 0,0003 | 0,0206 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 15-16 | 0,00084 | 0,0003 | 0,0206 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 17-18 | 0,00060 | 0,0002 | 0,0174 | 0,69 | 1/2 | ¾ |
| 19-20 | 0,00060 | 0,0002 | 0,0174 | 0,69 | 1/2 | ¾ |
| 21-22 | 0,00083 | 0,0003 | 0,0206 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 23-24 | 0,00001 | 0,0000 | 0,0021 | 0,08 | - | ¼ |
| 25-26 | 0,00082 | 0,0003 | 0,0205 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 27-28 | 0,00082 | 0,0003 | 0,0205 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 29-30 | 0,00082 | 0,0003 | 0,0205 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 31-32 | 0,00084 | 0,0003 | 0,0206 | 0,81 | 3/4 | 1 |
| 33-34 | 0,00055 | 0,0002 | 0,0167 | 0,66 | 1/2 | ¾ |
| 35-36 | 0,00024 | 0,0001 | 0,0110 | 0,43 | 3/8 | ½ |
| 37-38 | 0,64045 | 0,0233 | 0,1722 | 6,78 | 6 | 8 |
| 39-40 | 0,00014 | 0,0001 | 0,0086 | 0,34 | 1/4 | 3/8 |
| 41-42 | 0,00011 | 0,0000 | 0,0076 | 0,30 | 1/4 | 3/8 |
| 43-44 | 0,00003 | 0,0000 | 0,0038 | 0,15 | - | ¼ |
| 45-46 | 0,00001 | 0,0000 | 0,0025 | 0,10 | - | ¼ |
| 47-48 | 0,00005 | 0,0000 | 0,0051 | 0,20 | - | ¼ |
| 49-50 | 0,00004 | 0,0000 | 0,0043 | 0,17 | - | ¼ |
| 51-52 | 0,00016 | 0,0001 | 0,0090 | 0,36 | 1/4 | 3/8 |
| 53-54 | 0,00011 | 0,0000 | 0,0074 | 0,29 | 1/4 | 3/8 |
| 55-56 | 0,00031 | 0,0001 | 0,0125 | 0,49 | 3/8 | ½ |
| 57-58 | 0,00032 | 0,0001 | 0,0129 | 0,51 | 1/2 | ¾ |
| 59-60 | 0,00032 | 0,0001 | 0,0127 | 0,50 | 1/2 | ½ |
| 61-62 | 0,00058 | 0,0002 | 0,0172 | 0,68 | 1/2 | ¾ |
| 63-64 | 0,00058 | 0,0002 | 0,0171 | 0,67 | 1/2 | ¾ |
| 65-66 | 0,00015 | 0,0001 | 0,0088 | 0,35 | 1/4 | 3/8 |
| 67-68 | 0,00070 | 0,0003 | 0,0189 | 0,74 | 1/2 | ¾ |
| 69-70 | 0,00070 | 0,0003 | 0,0189 | 0,75 | 3/4 | ¾ |

(conclusão)

| Trecho | Vazão (m ³ /s) | Área (m ²) | Diâmetro (m) | Diâmetro (in) | Diâmetro menor (in) | Diâmetro maior (in) |
|--------|---------------------------|------------------------|--------------|---------------|---------------------|---------------------|
| 71-72 | 0,00071 | 0,0003 | 0,0191 | 0,75 | 3/4 | ¾ |
| 73-74 | 0,00039 | 0,0002 | 0,0141 | 0,56 | 1/2 | ¾ |
| 75-76 | 0,00103 | 0,0004 | 0,0228 | 0,90 | 3/4 | 1 |
| 77-78 | 0,00099 | 0,0004 | 0,0225 | 0,89 | 3/4 | 1 |
| 79-80 | 0,00005 | 0,0000 | 0,0051 | 0,20 | - | ¼ |
| 81-82 | 0,00105 | 0,0004 | 0,0231 | 0,91 | 3/4 | 1 |
| 83-84 | 0,00136 | 0,0005 | 0,0263 | 1,03 | 1 | 1 ¼ |

Fonte: Autores (2023).

Tabela B.7 – Diâmetro escolhido para cada trecho (processo)

(continua)

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|--------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1-2 | 15,8 | 1,71 | 20,9 | 0,98 | 3/4 |
| 3-4 | 15,8 | 1,71 | 20,9 | 0,98 | 3/4 |
| 5-6 | 15,8 | 1,71 | 20,9 | 0,98 | 3/4 |
| 7-8 | 15,8 | 1,71 | 20,9 | 0,97 | 3/4 |
| 9-10 | 20,9 | 2,44 | 26,6 | 1,50 | 3/4 |
| 11-12 | 20,9 | 2,44 | 26,6 | 1,50 | 3/4 |
| 13-14 | 20,9 | 2,44 | 26,6 | 1,50 | 3/4 |
| 15-16 | 20,9 | 2,44 | 26,6 | 1,51 | 3/4 |
| 17-18 | 15,8 | 3,04 | 20,9 | 1,74 | 3/4 |
| 19-20 | 15,8 | 3,04 | 20,9 | 1,74 | 3/4 |
| 21-22 | 20,9 | 2,43 | 26,6 | 1,50 | 3/4 |
| 23-24 | - | - | 9,2 | 0,13 | 1/4 |
| 25-26 | 20,9 | 2,40 | 26,6 | 1,48 | 3/4 |
| 27-28 | 20,9 | 2,40 | 26,6 | 1,48 | 3/4 |
| 29-30 | 20,9 | 2,40 | 26,6 | 1,48 | 3/4 |
| 31-32 | 20,9 | 2,44 | 26,6 | 1,50 | 3/4 |
| 33-34 | 15,8 | 2,81 | 20,9 | 1,60 | 1/2 |
| 35-36 | 12,5 | 1,94 | 15,8 | 1,22 | 1/2 |
| 37-38 | 154 | 34,38 | 202,7 | 19,85 | 8 |

(conclusão)

| Trecho | Diâmetro menor (mm) | Velocidade inferior (m/s) | Diâmetro maior (mm) | Velocidade superior (m/s) | Diâmetro adotado (in) |
|--------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| 39-40 | 9,2 | 2,17 | 12,5 | 1,18 | 1/4 |
| 41-42 | 9,2 | 1,70 | 12,5 | 0,92 | 1/4 |
| 43-44 | - | - | 9,2 | 0,43 | 1/4 |
| 45-46 | - | - | 9,2 | 0,19 | 1/4 |
| 47-48 | - | - | 9,2 | 0,76 | 1/4 |
| 49-50 | - | - | 9,2 | 0,55 | 1/4 |
| 51-52 | 9,2 | 2,41 | 12,5 | 1,30 | 1/4 |
| 53-54 | 9,2 | 1,60 | 12,5 | 0,87 | 1/4 |
| 55-56 | 12,5 | 2,49 | 15,8 | 1,56 | 3/8 |
| 57-58 | 15,8 | 1,65 | 20,9 | 0,95 | 1/2 |
| 59-60 | 15,8 | 1,63 | 15,8 | 1,63 | 1/2 |
| 61-62 | 15,8 | 2,95 | 20,9 | 1,69 | 1/2 |
| 63-64 | 15,8 | 2,94 | 20,9 | 1,68 | 1/2 |
| 65-66 | 9,2 | 2,29 | 12,5 | 1,24 | 1/4 |
| 67-68 | 15,8 | 3,56 | 20,9 | 2,04 | 3/4 |
| 69-70 | 20,9 | 2,05 | 20,9 | 2,05 | 3/4 |
| 71-72 | 20,9 | 2,08 | 20,9 | 2,08 | 3/4 |
| 73-74 | 15,8 | 2,00 | 20,9 | 1,14 | 1/2 |
| 75-76 | 20,9 | 2,99 | 26,6 | 1,84 | 3/4 |
| 77-78 | 20,9 | 2,90 | 26,6 | 1,79 | 3/4 |
| 79-80 | - | - | 9,2 | 0,78 | 1/4 |
| 81-82 | 20,9 | 3,05 | 26,6 | 1,88 | 1 |
| 83-84 | 26,6 | 2,44 | 35 | 1,41 | 1 |

Fonte: Autores (2023).

B.2.2 Acessórios (linhas do processo)

Com relação aos acessórios presentes na linha de processo, estima-se, conforme indicam as mudanças de direção e divisões da tubulação na planta baixa, 12 curvas de 90° e 45 válvulas.

B.3 INSTALAÇÕES DE VAPOR E CONDENSADO

B.3.1 Instalações de vapor

As tubulações de vapor foram dimensionadas por meio dos critérios da velocidade e do critério da perda de carga, conforme Macintyre (2010), logo a perda de carga máxima permitida foi de 0,5 kgf/cm², com a caldeira operando a 8 kgf/cm². Visando evitar perdas de carga elevadas e erosão das tubulações, adotam-se as seguintes velocidades para o vapor, de 10 a 15 m/s para ramais secundários e linhas curtas, e de 15 a 30 m/s para linhas alimentadoras (MACINTYRE, 2010). Com fins de cálculos, adotaram-se os valores médios dessas faixas.

Dessa forma, para o cálculo do diâmetro interno mínimo, usado para a seleção do diâmetro comercial da tubulação, foi utilizada a Equação B.7, considerando uma velocidade de 22,5 m/s.

$$D = \sqrt{\frac{4 * \dot{m} * v}{\pi * v}} \quad (\text{B.7})$$

onde, \dot{m} é a vazão mássica de vapor em kg/s, v é velocidade em m/s, D é o diâmetro em m e v é o volume específico em m³/kg. Os diâmetros calculados e selecionados estão apresentados na Tabela B.8. Selecionaram-se os diâmetros nominais como sendo o diâmetro superior ao calculado.

Tabela B.8 – Dimensionamento das tubulações de vapor

| Trecho | Comprimento (m) | \dot{m} (kg/s) | Diâmetro calculado (m) | Diâmetro calculado (in) | Diâmetro escolhido (in) |
|--------|-----------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1-2 | 8,60 | 0,39 | 0,105 | 4,15 | 6 |
| 2-3 | 9,68 | 0,19 | 0,074 | 2,91 | 3 |
| 2-4 | 86,82 | 0,20 | 0,075 | 2,96 | 3 |
| 4-5 | 6,70 | 0,08 | 0,094 | 3,70 | 4 |
| 4-6 | 11,51 | 0,12 | 0,058 | 2,28 | 3 |
| 6-7 | 6,55 | 0,05 | 0,071 | 2,80 | 3 |
| 6-8 | 7,68 | 0,07 | 0,046 | 1,79 | 2 |
| 8-9 | 1,83 | 0,03 | 0,035 | 1,39 | 1 1/2 |
| 8-10 | 8,30 | 0,04 | 0,034 | 1,32 | 1 1/2 |
| 10-11 | 1,99 | 0,02 | 0,025 | 1,00 | 1 |
| 10-12 | 13,72 | 0,02 | 0,029 | 1,14 | 1 1/4 |

Fonte: Autores (2023).

Em posse dos diâmetros selecionados, partiu-se para o cálculo das perdas de carga para cada um dos trechos apresentados. Para obter o comprimento equivalente da tubulação, utilizou-se uma aproximação que considera o comprimento real da tubulação, acrescido de 20 a 35%, para linha reta, e de 10 a 15%, para linha longa e retilínea (em torno de 100 m ou mais) (MACINTYRE, 2010). Em vistas disso, fez-se um acréscimo de 27,5% para compensar os acessórios presentes nas linhas, além de considerar uma queda de pressão de até 0,5 kgf/cm² como perda de carga admissível, como comentado anteriormente. Para o cálculo da perda de carga utilizou-se a Equação B.8.

$$J = 0,029 * \frac{\dot{m}^{1,95} * v * 0,95}{D^{5,1}} \quad (\text{B.8})$$

onde, J é a perda de carga em kgf/cm².100m, \dot{m} é a vazão mássica de vapor em kg/h, D é o diâmetro em cm e v é o volume específico em m³/kg. Para o cálculo da variação de pressão utilizou-se a Equação B.9.

$$\Delta P = \frac{J * L_{eq}}{100} \quad (\text{B.9})$$

onde, ΔP é variação de pressão em kgf/cm^2 , J é a perda de carga em $\text{kgf/cm}^2 \cdot 100\text{m}$ e L_{eq} é o comprimento equivalente em m. Para recalculer a velocidade utilizou-se a Equação B.10.

$$v = 2,78 * \frac{\dot{m} * v}{S} \quad (\text{B.10})$$

onde, \dot{m} é a vazão mássica de vapor em kg/h , v é o volume específico em m^3/kg e S é a área da seção de escoamento do tubo em cm^2 . Os resultados para a perda de carga, variação de pressão e velocidade recalculada estão apresentados na Tabela B.9.

Tabela B.9 – Perda de carga, variação de pressão e velocidades para as tubulações de vapor

| Trecho | Comprimento equivalente (m) | J (kgf/cm².100m) | ΔP (kgf/cm²) | Nova velocidade (m/s) |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|
| 1-2 | 10,97 | 0,02 | 0,0019 | 10,77 |
| 2-3 | 12,34 | 0,15 | 0,0185 | 21,20 |
| 2-4 | 110,70 | 0,16 | 0,1767 | 21,87 |
| 4-5 | 8,54 | 0,02 | 0,0021 | 19,31 |
| 4-6 | 14,67 | 0,06 | 0,0086 | 13,06 |
| 6-7 | 8,36 | 0,04 | 0,0029 | 19,56 |
| 6-8 | 9,79 | 0,18 | 0,0175 | 18,08 |
| 8-9 | 2,33 | 0,22 | 0,0052 | 19,35 |
| 8-10 | 10,58 | 0,24 | 0,0249 | 17,41 |
| 10-11 | 2,54 | 0,48 | 0,0123 | 22,43 |
| 10-12 | 17,49 | 0,26 | 0,0448 | 18,58 |

Fonte: Autores (2023).

B.3.1.1 Dilatação das tubulações de vapor

Deve-se considerar a dilatação dos encanamentos sob o efeito do calor nas instalações, permitindo que a dilatação se dê de forma livre e sem obstáculos para evitar que ocorram

tensões internas no tubo e empuxos consideráveis (MACINTYRE, 2010). Portanto, calculou-se a dilatação nas tubulações de vapor por meio da Equação B.11.

$$\Delta L = \Delta T * C * L \quad (\text{B.11})$$

onde, ΔL é a dilatação do trecho em mm, L corresponde ao comprimento do trecho em m, T é a variação máxima de temperatura em °C e C é a constante de dilatação para o aço carbono (0,0123 mm/m°C). Dessa forma, a Tabela B.10 indica a dilatação térmica de cada trecho.

Tabela B.10 – Dilatação de cada trecho para as tubulações de vapor

| Trecho | Comprimento (m) | ΔL (mm) |
|--------|-----------------|-----------------|
| 1-2 | 8,60 | 12,16 |
| 2-3 | 9,68 | 13,69 |
| 2-4 | 86,82 | 122,81 |
| 4-5 | 6,70 | 5,77 |
| 4-6 | 11,51 | 16,28 |
| 6-7 | 6,55 | 5,64 |
| 6-8 | 7,68 | 10,86 |
| 8-9 | 1,83 | 2,36 |
| 8-10 | 8,30 | 11,74 |
| 10-11 | 1,99 | 2,57 |
| 10-12 | 13,72 | 17,71 |

Fonte: Autores (2023).

B.3.1.2 Isolamento térmico das tubulações de vapor

A tubulação de vapor contará com um revestimento de um isolante a base de hidrossilicato de cálcio. A Tabela B.11 apresenta as espessuras adotadas para o isolamento térmico com base no diâmetro de cada um dos trechos e da temperatura de operação, utilizando as informações que constam no Anexo B.B.

Tabela B.11 – Espessura do isolamento térmico para as tubulações de vapor

| Trecho | Diâmetro (in) | Espessura recomendada (in) |
|--------|---------------|----------------------------|
| 1-2 | 6 | 1 ½ |
| 2-3 | 3 | 1 |
| 2-4 | 3 | 1 |
| 4-5 | 4 | 1 1/2 |
| 4-6 | 3 | 1 |
| 6-7 | 3 | 1 |
| 6-8 | 2 | 1 |
| 8-9 | 1 1/2 | 1 |
| 8-10 | 1 1/2 | 1 |
| 10-11 | 1 | 1 |
| 10-12 | 1 1/4 | 1 |

Fonte: Autores (2023).

B.3.1.3 Acessórios (vapor)

Com relação aos acessórios presentes na linha de vapor, estima-se, conforme indicam as mudanças de direção e divisões da tubulação na planta baixa, 8 curvas de 90°, 5 têes, 12 válvulas, 8 separadores e 7 purgadores.

B.3.2 Instalações de Condensado

Para o dimensionamento das linhas de retorno do condensado, é necessário calcular a quantidade de condensado gerada, levando-se em conta a situação mais pessimista para o processo. Considerando a declividade de 0,5 cm/m para as linhas de condensado para favorecer o escoamento do mesmo, as vazões calculadas através da Equação B.12 e o Anexo B.C.

$$Q = C * \frac{P * (t_f - t_i)}{L} \quad (\text{B.12})$$

onde, Q é a quantidade de condensado formado em kg, C é o calor específico do aço (0,49 kJ/(kg· °C)), P é o peso da tubulação de vapor de aço no trecho onde se considera formando o

condensado em kg, t_i é a temperatura inicial da tubulação, considerada igual à do meio ambiente em °C (25 °C), t_f é a temperatura final da tubulação, considerada igual à do vapor, expressa em °C, e L é o calor latente em kJ/kg. Considera-se 5 minutos como o tempo no qual se produz o aquecimento da linha, que ocorre a formação do condensado. Sendo assim, foi possível dimensionar o diâmetro das tubulações de condensado como mostra a Tabela B.12. Vale ressaltar que, na planta baixa da unidade industrial os trechos de vapor sobrepõe os trechos de condensado, para tanto os ambos os trechos, tanto de condensado, quanto de vapor, possuem a mesma numeração.

Tabela B.12 – Diâmetro escolhido para as tubulações de condensado

| Trecho | Peso (kg/m) | Distância (m) | Q (kg/h) | Diâmetro escolhido (in) |
|---------------|--------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------|
| 1-2 | 28,23 | 8,60 | 76,56 | 1 |
| 2-3 | 11,28 | 9,68 | 34,44 | 3/4 |
| 2-4 | 11,28 | 86,82 | 308,86 | 1 1/2 |
| 4-5 | 16,06 | 6,70 | 19,51 | 1/2 |
| 4-6 | 1,28 | 11,51 | 4,65 | 1/2 |
| 6-7 | 11,28 | 6,55 | 13,41 | 1/2 |
| 6-8 | 5,44 | 7,68 | 13,17 | 1/2 |
| 8-9 | 4,04 | 1,83 | 2,10 | 1/2 |
| 8-10 | 4,04 | 8,30 | 10,57 | 1/2 |
| 10-11 | 2,50 | 1,99 | 1,41 | 1/2 |
| 10-12 | 3,38 | 13,72 | 13,17 | 1/2 |

Fonte: Autores (2023).

B.3.2.1 Acessórios (condensado)

Com relação aos acessórios presentes na linha de condensado, estima-se, conforme indicam as mudanças de direção e divisões da tubulação na planta baixa, 8 curvas de 90°, 5 tês e 12 válvulas.

B.4 INSTALAÇÕES DE AR COMPRIMIDO

B.4.1 Dimensionamento das tubulações de ar comprimido

De acordo com Macintyre (2010), para o dimensionamento das tubulações de ar comprimido pode-se adotar alguns valores, como perdas de carga admissíveis de 0,0002 kgf/cm² por metro de tubo nas tubulações principais e de 0,0008 kgf/cm² por metro de tubo para as tubulações secundárias. Além disso, para as velocidades tem-se uma faixa de 6 a 8 m/s para as tubulações principais, de 8 a 10 m/s para as tubulações secundárias (ramais) e de 15 a 30 m/s para as mangueiras (tubos elásticos de acoplamento de ferramentas). Adotam-se, aqui, os valores médios das faixas mencionadas. Na Tabela B.13, estão apresentadas os trechos das linhas de ar comprimido com seus respectivos comprimentos, velocidade adotada e perda de carga admitida. Considerando que, a tubulação possui menos de 100 m e poucas conexões e acessórios, eleva-se em 20% o comprimento real para o cálculo do comprimento equivalente das tubulações de ar comprimido, como também apresentado na Tabela B.13.

Tabela B.13 – Informações das tubulações de ar comprimido

| Trecho | Vazão (m ³ /min) | Comprimento (m) | Comprimento equivalente (m) | Perda de carga admissível (kgf/cm ²) | Velocidade adotada (m/s) |
|--------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|--|--------------------------|
| 1-2 | 5,46 | 27,90 | 33,48 | 0,0002 | 7 |
| 3-4 | 3,39 | 38,80 | 46,56 | 0,0002 | 7 |

Fonte: Autores (2023).

Considerando que a tubulação seja de aço carbono SCH 40 e de que o diâmetro, seja calculado pelo método da perda de carga, como apresentado por Macintyre (2010), tem-se a Equação B.13.

$$d = \sqrt[5]{\frac{0,842 * l_t * Q^2}{R * h_p}} \quad (\text{B.13})$$

onde, d é o diâmetro interno da tubulação em cm, h_p é a perda de carga total em bar, l_t é o comprimento total da tubulação em m (comprimento real + comprimento equivalente dos acessórios), Q é vazão normal de ar em m³/min e R é a relação de compressão para a pressão

de trabalho, R é dada por $R = p_2/p_1$, onde p_2 é a pressão absoluta (pressão atmosférica somada à pressão de operação do compressor) e p_1 é a pressão atmosférica. Neste caso, R é igual a 8 para todo o sistema, pois a pressão atmosférica é 1 bar e a pressão absoluta é 8 bar.

Com o diâmetro calculado, calcularam-se as perdas de carga para os diâmetros inferior e superior ao calculado disponíveis comercialmente, escolhendo-se aquele que apresentou a menor perda de carga para compor as tubulações de ar comprimido, como apresentado pela Tabela B.14.

Tabela B.14 – Dimensionamento das tubulações de ar comprimido

| Trecho | Diâmetro calculado (in) | Diâmetro inferior (in) | hp inferior (kgf/cm ²) | Diâmetro superior (in) | hp superior (kgf/cm ²) | Diâmetro escolhido (in) |
|--------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 1-2 | 6,22 | 6 | 2,39E-04 | 8 | 5,67E-05 | 8 |
| 3-4 | 5,49 | 4 | 9,73E-04 | 6 | 1,28E-04 | 6 |

Fonte: Autores (2023).

B.4.2 Instalação do compressor

A escolha do compressor se dá por fatores que consideram a aplicação industrial do modelo escolhido, bem como a aplicação para a vazão de consumo requerida pela indústria. Dessa forma, sabendo-se que a vazão total de ar comprimido requerido pela indústria é de 12744 m³/dia, necessita-se de um compressor que tenha uma capacidade de vazão igual ou superior a esta. Para tanto, escolheu-se o compressor Oil Free Water Lubricant modelo OF-132W da ZIQI, ou similar, que atende aos requisitos da indústria. O modelo se encontra no Anexo B.D, e corresponde a um modelo de compressor rotativo.

B.4.3 Reservatório de ar comprimido

Para o dimensionamento do reservatório de ar comprimido, deve-se considerar as recomendações acerca do cálculo do volume do tanque com relação à capacidade do compressor. Para compressores com pressão efetiva de trabalho de até 9 bar e condições normais de consumo de ar, o volume do reservatório (m³) deverá ser cerca de seis vezes a capacidade do compressor expressa na mesma unidade de volume (m³) por segundo. Essa

recomendação é válida para operações semiautomáticas em acionamento contínuo do compressor com válvula de aspiração do compressor mantida aberta (MACINTYRE, 2010).

Dessa forma, o cálculo se dá pela Equação B.14 que estima um volume do reservatório considerando a recomendação de 2,5 m³, considerando a capacidade do compressor a 7 bar de 25 m³/min (0,417 m³/s).

$$V = 6 * Q \quad (\text{B.14})$$

B.4.4 Acessórios (ar comprimido)

Com relação aos acessórios presentes na linha de ar comprimido, estima-se, conforme indicam as mudanças de direção e divisões da tubulação na planta baixa, 3 curvas de 90°, 6 válvulas, 2 filtros, 2 purgadores, 2 manômetros e 2 lubrificadores.

B.4.5 Dimensionamento do sistema de air-lift

A partir do valor da vazão de água (Q) requerida de 1,02 m³/min para a operação da indústria, dimensiona-se a quantidade de ar comprimido necessária para a retirada de água subterrânea. Dessa forma, Lopes & Silvestre (1967) definem parâmetros de dimensionamento para o sistema utilizando considerações iniciais acerca do poço e da tubulação, considerando uma pressão atmosférica de 1 bar:

- Profundidade total do poço (H_i) de 100 metros;
- Profundidade do nível estático (H_e) de 6 metros;
- Profundidade do nível dinâmico (H_a) de 24 metros;
- Ponto de descarga (H_o) de 2 metros;
- Diâmetro interno do poço de 10” (ou 250 mm).

Com os parâmetros listados, calcula-se o fator de consumo de ar com a Equação B.15, onde f é o fator de consumo de ar, C é o coeficiente para o tubo externo de ar que depende da porcentagem de submersão (S'), H_g é a altura geométrica e H_s é a submersão dinâmica do ponto de descarga. A altura geométrica é encontrada por meio da Equação B.16 com as considerações anteriores:

$$f = \frac{H_g}{C * \log\left(\frac{H_s + 10,37}{10,37}\right)} \quad (\text{B.15})$$

$$H_g = H_o + H_a \quad (\text{B.16})$$

$$H_g = 26 \text{ m}$$

A partir do valor de 26 metros para a altura geométrica do poço (H_g), usa-se o quadro presente no Anexo B.E para encontrar um valor ótimo de submergência (S). Considerou-se assim um valor de 58% para a submergência, a qual deve ser usada na Equação B.17 para o cálculo da profundidade do poço (H_p) entre a entrada do ar (saída da água) (N-N) e o ponto em que o eixo da coluna de ar encontra o hidroemulsor (f) conforme imagem presente no Anexo B.F (LOPES & SILVESTRE, 1967).

$$H_p = \frac{(S * H_a + 100 * H_o)}{100 - S} \quad (\text{B.17})$$

$$H_p = 59,90 \text{ m}$$

Com o valor obtido para a profundidade do poço, calcula-se a submergência linear (H_s) com a Equação B.18. O valor da submergência linear é utilizado para o cálculo da porcentagem de submersão (S') pela Equação B.19, que deverá ser utilizado para a encontrar o valor do coeficiente C com a tabela presente no Anexo B.G.

$$H_s = H_p - H_a \quad (\text{B.18})$$

$$H_s = 35,90 \text{ m}$$

$$S' = \frac{H_s}{H_s + H_g} * 100 \quad (\text{B.19})$$

$$S' = 60,55 \%$$

Para encontrar C , é necessário interpolar na tabela com relação aos valores da faixa de 60 a 65% de submersão com a Equação B.20.

$$C = C_1 \frac{(S' - S_1)}{(S_2 - S_1)} * (C_2 - C_1) \quad (\text{B.20})$$

$$C = 13,71$$

Com os cálculos elaborados, é possível calcular o fator de consumo de ar com a Equação B.20 definida anteriormente. Assim, utiliza-se a Equação B.21 para definir a vazão de ar comprimido (Q') com o fator (f) e a vazão de água requerida (Q) para a indústria.

$$f = 2,89$$

$$Q' = f * Q \quad (\text{B.21})$$

$$Q' = 176,87 \text{ m}^3/\text{h}$$

Considerando uma margem de segurança de 15% acima do necessário, para possíveis imprevistos:

$$Q' = 203,40 \text{ m}^3/\text{h} = 3,39 \text{ m}^3/\text{min} = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$$

Considerando as deduções da Lei de Mariotte, é possível descrever a área de descarga (A_d) através da Equação B.22, onde Q é a vazão de água (m^3/s), Q' é a vazão de ar livre considerando uma relação de compressão (r) de 1:1, e V_d é a velocidade da mistura na descarga considerando a faixa recomendável de 3,7 a 7,6 m/s, e escolhendo-se o valor intermediário de 5,65 m/s. Com o valor da área, calcula-se o diâmetro da tubulação de descarga pela Equação B.23.

$$A_d = \frac{Q' + Q}{V_d} \quad (\text{B.22})$$

$$A_d = 0,014 \text{ m}^2$$

$$D_d = \sqrt{\frac{4 * A_d}{\pi}} \quad (\text{B.23})$$

$$D_d = 0,134 \text{ m} = 134 \text{ mm} = 5,28 \text{ in}$$

Calcula-se os valores de velocidade de descarga considerando tubos de aço carbono SCH 40 entre diâmetros de descarga inferior e superior ao calculado utilizando as tabelas para tubos comerciais presentes no Anexo B.I. Considerou-se o diâmetro de descarga superior (D_{ds}) igual a 154,0 mm e o diâmetro de descarga inferior (D_{di}) igual a 102,3 mm. O valor de velocidade mais próximo dos extremos ou fora dos extremos para a faixa recomendada é descartado, e escolhe-se o outro.

$$A_{di} = 0,00822 \text{ m}^2$$

$$V_{di} = 9,73 \text{ m/s}$$

$$A_{ds} = 0,01863 \text{ m}^2$$

$$V_{ds} = 4,29 \text{ m/s}$$

Portanto, escolhe-se o valor do diâmetro superior de 154,0 mm com velocidade de 4,29 m/s, que representa tubos comerciais SCH 40 6”.

B.5 INSTALAÇÕES DE GÁS NATURAL

B.5.1 Dimensionamento das tubulações de gás natural

O dimensionamento das instalações de gás natural adota as instruções do “Manual de Instalações Industriais” da empresa Comgás, logo, a tubulação de gás deve ser dimensionada considerando os parâmetros de pressão de operação, potência ou vazão de operação, pressão da rede de distribuição de gás natural, características da instalação industrial e perda de carga.

Para o cálculo da vazão de gás necessária, é preciso levantar a necessidade de consumo dos aparelhos. A vazão de operação é calculada por meio da Equação B.24.

$$Q = \frac{A}{PCI} \quad (\text{B.24})$$

onde, A é potência adotada em kcal/h, PCI é o poder calorífico inferior em kcal/m³, sendo 9065 kcal/Nm³ para o gás natural e Q é vazão de gás em Nm³/h. Porém, tendo como base o consumo diário de vapor e o modelo escolhido para a caldeira com capacidade de atender essa demanda pelo Anexo B.J, tem-se que a vazão de gás natural necessária para o funcionamento da caldeira é de 158 Nm³/h. Parte do ar quente com DMC também é alimentado na caldeira, mas o mesmo, pela baixa quantidade, não é incluído nos cálculos.

Ressalta-se que o dimensionamento do ramal externo é de responsabilidade da empresa que realiza o fornecimento de gás natural, neste caso da Comgás, que dentre outras localidades atende a região de Campinas. Aqui será considerado o dimensionamento de uma estação de gás CRM (Conjunto de Regulagem e Medição) cuja finalidade é regular e/ou medir o gás natural.

A velocidade máxima permitida para as redes é de 20 m/s, logo, considerou-se uma velocidade de 15 m/s como medida de segurança. O diâmetro interno das tubulações pode ser obtido conforme a Equação B.25.

$$D = \sqrt{\frac{354 * Q}{\left[\left(\frac{P}{98,066}\right) + 1,033\right] * V}} \quad (\text{B.25})$$

onde, V é a velocidade dada em m/s, Q é a vazão do gás na pressão de operação Nm³/h, P é a pressão manométrica de operação em kPa e D é o diâmetro interno do tubo dado em mm.

O material utilizado na tubulação é de aço carbono SCH 40, a Tabela B.15 apresenta os diâmetros internos escolhidos com base nos equacionamentos apresentados para as tubulações de gás natural, considerando uma pressão de operação de 1172,11 kPa, tendo como base a PMTA da caldeira.

Tabela B.15 – Dimensionamento das tubulações de gás natural

| Trecho | Comprimento (m) | Vazão (Nm ³ /h) | Diâmetro (mm) | Diâmetro (in) | Diâmetro escolhido (in) |
|--------|--------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|
| 1-2 | 9,40 | 158 | 254,19 | 10,01 | 10 |

Fonte: Autores (2023).

B.5.2 Acessórios (gás natural)

Com relação aos acessórios presentes na linha de gás natural, fica a critério da fornecedora de gás natural contratada os acessórios a serem instalados, tendo em vista os seus serviços prestados.

B.6 DIMENSIONAMENTO DAS BOMBAS DO PROCESSO

De acordo com Cremasco (2018), para o dimensionamento das bombas do processo utiliza-se a Equação B.26, em que o subscrito S refere-se a sucção e o subscrito D a descarga ou recalque, todos os termos presentes na equação possuem dimensão de comprimento ou altura.

$$Z_S + \frac{p_S}{\rho * g} + \frac{V_S^2}{2 * g} + h_{bomba} = Z_D + \frac{p_D}{\rho * g} + \frac{V_D^2}{2 * g} + h_{LT} \quad (B.26)$$

onde, “ $p/\rho g$ ” é convencionada como a altura de pressão, “ $V^2/2g$ ” como a altura de velocidade, “ z ” é a altura de posição, “ h_{LT} ” é a altura de atrito total ($h_{LT} = h_{LS} + h_{LD}$) e “ h_{bomba} ” é a altura total a ser fornecida pela bomba. Levou-se em conta que os diâmetros das tubulações tanto na seção de sucção quanto na descarga são muito menores que os raios dos equipamentos, tornando as velocidades nos pontos de sucção e de descarga desprezíveis. De tal modo que, a energia cinética por unidade de massa na tubulação fosse muito superior à energia cinética por unidade de massa à superfície do equipamento (CREMASCO, 2018).

A diferença das alturas de sucção e de descarga foi considerada para fins de cálculo como sendo uma altura próxima a do equipamento. Além disso, tendo as bombas a finalidade somente de transporte, considera-se constante a pressão ao longo dos trechos, anulando os termos referentes a pressão. Também se optou por desconsiderar as perdas de carga na tubulação de processo, reforçando tal simplificação, tem-se a justificativas de poucos acessórios presentes nas tubulações do processo, assim como de uma baixa rugosidade do aço utilizado na confecção destes tubos. Por fim, a gravidade é tida como $9,81 \text{ m/s}^2$.

Para o cálculo da potência consumida ($\dot{W}_{consumida}$), utiliza-se a Equação B.27. Ressalta-se que, as bombas centrífugas apresentam rendimento mecânico entre 30 e 50% para fluidos de processo e de até 75% para água (CREMASCO, 2018). Dessa forma, considerou-se um rendimento mecânico de 50% para todas as bombas.

$$\dot{W}_{consumida} = \frac{\dot{W}_U}{\eta} \quad (B.27)$$

A Equação B.26 necessita do valor da potência útil (\dot{W}_u), obtida a partir da Equação B.28. A potência útil é definida como aquela a ser fornecida ao líquido que escoar com vazão mássica, \dot{m} , ou volumétrica, Q .

$$\dot{W}_U = \dot{m} * g * h_{bomba} = \rho * g * Q * h_{bomba} \quad (B.28)$$

Portanto, em posse dos valores calculados, escolhe-se a bomba, neste caso do tipo centrífuga, mais adequada comparando os valores encontrados com as potências das bombas disponíveis comercialmente. Os valores calculados encontram-se na Tabela B.16.

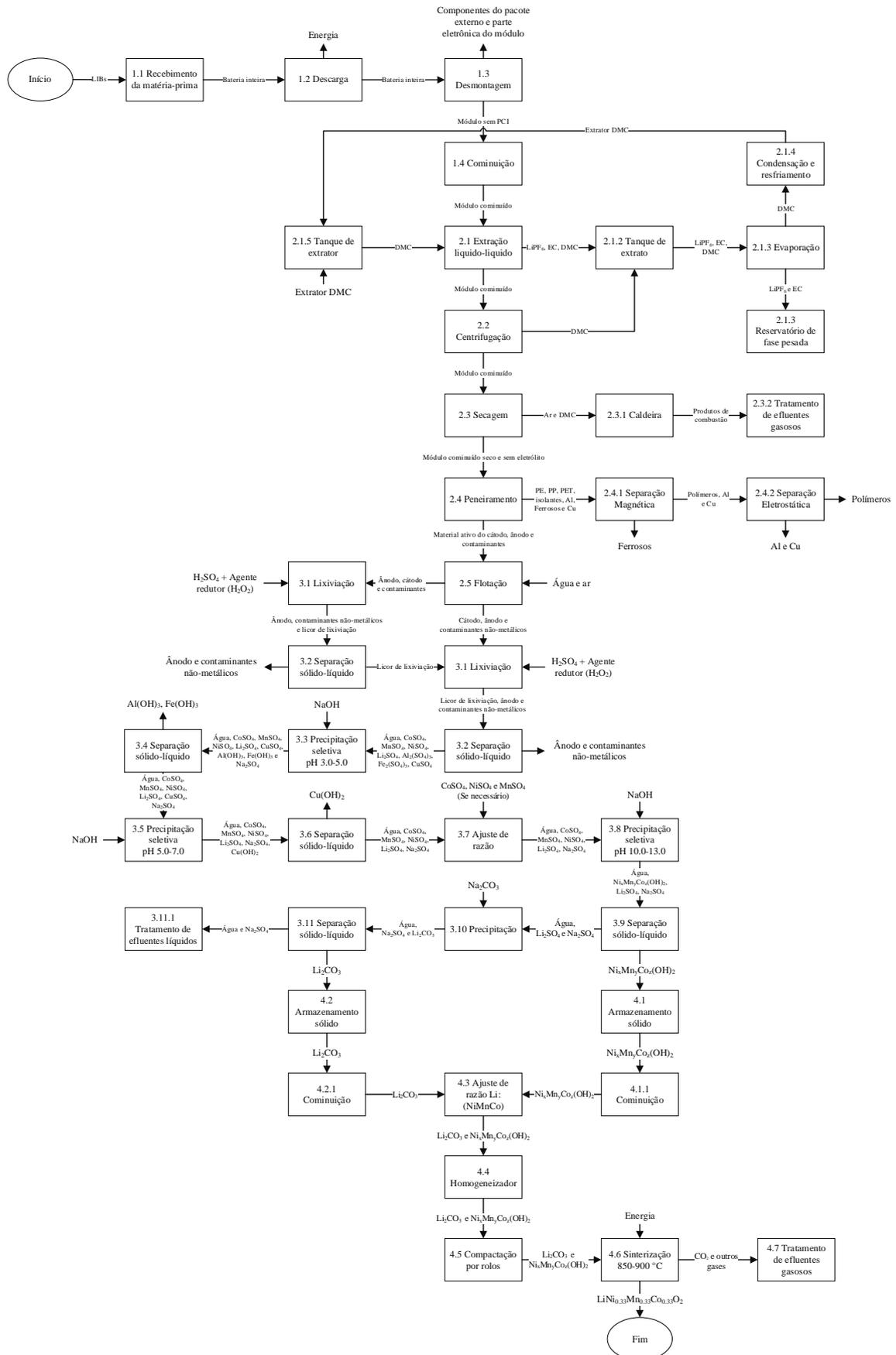
Tabela B.16 – Dimensionamento das bombas do processo

| Bomba | Vazão mássica (kg/s) | h_{bomba} (m) | W_u (W) | $W_{\text{consumida}}$ (W) | $W_{\text{consumida}}$ (hP) |
|--------------|-----------------------------|--|-----------------------------|--|---|
| P-201 | 0,36 | 3,00 | 10,52 | 21,05 | 0,03 |
| P-202 | 0,36 | 3,00 | 10,51 | 21,03 | 0,03 |
| P-203 | 0,36 | 3,00 | 10,51 | 21,03 | 0,03 |
| P-204 | 0,36 | 3,00 | 10,51 | 21,03 | 0,03 |
| P-205 | 0,89 | 1,50 | 13,10 | 26,21 | 0,04 |
| P-206 | 0,88 | 1,50 | 12,95 | 25,89 | 0,03 |
| P-207 | 0,89 | 1,50 | 13,14 | 26,28 | 0,04 |
| P-208 | 0,25 | 1,50 | 3,75 | 7,49 | 0,01 |
| P-209 | 0,14 | 1,50 | 2,12 | 4,24 | 0,01 |
| P-210 | 0,04 | 1,50 | 0,64 | 1,28 | 0,01 |
| P-211 | 0,17 | 1,50 | 2,54 | 5,08 | 0,01 |
| P-301 | 0,02 | 1,50 | 0,25 | 0,51 | 0,01 |
| P-302 | 0,07 | 1,50 | 1,04 | 2,07 | 0,01 |
| P-303 | 0,22 | 1,50 | 3,23 | 6,46 | 0,01 |
| P-304 | 0,15 | 1,50 | 2,19 | 4,39 | 0,01 |
| P-305 | 0,43 | 1,50 | 6,31 | 12,62 | 0,02 |
| P-306 | 0,33 | 1,50 | 4,92 | 9,84 | 0,01 |
| P-307 | 0,76 | 1,50 | 11,17 | 22,35 | 0,03 |
| P-308 | 0,16 | 1,50 | 2,35 | 4,69 | 0,01 |
| P-309 | 0,92 | 1,50 | 13,48 | 26,96 | 0,04 |
| P-310 | 0,93 | 1,50 | 13,76 | 27,51 | 0,04 |
| P-311 | 0,41 | 1,50 | 6,03 | 12,06 | 0,02 |
| P-312 | 1,34 | 1,50 | 19,78 | 39,57 | 0,05 |
| P-313 | 0,07 | 1,50 | 1,00 | 2,00 | 0,01 |
| P-314 | 1,36 | 1,50 | 20,02 | 40,04 | 0,05 |
| P-315 | 1,34 | 1,50 | 19,71 | 39,42 | 0,05 |

Fonte: Autores (2023).

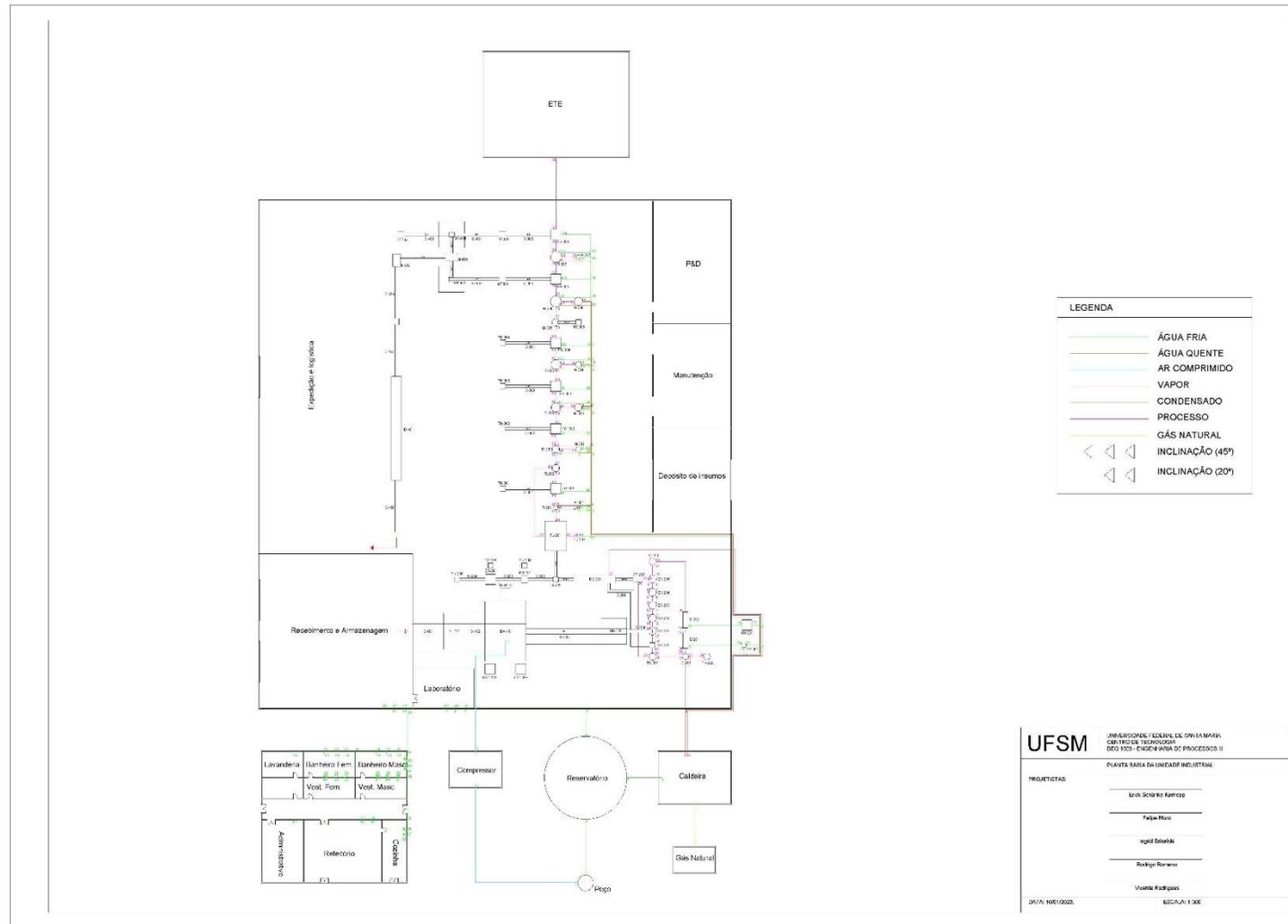
Como é possível observar, também em virtude das considerações tomadas, a potência requerida para as bombas do processo são baixas, logo, difíceis de serem encontradas comercialmente. Assim, em virtude das características dos compostos com que se trabalha e da falta de bombas que trabalhem nas potências calculadas, sugerem-se as bombas centrífugas dos tipos “*Chemical Motor Pump Unit MB*” da Lutz-Jesco, ou similares, presente no Anexo B.H.

APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS



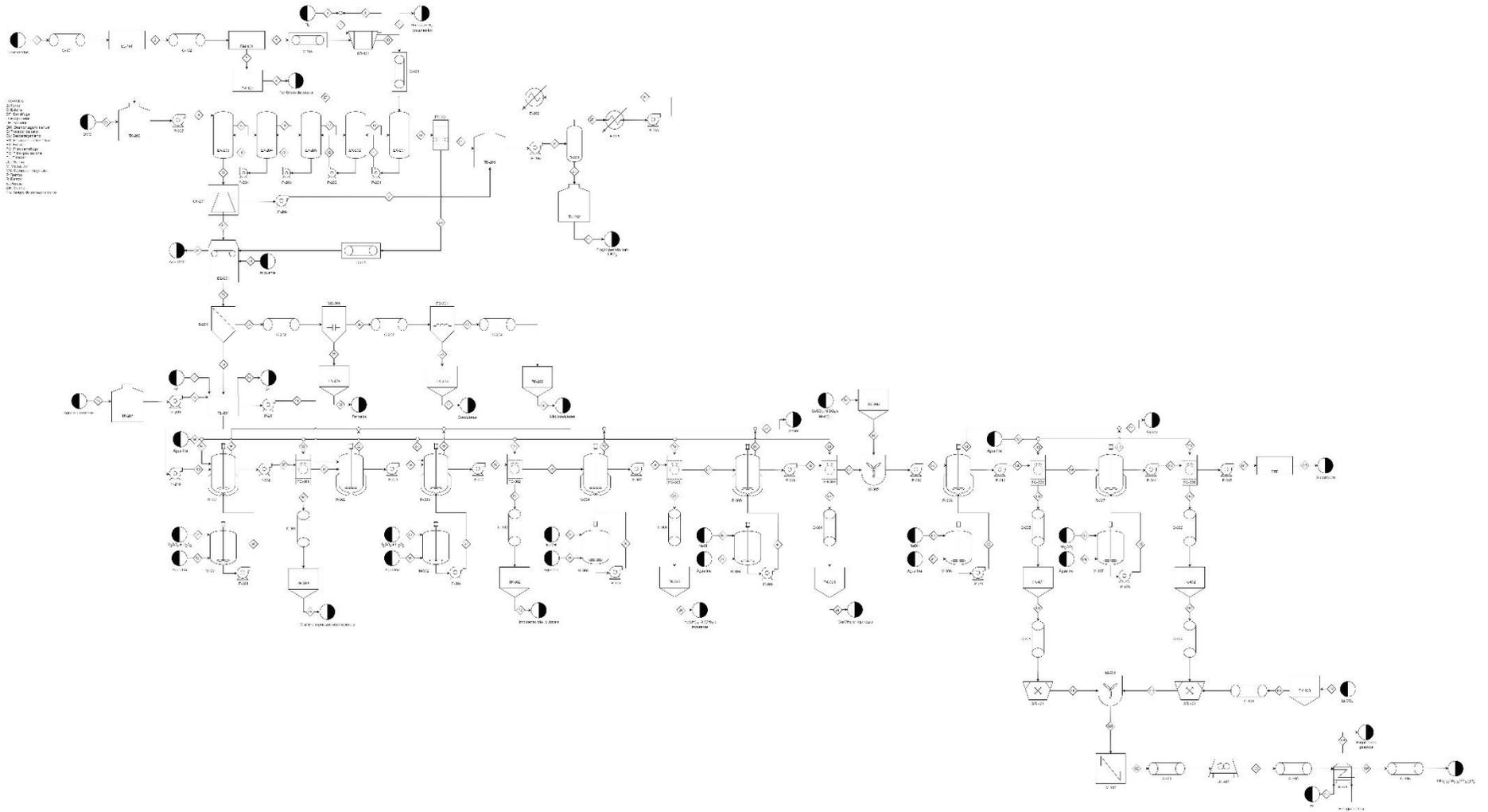
Fonte: Autores (2023).

APÊNDICE D – PLANTA BAIXA DA UNIDADE INDUSTRIAL



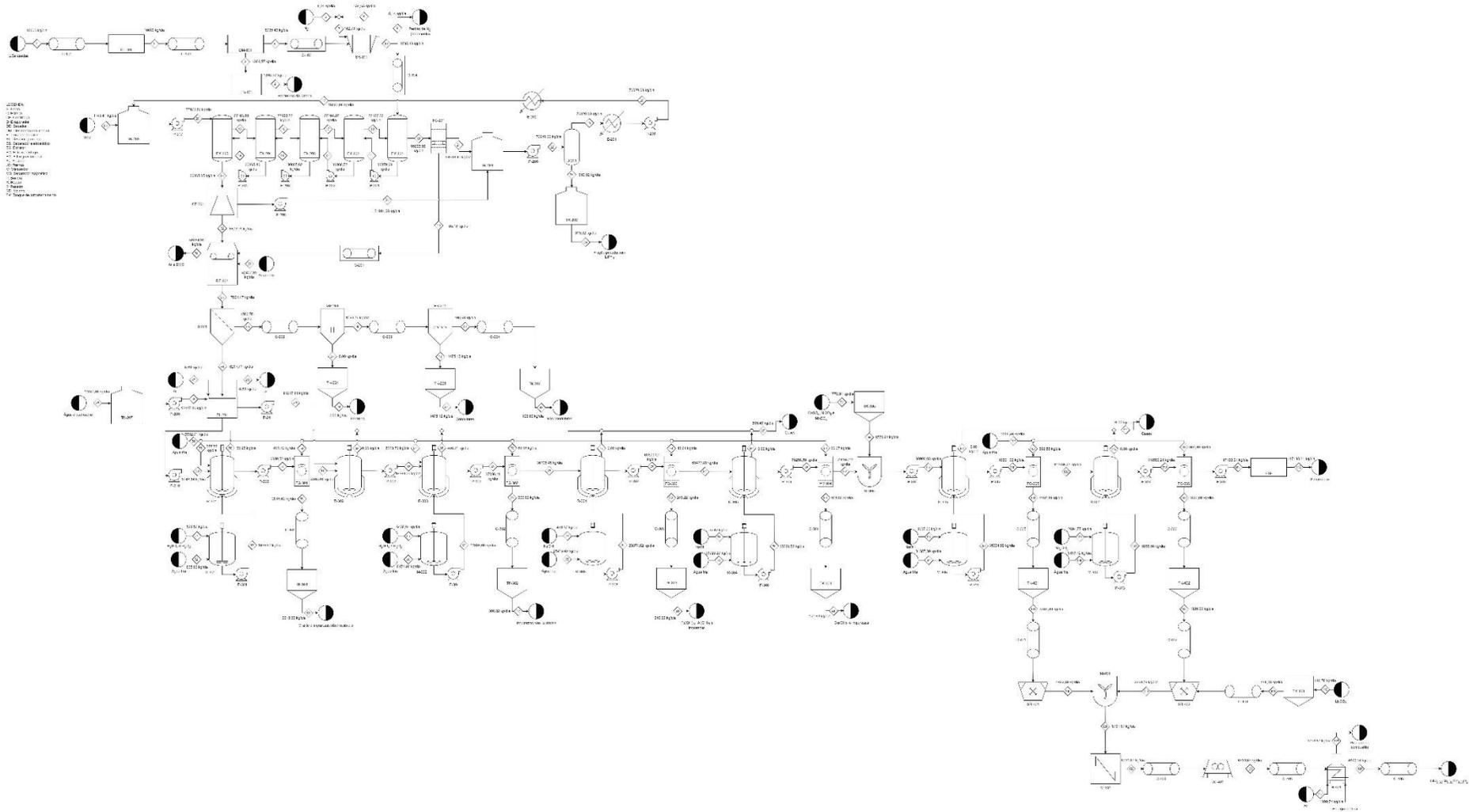
Fonte: Autores (2023).

APÊNDICE E – FLUXOGRAMA DETALHADO



Fonte: Autores (2023).

APÊNDICE F – FLUXOGRAMA DETALHADO COM VAZÕES

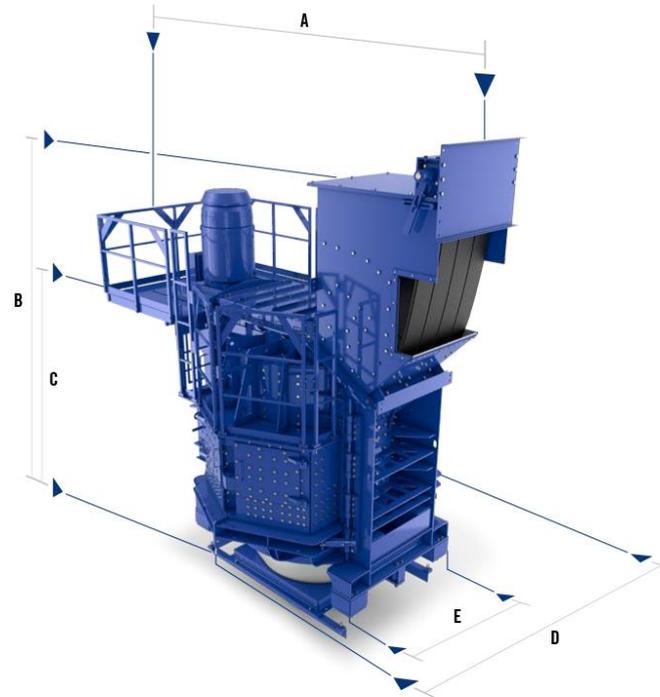


Fonte: Autores (2023).

ANEXO A – ROTORSHREDDER BHS SONTHOFEN

FLEXIBILITY FOR PEAK PERFORMANCE

Two sizes offer pure performance



Performance data

| Type | Working chamber (diameter) | Working chamber (height) | Feed opening clear width ¹⁾ (H x W) | Drive power max. |
|---------|----------------------------|--------------------------|--|------------------|
| RS 2018 | 2,000 mm | 1,800 mm | 750 x 1,200 mm 900 x 1,200 mm | 110-250 kW |
| RS 3218 | 3,200 mm | 1,800 mm | 1,500 x 1,500 mm | 200-400 kW |

Dimensions and weights

| Type | A ²⁾ | B ²⁾ | C | D | E | Weight ³⁾ |
|---------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|----------------------|
| RS 2018 | 4,800 mm | 6,300 mm | 3,350 mm | 3,500 mm | 1,900 mm | 34,000 kg |
| RS 3218 | 5,750 mm | 7,250 mm | 3,200 mm | 5,150 mm | 3,800 mm | 55,000 kg |

1) Not suitable for shredding solid parts or materials with high strength and larger than the largest grate gap. The maximum piece size for the RS 2018 is 500 mm and an individual weight of up to 15 kg. For the RS 3218, the maximum piece size is 800 mm and an individual weight of up to 30 kg. | 2) Data may differ depending on the feed hopper used. | 3) Weight data for the standard version, including feed and discharge hoppers. | All technical data mentioned correspond to the standard version and are subject to continuous development. Subject to change without notice.

Fonte: BHS Sonthofen (2022).

ANEXO B – MIXER-SETTLERS DE DIETRICH

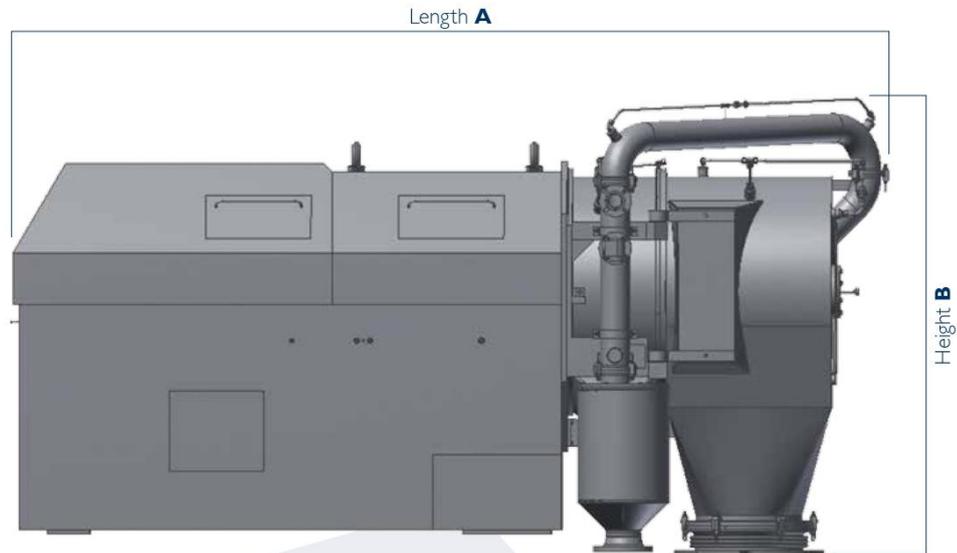


Fonte: De Dietrich (2022).

ANEXO C – FILTRO CENTRÍFUGO HEINKEL

Technical Data

in detail



| Technical data | HF 300.1 | HF 450.1 | HF 600.1 | HF 800.1 | HF 1000.1 | HF 1300.1 |
|--|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Inverting Filter Centrifuges | | | | | | |
| Basket diameter (mm) | 300 | 450 | 600 | 800 | 1000 | 1300 |
| Filtering surface area (m ²) | 0,1 | 0,31 | 0,41 | 0,85 | 1,26 | 2,0 |
| Nominal volume (ltr) | 6,5 | 26 | 52 | 120 | 200 | 350 |
| Speed max. (l/min) | 3000 | 2300 | 1940 | 1600 | 1270 | 1000 |
| Spinning speed (x g) | 1500 | 1322 | 1255 | 1138 | 900 | 722 |
| Weight (kg) | 1400 | 3250 | 3500 | 6200 | 8900 | 10700 |
| Length (mm) A | 2025 | 3095 | 3095 | 4080 | 5090 | 5950 |
| Width closed (mm) | 930 | 1605 | 1605 | 2065 | 2290 | 2600 |
| Width opened (mm) | 1170 | 2450 | 2450 | 3190 | 3735 | 4600 |
| Height (mm) B | 1065 | 1735 | 1735 | 1900 | 2550 | 3300 |

Fonte: Heinkel (2022).

ANEXO D – EVAPORADOR DE SIMPLES EFEITO

| Model | RFE-200L | RFE-500L | RFE-1000L |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Vacuum Degree (Mpa) | -0.06~-0.095 | -0.06~-0.095 | -0.06~-0.095 |
| Evaporation Temp. (°C) | 45~75 | 55~75 | 55~75 |
| Evaporation Capacity (kg/h) | 200 | 500 | 1000 |
| Heating Area (m ²) | 4 | 10 | 16 |
| Steam Pressure (Mpa) | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| Steam Consumption (kg/h) | 220 | 600 | 1100 |
| Primary Condensing Area (m ²) | 10 | 26 | 57 |
| Secondary Condensing Area (m ²) | 0.5 | 1 | 2 |
| Cooling Water Inlet Temp. (°C) | 32 | 32 | 32 |
| Cooling Water Outlet Temp. (°C) | 40 | 40 | 40 |
| Cooling Water Capacity (m ³ /h) | 15 | 32 | 65 |
| Liquid Collector | 210L | 360L + 100L | 600L + 250L |
| Evaporation Chamber (L) | 650 | 1100 | 2100 |
| Gas-Liquid Separator (L) | 30 | 70 | 140 |
| Material | SS304 | SS304 | SS304 |

Fonte: LAB1ST (2022).

ANEXO E – CENTRÍFUGA DE TIJELA SÓLIDA

DZ | DECANTER CENTRIFUGE - SOLID BOWL

Standard Machine Sizes

| | | 250 | 300 | 350 | 450 | 500 | 600 | 710 | 850 | 1,000 | 1,100 | 1,200 |
|--------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| Length | from - to mm | 1,400-2,000 | 1,900-2,500 | 2,020-2,740 | 2,020-3,040 | 2,650-3,650 | 2,900-4,100 | 3,300-4,720 | 3,500-5,200 | 4,570-6,570 | 4,770-6,970 | 5,060-7,460 |
| Width | approx. mm | 1,100 | 1,370 | 1,500 | 1,750 | 2,035 | 2,060 | 2,580 | 2,700 | 3,160 | 3,260 | 3,600 |
| Height | approx. mm | 800 | 940 | 980 | 1,110 | 1,325 | 1,400 | 1,450 | 1,600 | 1,660 | 1,750 | 1,915 |
| Weight | from - to kg | 900-1,400 | 1,200-1,600 | 1,500-2,100 | 2,100-2,800 | 3,000-4,000 | 4,200-5,800 | 5,000-7,000 | 7,000-9,800 | 10,000-15,000 | 12,800-18,300 | 20,500-25,500 |

Special versions on request.



Fonte: SIEBTECHNIK TEMA (2022).

ANEXO F – TÚNEL DE SECAGEM



Technical Parameter

| Model (mm) | Rotate Speed (r/min) | Heat pipe quantity (pcs) | Capacity (t/h) | Driving motor (kw) | Draught fan (kw) | Weight (T) |
|------------|----------------------|--------------------------|----------------|--------------------|------------------|------------|
| 800 | 3-7 | 30-36 | 0.7-1.1 | 4 | 1.5+3 | 5.2 |
| 1000 | 3-7 | 38-43 | 1.3-2.8 | 5.5 | 1.5+3 | 7.2 |
| 1200 | 3-7 | 45-48 | 2.0-2.5 | 7.5 | 3+3 | 9 |
| 1500 | 3-7 | 48-54 | 3.0-4.0 | 11 | 3+3 | 14 |
| 1800 | 3-7 | 60-80 | 4.5-6.0 | 15 | 7.5+4 | 18.5 |
| 2000 | 3-7 | 80-110 | 6.5-8.0 | 18.5 | 7.5+7.5 | 22 |

Fonte: HB Haokebang Machinery (2022).

ANEXO G – PENEIRA VIBRATÓRIA



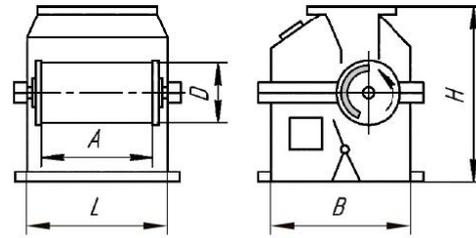
máquina de triagem de movimento circular

| | | | | | |
|----------------------|--------|-------------|-----|-----|------|
| Largura efetiva | mm | a partir de | 400 | até | 2700 |
| Comprimento efetivo | mm | a partir de | 800 | até | 8000 |
| Inclinação | degree | a partir de | 10 | até | 30 |
| Rapidez | min-1 | a partir de | 750 | até | 3000 |
| Amplitude | mm | a partir de | 2 | até | 14 |
| Ângulo de lançamento | degree | a partir de | 75 | até | 85 |
| Peso de vibração | t | | | até | 14 |

Fonte: SIEBTECHNIK TEMA (2022).

ANEXO H – SEPARADOR MAGNÉTICO

Сепаратори магнітні барабанні БС



Призначені для сухого збагачення рудних та нерудних матеріалів, а також для очищення різноманітних немагнітних матеріалів від магнітних домішків.

Застосовуються на підприємствах чорної металургії та в інших галузях промисловості.

| Найменування | Матеріал магнітів | Розміри, мм | | | | | Потужність приводу, кВт | Маса, кг, не більше | |
|--------------|-------------------|-------------|------|------|------|------|-------------------------|---------------------|------|
| | | D | A | B | L | H | | | |
| БС-50/50-Н | Неодим | 500 | 500 | 1000 | 1400 | 1100 | 2,2 | 600 | |
| БС-50/65-Н | | | 650 | | | | 1050 | 2,2 | 800 |
| БС-50/100-Н | | | 1000 | | | | 1400 | 3,0 | 1200 |
| БС-63/65-Н | | 630 | 650 | 1310 | 1210 | 1340 | 3,0 | 1400 | |
| БС-63/80-Н | | | 800 | | | | 1210 | 3,0 | 1600 |
| БС-63/100-Н | Феррит (Неодим) | 630 | 1000 | 1310 | 1910 | 1340 | 3,0(4,0) | 1950 | |
| БС-63/150-Н | | | 1500 | | | | 1910 | 4,0(5,5) | 2400 |
| БС-63/200-Н | | | 2000 | | | | 2410 | 5,5(7,5) | 2800 |
| БС-80/100-Н | | 800 | 1000 | 1500 | 1910 | 1500 | 3,0(4,0) | 2400 | |
| БС-80/150-Н | | | 1500 | | | | 1910 | 4,0(5,5) | 2800 |
| БС-90/150-Н | | 900 | 1500 | 1300 | 1800 | 1680 | 8,2 | 2800 | |
| БС-120/200-Н | 1200 | 1975 | 2320 | 2300 | 2050 | 11,0 | 4500 | | |

- (Н) - магнітна система з неодимових магнітів.
- Магнітна індукція на поверхні барабану відповідно до технічного завдання:
80 - 150 мТл для феритових магнітних систем;
200 - 800 мТл для неодимових магнітних систем.
- Продуктивність сепараторів визначається для конкретних матеріалів після заповнення опитувального листа або проведення пробної магнітної сепарації.
- Можливе виготовлення сепараторів з урахуванням вимог замовника.

Fonte: Prodecolog (2022).

ANEXO I – SEPARADOR ELETROSTÁTICO

Сепаратори електростатичні (трибоелектричні) ЕБС-Т



Призначені для:

- сухого розділення за електричними властивостями сумішей полімерів*, а саме: ПВХ_{твердий} + невідна гума + ПВХ_{м'який} + EPDM (подрібнений пластиковий віконний профіль), ПВХ + ПЕ (подрібнена ізоляція електрокабелю), ПЕТ + ПВХ (подрібнені ПЕТ-пляшки), ПЕТ + ПЕ (харчова упаковка, контейнери), АБС + ПС (подрібнені електровідходи), ПП + ПЕ (пластикові пляшки та ковпачки) та інші суміші (ПВХ + скло, ПС + ПП, ПС + ПК, ПС + САН, АБС + САН, АБС + ПВХ, ПП + ПЕТ, ПЕ + ПС);
- вилучення алмазів з хвостів рентгенолюмінесцентної сепарації.

| Найменування | Продуктивність, кг/год.** | Фракційний склад, мм | Ширина робочої зони, мм | Кількість осаджуючих електродів (барабанів), шт. | Габаритні розміри, мм*** | Споживана потужність, кВт*** | Маса, кг*** |
|----------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|--|--------------------------|------------------------------|-------------|
| ЕБС-Т-27/60 | 100-200 | - 8 + 2 | 600 | 1 | 1120x1370x1210 | 1,0 | 600 |
| ЕБС-Т-27/100 | 150-300 | | 1000 | | 1120x1770x1210 | 2,5 | 800 |
| ЕБС-Т-27/150 | 250-500 | | 1500 | | 1200x2420x1235 | 3,5 | 1000 |
| ЕБС-Т-27/200 | 350-700 | | 2000 | | 1200x2920x1235 | 4,0 | 1200 |
| ЕБС-Т-2-27/150 | 500-1000 | | 3000 | 2 | 1980x1940x1275 | 4,5 | 1600 |
| ЕБС-Т-2-27/200 | 700-1400 | | 4000 | | 1980x2440x1275 | 5,0 | 1900 |
| ЕБС-Т-2-27/250 | 900-1800 | 5000 | 1980x2940x1275 | | 5,5 | 2200 | |

- * в умовах закритого приміщення з температурою повітря від 5 до 40 °С, при відносній вологості внутрішнього седовища сепаратора не більше 40% та продуктів сепарації не більше 0,5%.
- ** продуктивність для конкретного продукту визначається при проведенні тестових випробувань. Максимальне значення вказано для насипної маси 0,8 т/м³.
- *** характеристика сепараторів без врахування додаткових опцій (п.1).

1. Сепаратори можуть додатково комплектуватися:

- подаючими та відвідними шнеками;
- рамою під сепаратор;
- робочою площадкою обслуговування;
- завантажувальними бункерами різного об'єму.

2. Можливе виготовлення сепараторів (сепараторів з опціями) із врахуванням вимог замовника.

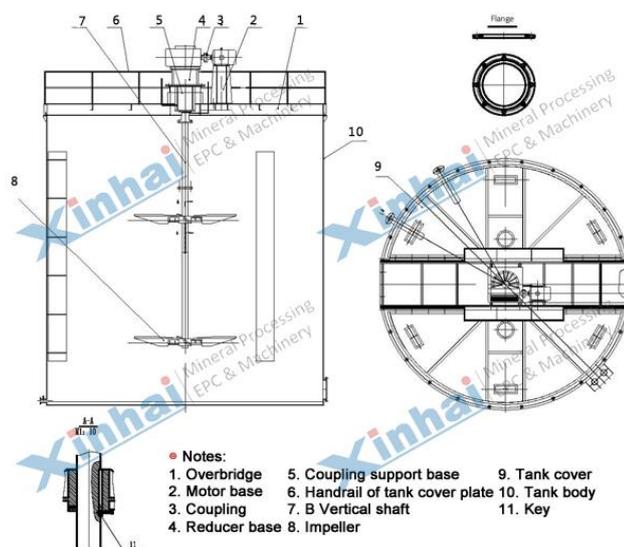
Fonte: Prodecolog (2022).

ANEXO J – MÁQUINA DE FLOTAÇÃO SMARTCELL®



Fonte: FLSmidth (2022).

ANEXO K – REATOR DE LIXIVIAÇÃO



■ Structure Drawing of Double-impeller Leaching Agitation Tank

| Model | Tank Spec. (DX H) (mm) | Effective Volume (m ³) | Rotating Speed of Impeller (r/min) | Diameter of Impeller (mm) | Motor Model | Motor Power (kW) | Reducer Model | Tank Weight (kg) | Total Weight (kg) |
|-------------|---------------------------|--|------------------------------------|---------------------------|----------------|------------------------|---------------|------------------------|-------------------------|
| SJ2.0X2.5 | 2000X2500 | 7.07 | 52 | 909 | Y100L1-4 | 2.2 | XLD2.2-4-29 | 1609 | 2144 |
| SJ2.5X2.5 | 2500X2500 | 10.8 | 43 | 935 | Y112M-4 | 4 | XLD4-5-35 | 2159 | 2729 |
| SJ2.5X3.15 | 2500X3150 | 13.92 | 52 | 935 | Y100L1-4 | 2.2 | XLD2.2-4-29 | 2398 | 3095 |
| SJ3.0X3.0 | 3000X3000 | 19 | 43 | 1130 | Y112M-4 | 4 | XLD4-5-35 | 3480 | 4583 |
| SJ3X3.15 | 3000X3150 | 20 | | | | | | 3480 | 4160.6 |
| SJ3X3.5 | 3000X3500 | 22.97 | | | | | | 3211 | 4334.6 |
| SJ3.15X3.55 | 3150X3550 | 25.73 | | 1260 | | | | 3433.5 | 4322.8 |
| SJ3.5X3.5 | 3500X3500 | 31.3 | 52 | 1310 | Y132S-4 | 5.5 | XLD5.5-5-29 | 3480 | 5025 |
| SJ3.5X4 | 3500X4000 | 35.6 | 4230 | | | | | 5429 | |
| SJ3.55X4.0 | 3550X4000 | 36.8 | 4260 | | | | | 5025 | |
| SJ3.7X4.2 | 3700X4200 | 42 | 42 | | Y112M-4 | 4 | XLD4-5-43 | 5266 | 6153 |

Fonte: Xinhai Mineral Processing Epc (2022).

ANEXO L – COMPACTADOR DE ROLOS FREUND VECTOR

| Modelos TFC | Capacidade (Kg / h) | Medida dos Rolos Largura x Diâmetro (mm) | Velocidade dos Rolos (RPM) | Força nos Rolos (kN) |
|----------------|--------------------------|---|-------------------------------|-------------------------|
| TFC-220 | 1 a 20 | 20 x 200 | 1 a 17 | 50,4 |
| TFC-520 | 10 a 100 | 50 x 200 | 3 a 24 | 130 |
| TFC-1230 | 100 a 400 | 132 x 300 | 2 a 20 | 319 |
| TFC-1540 | 200 a 700 | 165 x 400 | 2 a 20 | 398 |

Fonte: AMI Brasil (2022).

ANEXO M – FORNO DE SINTERIZAÇÃO EASYBRAZE

EASYBRAZE

fours électriques à tapis transporteur sous atmosphère contrôlée
à plat ou à " dos d'âne "

hypertrempe inox
recuit
recuit magnétique
brasage
scellement verre-métal
frittage



- température maxi 1000°C / 1100°C / 1230°C
- isolation en fibre minérale suivant Directive Machines 2006/42/CE
- résistances démontables à chaud, sans arrêt du four
- moufle en acier réfractaire pour traitements sous atmosphère inflammable (sécurité atmosphère suivant norme EN 746.3+A1 d'août 2009)
- régulation indépendante des zones de chauffe, par contacteurs statiques à thyristors
- transformateur d'isolement (modèles 1150°C et >)
- traçabilité et régulation température et atmosphère par système de supervision
- conforme normes  et Directive Machines 2006/42/CE

Quelques-uns de nos modèles standard

| | modèle | température en °C | section de passage en mm | | longueur chauffée en mm | nombre de zones | puissance en kW | dimensions extérieures en mm | | |
|-------------------|--------|-------------------|--------------------------|---------|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|---------|----------|
| | | | largeur | hauteur | | | | largeur | hauteur | longueur |
| d o s | 270 | 1150 | 100 | 40 | 1900 | 2 | 16 | 1150 | 2100 | 7500 |
| | 272 | 1150 | 200 | 60 | 2500 | 3 | 38 | 1100 | 1800 | 8840 |
| | 274 | 1150 | 300 | 150 | 2100 | 3 | 40 | 1200 | 1900 | 10950 |
| d' à n e | 276 | 1150 | 400 | 170 | 2300 | 3 | 56 | 1300 | 2050 | 12000 |
| | 278 | 1150 | 500 | 200 | 2400 | 3 | 70 | 1400 | 2150 | 13000 |
| | 279 | 1150 | 600 | 250 | 4700 | 5 | 114 | 1780 | 2950 | 18650 |
| à | 290 | 1150 | 120 | 50 | 1750 | 2 | 15 | 900 | 2100 | 8000 |
| | 292 | 1150 | 200 | 60 | 2500 | 3 | 38 | 1350 | 2100 | 11615 |
| | 294 | 1150 | 300 | 60 | 3500 | 4 | 64 | 1750 | 2100 | 14220 |
| p l a t | 296 | 1150 | 400 | 100 | 4600 | 5 | 112 | 1750 | 2100 | 16000 |
| | 298 | 1150 | 500 | 120 | 7000 | 5 | 125 | 1500 | 2100 | 17000 |
| | 299 | 1150 | 600 | 120 | 7000 | 7 | 168 | 1900 | 2100 | 17000 |

Nos gammes font régulièrement l'objet d'évolutions techniques. Leurs caractéristiques sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.

Fonte: Heat Concept (2022).

ANEXO N - CALDEIRA



Caldeira FAM

Lenha, cavaco, briquetes, bagaço e outros combustíveis sólidos

- Baixa taxa de evaporação
- Controle de nível de água contínuo, proporcionando menor variação na pressão do vapor
- Rápida resposta às variações de carga, devido aos controles automáticos de vazão de gases, pressão de fornalha e nível contínuo
- Alta eficiência térmica, devido à ausência de refratários, pré-aquecimento do ar de combustão e controles operacionais automáticos
- Alta confiabilidade operacional
- Fossos roletes nas bases para absorver dilatações térmicas
- A parte de pressão é tratada termicamente, de acordo com código ASME, para alívio das tensões geradas no processo de soldagem, e também é radiografada, resultando em longa vida útil do corpo
- Controle de pressão da fornalha via controlador eletrônico e inversores de frequência nos motores do ventilador e exaustor
- Devido à sua forma construtiva, as caldeiras FAM dispõem fosso com refratário, o que representa menores custos de instalação e manutenção
- Já vem praticamente montada da fábrica, reduzindo sensivelmente o tempo de instalação e, consequentemente, seu custo
- É fornecida com pré-aquecedor de ar da Alfa Laval Aalborg tipo multi tubular com a finalidade de reduzir a temperatura dos gases de combustão para aumentar a eficiência da caldeira, pré-aquecimento do ar de combustão, com melhoria global do sistema

O grupo dinamarquês Alfa Laval Aalborg é líder mundial no mercado de caldeiras navais e está presente em 13 países. Há quase um século domina a tecnologia de fabricação de caldeiras para os mais diversos fins. Localizada em Petrópolis - RJ, a unidade industrial da Alfa Laval Aalborg possui 17 mil m² de área construída, numa área total de 190 mil m². A Alfa Laval Aalborg Brasil é líder no mercado brasileiro de caldeiras e já entregou mais de 11 mil unidades para Brasil e demais países de América do Sul. A Alfa Laval Aalborg possui uma ampla linha de equipamentos para recuperação de calor e geração de vapor e aquecimento, aplicáveis tanto a empresas industriais quanto a navios e plataformas de petróleo.

MISSION™ 3-Pass

- Caldeira flamotubular para queima de óleo, gás e mista
- Traseira úmida (wet back), com 3 passagens de gases
- Baixo nível de emissões (NO_x, particulados), devido à otimização do queimador com a fornalha
- Rendimentos superiores à 96% com uso de economizador
- Economizadores disponíveis para versão a gás
- Fácil manutenção devido às portas de acesso e número reduzido de tubos
- Pode ser fornecida com diversos tipos de automação
- Fornecida como unidade compacta e completa facilitando sua instalação

| Modelo | Capacidade nominal de produção de vapor a 20°C (T _{sat}) (t/h) | Eficiência (%) | Consumo Óleo IA (Kg/h) | Consumo Gás Natural (Nm ³ /h) | Consumo GLP (Kg/h) | Consumo Diesel (Kg/h) | Dimensões (mm) | | | | | Peso (ton) | |
|----------|--|----------------|------------------------|--|--------------------|-----------------------|----------------|-------|-------|---------|-------|------------------|--|
| | | | | | | | C | L | A | Chaminé | Valva | Q _{top} | |
| MSP-2.0 | 2 | 90.2% | 152 | 150 | 144 | 144 | 5,655 | 2,540 | 2,523 | 340 | 9.0 | 13.8 | |
| MSP-2.5 | 2.5 | 90.2% | 189 | 197 | 182 | 179 | 6,847 | 2,960 | 2,829 | 340 | 9.5 | 15.3 | |
| MSP-3.2 | 3.2 | 90.2% | 241 | 252 | 237 | 238 | 8,044 | 2,860 | 2,734 | 340 | 10.5 | 17.3 | |
| MSP-4.0 | 4 | 90.2% | 300 | 314 | 298 | 295 | 9,412 | 2,900 | 2,769 | 500 | 12.5 | 20.7 | |
| MSP-5.0 | 5 | 90.2% | 378 | 395 | 375 | 378 | 10,962 | 2,970 | 2,822 | 500 | 14.5 | 24.3 | |
| MSP-6.5 | 6.5 | 90.2% | 491 | 512 | 491 | 488 | 12,836 | 3,050 | 2,880 | 500 | 16.5 | 28.2 | |
| MSP-8.0 | 8 | 90.2% | 606 | 632 | 603 | 605 | 14,939 | 3,140 | 2,940 | 600 | 21.0 | 35.3 | |
| MSP-10 | 10 | 90.2% | 755 | 789 | 748 | 746 | 17,294 | 3,210 | 2,985 | 600 | 26.0 | 48.2 | |
| MSP-12 | 12 | 90.2% | 925 | 964 | 914 | 907 | 19,922 | 3,280 | 3,060 | 600 | 31.0 | 52.4 | |
| MSP-15 | 15 | 90.2% | 1,138 | 1,195 | 1,115 | 1,106 | 22,850 | 3,360 | 3,150 | 750 | 35.5 | 62.8 | |
| MSP-17 | 17 | 90.2% | 1,270 | 1,328 | 1,230 | 1,222 | 25,100 | 3,430 | 3,230 | 750 | 42.0 | 74.7 | |
| MSP-20 F | 20 | 90.2% | 1,492 | 1,558 | 1,442 | 1,432 | 28,500 | 3,500 | 3,300 | 1,160 | 45.8 | 82.2 | |
| MSP-20 | 20 | 90.2% | 1,501 | 1,567 | 1,458 | 1,448 | 28,500 | 3,580 | 3,380 | 1,160 | 50.0 | 88.1 | |
| MSP-24 | 24 | 90.2% | 1,801 | 1,880 | 1,746 | 1,736 | 33,400 | 3,660 | 3,460 | 1,160 | 53.0 | 96.4 | |
| MSP-30 | 30 | 90.2% | 2,246 | 2,345 | 2,192 | 2,182 | 40,200 | 3,740 | 3,540 | 1,500 | 66.0 | 116.7 | |
| MSP-34 | 34 | 90.2% | 2,534 | 2,646 | 2,475 | 2,465 | 45,800 | 3,820 | 3,620 | 1,500 | 77.0 | 137.8 | |

* Dados para caldeiras com PMA 170 psig. Eficiência e consumo de combustível, considerando gás natural (6.065 Kcal/Nm³), óleo 35.700 Kcal/Kg, diesel (10.502 Kcal/Kg), GLP (11.025 Kcal/Kg).

| Modelo | FAM 6 | FAM 10 | FAM 12 | FAM 15 | FAM 17 | FAM 20 | FAM 22 | FAM 24 |
|---|-----------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Características técnicas nominais | | | | | | | | |
| Produção de vapor (água a 20°C) | kg/h | 8.000 | 10.000 | 12.000 | 15.000 | 17.000 | 20.000 | 24.000 |
| Produção de vapor (água a 90°C) | kg/h | 8.800 | 11.000 | 13.200 | 16.500 | 18.700 | 22.000 | 26.400 |
| Produção de vapor (água a 105°C) | kg/h | 9.200 | 11.500 | 13.800 | 17.250 | 19.500 | 23.000 | 27.600 |
| Capacidade Térmica | kcal/h | 5.153.302 | 6.441.628 | 7.729.953 | 9.662.442 | 10.950.767 | 12.883.256 | 14.171.581 |
| Pressão de operação | psig | 153 | 153 | 153 | 153 | 153 | 153 | 153 |
| Rendimento (lenha em toras/cavaco) | % | 87/88 | 87/88 | 87/88 | 87/88 | 87/88 | 87/88 | 87/88 |
| Consumo de lenha (PCI=2.750 kcal/kg) | kg/h | 2.118 | 2.652 | 3.231 | 4.039 | 4.577 | 5.385 | 6.462 |
| Consumo de cavaco (PCI=2.750 kcal/kg) | kg/h | 2.130 | 2.662 | 3.244 | 3.993 | 4.535 | 5.324 | 6.400 |
| Temperatura de saída dos gases | °C | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Tor de CO ₂ nos gases (lenha/cavaco) | % | 13,0/15,0 | 13,0/15,0 | 13,0/15,0 | 13,0/15,0 | 13,0/15,0 | 13,0/15,0 | 13,0/15,0 |
| Superfície de aquecimento | m ² | 278 | 340 | 422 | 533 | 590 | 698 | 848 |
| Taxa de evaporação | kg/t/h ₂ O | 29 | 29 | 29 | 30 | 30 | 29 | 27 |
| Volume de água em operação | m ³ | 14,2 | 17,5 | 20,7 | 24,2 | 25,2 | 29,6 | 35,9 |
| Volume de água com a caldeira cheia | m ³ | 16,3 | 20,3 | 23,6 | 27,5 | 29,6 | 34,3 | 38,5 |
| Dimensões principais | | | | | | | | |
| Comprimento | mm | 5.960 | 6.200 | 7.000 | 7.100 | 7.500 | 7.900 | 8.000 |
| Largura | mm | 4.000 | 4.100 | 4.400 | 4.800 | 4.800 | 5.000 | 5.000 |
| Altura | mm | 4.100 | 4.400 | 4.600 | 4.700 | 4.700 | 4.800 | 4.800 |
| Diâmetro X Altura da chaminé | mm x m | 505x12,0 | 625x12,0 | 1.160x12,0 | 1.160x12,0 | 1.500x12,0 | 1.500x12,0 | 1.500x12,0 |
| Peso vazio | ton | 16,0 | 20,4 | 24,3 | 28,0 | 30,7 | 34,4 | 36,4 |
| Peso em operação | ton | 30,8 | 37,8 | 45,0 | 52,2 | 55,9 | 64,0 | 67,6 |

* Dados para caldeiras com PMA 170 psig. Eficiência e consumo de combustível, considerando lenha/cavaco com teor mínimo de umidade de 30% e pressão de operação 153 psig. Os equipamentos acima também estão disponíveis para pressões até 300 psig. Dados acima sujeitos a alterações.

Fonte: Alfa Laval (2022).

ANEXO O – FATORES PARA ESTIMAÇÃO DO INVESTIMENTO FIXO

Table 6.4. Typical Factors for Estimation of Project Fixed Capital Cost

| Item | Fluids | Process Type Fluids–Solids | Solids |
|---|--------|-------------------------------|--------|
| 1. Major equipment, total purchase cost | C_e | C_e | C_e |
| f_{er} Equipment erection | 0.3 | 0.5 | 0.6 |
| f_p Piping | 0.8 | 0.6 | 0.2 |
| f_i Instrumentation and control | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| f_{el} Electrical | 0.2 | 0.2 | 0.15 |
| f_c Civil | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| f_s Structures and buildings | 0.2 | 0.2 | 0.1 |
| f_l Lagging and paint | 0.1 | 0.1 | 0.05 |
| ISBL cost $C = \Sigma C_e \times$ | 3.3 | 3.2 | 2.5 |
| Offsites (OS) | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| Design and Engineering (D&E) | 0.3 | 0.25 | 0.2 |
| Contingency (X) | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Total fixed capital cost $C_{FC} = C(1 + OS)(1 + DE + X)$ | | | |
| $= C \times$ | 1.82 | 1.89 | 1.82 |
| $= \Sigma C_e \times$ | 6.00 | 6.05 | 4.55 |

Fonte: Towler & Sinnott (2013).

ANEXO P – FATOR DE CUSTO DE MATERIAIS**Table 6.5.** Materials Cost Factors, f_m Relative to Plain Carbon Steel

| Material | f_m |
|---------------------|-------------------------|
| Carbon steel | 1.0 |
| Aluminum and bronze | 1.07 |
| Cast steel | 1.1 |
| 304 stainless steel | 1.3 |
| 316 stainless steel | 1.3 |
| 321 stainless steel | 1.5 |
| Hastelloy C | 1.55 |
| Monel | 1.65 |
| Nickel and Inconel | 1.7 |

Fonte: Towler & Sinnott (2013).

ANEXO Q – PARÂMETROS DE CUSTOS COM EQUIPAMENTOS

Table 6.6. Purchased Equipment Cost for Common Plant Equipment

| Equipment | Units for Size, S | S_{Lower} | S_{Upper} | a | b | n | Note |
|--|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| <i>Agitators & mixers</i> | | | | | | | |
| Propeller | driver power, kW | 5.0 | 75.0 | 4,300 | 1,920 | 0.8 | |
| Spiral ribbon mixer | driver power, kW | 5.0 | 35.0 | 11,000 | 420 | 1.5 | |
| Static mixer | Liters/s | 1.0 | 50.0 | 780 | 62 | 0.8 | |
| <i>Boilers</i> | | | | | | | |
| Packaged, 15 to 40 bar | kg/h steam | 5,000.0 | 200,000.0 | 4,600 | 62 | 0.8 | |
| Field erected, 10 to 70 bar | kg/h steam | 20,000.0 | 800,000.0 | -90,000 | 93 | 0.8 | |
| <i>Centrifuges</i> | | | | | | | |
| High-speed disk | diameter, m | 0.26 | 0.49 | 63,000 | 260,000 | 0.8 | |
| Atmospheric suspended basket | power, kW | 2.0 | 20.0 | 37,000 | 1,200 | 1.2 | |
| <i>Compressors</i> | | | | | | | |
| Blower | m ³ /h | 200.0 | 5,000.0 | 4,200 | 27 | 0.8 | |
| Centrifugal | driver power, kW | 132.0 | 29,000.0 | 8,400 | 3,100 | 0.6 | |
| Reciprocating | driver power, kW | 100.0 | 16,000.0 | 240,000 | 1.33 | 1.5 | |
| <i>Conveyors</i> | | | | | | | |
| Belt, 0.5 m wide | length, m | 10.0 | 500.0 | 21,000 | 340 | 1.0 | |
| Belt, 1.0 m wide | length, m | 10.0 | 500.0 | 23,000 | 575 | 1.0 | |
| Bucket elevator, 0.5 m bucket | height, m | 10.0 | 35.0 | 14,000 | 1,450 | 1.0 | |
| <i>Crushers</i> | | | | | | | |
| Reversible hammer mill | tonne/h | 20.0 | 400.0 | 400 | 9,900 | 0.5 | |
| Pulverizers | kg/h | 200.0 | 4,000.0 | 3,000 | 390 | 0.5 | |
| <i>Crystallizers</i> | | | | | | | |
| Scraped surface crystallizer | length, m | 7.0 | 280.0 | 41,000 | 40,000 | 0.7 | |
| <i>Distillation columns</i> | | | | | | | |
| See pressure vessels, packing, and trays | | | | | | | |
| <i>Dryers</i> | | | | | | | |
| Direct contact rotary | area, m ² | 11.0 | 180.0 | -7,400 | 4,350 | 0.9 | 1 |
| Pan | area, m ² | 1.5 | 15.0 | -5,300 | 24,000 | 0.5 | 2 |
| Spray dryer | evap rate kg/h | 400.0 | 4,000.0 | 190,000 | 180 | 0.9 | |
| <i>Evaporators</i> | | | | | | | |
| Vertical tube | area, m ² | 11.0 | 640.0 | 17,000 | 13,500 | 0.6 | |
| Agitated falling film | area, m ² | 0.5 | 12.0 | 29,000 | 53,500 | 0.6 | |

(continued)

Table 6.6. Purchased Equipment Cost for Common Plant Equipment—Cont'd

| Equipment | Units for Size, S | S_{Lower} | S_{Upper} | a | b | n | Note |
|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|----------|----------|-------------|
| <i>Exchangers</i> | | | | | | | |
| U-tube shell and tube | area, m ² | 10.0 | 1,000.0 | 10,000 | 88 | 1.0 | |
| Floating head shell and tube | area, m ² | 10.0 | 1,000.0 | 11,000 | 115 | 1.0 | |
| Double pipe | area, m ² | 1.0 | 80.0 | 500 | 1,100 | 1.0 | |
| Thermosyphon reboiler | area, m ² | 10.0 | 500.0 | 13,000 | 95 | 1.0 | |
| U-tube Kettle reboiler | area, m ² | 10.0 | 500.0 | 14,000 | 83 | 1.0 | |
| Plate and frame | area, m ² | 1.0 | 180.0 | 1,100 | 850 | 0.4 | 3 |
| <i>Filters</i> | | | | | | | |
| Plate and frame | capacity, m ³ | 0.4 | 1.4 | 76,000 | 54,000 | 0.5 | |
| Vacuum drum | area, m ² | 10.0 | 180.0 | -45,000 | 56,000 | 0.3 | |
| <i>Furnaces</i> | | | | | | | |
| Cylindrical | duty, MW | 0.2 | 60.0 | 53,000 | 69,000 | 0.8 | |
| Box | duty, MW | 30.0 | 120.0 | 7,000 | 71,000 | 0.8 | |
| <i>Packings</i> | | | | | | | |
| 304 ss Raschig rings | m ³ | | | 0 | 3,700 | 1.0 | |
| Ceramic intalox saddles | m ³ | | | 0 | 930 | 1.0 | |
| 304 ss Pall rings | m ³ | | | 0 | 4,000 | 1.0 | |
| PVC structured packing | m ³ | | | 0 | 250 | 1.0 | |
| 304 ss structured packing | m ³ | | | 0 | 3,200 | 1.0 | 4 |
| <i>Pressure vessels</i> | | | | | | | |
| Vertical, cs | shell mass, kg | 150.0 | 69,200.0 | -400 | 230 | 0.6 | 5 |
| Horizontal, cs | shell mass, kg | 250.0 | 69,200.0 | -2,500 | 200 | 0.6 | |
| Vertical, 304 ss | shell mass, kg | 90.0 | 124,200.0 | -10,000 | 600 | 0.6 | 5 |
| Horizontal, 304 ss | shell mass, kg | 170.0 | 114,000.0 | -15,000 | 560 | 0.6 | |
| <i>Pumps and drivers</i> | | | | | | | |
| Single-stage centrifugal | flow Liters/s | 0.2 | 500.0 | 3,300 | 48 | 1.2 | |
| Explosion-proof motor | power, kW | 1.0 | 2,500.0 | 920 | 600 | 0.7 | |
| Condensing steam turbine | power, kW | 100.0 | 20,000.0 | -19,000 | 820 | 0.8 | |
| <i>Reactors</i> | | | | | | | |
| Jacketed, agitated | volume, m ³ | 0.5 | 100.0 | 14,000 | 15,400 | 0.7 | |
| Jacketed, agitated, glass-lined | volume, m ³ | 0.5 | 25.0 | 13,000 | 34,000 | 0.5 | |
| <i>Tanks</i> | | | | | | | |
| Floating roof | capacity, m ³ | 100.0 | 10,000.0 | 53,000 | 2,400 | 0.6 | |
| Cone roof | capacity, m ³ | 10.0 | 4,000.0 | 5,700 | 700 | 0.7 | |
| <i>Trays</i> | | | | | | | |
| Sieve trays | diameter, m | 0.5 | 5.0 | 100 | 120 | 2.0 | 6 |
| Valve trays | diameter, m | 0.5 | 5.0 | 130 | 146 | 2.0 | 6 |
| Bubble cap trays | diameter, m | 0.5 | 5.0 | 200 | 240 | 2.0 | 6 |
| <i>Utilities</i> | | | | | | | |
| Cooling tower & pumps | flow liters/s | 100.0 | 10,000.0 | 61,000 | 650 | 0.9 | 7 |
| Packaged mechanical refrigerator | evaporator duty, kW | 50.0 | 1,500.0 | 4,900 | 720 | 0.9 | |
| Water ion exchange plant | flow m ³ /h | 1.0 | 50.0 | 6,200 | 4,300 | 0.7 | |

Fonte: Towler & Sinnott (2013).

ANEXO A.A – TRANSPORTADORES HELICOIDAIS

Figura A.1 - Propriedades para transportadores helicoidais comerciais

| Material Class Code | | Degree of Trough Loading | Screw Dia. (in) | Maximum RPM* | Capacity, ft ³ /hr | |
|---------------------|------|---|--|--------------|-------------------------------|------------|
| | | | | | At Max. RPM | At One RPM |
| A-15 | |  <p>45%</p> | 6 | 165 | 368 | 2,23 |
| A-25 | | | 9 | 155 | 1.270 | 8,2 |
| B-15 | | | 12 | 145 | 2.820 | 19,4 |
| B-25 | | | 14 | 140 | 4.370 | 31,2 |
| C-15 | | | 16 | 130 | 6.060 | 46,7 |
| C-25 | | | 18 | 120 | 8.120 | 67,6 |
| | | | 20 | 110 | 10.300 | 93,7 |
| | | | 24 | 100 | 16.400 | 164,0 |
| | | | 30 | 90 | 28.795 | 320,0 |
| | | 36 | 75 | 41.490 | 553,2 | |
| A-35 | E-15 |  <p>30% A</p> | 6 | 120 | 180 | 1,49 |
| A-45 | E-25 | | 9 | 100 | 545 | 5,45 |
| B-35 | E-35 | | 12 | 90 | 1.160 | 12,9 |
| B-45 | E-45 | | 14 | 85 | 1.770 | 20,8 |
| C-35 | | | 16 | 80 | 2.500 | 31,2 |
| C-45 | | | 18 | 75 | 3.380 | 45,0 |
| D-15 | | | 20 | 70 | 4.370 | 62,5 |
| D-25 | | | 24 | 65 | 7.100 | 109,0 |
| D-35 | | | 30 | 60 | 12.800 | 213,3 |
| D-45 | | | 36 | 50 | 18.440 | 368,8 |
| A-16 | C-36 | |  <p>30% B</p> | 6 | 60 | 90 |
| A-26 | C-46 | 9 | | 55 | 300 | 5,45 |
| A-36 | D-16 | 12 | | 50 | 645 | 12,90 |
| A-46 | D-26 | 14 | | 50 | 1.040 | 20,80 |
| B-16 | D-36 | 16 | | 45 | 1.400 | 31,520 |
| B-26 | D-46 | 18 | | 45 | 2.025 | 45,00 |
| B-36 | E-16 | 20 | | 40 | 2.500 | 62,50 |
| B-46 | E-26 | 24 | | 40 | 4.360 | 109,00 |
| C-16 | E-36 | 30 | | 35 | 7.465 | 213,30 |
| C-26 | E-46 | 36 | | 30 | 11.064 | 368,80 |
| A-17 | C-37 |  <p>15%</p> | | 6 | 60 | 45 |
| A-27 | C-47 | | 9 | 55 | 150 | 2,72 |
| A-37 | D-17 | | 12 | 50 | 325 | 6,46 |
| A-47 | D-27 | | 14 | 50 | 520 | 10,4 |
| B-17 | D-37 | | 16 | 45 | 700 | 15,6 |
| B-27 | D-47 | | 18 | 45 | 1.010 | 22,5 |
| B-37 | E-17 | | 20 | 40 | 1.250 | 31,2 |
| B-47 | E-27 | | 24 | 40 | 2.180 | 54,6 |
| C-17 | E-37 | | 30 | 35 | 3.728 | 106,5 |
| C-27 | E-47 | | 36 | 30 | 5.532 | 184,4 |

Fonte: CEMA (2014).

Figura A.2 - Propriedades de Fator de Rolamento para transportador helicoidal

| Component Group | Bearing Type | F_b |
|-----------------|---|-------|
| Group A | Ball | 1.0 |
| Group B | Babbit Bronze Graphite bronze * Canvas base phenolic * Oil impregnated bronze * Oil impregnated wood * | 1.7 |
| Group C | Plastic * Nylon * PTFE* | 2.0 |
| Group D | Chilled hard iron * Hardened alloy sleeve * | 4.4 |

Fonte: CEMA (2019).

Figura A.3 - Propriedades de Fator de diâmetro para transportadores helicoidais

| Screw Diameter (in) | F_d | Screw Diameter (in) | F_d |
|---------------------|-------|---------------------|-------|
| 6 | 18 | 18 | 135 |
| 9 | 31 | 20 | 165 |
| 10 | 37 | 24 | 235 |
| 12 | 55 | 30 | 365 |
| 14 | 78 | 36 | 540 |
| 16 | 106 | | |

Fonte: CEMA (2019).

Figura A.4 - Propriedades de Fator de Carga para transportadores helicoidais

| Type of Flight | Conveyor Loading | | | |
|---------------------|------------------|------|------|------|
| | 15% | 30% | 45% | 95% |
| Standard | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Cut Flight | 1.10 | 1.15 | 1.20 | 1.30 |
| Cut & Folded Flight | N.R. * | 1.50 | 1.70 | 2.30 |
| Ribbon Flight | 1.00 | 1.14 | 1.20 | - |

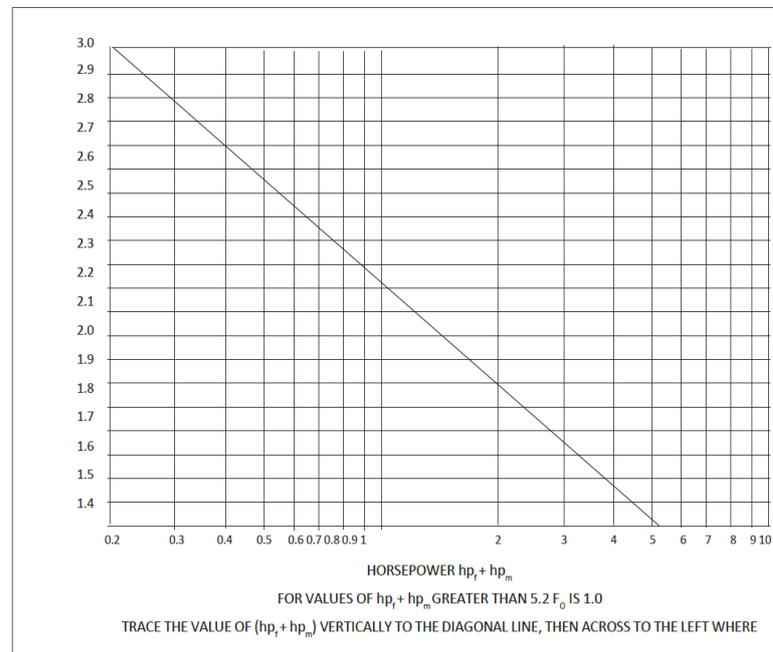
Fonte: CEMA (2019).

Figura A.5 - Propriedades de Fator de Palhetas para transportadores helicoidais

| Factor F_p | Standard paddles per pitch set at 45° reverse pitch | | | | |
|--------------|---|------|------|------|------|
| | None | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | 1.00 | 1.29 | 1.58 | 1.87 | 2.16 |

Fonte: CEMA (2019).

Figura A.6 - Propriedades de Fator de Sobrecarga para transportadores helicoidais



Fonte: CEMA (2019).

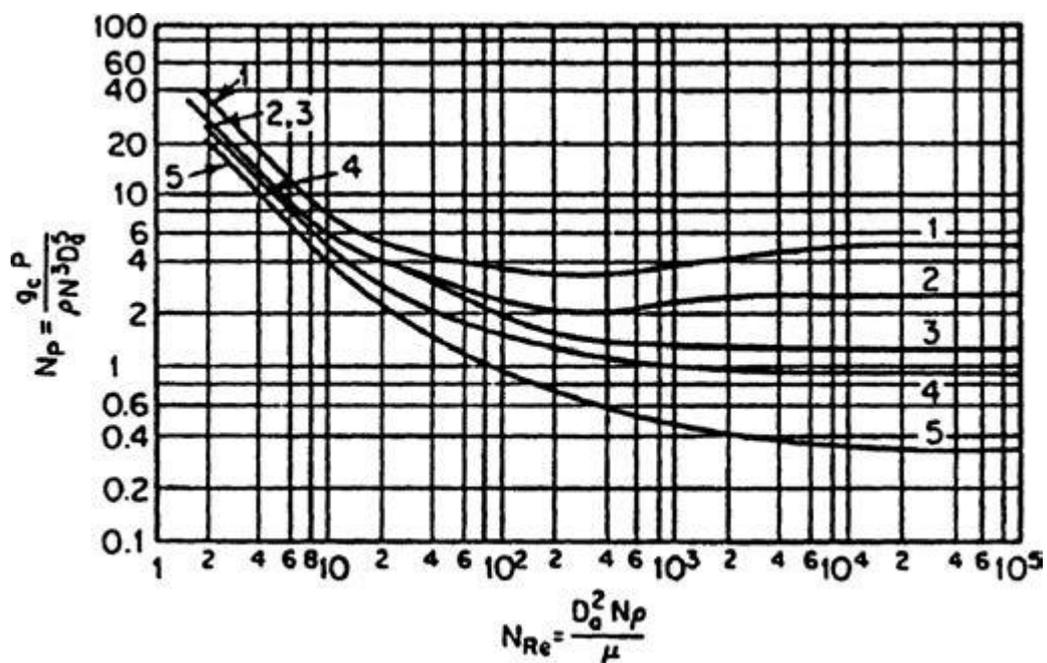
Figura A.7 - Propriedades de eficiência do motor para transportadores helicoidais

| Type of Speed Reduction Mechanism | Approximate Efficiencies |
|--|---------------------------------|
| V-Belts and Sheaves | 0.94 |
| Precision Roller Chain on Cut Tooth Sprockets, Open Guard | 0.93 |
| Precision Roller Chain on Cut Tooth Sprockets, Oil Tight Casing | 0.94 |
| Single Reduction Helical or Herringbone Enclosed Gear Reducer or Gearmotor | 0.95 |
| Double Reduction Helical or Herringbone Enclosed Gear Reducer or Gearmotor | 0.94 |
| Triple Reduction Helical or Herringbone Enclosed Gear Reducer or Gearmotor | 0.93 |
| Single Reduction Helical Gear, Enclosed Shaft Mounted Speed Reducers and Screw Conveyor Drives | 0.95 |
| Double Reduction Helical Gear, Enclosed Shaft Mounted Speed Reducers and Screw Conveyor Drives | 0.94 |
| Low Ratio (up to 20:1 range) Enclosed Worm Gear Speed Reducers | 0.90 |
| Medium Ratio (20:1 to 60:1 range) Enclosed Worm Gear Speed Reducers | 0.70 |
| High Ratio (over 60:1 to 100:1 range) Enclosed Worm Gear Speed Reducers | 0.50 |
| Cut Tooth, Miter or Bevel Gear, Enclosed Countershaft Box Ends | 0.93 |
| Cut Tooth Spur Gears, Enclosed, For Each Reduction | 0.93 |
| Cut Tooth Miter or Bevel Gear Open Type Countershaft Box Ends | 0.90 |
| Cut Tooth Spur Gears, Open For Each Reduction | 0.90 |
| Cast Tooth Spur Gears, Open For Each Reduction | 0.85 |

Fonte: CEMA (2019).

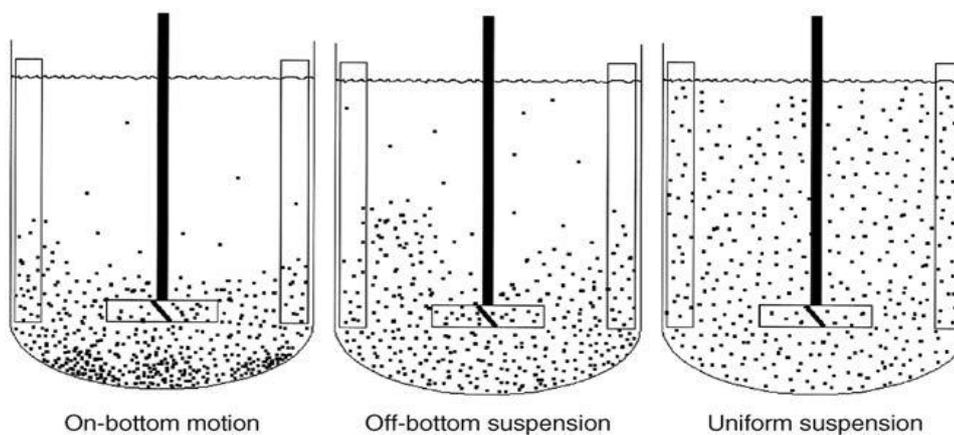
ANEXO A.B – EXTRATORES

Figura A.1 - Gráfico do número de potência para diferentes impelidores



Fonte: Green & Southard (2019).

Figura A.2 - Sistema de suspensão de sólidos em agitação



Fonte: Green & Southard (2019).

Figura A.3 - Valores de S para a correlação de Zwietering

| Impeller | D/T | C/T | S | P_{js}/P_{HE-3} |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|
| A310 ($NP = 0.3$) | 0.417 | 0.250 | 6.90 | 1.017 |
| | 0.500 | 0.250 | 7.10 | 1.712 |
| | 0.520 | 0.170 | 6.39 | 1.373 |
| | 0.520 | 0.250 | 7.03 | 1.831 |
| 45/PBT ($NP = 1.3$) | 0.520 | 0.330 | 7.71 | 2.424 |
| | 0.333 | 0.167 | 4.87 | 0.881 |
| | 0.333 | 0.250 | 5.58 | 1.339 |
| | 0.333 | 0.333 | 6.39 | 2.000 |
| | 0.500 | 0.167 | 2.72 | 0.424 |
| | 0.500 | 0.250 | 2.77 | 0.441 |
| | 0.500 | 0.333 | 3.40 | 0.814 |
| HE-3 ($NP = 0.35$) | 0.714 | 0.125 | 4.50 | 4.542 |
| | 0.714 | 0.250 | 5.40 | 7.847 |
| | 0.350 | 0.170 | 7.07 | 0.831 |
| | 0.350 | 0.250 | 7.39 | 0.949 |
| | 0.350 | 0.330 | 8.17 | 1.271 |
| | 0.390 | 0.170 | 6.60 | 0.881 |
| | 0.390 | 0.250 | 6.88 | 1.000 |
| | 0.390 | 0.330 | 7.82 | 1.458 |
| | 0.440 | 0.170 | 6.49 | 1.119 |
| | 0.440 | 0.250 | 6.64 | 1.203 |
| | 0.440 | 0.330 | 7.23 | 1.542 |
| | 0.470 | 0.170 | 6.26 | 1.186 |
| | 0.470 | 0.250 | 6.25 | 1.169 |
| | 0.470 | 0.330 | 6.81 | 1.525 |
| PBT Down 6 Blade ($NP = 1.7$) | 0.520 | 0.170 | 6.89 | 2.017 |
| | 0.520 | 0.250 | 6.88 | 2.000 |
| | 0.520 | 0.330 | 7.72 | 2.831 |
| | 0.380 | 0.170 | 4.24 | 1.051 |
| | 0.380 | 0.250 | 3.99 | 0.881 |
| | 0.380 | 0.330 | 4.78 | 1.508 |
| | 0.520 | 0.170 | 5.39 | 4.695 |
| PBT Up 6 Blade ($NP = 1.7$) | 0.520 | 0.250 | 5.72 | 5.610 |
| | 0.520 | 0.330 | 6.52 | 8.305 |
| | 0.520 | 0.170 | 5.14 | 4.068 |
| | 0.520 | 0.250 | 5.19 | 4.186 |
| RT (Rushton) ($NP = 5.5$) | 0.520 | 0.330 | 5.30 | 4.458 |
| | 0.250 | 0.143 | 8.70 | 8.288 |
| | 0.250 | 0.167 | 9.20 | 10.949 |
| | 0.250 | 0.200 | 9.90 | 13.644 |
| | 0.330 | 0.170 | 5.42 | 4.610 |
| | 0.330 | 0.250 | 6.96 | 9.729 |
| | 0.330 | 0.330 | 8.37 | 16.949 |
| | 0.333 | 0.143 | 5.80 | 4.966 |
| | 0.333 | 0.167 | 6.10 | 6.593 |
| | 0.333 | 0.200 | 6.60 | 8.525 |
| | 0.500 | 0.143 | 3.20 | 2.305 |
| | 0.500 | 0.167 | 3.40 | 3.203 |
| | 0.500 | 0.170 | 4.34 | 6.542 |
| | 0.500 | 0.200 | 3.60 | 3.881 |
| 0.500 | 0.250 | 4.44 | 7.000 | |
| Intermig Single ($NP = 0.61$) | 0.500 | 0.330 | 4.69 | 8.254 |
| | 0.600 | 0.170 | 6.78 | 4.763 |
| | 0.600 | 0.250 | 6.85 | 4.898 |
| Intermig Double ($NP = 0.74$) | 0.600 | 0.330 | 7.55 | 6.559 |
| | 0.600 | 0.170 | 7.44 | 6.271 |
| | 0.600 | 0.250 | 8.30 | 8.729 |
| | 0.600 | 0.330 | 8.72 | 10.119 |

Fonte: Green & Southard (2019).

Figura A.4 - Relação da velocidade de sedimentação com a dificuldade da suspensão total dos sólidos

| Suspension Criteria | Speed Ratio | Power Ratio at Settling Velocity (ft/min) | | |
|--------------------------------|-------------|--|-----------------|-----------------|
| | | 16–60 Difficult | 4–8 Moderate | 0.1–0.6 Easy |
| On-bottom motion | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Complete off-bottom suspension | 1.7 | 5 | 3 | 2 |
| Total uniformity | 2.9 | 25 | 9 | 4 |

Fonte: PENNEY et al. (2004).

ANEXO A.C – CENTRÍFUGA

Figura A.1- Tabelas de características típicas para diferentes modelos de centrífuga

| Type | Bowl diameter | Speed, r/min | Maximum centrifugal force × gravity | Throughput | | Typical motor size, hp |
|------------------|---------------|--------------|-------------------------------------|-----------------|-------------------|------------------------|
| | | | | Liquid, gal/min | Solids, tons/h | |
| Tubular | 1.75 | 50,000* | 62,400 | 0.05–0.25 | | * |
| | 4.125 | 15,000 | 13,200 | 0.1–10 | | 2 |
| | 5 | 15,000 | 15,900 | 0.2–20 | | 3 |
| Disc | 7 | 12,000 | 14,300 | 0.1–10 | | ⅓ |
| | 13 | 7500 | 10,400 | 5–50 | | 6 |
| | 24 | 4000 | 5500 | 20–200 | | 7½ |
| Nozzle discharge | 10 | 10,000 | 14,200 | 10–40 | 0.1–1 | 20 |
| | 16 | 6250 | 8900 | 25–150 | 0.4–4 | 40 |
| | 27 | 4200 | 6750 | 40–400 | 1–11 | 125 |
| | 30 | 3300 | 4600 | 40–400 | 1–11 | 125 |
| Scroll conveyor | 6 | 8000 | 5500 | To 20 | 0.03–0.25 | 5 |
| | 14 | 4000 | 3180 | To 75 | 0.5–1.5 | 20 |
| | 18 | 3500 | 3130 | To 100 | 1–3 | 50 |
| | 24 | 3000 | 3070 | To 250 | 2.5–12 | 125 |
| | 30 | 2700 | 3105 | To 350 | 3–15 | 200 |
| | 36 | 2250 | 2590 | To 600 | 10–25 | 300 |
| | 44 | 1600 | 1600 | To 700 | 10–25 | 400 |
| | 54 | 1000 | 770 | To 750 | 20–60 | 250 |
| Knife discharge | 20 | 1800 | 920 | † | 1.0 [‡] | 20 |
| | 36 | 1200 | 740 | † | 4.1 [‡] | 30 |
| | 68 | 900 | 780 | † | 20.5 [‡] | 40 |

Fonte: Green & Southard (2019).

ANEXO A.D – SECADOR DE ESTEIRA

Figura A.1 - Valores de calor específico para o DMC

Table 9. Standard Molar Thermodynamic Functions (in $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$) of Dimethyl Carbonate, Diethyl Carbonate, and Dipropyl Carbonate in the Ideal Gaseous State at $p = 10^5$ Pa Using B3LYP-D3/6-311+G(d,p) Calculations^a

| T/K | dimethyl carbonate | | diethyl carbonate | | dipropyl carbonate | |
|--------|--------------------|------------|-------------------|------------|--------------------|------------|
| | $C_{p,m}^{g0}$ | S_m^{g0} | $C_{p,m}^{g0}$ | S_m^{g0} | $C_{p,m}^{g0}$ | S_m^{g0} |
| 100 | 65.0 | 253.2 | 79.1 | 300.1 | 102.7 | 346.8 |
| 150 | 74.2 | 281.4 | 96.4 | 335.6 | 123.2 | 392.5 |
| 200 | 81.5 | 303.8 | 113.0 | 365.5 | 143.8 | 430.8 |
| 250 | 90.1 | 322.9 | 131.0 | 392.6 | 167.0 | 465.4 |
| 273.15 | 94.6 | 331.1 | 139.8 | 404.6 | 178.6 | 480.7 |
| 298.15 | 99.8 | 339.6 | 149.5 | 417.2 | 191.5 | 497.0 |
| 300 | 100.2 | 340.2 | 150.2 | 418.2 | 192.5 | 498.1 |
| 400 | 122.3 | 372.2 | 188.2 | 466.7 | 243.7 | 560.7 |
| 500 | 143.1 | 401.9 | 221.4 | 512.3 | 289.1 | 620.1 |
| 600 | 160.8 | 429.8 | 248.7 | 555.2 | 327.0 | 676.3 |
| 700 | 175.7 | 456.0 | 271.2 | 595.3 | 358.5 | 729.1 |
| 800 | 188.1 | 480.4 | 290.1 | 632.8 | 385.0 | 778.8 |
| 900 | 198.7 | 503.4 | 306.1 | 667.9 | 407.6 | 825.5 |
| 1000 | 207.8 | 525.0 | 319.8 | 700.9 | 426.9 | 869.4 |

Fonte: Pokorný et al. (2017).

Figura A.2 - Valor de entalpia de condensação para o DMC

| reference | T_{fm}/K | $\Delta_c H_m/kJ \cdot mol^{-1}$ | T_i^a/K | $\Delta C_p^b/J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ |
|------------------------------|------------|----------------------------------|-----------|--|
| | | Dimethyl Carbonate | | |
| Biltz et al. ²⁸ | 267.55 | | | |
| Ding ²⁰ | 278.20 | 11.58 | 220.10 | 37.5 ^c |
| Wachter et al. ²⁹ | 277.06 | | | |
| this work ^d | 277.57 | 11.9 | 219.78 | 47.5 |
| | | Diethyl Carbonate | | |
| Ding ²⁰ | 198.20 | 9.24 | | |
| Ding and Jow ³⁰ | 198.95 | | | |
| Wachter et al. ²⁹ | 195.86 | | | |
| this work ^d | 196.4 | 9.1 | | |
| | | Dipropyl Carbonate | | |
| this work ^d | 215.4 | 17.5 | | |

Fonte: Pokorný et al. (2017).

Figura A.3 - Propriedades para o ar

| T (°C) | T (K) | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/kg·K) | $\mu \times 10^5$ (Pa·s, or kg/m·s) | ν (W/m·K) | N_{Pr} | $\beta \times 10^3$ (1/K) | $g\beta\rho^2/\mu^2$ (1/K·m ³) |
|-------------|------------|--------------------------------|--------------------|---|------------------|----------|------------------------------|---|
| -17.8 | 255.4 | 1.379 | 1.0048 | 1.62 | 0.02250 | 0.720 | 3.92 | 2.79×10^8 |
| 0 | 273.2 | 1.293 | 1.0048 | 1.72 | 0.02423 | 0.715 | 3.65 | 2.04×10^8 |
| 10.0 | 283.2 | 1.246 | 1.0048 | 1.78 | 0.02492 | 0.713 | 3.53 | 1.72×10^8 |
| 37.8 | 311.0 | 1.137 | 1.0048 | 1.90 | 0.02700 | 0.705 | 3.22 | 1.12×10^8 |
| 65.6 | 338.8 | 1.043 | 1.0090 | 2.03 | 0.02925 | 0.702 | 2.95 | 0.775×10^8 |
| 93.3 | 366.5 | 0.964 | 1.0090 | 2.15 | 0.03115 | 0.694 | 2.74 | 0.534×10^8 |
| 121.1 | 394.3 | 0.895 | 1.0132 | 2.27 | 0.03323 | 0.692 | 2.54 | 0.386×10^8 |
| 148.9 | 422.1 | 0.838 | 1.0174 | 2.37 | 0.03531 | 0.689 | 2.38 | 0.289×10^8 |
| 176.7 | 449.9 | 0.785 | 1.0216 | 2.50 | 0.03721 | 0.687 | 2.21 | 0.214×10^8 |
| 204.4 | 477.6 | 0.740 | 1.0258 | 2.60 | 0.03894 | 0.686 | 2.09 | 0.168×10^8 |
| 232.2 | 505.4 | 0.700 | 1.0300 | 2.71 | 0.04084 | 0.684 | 1.98 | 0.130×10^8 |
| 260.0 | 533.2 | 0.662 | 1.0341 | 2.80 | 0.04258 | 0.680 | 1.87 | 0.104×10^8 |

Fonte: Geankoplis (1993)

ANEXO A.E – PROPRIEDADES DO NITROGÊNIO

Figura A.1- Propriedades para o Nitrogênio em pressão atmosférica

| Temperature (K) | Pressure (MPa) | Density (kg/m ³) | Internal energy (kJ/kg) | Enthalpy (kJ/kg) | Entropy (kJ/kg K) | C _v (kJ/kg K) | C _p (kJ/kg K) | Sound speed (m/s) |
|-----------------|----------------|------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| <i>0.1 MPa</i> | | | | | | | | |
| 63.17 | 0.1 | 867.29 | -150.74 | -150.63 | 2.4258 | 1.1764 | 1.9998 | 995.61 |
| 70 | 0.1 | 838.64 | -137.04 | -136.92 | 2.6317 | 1.1298 | 2.014 | 926.18 |
| 77.244 | 0.1 | 806.59 | -122.37 | -122.25 | 2.8312 | 1.0847 | 2.041 | 852.53 |
| 77.244 | 0.1 | 4.5565 | 55.126 | 77.073 | 5.4116 | 0.77104 | 1.1231 | 174.74 |
| 80 | 0.1 | 4.3794 | 57.319 | 80.153 | 5.4508 | 0.76665 | 1.112 | 178.31 |
| 90 | 0.1 | 3.8468 | 65.131 | 91.127 | 5.5801 | 0.75661 | 1.0857 | 190.46 |
| 100 | 0.1 | 3.4366 | 72.807 | 101.91 | 5.6937 | 0.7514 | 1.0713 | 201.64 |
| 110 | 0.1 | 3.1089 | 80.407 | 112.57 | 5.7954 | 0.74844 | 1.0627 | 212.1 |
| 120 | 0.1 | 2.8401 | 87.959 | 123.17 | 5.8876 | 0.74664 | 1.057 | 221.97 |
| 130 | 0.1 | 2.6152 | 95.481 | 133.72 | 5.972 | 0.74548 | 1.0532 | 231.37 |
| 140 | 0.1 | 2.4239 | 102.98 | 144.24 | 6.05 | 0.7447 | 1.0504 | 240.36 |
| 150 | 0.1 | 2.2592 | 110.47 | 154.73 | 6.1224 | 0.74416 | 1.0484 | 249 |
| 160 | 0.1 | 2.1157 | 117.94 | 165.21 | 6.19 | 0.74378 | 1.0469 | 257.33 |
| 170 | 0.1 | 1.9895 | 125.41 | 175.67 | 6.2534 | 0.7435 | 1.0457 | 265.37 |
| 180 | 0.1 | 1.8777 | 132.87 | 186.12 | 6.3131 | 0.74329 | 1.0448 | 273.17 |
| 190 | 0.1 | 1.7779 | 140.32 | 196.57 | 6.3696 | 0.74314 | 1.044 | 280.74 |
| 200 | 0.1 | 1.6882 | 147.77 | 207 | 6.4232 | 0.74302 | 1.0434 | 288.11 |
| 210 | 0.1 | 1.6072 | 155.22 | 217.44 | 6.4741 | 0.74293 | 1.0429 | 295.28 |
| 220 | 0.1 | 1.5337 | 162.66 | 227.86 | 6.5226 | 0.74287 | 1.0425 | 302.28 |
| 230 | 0.1 | 1.4666 | 170.1 | 238.29 | 6.5689 | 0.74283 | 1.0422 | 309.11 |
| 240 | 0.1 | 1.4052 | 177.54 | 248.71 | 6.6132 | 0.7428 | 1.0419 | 315.79 |
| 250 | 0.1 | 1.3488 | 184.98 | 259.13 | 6.6558 | 0.7428 | 1.0417 | 322.33 |
| 260 | 0.1 | 1.2967 | 192.42 | 269.54 | 6.6966 | 0.74282 | 1.0415 | 328.74 |
| 270 | 0.1 | 1.2485 | 199.86 | 279.96 | 6.7359 | 0.74286 | 1.0414 | 335.01 |
| 280 | 0.1 | 1.2037 | 207.3 | 290.37 | 6.7738 | 0.74293 | 1.0413 | 341.17 |
| 290 | 0.1 | 1.1621 | 214.73 | 300.78 | 6.8103 | 0.74303 | 1.0413 | 347.22 |
| 300 | 0.1 | 1.1233 | 222.17 | 311.2 | 6.8457 | 0.74316 | 1.0413 | 353.16 |
| 400 | 0.1 | 0.84208 | 296.7 | 415.45 | 7.1456 | 0.74746 | 1.045 | 407.51 |
| 500 | 0.1 | 0.67358 | 371.99 | 520.45 | 7.3798 | 0.75921 | 1.0564 | 454.6 |
| 600 | 0.1 | 0.5613 | 448.82 | 626.98 | 7.574 | 0.77807 | 1.0751 | 496.27 |
| 700 | 0.1 | 0.48112 | 527.77 | 735.62 | 7.7414 | 0.8011 | 1.0981 | 533.87 |
| 800 | 0.1 | 0.42099 | 609.1 | 846.64 | 7.8896 | 0.82535 | 1.1223 | 568.44 |
| 900 | 0.1 | 0.37422 | 692.83 | 960.05 | 8.0232 | 0.84884 | 1.1457 | 600.68 |
| 1000 | 0.1 | 0.33681 | 778.82 | 1075.7 | 8.145 | 0.87052 | 1.1674 | 631.11 |

Fonte: Leachman (2017).

ANEXO A.F – EVAPORADOR

Figura A.1 - Pressões parciais de vapor para o DMC

| T (K) | P_i^0 (kPa) | T (K) | P_i^0 (kPa) | T (K) | P_i^0 (kPa) |
|---------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|
| 326.06 | 26.66 | 372.06 | 133.29 | 393.98 | 247.92 |
| 328.41 | 29.32 | 372.67 | 135.96 | 394.39 | 250.58 |
| 330.58 | 31.99 | 373.27 | 138.62 | 394.80 | 253.25 |
| 332.61 | 34.66 | 373.91 | 141.29 | 395.18 | 255.92 |
| 334.53 | 37.32 | 374.54 | 143.95 | 395.58 | 258.58 |
| 336.34 | 39.99 | 375.15 | 146.62 | 395.99 | 261.25 |
| 338.03 | 42.65 | 375.73 | 149.28 | 396.38 | 263.91 |
| 339.64 | 45.32 | 376.33 | 151.95 | 396.77 | 266.58 |
| 341.20 | 47.98 | 376.89 | 154.62 | 397.16 | 269.24 |
| 342.68 | 50.65 | 377.37 | 157.28 | 397.54 | 271.91 |
| 344.09 | 53.32 | 377.94 | 159.95 | 397.95 | 274.58 |
| 345.45 | 55.98 | 378.47 | 162.61 | 398.29 | 277.24 |
| 346.75 | 58.65 | 379.02 | 165.28 | 398.67 | 279.91 |
| 348.04 | 61.31 | 379.63 | 167.94 | 398.93 | 282.57 |
| 349.26 | 63.98 | 380.05 | 170.61 | 399.30 | 285.24 |
| 350.43 | 66.64 | 380.62 | 173.28 | 399.66 | 287.91 |
| 351.57 | 69.31 | 381.16 | 175.94 | 400.02 | 290.57 |
| 352.69 | 71.98 | 381.71 | 178.61 | 400.38 | 293.24 |
| 353.77 | 74.64 | 382.23 | 181.27 | 400.66 | 295.90 |
| 354.81 | 77.31 | 382.71 | 183.94 | 400.99 | 298.57 |
| 355.86 | 79.97 | 383.22 | 186.61 | 401.35 | 301.23 |
| 356.85 | 82.64 | 383.73 | 189.27 | 401.66 | 303.90 |
| 357.81 | 85.31 | 384.40 | 191.94 | 402.03 | 306.57 |
| 358.72 | 87.97 | 384.98 | 194.60 | 402.39 | 309.23 |
| 359.63 | 90.64 | 385.48 | 197.27 | 402.76 | 311.90 |
| 360.54 | 93.30 | 385.95 | 199.93 | 403.11 | 314.56 |
| 361.73 | 95.97 | 386.45 | 202.60 | 403.46 | 317.23 |
| 362.14 | 97.30 | 386.92 | 205.27 | 403.80 | 319.89 |
| 362.55 | 98.63 | 387.40 | 207.93 | 404.50 | 325.23 |
| 362.98 | 99.97 | 387.91 | 210.60 | 405.15 | 330.56 |
| 363.46 | 101.30 | 388.33 | 213.26 | 405.45 | 333.22 |
| 363.84 | 102.63 | 388.77 | 215.93 | 406.12 | 338.56 |
| 364.24 | 103.97 | 389.25 | 218.59 | 406.75 | 343.89 |
| 364.65 | 105.30 | 389.70 | 221.26 | 407.03 | 346.55 |
| 365.04 | 106.63 | 390.14 | 223.93 | 407.69 | 351.88 |
| 365.63 | 109.30 | 390.59 | 226.59 | 408.31 | 357.22 |
| 366.37 | 111.96 | 391.04 | 229.26 | 408.56 | 359.88 |
| 367.10 | 114.63 | 391.45 | 231.92 | 409.22 | 365.21 |
| 367.89 | 117.29 | 391.89 | 234.59 | 409.82 | 370.54 |
| 368.65 | 119.96 | 391.89 | 234.59 | 410.13 | 373.21 |
| 369.38 | 122.63 | 392.31 | 237.26 | 410.71 | 378.54 |
| 370.10 | 125.29 | 392.75 | 239.92 | 411.09 | 381.21 |
| 370.80 | 127.96 | 393.15 | 242.59 | 411.29 | 383.87 |
| 371.47 | 130.62 | 393.55 | 245.25 | | |

Fonte: Rodríguez et al. (2001).

Figura A.2 - Dados termodinâmicos para o EC

| T^b (K) | m^b (mg) | $V_{(N_2)^c}$ (dm ³) | Gas-flow (dm ³ /h) | p^d (Pa) | $P_{exp} - P_{calc}$ (Pa) | $\Delta_c^e H_m$ or $\Delta_f^e H_m$ (kJ mol ⁻¹) |
|--|------------|----------------------------------|-------------------------------|------------|---------------------------|--|
| Ethylene carbonate; $\Delta_c^e H_m(298.15\text{ K}) = (74.08 \pm 0.63) \text{ kJ mol}^{-1}$, $\ln(p/\text{Pa}) = \frac{278.64}{R} - \frac{29556.09}{R(T,K)} - \frac{38.4}{R} \ln\left(\frac{T,K}{298.15}\right)$ | | | | | | |
| 280.6 | 2.51 | 113.2 | 9.57 | 0.62 | -0.01 | 74.41 |
| 286.2 | 2.93 | 69.1 | 9.60 | 1.19 | 0.01 | 74.30 |
| 291.3 | 2.74 | 38.2 | 9.60 | 2.00 | -0.03 | 74.21 |
| 295.5 | 3.18 | 27.4 | 9.60 | 3.25 | 0.10 | 74.13 |
| 299.4 | 3.44 | 20.3 | 9.60 | 4.72 | 0.06 | 74.06 |
| 303.2 | 3.09 | 12.8 | 9.57 | 6.75 | -0.02 | 73.99 |
| 304.4 | 3.38 | 12.0 | 9.60 | 7.85 | 0.24 | 73.97 |
| 306.4 | 3.63 | 11.2 | 9.57 | 9.07 | -0.13 | 73.93 |
| 308.4 | 3.70 | 9.6 | 9.57 | 10.77 | -0.34 | 73.89 |
| Ethylene carbonate; $\Delta_f^e H_m(298.15\text{ K}) = (60.81 \pm 0.12) \text{ kJ mol}^{-1}$, $\ln(p/\text{Pa}) = \frac{264.13}{R} - \frac{74971.42}{R(T,K)} - \frac{47.5}{R} \ln\left(\frac{T,K}{298.15}\right)$ | | | | | | |
| 310.3 | 7.53 | 17.53 | 9.56 | 12.00 | 0.10 | 60.23 |
| 314.4 | 7.37 | 12.75 | 9.56 | 16.15 | 0.02 | 60.04 |
| 314.5 | 3.11 | 5.39 | 7.19 | 16.14 | -0.11 | 60.04 |
| 317.3 | 3.77 | 5.27 | 7.19 | 20.00 | 0.11 | 59.90 |
| 320.3 | 4.82 | 5.39 | 7.19 | 24.99 | 0.39 | 59.76 |
| 320.4 | 6.73 | 7.59 | 9.30 | 24.75 | -0.03 | 59.75 |
| 324.4 | 6.47 | 5.51 | 7.19 | 32.81 | 0.15 | 59.56 |
| 323.5 | 1.04 | 0.958 | 2.87 | 30.50 | -0.21 | 59.61 |
| 327.4 | 6.77 | 4.80 | 7.21 | 39.39 | -0.59 | 59.42 |
| 331.3 | 7.70 | 4.20 | 7.21 | 51.19 | -0.49 | 59.24 |
| 328.6 | 1.11 | 0.718 | 2.87 | 43.12 | -0.17 | 59.37 |
| 335.4 | 8.84 | 3.61 | 7.21 | 68.48 | 1.29 | 59.04 |
| 333.6 | 10.08 | 4.72 | 5.67 | 59.62 | -0.31 | 59.13 |
| 342.3 | 6.07 | 1.65 | 3.29 | 103.13 | 0.29 | 58.71 |
| 341.4 | 9.02 | 2.58 | 6.18 | 97.80 | 0.40 | 58.76 |
| 338.7 | 10.40 | 3.50 | 5.67 | 83.12 | 0.56 | 58.89 |
| 345.2 | 9.39 | 2.16 | 6.18 | 121.26 | -1.03 | 58.58 |
| 349.0 | 13.02 | 2.36 | 5.67 | 153.99 | 1.31 | 58.40 |
| 343.8 | 9.25 | 2.36 | 5.67 | 109.42 | -3.11 | 58.64 |
| 347.6 | 6.77 | 1.37 | 3.29 | 137.93 | -2.85 | 58.46 |
| 354.0 | 11.71 | 1.61 | 5.67 | 203.68 | 0.91 | 58.16 |
| 352.4 | 7.34 | 1.10 | 3.29 | 186.92 | 1.56 | 58.23 |
| 357.5 | 7.28 | 0.822 | 3.29 | 247.33 | 1.33 | 57.99 |
| 363.2 | 9.02 | 0.767 | 3.29 | 328.31 | -5.60 | 57.72 |
| 364.1 | 18.87 | 1.51 | 5.67 | 348.61 | -1.46 | 57.68 |
| 360.6 | 9.17 | 0.877 | 3.29 | 292.05 | 1.18 | 57.85 |
| 358.9 | 13.40 | 1.42 | 5.67 | 264.20 | -1.24 | 57.93 |
| 366.7 | 11.12 | 0.767 | 3.29 | 404.73 | 4.07 | 57.56 |
| 369.5 | 13.82 | 0.822 | 3.29 | 469.45 | 7.24 | 57.42 |

Fonte: Verevkin et al. (2008).

Figura A.3 - Calor específico para o EC

Table 9. Standard Molar Thermodynamic Functions (in J·K⁻¹·mol⁻¹) of Ethylene Carbonate, Propylene Carbonate, γ -Valerolactone, and γ -Butyrolactone in the Ideal Gaseous State at $p = 10^5$ Pa^a

| T/K | ethylene carbonate | | propylene carbonate | | γ -valerolactone | | γ -butyrolactone | |
|--------|--------------------|---------|---------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
| | C_p^0 | S_m^0 | C_p^0 | S_m^0 | C_p^0 | S_m^0 | C_p^0 | S_m^0 |
| 100 | 43.3 | 240.9 | 54.6 | 257.8 | 55.8 | 255.4 | 43.9 | 247.8 |
| 150 | 49.5 | 259.6 | 64.9 | 281.9 | 69.1 | 280.6 | 51.5 | 267.0 |
| 200 | 57.4 | 274.9 | 76.7 | 302.2 | 82.8 | 302.3 | 61.5 | 283.1 |
| 250 | 67.6 | 288.7 | 90.4 | 320.8 | 98.3 | 322.4 | 73.9 | 298.1 |
| 273.15 | 72.8 | 295.0 | 97.1 | 329.1 | 106.0 | 331.5 | 80.2 | 304.9 |
| 298.15 | 78.7 | 301.6 | 104.6 | 337.9 | 114.4 | 341.1 | 87.2 | 312.2 |
| 300 | 79.1 | 302.1 | 105.1 | 338.6 | 115.1 | 341.8 | 87.7 | 312.8 |
| 400 | 102.3 | 328.0 | 134.1 | 372.9 | 148.3 | 379.5 | 115.5 | 341.9 |
| 500 | 122.5 | 353.1 | 159.2 | 405.6 | 177.5 | 415.8 | 139.9 | 370.3 |
| 600 | 138.9 | 376.9 | 179.8 | 436.5 | 201.7 | 450.4 | 160.1 | 397.7 |
| 700 | 152.3 | 399.4 | 196.7 | 465.6 | 221.6 | 483.0 | 176.7 | 423.7 |
| 800 | 163.2 | 420.5 | 210.6 | 492.8 | 238.3 | 513.8 | 190.5 | 448.2 |
| 900 | 172.3 | 440.2 | 223.1 | 518.3 | 252.4 | 542.7 | 202.0 | 471.3 |
| 1000 | 179.8 | 458.8 | 232.1 | 542.2 | 264.3 | 569.9 | 211.8 | 493.1 |

Fonte: Pokorný et al. (2017).

Figura A.4 - Calor específico para o LiPF₆

Table 4 Smoothed heat capacity and enthalpy change of LiPF₆

| T/ K | $C_p^0(T)/$ J K ⁻¹ mol ⁻¹ | $H^0(T) - H^0(298.15 K)/$ J mol ⁻¹ | T/ K | $C_p^0(T)/$ J K ⁻¹ mol ⁻¹ | $H^0(T) - H^0(298.15 K)/$ J mol ⁻¹ |
|--------|--|--|------|--|--|
| 298.15 | 151.1 | 0 | 390 | 182.2 | 15420 |
| 300 | 151.9 | 303.0 | 400 | 184.8 | 17260 |
| 310 | 155.8 | 1841 | 410 | 187.3 | 19120 |
| 320 | 159.6 | 3418 | 420 | 189.6 | 21000 |
| 330 | 163.2 | 5033 | 430 | 191.7 | 22910 |
| 340 | 166.7 | 6682 | 440 | 193.6 | 24830 |
| 350 | 170.1 | 8367 | 450 | 195.2 | 26780 |
| 360 | 173.3 | 10080 | 460 | 196.6 | 28740 |
| 370 | 176.4 | 11830 | 470 | 197.7 | 30710 |
| 380 | 179.4 | 13610 | | | |

Fonte: Gavritchev et al. (2003).

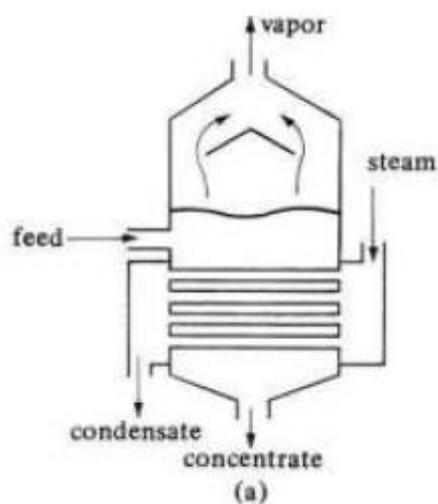
Figura A.5 - Dados termodinâmicos da água

Table 4. Properties of Saturated Water and Steam (Temperature)

| Temp. t (°C) | Pressure MPa | Volume, m ³ /kg v _L v _V | Enthalpy, kJ/kg h _L h _V | Entropy, kJ/(kg·K) s _L s _V | Temp. t (°C) |
|--------------|--------------|---|--|---|--------------|
| 0.01 | 0.0006117 | 0.0010002 206.00 | 0.001 2500.9 | 0.0000 9.1555 | 0.01 |
| 5 | 0.0008726 | 0.0010001 147.02 | 21.019 2510.1 | 0.0763 9.0249 | 5 |
| 10 | 0.0012228 | 0.0010003 106.31 | 42.021 2519.2 | 0.1511 8.8998 | 10 |
| 15 | 0.001706 | 0.0010009 77.881 | 62.984 2528.4 | 0.2245 8.7804 | 15 |
| 20 | 0.002339 | 0.0010018 57.761 | 83.920 2537.5 | 0.2965 8.6661 | 20 |
| 25 | 0.003170 | 0.0010030 43.341 | 104.84 2546.5 | 0.3673 8.5568 | 25 |
| 30 | 0.004247 | 0.0010044 32.882 | 125.75 2555.6 | 0.4368 8.4521 | 30 |
| 35 | 0.005629 | 0.0010060 25.208 | 146.64 2564.6 | 0.5052 8.3518 | 35 |
| 40 | 0.007384 | 0.0010079 19.517 | 167.54 2573.5 | 0.5724 8.2557 | 40 |
| 45 | 0.009594 | 0.0010099 15.253 | 188.44 2582.5 | 0.6386 8.1634 | 45 |
| 50 | 0.012351 | 0.0010121 12.028 | 209.34 2591.3 | 0.7038 8.0749 | 50 |
| 55 | 0.015761 | 0.0010145 9.5649 | 230.24 2600.1 | 0.7680 7.9899 | 55 |
| 60 | 0.019946 | 0.0010171 7.6677 | 251.15 2608.8 | 0.8312 7.9082 | 60 |
| 65 | 0.025041 | 0.0010199 6.1938 | 272.08 2617.5 | 0.8935 7.8296 | 65 |
| 70 | 0.031201 | 0.0010228 5.0397 | 293.02 2626.1 | 0.9550 7.7540 | 70 |
| 75 | 0.038595 | 0.0010258 4.1291 | 313.97 2634.6 | 1.0156 7.6812 | 75 |
| 80 | 0.047415 | 0.0010290 3.4053 | 334.95 2643.0 | 1.0754 7.6110 | 80 |
| 85 | 0.057867 | 0.0010324 2.8259 | 355.95 2651.3 | 1.1344 7.5434 | 85 |
| 90 | 0.070182 | 0.0010359 2.3591 | 376.97 2659.5 | 1.1927 7.4781 | 90 |
| 95 | 0.084609 | 0.0010396 1.9806 | 398.02 2667.6 | 1.2502 7.4150 | 95 |
| 100 | 0.10142 | 0.0010435 1.6719 | 419.10 2675.6 | 1.3070 7.3541 | 100 |
| 105 | 0.12090 | 0.0010474 1.4185 | 440.21 2683.4 | 1.3632 7.2951 | 105 |
| 110 | 0.14338 | 0.0010515 1.2094 | 461.36 2691.1 | 1.4187 7.2380 | 110 |
| 115 | 0.16918 | 0.0010559 1.0359 | 482.55 2698.6 | 1.4735 7.1827 | 115 |
| 120 | 0.19867 | 0.0010603 0.89130 | 503.78 2705.9 | 1.5278 7.1291 | 120 |
| 125 | 0.23222 | 0.0010649 0.77011 | 525.06 2713.1 | 1.5815 7.0770 | 125 |
| 130 | 0.27026 | 0.0010697 0.66808 | 546.39 2720.1 | 1.6346 7.0264 | 130 |
| 135 | 0.31320 | 0.0010747 0.58180 | 567.77 2726.9 | 1.6872 6.9772 | 135 |
| 140 | 0.36150 | 0.0010798 0.50852 | 589.20 2733.4 | 1.7393 6.9293 | 140 |
| 145 | 0.41563 | 0.0010850 0.44602 | 610.69 2739.8 | 1.7909 6.8826 | 145 |
| 150 | 0.47610 | 0.0010905 0.39250 | 632.25 2745.9 | 1.8420 6.8370 | 150 |
| 155 | 0.54342 | 0.0010962 0.34650 | 653.88 2751.8 | 1.8926 6.7926 | 155 |
| 160 | 0.61814 | 0.0011020 0.30682 | 675.57 2757.4 | 1.9428 6.7491 | 160 |
| 165 | 0.70082 | 0.0011080 0.27246 | 697.35 2762.8 | 1.9926 6.7066 | 165 |
| 170 | 0.79205 | 0.0011143 0.24262 | 719.21 2767.9 | 2.0419 6.6649 | 170 |
| 175 | 0.89245 | 0.0011207 0.21660 | 741.15 2772.7 | 2.0909 6.6241 | 175 |
| 180 | 1.0026 | 0.0011274 0.19386 | 763.19 2777.2 | 2.1395 6.5841 | 180 |
| 185 | 1.1233 | 0.0011343 0.17392 | 785.32 2781.4 | 2.1878 6.5447 | 185 |
| 190 | 1.2550 | 0.0011414 0.15638 | 807.57 2785.3 | 2.2358 6.5060 | 190 |
| 195 | 1.3986 | 0.0011488 0.14091 | 829.92 2788.9 | 2.2834 6.4679 | 195 |
| 200 | 1.5547 | 0.0011565 0.12722 | 852.39 2792.1 | 2.3308 6.4303 | 200 |
| 205 | 1.7240 | 0.0011645 0.11509 | 874.99 2794.9 | 2.3779 6.3932 | 205 |
| 210 | 1.9074 | 0.0011727 0.10430 | 897.73 2797.4 | 2.4248 6.3565 | 210 |
| 215 | 2.1055 | 0.0011813 0.094689 | 920.61 2799.4 | 2.4714 6.3202 | 215 |
| 220 | 2.3193 | 0.0011902 0.086101 | 943.64 2801.1 | 2.5178 6.2842 | 220 |

Fonte: ASME (2006).

Figura A.6 - Evaporador de tubo horizontal de circulação natural



Fonte: Geankoplis (2018).

Figura A.7 - Valores típicos de coeficientes globais para diferentes tipos de evaporadores

TABLE 8.3-1. *Typical Heat-Transfer Coefficients for Various Evaporators**
(B3, B4, L1, P2)

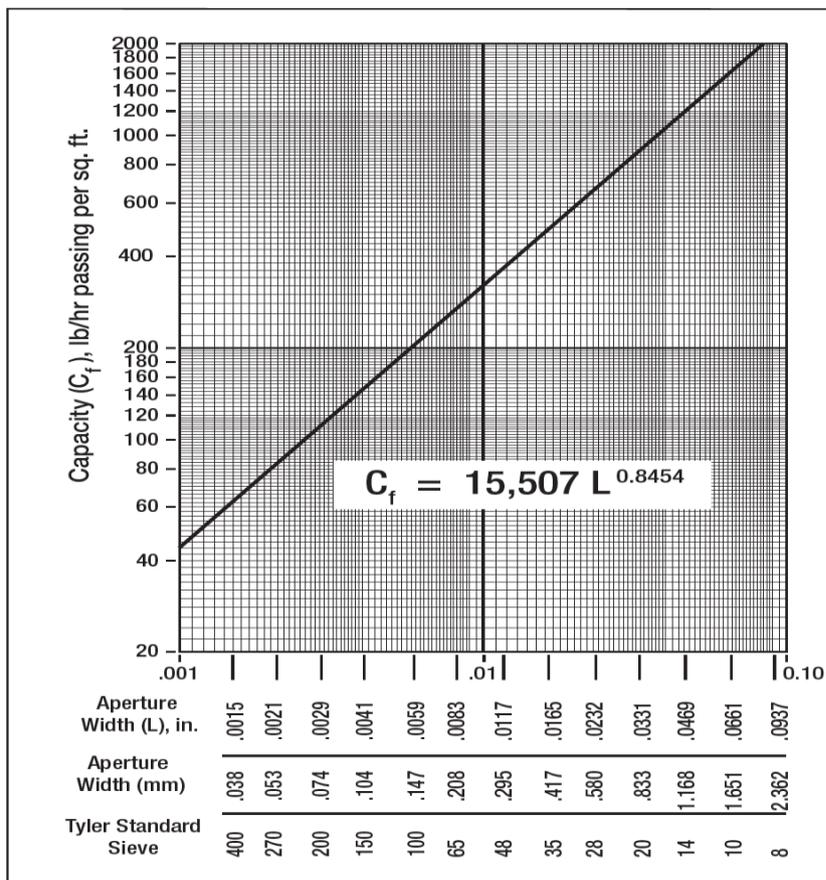
| <i>Type of Evaporator</i> | <i>Overall U</i> | |
|--|------------------|-----------------------------------|
| | $W/m^2 \cdot K$ | $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$ |
| Short-tube vertical, natural circulation | 1100–2800 | 200–500 |
| Horizontal-tube, natural circulation | 1100–2800 | 200–500 |
| Long-tube vertical, natural circulation | 1100–4000 | 200–700 |
| Long-tube vertical, forced circulation | 2300–11 000 | 400–2000 |
| Agitated film | 680–2300 | 120–400 |

* Generally, nonviscous liquids have the higher coefficients and viscous liquids the lower coefficients in the ranges given.

Fonte: Geankoplis (1993).

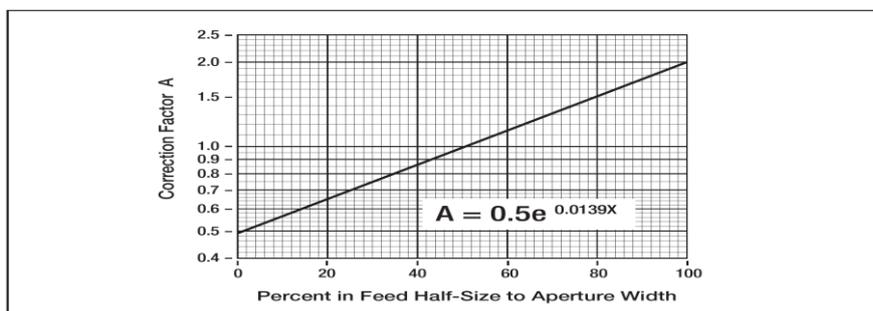
ANEXO A.G – PENEIRA VIBRATÓRIA

Figura A.1 - Capacidade da peneira vibratória para finos com relação a granulometria



Fonte: Sullivan (2013).

Figura A.2 - Fator de meio de tamanho



Fonte: Sullivan (2013).

Figura A.3 - Fator de forma da partícula

| Particle Shape Factor K3 | | |
|--------------------------|--|-----|
| | Smooth and rounded (natural beach sands and gravel) | 1.2 |
| | Rough and angular (crushed rock, rough natural gravel) | 1.0 |

Fonte: Sullivan (2013).

Figura A.4 - Fator de alimentação da peneira

| Deck Location Factor K4 | | |
|---|-------------|-----|
| | Top deck | 1.0 |
| | Second deck | 0.9 |
| | Third deck | 0.8 |
| Note: Stacking more than three decks in a single unit series separation is not usually practical, due to loss of usable area. | | |

Fonte: Sullivan (2013).

Figura A.5 - Fator de forma da abertura da peneira

| Aperture Shape Factor K5 | | |
|--------------------------------|----------------------------------|------|
| | Square | 1.0 |
| | Round ¹⁹ | 0.83 |
| Rectangular slot ²⁰ | | |
| | Length/width ratio $2 < l/w < 4$ | 1.1 |
| | Length/width $4 < l/w < 25$ | 1.2 |

Fonte: Sullivan (2013).

Figura A.6 - Fator de área aberta

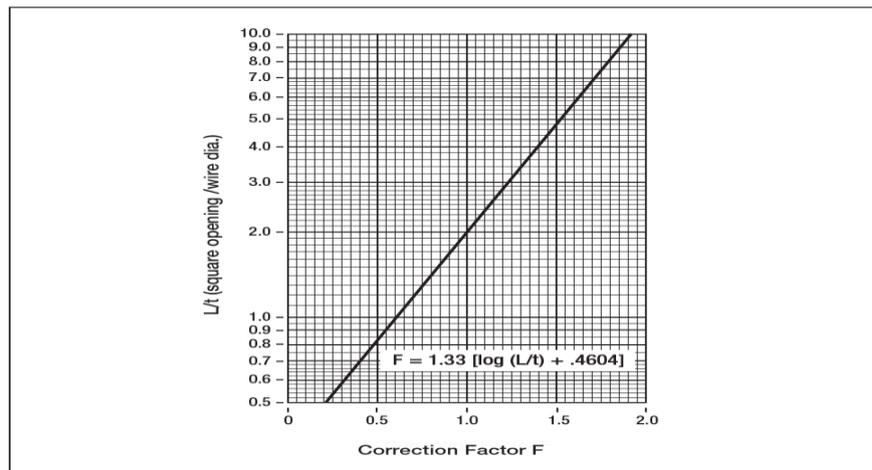
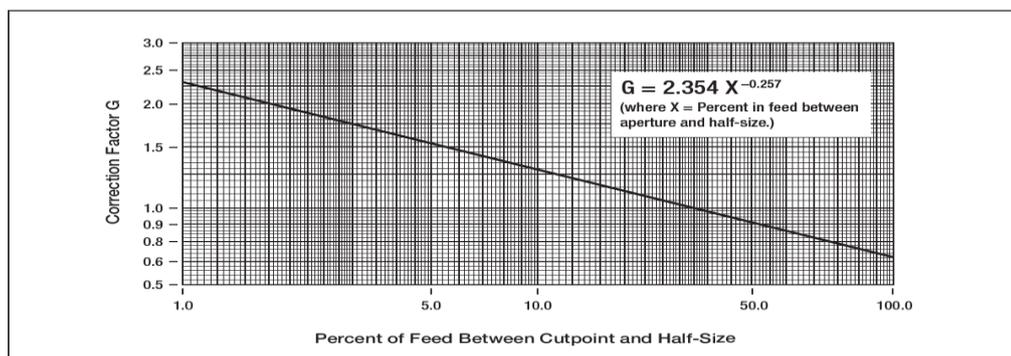


Figure 14: Open Area Factor (fine screen method)

Fonte: Sullivan (2013).

Figura A.7 - Fator de inclinação



Fonte: Sullivan (2013).

ANEXO A.H – TROCADORES DE CALOR

Figura A.1 - Correlações para o escoamento externo em tubos

TABELA 7.7 Resumo de correlações para a transferência de calor por convecção em escoamentos externos^{a,b}

| Correlação | | Geometria | Condições ^c |
|--|-------------------|-----------------------------|---|
| $\delta = 5x Re_x^{-1/2}$ | (7.19) | Placa plana | Laminar, T_f |
| $C_{f,x} = 0,664 Re_x^{-1/2}$ | (7.20) | Placa plana | Laminar, local, T_f |
| $Nu_x = 0,332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$ | (7.23) | Placa plana | Laminar, local, T_f , $Pr \geq 0,6$ |
| $\delta_i = \delta Pr^{-1/3}$ | (7.24) | Placa plana | Laminar, T_f |
| $\bar{C}_{f,x} = 1,328 Re_x^{-1/2}$ | (7.29) | Placa plana | Laminar, médio, T_f |
| $\bar{Nu}_x = 0,664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$ | (7.30) | Placa plana | Laminar, médio, T_f , $Pr \geq 0,6$ |
| $Nu_x = 0,564 Pe_x^{1/2}$ | (7.32) | Placa plana | Laminar, médio, T_f , $Pr \leq 0,05$, $Pe_x \geq 100$ |
| $C_{f,x} = 0,0592 Re_x^{-1/5}$ | (7.34) | Placa plana | Turbulento, local, T_f , $Re_x \leq 10^8$ |
| $\delta = 0,37x Re_x^{-1/5}$ | (7.35) | Placa plana | Turbulento, T_f , $Re_x \leq 10^8$ |
| $Nu_x = 0,0296 Re_x^{4/5} Pr^{1/3}$ | (7.36) | Placa plana | Turbulento, local, T_f , $Re_x \leq 10^8$, $0,6 \leq Pr \leq 60$ |
| $\bar{C}_{f,L} = 0,074 Re_L^{-1/5} = 1742 Re_L^{-1}$ | (7.40) | Placa plana | Mista, médio, T_f , $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, $Re_L \leq 10^8$ |
| $\bar{Nu}_L = (0,037 Re_L^{4/5} - 841) Pr^{1/3}$ | (7.38) | Placa plana | Mista, médio, T_f , $Re_{x,c} = 5 \times 10^5$, $Re_L \leq 10^8$, $0,6 \leq Pr \leq 60$ |
| $\bar{Nu}_D = C Re_D^m Pr^{1/3}$ (Tabela 7.2) | (7.52) | Cilindro | Médio, T_f , $0,4 \leq Re_D \leq 4 \times 10^5$, $Pr \geq 0,7$ |
| $\bar{Nu}_D = C Re_D^m Pr^n (Pr/Pr_s)^{1/4}$ (Tabela 7.4) | (7.53) | Cilindro | Médio, T_w , $1 \leq Re_D \leq 10^6$, $0,7 \leq Pr \leq 500$ |
| $\bar{Nu}_D = 0,3 + [0,62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3} \times [1 + (0,4/Pr)^{1/4}] \times [1 + (Re_D/282.000)^{5/8}]^{4/5}$ | (7.54) | Cilindro | Médio, T_f , $Re_D Pr \geq 0,2$ |
| $\bar{Nu}_D = 2 + (0,4 Re_D^{1/2} + 0,06 Re_D^{2/3}) Pr^{0,43} \times (\mu/\mu_s)^{1/4}$ | (7.56) | Esfera | Médio, T_w , $3,5 \leq Re_D \leq 7,6 \times 10^4$, $0,71 \leq Pr \leq 380$, $1,0 \leq (\mu/\mu_s) \leq 3,2$ |
| $\bar{Nu}_D = 2 + 0,6 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}$ | (7.57) | Gota caindo | Médio, T_w |
| $\bar{Nu}_D = C_1 C_2 Re_{D,max}^m Pr^{0,36} (Pr/Pr_s)^{1/2}$ (Tabelas 7.5, 7.6) | (7.58), (7.59) | Faixa de tubos ^d | Médio, T_f , $10 \leq Re_D \leq 2 \times 10^6$, $0,7 \leq Pr \leq 500$ |
| Um bocal circular | (7.71) | Jato colidente | Médio, T_f , $2000 \leq Re \leq 4 \times 10^4$, $2 \leq (H/D) \leq 12$, $2,5 \leq (r/D) \leq 7,5$ |

Fonte: Incropera (2017).

Figura A.2 - Valores de constantes para as correlações de escoamento externo

TABELA 7.2 Constantes da Equação 7.52 para o cilindro circular em escoamento cruzado [11, 12]

| <i>Re_D</i> | <i>C</i> | <i>m</i> |
|-----------------------|----------|----------|
| 0,4-4 | 0,989 | 0,330 |
| 4-40 | 0,911 | 0,385 |
| 40-4000 | 0,683 | 0,466 |
| 4000-40.000 | 0,193 | 0,618 |
| 40.000-400.000 | 0,027 | 0,805 |

Fonte: Incropera (2017).

Figura A.3 - Valores padrão para tubos de aço

TABLE 10-22 Properties of Steel Pipe

| Nominal pipe size, in | Outside diameter, in | Schedule no. | Wall thickness, in | Inside diameter, in | Cross-sectional area | | Circumference, ft, or surface, ft ² /ft of length | | Capacity at 1 ft/s velocity | | Weight of plain-end pipe, lb/ft |
|-----------------------|----------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|--|--------|-----------------------------|------------|---------------------------------|
| | | | | | Metal, in ² | Flow, ft ² | Outside | Inside | U.S. gal/min | lb/h water | |
| | | | | | | | | | | | |
| 1/8 | 0.405 | 10S | 0.049 | 0.307 | 0.055 | 0.00051 | 0.106 | 0.0804 | 0.231 | 115.5 | 0.19 |
| | | 40ST, 40S | .068 | .269 | .072 | .00040 | .106 | .0705 | .179 | 89.5 | .24 |
| | | 80XS, 80S | .095 | .215 | .093 | .00025 | .106 | .0563 | .113 | 56.5 | .31 |
| 1/4 | 0.540 | 10S | .065 | .410 | .097 | .00092 | .141 | .107 | .412 | 206.5 | .33 |
| | | 40ST, 40S | .088 | .364 | .125 | .00072 | .141 | .095 | .323 | 161.5 | .42 |
| | | 80XS, 80S | .119 | .302 | .157 | .00050 | .141 | .079 | .224 | 112.0 | .54 |
| 3/8 | 0.675 | 10S | .065 | .545 | .125 | .00162 | .177 | .143 | .727 | 363.5 | .42 |
| | | 40ST, 40S | .091 | .493 | .167 | .00133 | .177 | .129 | .596 | 298.0 | .57 |
| | | 80XS, 80S | .126 | .423 | .217 | .00098 | .177 | .111 | .440 | 220.0 | .74 |
| 1/2 | 0.840 | 5S | .065 | .710 | .158 | .00275 | .220 | .186 | 1.234 | 617.0 | .54 |
| | | 10S | .083 | .674 | .197 | .00248 | .220 | .176 | 1.112 | 556.0 | .67 |
| | | 40ST, 40S | .109 | .622 | .250 | .00211 | .220 | .163 | 0.945 | 472.0 | .85 |
| | | 80XS, 80S | .147 | .546 | .320 | .00163 | .220 | .143 | 0.730 | 365.0 | 1.09 |
| | | 160 | .188 | .464 | .385 | .00117 | .220 | .122 | 0.527 | 263.5 | 1.31 |
| XX | .294 | .252 | .504 | .00035 | .220 | .066 | 0.155 | 77.5 | 1.71 | | |
| 3/4 | 1.050 | 5S | .065 | .920 | .201 | .00461 | .275 | .241 | 2.072 | 1036.0 | 0.69 |
| | | 10S | .083 | .884 | .252 | .00426 | .275 | .231 | 1.903 | 951.5 | 0.86 |
| | | 40ST, 40S | .113 | .824 | .333 | .00371 | .275 | .216 | 1.665 | 832.5 | 1.13 |
| | | 80XS, 80S | .154 | .742 | .433 | .00300 | .275 | .194 | 1.345 | 672.5 | 1.47 |
| | | 160 | .219 | .612 | .572 | .00204 | .275 | .160 | 0.917 | 458.5 | 1.94 |
| XX | .308 | .434 | .718 | .00103 | .275 | .114 | 0.461 | 230.5 | 2.44 | | |
| 1 | 1.315 | 5S | .065 | 1.185 | .255 | .00768 | .344 | .310 | 3.449 | 1725 | 0.87 |
| | | 10S | .109 | 1.097 | .413 | .00656 | .344 | .287 | 2.946 | 1473 | 1.40 |
| | | 40ST, 40S | .133 | 1.049 | .494 | .00600 | .344 | .275 | 2.690 | 1345 | 1.68 |
| | | 80XS, 80S | .179 | 0.957 | .639 | .00499 | .344 | .250 | 2.240 | 1120 | 2.17 |
| | | 160 | .250 | 0.815 | .836 | .00362 | .344 | .213 | 1.625 | 812.5 | 2.84 |
| XX | .358 | 0.599 | 1.076 | .00196 | .344 | .157 | 0.878 | 439.0 | 3.66 | | |
| 1 1/4 | 1.660 | 5S | .065 | 1.530 | .326 | .01277 | .435 | .401 | 5.73 | 2865 | 1.11 |
| | | 10S | .109 | 1.442 | .531 | .01134 | .435 | .378 | 5.09 | 2545 | 1.81 |
| | | 40ST, 40S | .140 | 1.380 | .668 | .01040 | .435 | .361 | 4.57 | 2285 | 2.27 |
| | | 80XS, 80S | .191 | 1.278 | .881 | .00891 | .435 | .335 | 3.99 | 1995 | 3.00 |
| | | 160 | .250 | 1.160 | 1.107 | .00734 | .435 | .304 | 3.29 | 1645 | 3.76 |
| XX | .382 | 0.896 | 1.534 | .00438 | .435 | .235 | 1.97 | 985 | 5.21 | | |
| 1 1/2 | 1.900 | 5S | .065 | 1.770 | .375 | .01709 | .497 | .463 | 7.67 | 3835 | 1.28 |
| | | 10S | .109 | 1.682 | .614 | .01543 | .497 | .440 | 6.94 | 3465 | 2.09 |
| | | 40ST, 40S | .145 | 1.610 | .800 | .01414 | .497 | .421 | 6.34 | 3170 | 2.72 |
| | | 80XS, 80S | .200 | 1.500 | 1.069 | .01225 | .497 | .393 | 5.49 | 2745 | 3.63 |
| | | 160 | .281 | 1.338 | 1.429 | .00976 | .497 | .350 | 4.38 | 2190 | 4.86 |
| XX | .400 | 1.100 | 1.885 | .00660 | .497 | .288 | 2.96 | 1480 | 6.41 | | |
| 2 | 2.375 | 5S | .065 | 2.245 | .472 | .02749 | .622 | .588 | 12.34 | 6170 | 1.61 |
| | | 10S | .109 | 2.157 | .776 | .02538 | .622 | .565 | 11.39 | 5695 | 2.64 |
| | | 40ST, 40S | .154 | 2.067 | 1.075 | .02330 | .622 | .541 | 10.45 | 5225 | 3.65 |
| | | 80ST, 80S | .218 | 1.939 | 1.477 | .02050 | .622 | .508 | 9.20 | 4600 | 5.02 |
| | | 160 | .344 | 1.687 | 2.195 | .01552 | .622 | .436 | 6.97 | 3485 | 7.46 |
| XX | .436 | 1.503 | 2.656 | .01232 | .622 | .393 | 5.53 | 2765 | 9.03 | | |
| 2 1/2 | 2.875 | 5S | .083 | 2.709 | .728 | .04003 | .753 | .709 | 17.97 | 8985 | 2.48 |
| | | 10S | .120 | 2.635 | 1.039 | .03787 | .753 | .690 | 17.00 | 8500 | 3.53 |
| | | 40ST, 40S | .203 | 2.469 | 1.704 | .03322 | .753 | .647 | 14.92 | 7460 | 5.79 |
| | | 80XS, 80S | .276 | 2.323 | 2.254 | .02942 | .753 | .608 | 13.20 | 6600 | 7.66 |
| | | 160 | .375 | 2.125 | 2.945 | .02463 | .753 | .556 | 11.07 | 5535 | 10.01 |
| XX | .552 | 1.771 | 4.028 | .01711 | .753 | .464 | 7.68 | 3840 | 13.69 | | |
| 3 | 3.500 | 5S | .083 | 3.334 | .891 | .06063 | .916 | .873 | 27.21 | 13,605 | 3.03 |
| | | 10S | .120 | 3.260 | 1.274 | .05796 | .916 | .853 | 26.02 | 13,010 | 4.33 |
| | | 40ST, 40S | .216 | 3.068 | 2.228 | .05130 | .916 | .803 | 23.00 | 11,500 | 7.58 |
| | | 80XS, 80S | .300 | 2.900 | 3.016 | .04587 | .916 | .759 | 20.55 | 10,275 | 10.25 |
| | | 160 | .438 | 2.624 | 4.213 | .03755 | .916 | .687 | 16.86 | 8430 | 14.32 |
| XX | .600 | 2.300 | 5.466 | .02885 | .916 | .602 | 12.95 | 6475 | 18.58 | | |
| 3 1/2 | 4.0 | 5S | .083 | 3.834 | 1.021 | .08017 | 1.047 | 1.004 | 35.98 | 17,990 | 3.48 |
| | | 10S | .120 | 3.760 | 1.463 | .07711 | 1.047 | 0.984 | 34.61 | 17,305 | 4.97 |
| | | 40ST, 40S | .226 | 3.548 | 2.680 | .06870 | 1.047 | 0.929 | 30.80 | 15,400 | 9.11 |
| | | 80XS, 80S | .318 | 3.364 | 3.678 | .06170 | 1.047 | 0.881 | 27.70 | 13,850 | 12.50 |
| | | 5S | .083 | 4.334 | 1.152 | .10245 | 1.178 | 1.135 | 46.0 | 23,000 | 3.92 |
| 10S | .120 | 4.260 | 1.651 | .09898 | 1.178 | 1.115 | 44.4 | 22,200 | 5.61 | | |
| 40ST, 40S | .237 | 4.026 | 3.17 | .08840 | 1.178 | 1.054 | 39.6 | 19,800 | 10.79 | | |
| 80XS, 80S | .337 | 3.826 | 4.41 | .07986 | 1.178 | 1.002 | 35.8 | 17,900 | 14.98 | | |
| 120 | 0.438 | 3.624 | 5.58 | 0.07170 | 1.178 | 0.949 | 32.2 | 16,100 | 19.00 | | |
| 160 | .531 | 3.438 | 6.62 | .06647 | 1.178 | 0.900 | 28.9 | 14,450 | 22.51 | | |
| XX | .674 | 3.152 | 8.10 | .05419 | 1.178 | 0.825 | 24.3 | 12,150 | 27.54 | | |

Fonte: Green & Southard (2019)

Figura A.4 - Correlações para escoamento interno em tubos circulares

TABELA 8.4 Resumo de correlações da convecção para o escoamento no interior de um tubo circular^{a,b,e}

| Correlação | Condições |
|---|--|
| $f = 64/Re_D$ | (8.19) Laminar, plenamente desenvolvidas |
| $Nu_D = 4,36$ | (8.53) Laminar, plenamente desenvolvidas, q_s'' uniforme |
| $Nu_D = 3,66$ | (8.55) Laminar, plenamente desenvolvidas, T_s uniforme |
| $\overline{Nu}_D = 3,66 + \frac{0,0668 Gz_D}{1 + 0,04 Gz_D^{2/3}}$ | (8.57) Laminar, entrada térmica (ou entrada combinada com $Pr \geq 5$), T_s uniforme, $Gz_D = (D/x) Re_D Pr$ |
| $\overline{Nu}_D = \frac{3,66}{\tanh[2,264 Gz_D^{-1/3} + 1,7 Gz_D^{-2/3}]} + 0,0499 Gz_D \tanh(Gz_D^{-1})$ $\frac{\tanh(2,432 Pr^{1/6} Gz_D^{-1/6})}{\tanh(2,432 Pr^{1/6} Gz_D^{-1/6})}$ | (8.58) Laminar, entrada combinada, $Pr \geq 0,1$, T_s uniforme, $Gz_D = (D/x) Re_D Pr$ |
| $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left[\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re_D \sqrt{f}} \right]$ | (8.20) ^c Turbulenta, plenamente desenvolvidas |
| $f = (0,790 \ln Re_D - 1,64)^{-2}$ | (8.21) ^c Turbulenta, plenamente desenvolvidas, paredes lisas, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$ |
| $Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n$ | (8.60) ^d Turbulenta, plenamente desenvolvidas, $0,6 \leq Pr \leq 160$, $Re_D \geq 10.000$, $(L/D) \geq 10$, $n = 0,4$ para $T_s > T_m$ e $n = 0,3$ para $T_s < T_m$ |
| $Nu_D = 0,027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14}$ | (8.61) ^d Turbulenta, plenamente desenvolvidas, $0,7 \leq Pr \leq 16.700$, $Re_D \geq 10.000$, $(L/D) \geq 10$ |
| $Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000) Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$ | (8.62) ^d Turbulenta, plenamente desenvolvidas, $0,5 \leq Pr \leq 2000$, $3000 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6$, $(L/D) \geq 10$ |
| $Nu_D = 4,82 + 0,0185 (Re_D Pr)^{0,827}$ | (8.64) Metais líquidos, turbulenta, plenamente desenvolvidas, q_s'' uniforme, $3,6 \times 10^3 \leq Re_D \leq 9,05 \times 10^5$, $3 \times 10^{-3} \leq Pr \leq 5 \times 10^{-2}$, $10^2 \leq Re_D Pr \leq 10^4$ |
| $Nu_D = 5,0 + 0,025 (Re_D Pr)^{0,8}$ | (8.65) Metais líquidos, turbulenta, plenamente desenvolvidas, T_s uniforme, $Re_D Pr \geq 100$ |

^aAs correlações da transferência de massa podem ser obtidas pela substituição de Nu_D e Pr por Sh_D e Sc , respectivamente.

^bAs propriedades nas Equações 8.53, 8.55, 8.60, 8.61, 8.62, 8.64 e 8.65 são baseadas em T_m ; as propriedades nas Equações 8.19, 8.20 e 8.21 são baseadas em $T_f = (T_s + T_m)/2$; as propriedades nas Equações 8.57 e 8.58 são baseadas em $\overline{T}_m = (T_{m,ent} + T_{m,sa})/2$.

^cA Equação 8.20 se aplica para tubos ou rugosos. A Equação 8.21 é para tubos lisos.

^dComo uma primeira aproximação, as Equações 8.60, 8.61 ou 8.62 podem ser usadas para calcular o número de Nusselt médio \overline{Nu}_D em todo o comprimento do tubo, se $(L/D) \geq 10$. As propriedades devem então ser calculadas na média das temperaturas médias, $\overline{T}_m = (T_{m,ent} + T_{m,sa})/2$.

^ePara tubos com seção transversal não circular, $Re_D \equiv D \mu_m / \nu$, $D_h \equiv 4A_c/P$ e $u_m = \dot{m} / (\rho A_c)$. Resultados para o escoamento laminar plenamente desenvolvido são fornecidos na Tabela 8.1. Para o escoamento turbulento, a Equação 8.60 pode ser usada como uma primeira aproximação.

Fonte: Incropera (2017).

Figura A.5 - Propriedades termofísicas da água

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada^a

| Temperatura, T (K) | Pressão, p (bars) ^b | Volume Específico (m ³ /kg) | | Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg) | Calor Específico (kJ/(kg·K)) | | Viscosidade (N·s/m ²) | | Condutividade Térmica (W/(m·K)) | | Número de Prandtl | | Tensão Superficial, $\sigma_f \cdot 10^3$ (N/m) | Coeficiente de Expansão, $\beta_f \cdot 10^6$ (K ⁻¹) | Temperatura, T (K) |
|-------------------------|-------------------------------------|---|-------|--|---------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------------------|------------------------------------|------------------|-------------------|--------|---|--|-------------------------|
| | | $v_f \cdot 10^3$ | v_g | | $c_{p,f}$ | $c_{p,g}$ | $\mu_f \cdot 10^6$ | $\mu_g \cdot 10^6$ | $k_f \cdot 10^3$ | $k_g \cdot 10^3$ | Pr_f | Pr_g | | | |
| 273,15 | 0,00611 | 1,000 | 206,3 | 2502 | 4,217 | 1,854 | 1750 | 8,02 | 569 | 18,2 | 12,99 | 0,815 | 75,5 | -68,05 | 273,15 |
| 275 | 0,00697 | 1,000 | 181,7 | 2497 | 4,211 | 1,855 | 1652 | 8,09 | 574 | 18,3 | 12,22 | 0,817 | 75,3 | -32,74 | 275 |
| 280 | 0,00990 | 1,000 | 130,4 | 2485 | 4,198 | 1,858 | 1422 | 8,29 | 582 | 18,6 | 10,26 | 0,825 | 74,8 | 46,04 | 280 |
| 285 | 0,01387 | 1,000 | 99,4 | 2473 | 4,189 | 1,861 | 1225 | 8,49 | 590 | 18,9 | 8,81 | 0,833 | 74,3 | 114,1 | 285 |
| 290 | 0,01917 | 1,001 | 69,7 | 2461 | 4,184 | 1,864 | 1080 | 8,69 | 598 | 19,3 | 7,56 | 0,841 | 73,7 | 174,0 | 290 |
| 295 | 0,02617 | 1,002 | 51,94 | 2449 | 4,181 | 1,868 | 959 | 8,89 | 606 | 19,5 | 6,62 | 0,849 | 72,7 | 227,5 | 295 |
| 300 | 0,03531 | 1,003 | 39,13 | 2438 | 4,179 | 1,872 | 855 | 9,09 | 613 | 19,6 | 5,83 | 0,857 | 71,7 | 276,1 | 300 |
| 305 | 0,04712 | 1,005 | 29,74 | 2426 | 4,178 | 1,877 | 769 | 9,29 | 620 | 20,1 | 5,20 | 0,865 | 70,9 | 320,6 | 305 |
| 310 | 0,06221 | 1,007 | 22,93 | 2414 | 4,178 | 1,882 | 695 | 9,49 | 628 | 20,4 | 4,62 | 0,873 | 70,0 | 361,9 | 310 |
| 315 | 0,08132 | 1,009 | 17,82 | 2402 | 4,179 | 1,888 | 631 | 9,69 | 634 | 20,7 | 4,16 | 0,883 | 69,2 | 400,4 | 315 |
| 320 | 0,1053 | 1,011 | 13,98 | 2390 | 4,180 | 1,895 | 577 | 9,89 | 640 | 21,0 | 3,77 | 0,894 | 68,3 | 436,7 | 320 |
| 325 | 0,1351 | 1,013 | 11,06 | 2378 | 4,182 | 1,903 | 528 | 10,09 | 645 | 21,3 | 3,42 | 0,901 | 67,5 | 471,2 | 325 |
| 330 | 0,1719 | 1,016 | 8,82 | 2366 | 4,184 | 1,911 | 489 | 10,29 | 650 | 21,7 | 3,15 | 0,908 | 66,6 | 504,0 | 330 |
| 335 | 0,2167 | 1,018 | 7,09 | 2354 | 4,186 | 1,920 | 453 | 10,49 | 656 | 22,0 | 2,88 | 0,916 | 65,8 | 535,5 | 335 |
| 340 | 0,2713 | 1,021 | 5,74 | 2342 | 4,188 | 1,930 | 420 | 10,69 | 660 | 22,3 | 2,66 | 0,925 | 64,9 | 566,0 | 340 |
| 345 | 0,3372 | 1,024 | 4,683 | 2329 | 4,191 | 1,941 | 389 | 10,89 | 664 | 22,6 | 2,45 | 0,933 | 64,1 | 595,4 | 345 |
| 350 | 0,4163 | 1,027 | 3,846 | 2317 | 4,195 | 1,954 | 365 | 11,09 | 668 | 23,0 | 2,29 | 0,942 | 63,2 | 624,2 | 350 |
| 355 | 0,5100 | 1,030 | 3,180 | 2304 | 4,199 | 1,968 | 343 | 11,29 | 671 | 23,3 | 2,14 | 0,951 | 62,3 | 652,3 | 355 |
| 360 | 0,6209 | 1,034 | 2,645 | 2291 | 4,203 | 1,983 | 324 | 11,49 | 674 | 23,7 | 2,02 | 0,960 | 61,4 | 697,9 | 360 |
| 365 | 0,7514 | 1,038 | 2,212 | 2278 | 4,209 | 1,999 | 306 | 11,69 | 677 | 24,1 | 1,91 | 0,969 | 60,5 | 707,1 | 365 |
| 370 | 0,9040 | 1,041 | 1,861 | 2265 | 4,214 | 2,017 | 289 | 11,89 | 679 | 24,5 | 1,80 | 0,978 | 59,5 | 728,7 | 370 |
| 373,15 | 1,0133 | 1,044 | 1,679 | 2257 | 4,217 | 2,029 | 279 | 12,02 | 680 | 24,8 | 1,76 | 0,984 | 58,9 | 750,1 | 373,15 |
| 375 | 1,0815 | 1,045 | 1,574 | 2252 | 4,220 | 2,036 | 274 | 12,09 | 681 | 24,9 | 1,70 | 0,987 | 58,6 | 761 | 375 |
| 380 | 1,2869 | 1,049 | 1,337 | 2239 | 4,226 | 2,057 | 260 | 12,29 | 683 | 25,4 | 1,61 | 0,999 | 57,6 | 788 | 380 |
| 385 | 1,5233 | 1,053 | 1,142 | 2225 | 4,232 | 2,080 | 248 | 12,49 | 685 | 25,8 | 1,53 | 1,004 | 56,6 | 814 | 385 |
| 390 | 1,794 | 1,058 | 0,980 | 2212 | 4,239 | 2,104 | 237 | 12,69 | 686 | 26,3 | 1,47 | 1,013 | 55,6 | 841 | 390 |
| 400 | 2,455 | 1,067 | 0,731 | 2183 | 4,256 | 2,158 | 217 | 13,05 | 688 | 27,2 | 1,34 | 1,033 | 53,6 | 896 | 400 |
| 410 | 3,302 | 1,077 | 0,553 | 2153 | 4,278 | 2,221 | 200 | 13,42 | 688 | 28,2 | 1,24 | 1,054 | 51,5 | 952 | 410 |
| 420 | 4,370 | 1,088 | 0,425 | 2123 | 4,302 | 2,291 | 185 | 13,79 | 688 | 29,8 | 1,16 | 1,075 | 49,4 | 1010 | 420 |
| 430 | 5,699 | 1,099 | 0,331 | 2091 | 4,331 | 2,369 | 173 | 14,14 | 685 | 30,4 | 1,09 | 1,10 | 47,2 | | 430 |

Fonte: Incropera (2017).

ANEXO A.I – REATORES

Figura A.1 - Coeficientes globais de transferência padrão de operação

TABELA 11.2 Valores representativos do coeficiente global de transferência de calor

| Combinação de Fluidos | U (W/(m ² · K)) |
|---|------------------------------|
| Água para água | 850–1700 |
| Água para óleo | 110–350 |
| Condensador de vapor de água (água nos tubos) | 1000–6000 |
| Condensador de amônia (água nos tubos) | 800–1400 |
| Condensador de álcool (água nos tubos) | 250–700 |
| Trocador de calor com tubos aletados (água nos tubos, ar em escoamento cruzado) | 25–50 |

Fonte: Incropera (2017).

ANEXO A.J – MISTURADOR TIPO RIBBON

| CARACTERÍSTICAS | |
|------------------------------|--|
| Tecnologia | tipo ribbon |
| Batelada / contínuo | contínuo |
| Tipo de produtos processados | de pós, de granulados |
| Configuração | vertical, horizontal |
| Abertura de alimentação | com carregamento superior |
| Aplicações | para construção civil |
| Outras características | para produtos de alta viscosidade |
| Potência do motor | MÁX: 132 kW (179,5 hp) MÍN: 2,2 kW (3 hp) |
| Capacidade | MÁX: 18.000 l (4.755,1 gal) MÍN: 40 l (10,57 gal) |



Fonte: DirectIndustry (2023).

ANEXO A.K – MISTURADOR DE PÁS

| CARACTERÍSTICAS | |
|------------------------------|---|
| Tecnologia | de pás |
| Batelada / contínuo | contínuo |
| Tipo de produtos processados | para líquidos, de pós, de granulados |
| Aplicações | para bebidas, de lama e de cal, de asfalto, para procedimento biológico, para mineração, para a indústria de reciclagem |
| Outras características | em aço inoxidável, de 2 eixos |
| Potência do motor | MÁX: 22 kW (29,9 hp) MÍN: 2,2 kW (3 hp) |
| Vazão | MÁX: 70 m³/h (2.472,02667 ft³/h) MÍN: 3 m³/h (105,944 ft³/h) |
| Peso | MÁX: 1.235 kg (2.722,7 lb) MÍN: 400 kg (881,8 lb) |

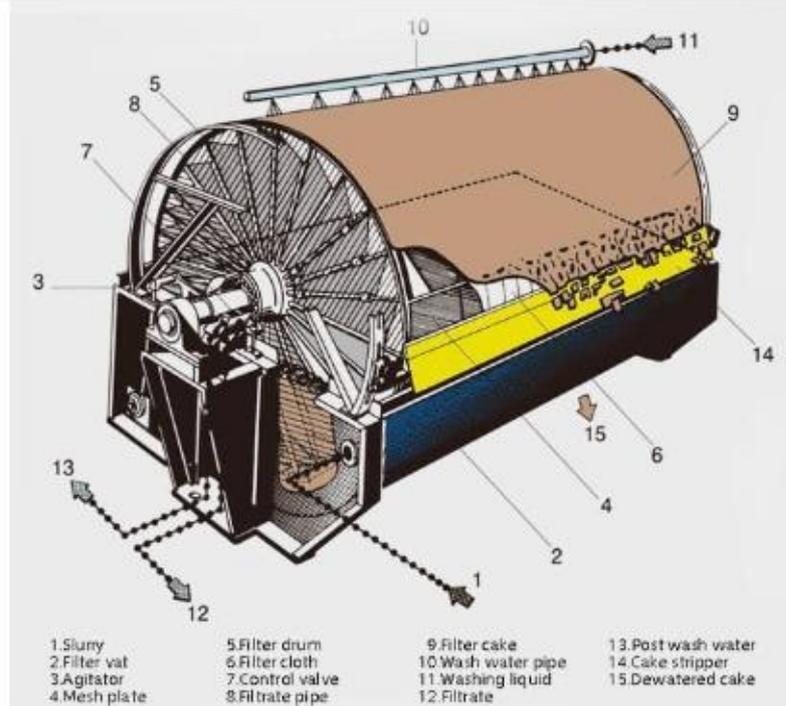


Fonte: DirectIndustry (2023).

ANEXO A.L – FILTRO DE TAMBOR ROTATIVO

Rotary Drum Filter Specifications

| Model | Filter Area | Cylinder Spec. (mm) | Cylinder Rotating Speed RPM | Magnetic Induction (mt) | Filter Cake Moisture (%) | Suction Rate (m ³ /min.m ²) | Gauge Pressure (kg/cm ²) | Capacity (t/h) | Motor Model | Motor Power (kW) | Weight (kg) |
|--------|-------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|--|--------------------------------------|----------------|-------------|------------------|-------------|
| GYW-3 | 3 | φ1600X700 | 0.5-2 | 80 | 8-11 | 1 | 0.1-0.3 | 6.0-9 | Y100L-6 | 1.5 | 3270 |
| GYW-5 | 5 | φ2000X900 | 0.5-2 | 80 | 8-11 | 1 | 0.1-0.3 | 14-18 | Y100L-6 | 1.5 | 3935 |
| GYW-8 | 8 | φ2000X1400 | 0.5-2 | 82 | 5-15 | 1 | 0.1-0.3 | 22-45 | Y100L-6 | 1.5 | 4755 |
| GYW-12 | 12 | φ2000X2000 | 0.5-2 | 87 | 5-15 | 1 | 0.1-0.3 | 33-65 | Y112M-6 | 2.2 | 5420 |
| GYW-20 | 20 | φ2550X2650 | 0.5-2 | 87 | 5-15 | 1 | 0.1-0.3 | 50-108 | Y132M2-6 | 5.5 | 6550 |



Fonte: 911metallurgist (2023).

ANEXO A.M – FORNO DE CALCINAÇÃO/SINTERIZAÇÃO

Figura A.1 - Dados termodinâmicos do ar

TABELA A.4 Propriedades termofísicas de gases à pressão atmosférica

| T (K) | ρ (kg/m ³) | c_p (kJ/(kg · K)) | $\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²) | $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s) | $k \cdot 10^3$ (W/(m · K)) | $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s) | Pr |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|---|---|-------------------------------|--|-------|
| Ar, $M = 28,97$ kg/kmol | | | | | | | |
| 100 | 3,5562 | 1,032 | 71,1 | 2,00 | 9,34 | 2,54 | 0,786 |
| 150 | 2,3364 | 1,012 | 103,4 | 4,426 | 13,8 | 5,84 | 0,758 |
| 200 | 1,7458 | 1,007 | 132,5 | 7,590 | 18,1 | 10,3 | 0,737 |
| 250 | 1,3947 | 1,006 | 159,6 | 11,44 | 22,3 | 15,9 | 0,720 |
| 300 | 1,1614 | 1,007 | 184,6 | 15,89 | 26,3 | 22,5 | 0,707 |
| 350 | 0,9950 | 1,009 | 208,2 | 20,92 | 30,0 | 29,9 | 0,700 |
| 400 | 0,8711 | 1,014 | 230,1 | 26,41 | 33,8 | 38,3 | 0,690 |
| 450 | 0,7740 | 1,021 | 250,7 | 32,39 | 37,3 | 47,2 | 0,686 |
| 500 | 0,6964 | 1,030 | 270,1 | 38,79 | 40,7 | 56,7 | 0,684 |
| 550 | 0,6329 | 1,040 | 288,4 | 45,57 | 43,9 | 66,7 | 0,683 |
| 600 | 0,5804 | 1,051 | 305,8 | 52,69 | 46,9 | 76,9 | 0,685 |
| 650 | 0,5356 | 1,063 | 322,5 | 60,21 | 49,7 | 87,3 | 0,690 |
| 700 | 0,4975 | 1,075 | 338,8 | 68,10 | 52,4 | 98,0 | 0,695 |
| 750 | 0,4643 | 1,087 | 354,6 | 76,37 | 54,9 | 109 | 0,702 |
| 800 | 0,4354 | 1,099 | 369,8 | 84,93 | 57,3 | 120 | 0,709 |
| 850 | 0,4097 | 1,110 | 384,3 | 93,80 | 59,6 | 131 | 0,716 |
| 900 | 0,3868 | 1,121 | 398,1 | 102,9 | 62,0 | 143 | 0,720 |
| 950 | 0,3666 | 1,131 | 411,3 | 112,2 | 64,3 | 155 | 0,723 |
| 1000 | 0,3482 | 1,141 | 424,4 | 121,9 | 66,7 | 168 | 0,726 |
| 1100 | 0,3166 | 1,159 | 449,0 | 141,8 | 71,5 | 195 | 0,728 |
| 1200 | 0,2902 | 1,175 | 473,0 | 162,9 | 76,3 | 224 | 0,728 |
| 1300 | 0,2679 | 1,189 | 496,0 | 185,1 | 82 | 257 | 0,719 |
| 1400 | 0,2488 | 1,207 | 530 | 213 | 91 | 303 | 0,703 |
| 1500 | 0,2322 | 1,230 | 557 | 240 | 100 | 350 | 0,685 |

Fonte: Incropera (2017).

ANEXO B.A – DIMENSÕES DE TUBOS COMERCIAIS

| Diâmetro nominal (pol) -- Diâmetro externo (mm) | Designação de espessura. (v. Nota 2) | Espessura de parede (mm) (v. Nota 3) | Diâmetro interno (mm) | Área da seção livre (cm ²) | Área da seção de metal (cm ²) | Superfície externa (m ² /m) | Peso aproximado (kg/m) | | Momento de inércia (cm ⁴) | Momento resistente (cm ³) | Raio de giração (cm) |
|---|---|---|-----------------------|--|---|--|------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| | | | | | | | Tubo vazio (Nota 5) | Conteúdo de água | | | |
| ¼ -- 13,7 | 10S | 1,65 | 10,4 | 0,85 | 0,62 | 0,043 | 0,49 | 0,085 | 0,116 | 0,169 | 0,430 |
| | Std, 40, 40S | 2,23 | 9,2 | 0,67 | 0,81 | | 0,62 | 0,067 | 0,138 | 0,202 | 0,413 |
| | XS, 80, 80S | 3,02 | 7,7 | 0,46 | 1,01 | | 0,79 | 0,046 | 0,157 | 0,229 | 0,393 |
| 1/8 -- 17,1 | 10S | 1,65 | 13,8 | 1,50 | 0,81 | 0,054 | 0,63 | 0,150 | 0,236 | 0,285 | 0,551 |
| | Std, 40, 40S | 2,31 | 12,5 | 1,23 | 1,08 | | 0,84 | 0,123 | 0,304 | 0,354 | 0,531 |
| | XS, 80, 80S | 3,20 | 10,7 | 0,91 | 1,40 | | 1,10 | 0,090 | 0,359 | 0,419 | 0,506 |
| ½ -- 21 | Std, 40, 40S | 2,77 | 15,8 | 1,96 | 1,61 | 0,071 | 0,42 | 0,20 | 0,71 | 0,67 | 0,66 |
| | XS, 80, 80S | 3,73 | 13,8 | 1,51 | 2,06 | | 1,62 | 0,15 | 0,84 | 0,78 | 0,64 |
| | 160 | 4,75 | 11,8 | 1,10 | 2,47 | | 1,94 | 0,11 | 0,92 | 0,86 | 0,61 |
| | XXS | 7,47 | 6,4 | 0,32 | 3,52 | | 2,55 | 0,03 | 1,01 | 0,95 | 0,56 |
| ¾ -- 27 | Std, 40, 40S | 2,87 | 20,9 | 3,44 | 2,15 | 0,083 | 1,68 | 0,34 | 1,54 | 1,16 | 0,85 |
| | XS, 80, 80S | 3,91 | 18,8 | 2,79 | 2,80 | | 2,19 | 0,28 | 1,86 | 1,40 | 0,82 |
| | 160 | 5,54 | 15,6 | 1,91 | 3,68 | | 2,88 | 0,19 | 2,19 | 1,65 | 0,77 |
| | XXS | 7,82 | 11,0 | 0,95 | 4,63 | | 3,63 | 0,10 | 2,41 | 1,81 | 0,72 |
| 1 -- 33 | Std, 40, 40S | 3,37 | 26,6 | 5,57 | 3,19 | 0,105 | 2,50 | 0,56 | 2,64 | 2,18 | 1,07 |
| | XS, 80, 80S | 4,55 | 24,3 | 4,64 | 4,12 | | 3,23 | 0,46 | 4,40 | 2,63 | 1,03 |
| | 160 | 6,35 | 20,7 | 3,37 | 5,39 | | 4,23 | 0,34 | 5,21 | 3,12 | 0,98 |
| | XXS | 9,09 | 15,2 | 1,82 | 6,94 | | 5,44 | 0,18 | 5,85 | 3,50 | 0,92 |
| 1¼ -- 42 | Std, 40, 40S | 3,56 | 35 | 9,65 | 4,32 | 0,132 | 3,38 | 0,96 | 8,11 | 3,85 | 1,37 |
| | XS, 80, 80S | 4,85 | 32,5 | 8,28 | 5,68 | | 4,46 | 0,83 | 10,06 | 4,77 | 1,33 |
| | 160 | 6,35 | 29,4 | 6,82 | 7,14 | | 5,60 | 0,68 | 11,82 | 5,61 | 1,29 |
| | XXS | 9,70 | 22,7 | 4,07 | 9,90 | | 7,76 | 0,41 | 14,19 | 6,74 | 1,20 |
| 1½ -- 48 | Std, 40, 40S | 3,68 | 40,8 | 13,1 | 5,15 | 0,151 | 4,04 | 1,31 | 12,90 | 5,34 | 1,58 |
| | XS, 80, 80S | 5,08 | 38,1 | 11,4 | 6,89 | | 5,40 | 1,14 | 16,27 | 6,75 | 1,54 |
| | 160 | 7,14 | 33,9 | 9,07 | 9,22 | | 7,23 | 0,91 | 20,10 | 8,33 | 1,48 |
| | XXS | 10,16 | 27,9 | 6,13 | 12,2 | | 9,53 | 0,61 | 23,64 | 9,80 | 1,39 |
| 2 -- 60 | Std, 40, 40S | 3,91 | 52,5 | 21,7 | 6,93 | 0,196 | 5,44 | 2,17 | 27,72 | 9,20 | 2,00 |
| | XS, 80, 80S | 5,54 | 49,2 | 19,0 | 9,53 | | 7,47 | 1,90 | 36,13 | 11,98 | 1,95 |
| | 160 | 8,71 | 42,9 | 14,4 | 14,1 | | 11,08 | 1,44 | 48,41 | 16,05 | 1,85 |
| | XXS | 11,07 | 38,2 | 11,4 | 17,1 | | 13,44 | 1,14 | 54,61 | 18,10 | 1,79 |
| 2½ -- 73 | Std, 40, 40S | 5,16 | 62,7 | 30,9 | 11,0 | 0,235 | 8,62 | 3,09 | 63,68 | 17,44 | 2,41 |
| | XS, 80, 80S | 7,01 | 59,0 | 27,3 | 14,5 | | 11,40 | 2,73 | 80,12 | 21,95 | 2,35 |
| | 160 | 9,52 | 54,0 | 22,9 | 19,0 | | 14,89 | 2,29 | 97,94 | 26,83 | 2,27 |
| | XXS | 14,0 | 44,9 | 15,9 | 26,0 | | 20,39 | 1,59 | 119,5 | 32,75 | 2,14 |
| 3 -- 89 | 10S | 3,05 | 82,8 | 53,9 | 8,22 | 0,282 | 6,44 | 5,39 | 75,84 | 17,06 | 3,04 |
| | Std, 40, 40S | 5,48 | 77,9 | 47,7 | 14,4 | | 11,28 | 4,77 | 125,70 | 28,26 | 2,96 |
| | XS, 80, 80S | 7,62 | 73,6 | 42,6 | 19,5 | | 15,25 | 4,26 | 162,33 | 36,48 | 2,89 |
| | 160 | 11,1 | 66,7 | 34,9 | 27,2 | | 21,31 | 3,49 | 209,36 | 47,14 | 2,78 |
| | XXS | 15,2 | 58,4 | 26,8 | 35,3 | | 27,65 | 2,68 | 249,32 | 56,22 | 2,66 |

| Diâmetro nominal (pol) -- Diâmetro externo (mm) | Designação de espessura. (v. Nota 2) | Espessura de parede (mm) (v. Nota 3) | Diâmetro interno (mm) | Área da seção livre (cm ²) | Área da seção de metal (cm ²) | Superfície externa (m ² /m) | Peso aproximado (kg/m) | | Momento de inércia (cm ⁴) | Momento resistente (cm ³) | Raio de giração (cm) |
|---|---|---|-----------------------|--|---|--|------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| | | | | | | | Tubo vazio (Nota 5) | Conteúdo de água | | | |
| 4 | 10S | 3,05 | 108,2 | 91,9 | 10,6 | 0,361 | 8,35 | 9,19 | 164,83 | 28,88 | 3,93 |
| -- | Std, 40, 40S | 6,02 | 102,3 | 82,1 | 20,4 | | 16,06 | 8,21 | 300,93 | 52,61 | 3,84 |
| | XS, 80, 80S | 8,56 | 97,2 | 74,2 | 28,4 | | 22,29 | 7,42 | 399,99 | 69,99 | 3,75 |
| | 160 | 13,5 | 87,3 | 59,9 | 42,7 | | 33,49 | 5,99 | 552,34 | 96,70 | 3,60 |
| 114 | XXS | 17,1 | 80,1 | 50,3 | 52,3 | | 40,98 | 5,03 | 636,42 | 111,29 | 3,49 |
| 6 | 10S | 3,40 | 161,4 | 204,5 | 17,6 | 0,535 | 13,82 | 20,45 | 599,37 | 71,30 | 5,83 |
| -- | Std, 40, 40S | 7,11 | 154,0 | 186,4 | 36,0 | | 28,23 | 18,64 | 1171,3 | 139,32 | 5,70 |
| | XS, 80, 80S | 10,97 | 146,3 | 168,2 | 54,2 | | 42,51 | 16,82 | 1685,7 | 200,45 | 5,58 |
| | 120 | 14,3 | 139,7 | 153,4 | 69,0 | | 54,15 | 15,34 | 2064,5 | 245,52 | 5,47 |
| | 160 | 18,2 | 131,8 | 136,4 | 86,0 | | 67,41 | 13,64 | 2455,8 | 291,91 | 5,34 |
| 168 | XXS | 21,9 | 124,4 | 121,5 | 100,9 | | 79,10 | 12,15 | 2759,6 | 328,29 | 5,23 |
| 8 | 10S | 3,76 | 211,5 | 351,6 | 25,4 | 0,692 | 19,93 | 35,16 | 1473,4 | 134,56 | 7,62 |
| -- | Std, 40, 40S | 8,18 | 202,7 | 322,6 | 54,2 | | 42,48 | 32,26 | 3017,7 | 275,52 | 7,46 |
| | 60 | 10,3 | 198,4 | 309,1 | 67,6 | | 53,03 | 30,91 | 3696,1 | 337,31 | 7,39 |
| | XS, 80, 80S | 12,7 | 193,7 | 294,8 | 82,3 | | 64,56 | 29,48 | 4399,5 | 401,88 | 7,31 |
| | 120 | 18,2 | 182,6 | 261,9 | 115,1 | | 90,22 | 26,19 | 5852,2 | 534,31 | 7,13 |
| | 160 | 22,2 | 174,6 | 239,4 | 137,4 | | 107,8 | 23,94 | 6742,9 | 616,26 | 7,00 |
| 219 | XXS | 23,0 | 173,1 | 235,5 | 141,7 | | 111,1 | 23,55 | 6905,3 | 631,02 | 6,98 |
| 10 | SS | 3,40 | 266,2 | 556,8 | 29,2 | 0,858 | 22,54 | 55,68 | 2651,4 | 194,22 | 9,53 |
| -- | 10S | 4,19 | 264,7 | 550,3 | 35,4 | | 27,83 | 55,03 | 3200,8 | 234,38 | 9,50 |
| | Std, 40, 40S | 9,27 | 254,5 | 509,1 | 76,8 | | 60,23 | 50,91 | 6692,9 | 490,06 | 9,32 |
| | XS, 60, 80S | 12,7 | 247,6 | 481,9 | 103,9 | | 81,45 | 48,19 | 8824,1 | 645,77 | 9,22 |
| | 80 | 15,1 | 242,9 | 463,2 | 122,1 | | 95,72 | 46,32 | 10193 | 747,38 | 9,14 |
| | 120 | 21,4 | 230,2 | 416,1 | 169,3 | | 132,7 | 41,61 | 13486 | 988,32 | 8,94 |
| 273 | 160 | 28,6 | 215,9 | 365,8 | 219,4 | | 172,1 | 36,58 | 16607 | 1217,8 | 8,71 |
| 12 | SS | 4,19 | 315,5 | 782,0 | 42,1 | 1,018 | 29,11 | 78,20 | 5377,7 | 332,23 | 11,30 |
| -- | 10S | 4,57 | 314,7 | 778,1 | 45,9 | | 36,00 | 77,81 | 5848,0 | 361,07 | 11,28 |
| | 20 | 6,35 | 311,1 | 760,7 | 63,5 | | 57,10 | 76,07 | 7987,5 | 493,34 | 11,23 |
| | Std, 40S | 9,52 | 304,8 | 729,6 | 94,1 | | 73,74 | 72,96 | 11675 | 717,88 | 11,13 |
| | 40 | 10,3 | 303,2 | 722,0 | 101,5 | | 79,65 | 72,20 | 12487 | 771,97 | 11,10 |
| | XS, 80S | 12,7 | 298,4 | 699,4 | 124,1 | | 97,34 | 69,94 | 15067 | 929,31 | 11,00 |
| | 60 | 14,3 | 295,3 | 685,2 | 138,8 | | 108,8 | 68,52 | 16691 | 1029,3 | 10,95 |
| | 80 | 17,4 | 288,9 | 655,5 | 168,0 | | 131,7 | 65,55 | 19771 | 1221,1 | 10,85 |
| 324 | 120 | 25,4 | 273,0 | 585,8 | 238,1 | | 186,7 | 58,58 | 26722 | 1650,5 | 10,59 |
| 14 | 10 | 6,35 | 342,9 | 923,3 | 69,7 | 1,118 | 54,62 | 92,33 | 10630 | 598,24 | 12,34 |
| -- | Std, 30 | 9,52 | 336,5 | 889,7 | 103,5 | | 81,20 | 88,97 | 15525 | 873,59 | 12,24 |
| | 40 | 11,1 | 333,4 | 872,9 | 120,1 | | 94,29 | 87,29 | 17856 | 1003,1 | 12,19 |
| | XS | 12,7 | 330,2 | 856,2 | 136,8 | | 107,3 | 85,62 | 20145 | 1132,5 | 12,14 |
| | 60 | 15,1 | 325,5 | 832,3 | 161,2 | | 126,3 | 83,23 | 23392 | 1316,1 | 12,04 |
| | 80 | 19,0 | 317,5 | 791,7 | 201,3 | | 157,9 | 79,17 | 28595 | 1609,5 | 11,91 |
| 356 | 100 | 23,8 | 308,0 | 745,2 | 248,4 | | 194,5 | 74,52 | 34339 | 1930,7 | 11,76 |
| 16 | 10 | 6,35 | 393,7 | 1217,5 | 79,8 | 1,277 | 62,57 | 121,7 | 15983 | 786,72 | 14,15 |
| -- | Std, 30 | 9,52 | 387,3 | 1178,1 | 118,8 | | 93,12 | 117,8 | 23392 | 1152,2 | 14,05 |
| | XS, 40 | 12,7 | 381,0 | 1140,1 | 157,1 | | 123,2 | 114,0 | 30468 | 1499,7 | 13,92 |
| | 60 | 16,6 | 373,1 | 1093,0 | 203,9 | | 159,9 | 109,3 | 38834 | 1911,1 | 13,79 |
| | 80 | 21,4 | 363,6 | 1038,1 | 258,7 | | 203,0 | 103,8 | 48158 | 2370,0 | 13,64 |
| 406 | 100 | 26,2 | 354,0 | 984,6 | 312,9 | | 245,3 | 98,46 | 56815 | 2796,1 | 13,46 |
| 18 | 10 | 6,35 | 444,5 | 1551,7 | 89,9 | 1,436 | 70,52 | 155,2 | 22851 | 999,79 | 15,95 |
| -- | Std | 9,52 | 438,1 | 1507,8 | 133,9 | | 105,0 | 150,8 | 33589 | 1468,5 | 15,82 |
| | XS | 12,7 | 431,8 | 1464,6 | 177,4 | | 139,0 | 146,5 | 43829 | 1917,6 | 15,72 |
| | 40 | 14,3 | 428,6 | 1443,3 | 198,7 | | 155,9 | 144,3 | 48782 | 2133,9 | 15,67 |
| | 60 | 19,0 | 419,1 | 1379,4 | 261,9 | | 205,6 | 137,9 | 63059 | 2758,4 | 15,49 |
| | 80 | 23,8 | 409,6 | 1317,5 | 323,9 | | 254,1 | 131,7 | 76337 | 3340,3 | 15,34 |
| 457 | 100 | 29,4 | 398,5 | 1247,2 | 394,8 | | 309,4 | 124,7 | 90738 | 3969,7 | 15,16 |
| 20 | 10 | 6,35 | 495,3 | 1926,6 | 100,1 | 1,597 | 78,46 | 192,7 | 31509 | 1240,7 | 17,73 |
| -- | Std, 20 | 9,52 | 488,9 | 1877,5 | 149,2 | | 116,9 | 187,7 | 46368 | 1825,8 | 17,63 |
| | XS, 30 | 12,7 | 482,6 | 1829,1 | 197,4 | | 154,9 | 182,9 | 60645 | 2388,0 | 17,53 |
| | 40 | 15,1 | 477,9 | 1793,6 | 233,5 | | 182,9 | 179,4 | 70926 | 2792,9 | 17,42 |
| | 60 | 20,6 | 466,7 | 1711,1 | 315,5 | | 247,6 | 171,1 | 93943 | 3699,2 | 17,25 |
| | 80 | 26,2 | 455,6 | 1630,4 | 396,1 | | 310,8 | 163,0 | 115379 | 4543,3 | 17,07 |
| 508 | 100 | 32,5 | 442,9 | 1540,7 | 485,8 | | 381,1 | 154,1 | 138188 | 5441,5 | 16,84 |
| 24 | 10 | 6,35 | 596,9 | 2800,2 | 120,3 | 1,914 | 94,35 | 280,0 | 54776 | 1796,3 | 21,34 |
| -- | Std, 20 | 9,52 | 590,5 | 2742,1 | 179,5 | | 140,8 | 274,2 | 80873 | 2482,8 | 21,21 |
| | XS | 12,7 | 584,2 | 2677,6 | 238,1 | | 186,7 | 267,8 | 106139 | 2653,5 | 21,11 |
| | 40 | 17,4 | 574,7 | 2593,7 | 324,5 | | 254,7 | 259,4 | 142351 | 4674,4 | 20,96 |
| | 60 | 24,6 | 560,4 | 2464,6 | 451,6 | | 354,3 | 246,5 | 193547 | 6359,3 | 20,70 |
| | 80 | 30,9 | 547,7 | 2355,0 | 562,6 | | 440,9 | 235,5 | 236002 | 7752,5 | 20,50 |
| 610 | 100 | 38,9 | 531,8 | 2219,5 | 697,5 | | 546,7 | 221,9 | 285118 | 9358,7 | 20,22 |

Fonte: Netto (1998).

ANEXO B.B – ESPESSURA DO ISOLAMENTO TÉRMICO

| Diâmetro dos tubos (pol.) | Isolamento de tubos (polegadas) | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 38 a 92°C | 93 a 148°C | 149 a 203°C | 204 a 259°C | 260 a 315°C | 316 a 370°C | 371 a 426°C | 427 a 481°C | 482 a 537°C | 538 a 592°C | 593 a 648°C |
| 1½ | 1 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 2½ | 2½ | 2½ | 3 | 3 | 3 |
| 2 | 1 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 2½ | 3 | 3 | 3 | 3½ | 3½ |
| 2½ | 1 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 2½ | 3 | 3 | 3 | 3½ | 3½ |
| 3 | 1 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 2½ | 3 | 3 | 3 | 3½ | 3½ |
| 4 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 2½ | 2½ | 3 | 3 | 3½ | 4 | 4 |
| 5 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 2½ | 3 | 3½ | 3½ | 4 | 4 | 4½ |
| 6 | 1 | 1½ | 2 | 2 | 3 | 3 | 3½ | 3½ | 4 | 4 | 4½ |
| 8 | 1½ | 1½ | 2 | 2½ | 3 | 3 | 3½ | 3½ | 4 | 4½ | 5 |

Para maiores diâmetros, consultar o catálogo da Calorisol

Fonte: Macintyre (2010).

ANEXO B.C – TUBULAÇÃO DE CONDENSADO

TABELA 9.3 Tubulação de condensado

| Perda de carga J (mm/m) | Declividade (cm/m) | Diâmetro da tubulação de condensado | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | | 1/2" | 3/4" | 1" | 1 1/4" | 1 1/2" | 2" | 2 1/2" | 3" | 4" | 5" | 6" |
| kg/h de Condensado | | | | | | | | | | | | |
| 0,5 | 0,05 | 22 | 60 | 130 | 300 | 450 | 910 | 1.800 | 3.000 | 6.000 | 11.000 | 15.500 |
| 1 | 0,1 | 38 | 100 | 200 | 450 | 680 | 1.330 | 2.700 | 4.380 | 9.000 | 12.600 | 19.000 |
| 2 | 0,2 | 55 | 145 | 290 | 640 | 980 | 1.940 | 3.900 | 6.380 | 13.000 | 16.000 | 25.500 |
| 3 | 0,3 | 75 | 180 | 360 | 780 | 1.220 | 2.400 | 4.900 | 7.900 | 16.250 | 27.000 | 45.000 |
| 4 | 0,4 | 85 | 210 | 420 | 910 | 1.430 | 2.800 | 5.700 | 9.200 | 18.950 | 31.500 | 51.000 |
| 5 | 0,5 | 95 | 240 | 470 | 1.000 | 1.600 | 3.150 | 6.400 | 10.400 | 21.300 | 35.500 | 58.000 |
| 6 | 0,6 | 101 | 260 | 520 | 1.140 | 1.750 | 3.500 | 7.100 | 11.450 | 23.500 | 41.000 | 64.000 |
| 7 | 0,7 | 108 | 290 | 570 | 1.245 | 2.000 | 3.800 | 7.750 | 12.500 | 25.800 | 44.000 | 70.000 |
| 8 | 0,8 | 112 | 310 | 610 | 1.300 | 2.080 | 4.050 | 8.250 | 13.400 | 27.500 | 46.000 | 75.000 |
| 9 | 0,9 | 118 | 330 | 650 | 1.450 | 2.210 | 4.350 | 8.800 | 14.250 | 29.300 | 49.000 | 80.000 |
| 10 | 1,0 | 122 | 350 | 690 | 1.550 | 2.300 | 4.600 | 9.350 | 15.100 | 31.000 | 52.000 | 84.000 |
| 15 | 1,5 | 148 | 430 | 850 | 1.780 | 2.900 | 5.700 | 11.600 | 18.750 | 38.550 | 61.000 | 98.500 |
| 20 | 2,0 | 175 | 500 | 1.000 | 2.100 | 3.400 | 6.690 | 13.550 | 21.950 | 45.000 | 70.000 | 115.000 |
| 25 | 2,5 | 200 | 570 | 1.130 | 2.400 | 3.800 | 7.500 | 15.300 | 24.500 | 50.800 | 79.000 | 130.000 |
| 30 | 3,0 | 228 | 630 | 1.250 | 2.670 | 4.200 | 8.300 | 16.950 | 27.300 | 56.000 | 90.000 | 135.000 |
| 35 | 3,5 | 256 | 680 | 1.300 | 2.900 | 4.600 | 9.000 | 18.400 | 29.800 | 61.000 | 98.000 | 154.000 |
| 40 | 4,0 | 300 | 720 | 1.400 | 3.020 | 4.900 | 9.700 | 19.500 | 31.000 | 65.000 | 105.000 | 164.000 |

Fonte: Macintyre (2010).

ANEXO B.D - COMPRESSOR INDUSTRIAL DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO



ZIQI Oil Free Water Lubricant Screw Air Compressor Advantages:

1. 100% oil-free , good reliability

There is no oil in the water-lubricated screw body, which will not cause oil pollution of the compressed air. It belongs to a completely oil-free screw air compressor. Dry-type oil-free machine bearings, gearboxes, and intercoolers require oil to participate in lubrication and sealing. The high temperature of the unit can easily cause oil leakage to pollute the compressed air. It is a semi-oil-free compressor.

2. Isothermal compression, high efficiency, no flammable, explosive, etc.

The operating temperature of the oil-free screw machine does not exceed 50°C, and the gas does not expand to save energy by more than 15%. The exhaust temperature of the semi-oil-free screw machine is above 180°C. The high temperature makes the bearing, screw, body, and sealing material have a very short service life and must be expensive. s material. The volatilization of lubricating oil at high temperatures can cause fires and explosions.

3. Power saving: water-lubricated compressor is one of the lower energy consumption of oil-free machines in the world.

ZIQI air dry oil-free air compressor 90KW, nameplate capacity 12.50m³/min (10bar), water-jet all oil-free air compressor 90KW, the actual measured air volume is 14.52m³/min (10bar), the displacement has increased by 16%. This means that users save 16% of electricity. According to the calculation based on running 24 hours a day and the electricity cost of 1.0 yuan/kWh, each unit can save 1.26 million yuan in electricity costs for ten years.

4. The compression temperature is relatively low, the host has a long life, the maintenance cost is relatively low, and the trouble-free operation cycle is long. The main engine of the water-jet all-oil-free compressor has a general warranty of 5 years and a design life of more than 25 years. Low maintenance costs are a reliable choice for formal enterprises to focus on energy management and reduce product costs.

5. Simple maintenance and no worries

It is as simple as a "water pump" to ensure no worries.

6. Dry

The water content in compressed air is low. All compressors produce 100% saturated water vapor. The pressure dew point of water-injected and oil-free compressed air is less than 40 degrees Celsius. Actually, it contains less water, and a lot of water in the air will be discharged. .

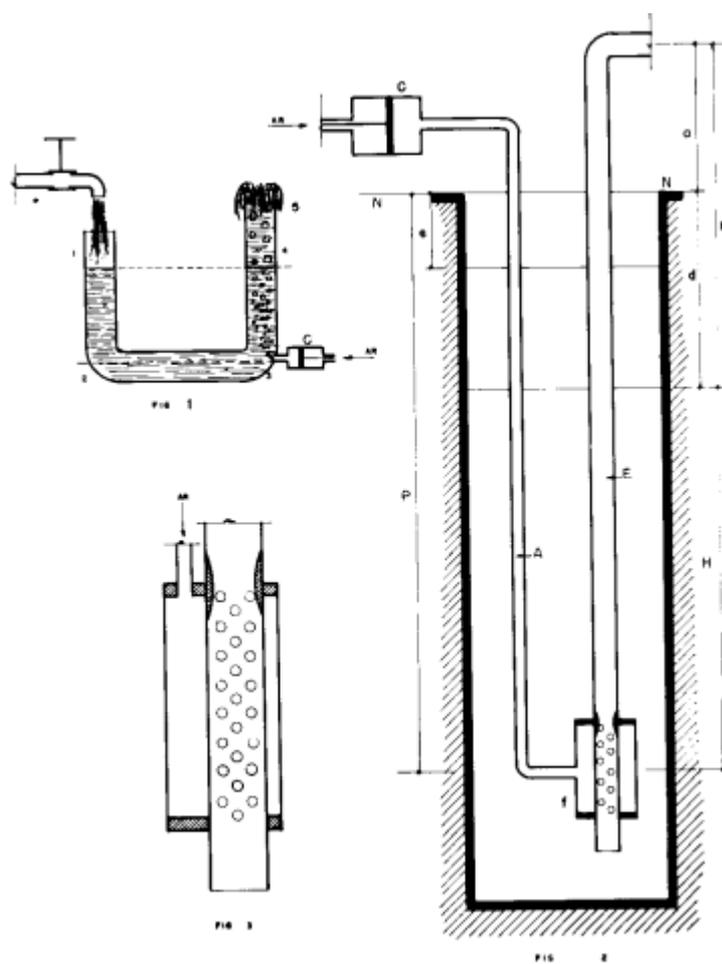
| Model | Air pressure | | | Air flowing | | Motorpower | | Driving mode&Cooling method | Dimension | | | Weight Kgs | Noise dB(A) | Air outlet pipe mm |
|---------|--------------|--------|--------|---------------------|-----|------------|-----|------------------------------|-----------|-------|-------|---------------|----------------|-----------------------|
| | mpa | bar(e) | psi(g) | m ³ /min | cfm | hp | kw | | L(mm) | W(mm) | H(mm) | | | |
| OF-132W | 0.7 | 7 | 102 | 25 | 883 | 179 | 132 | Direct drive & Water cooling | 2150 | 1600 | 1680 | 3250 | 72±2 | ND80 |
| | 0.8 | 8 | 116 | 23 | 812 | | | | | | | | | |
| | 1 | 10 | 145 | 20 | 706 | | | | | | | | | |

Fonte: Ziqi (2021).

ANEXO B.E – LIMITES PARA A SUBMERGÊNCIA E FATORES DE CONSUMO**QUADRO I**

| h metros | Submergência | |
|---------------------|---------------------|--------------------|
| | Normal | % Ótima |
| 4 a 40 | 50 a 70 | 58 |
| 40 a 75 | 40 a 60 | 50 |
| 100 a 200 | 37 a 50 | 48 |
| 200 a 250 | 35 a 45 | 38 |

Fonte: Lopes & Silvestre (1967).

ANEXO B.F – ESQUEMA HIDROEMULSOR

Fonte: Lopes & Silvestre (1967).

ANEXO B.G – VALORES DE C CONSIDERANDO A SUBMERSÃO

| Porcentagem de submersão | C | |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| | Tubo de ar externo | Tubo de ar interno |
| 75 | 14.92 | 13.45 |
| 70 | 14.59 | 13.12 |
| 65 | 14.18 | 12.47 |
| 60 | 13.65 | 11.62 |
| 55 | 12.96 | 10.68 |
| 50 | 12.06 | 9.70 |
| 45 | 11.09 | 8.72 |
| 40 | 10.03 | 7.54 |
| 35 | 8.80 | 6.60 |

Fonte: Yassuda (1965).

ANEXO B.H – BOMBA CENTRÍFUGA

Chemical centrifugal pumps**Normal-priming chemical motor pump units MB**

Chemical motor pump units MB

In short

- Single-stage, normal-priming pumps with horizontal axis
- Open impeller
- Pump head made of high-quality thick-walled plastic material
- Corrosion-resistant
- Wetted-end parts made of highly resistant material
- Special varnish, stainless steel pump shaft with shaft protection sleeve
- Shaft seals single or double-acting
- Vibrationless operation

Seal designs:

- Single-acting, internal mechanical seal, independent direction of rotation (B2 I)
- Single-acting, independent direction of rotation with quenching chamber (B2 Q) for supply of external liquid
- Double acting with sealing chamber (B2 D) for separate barrier and buffer fluid systems
- Special designs on request

Chemical motor pump units MB

| | |
|----------------------|---|
| Design | block design |
| Materials | PP, PVDF (further materials on request) |
| Max. flow rate Q | 19 m ³ /h |
| Max. delivery head H | 30 m |
| Motor power | 0.37 ... 2.2 kW (2900 min ⁻¹) |
| Temperature | PP max. 80 °C, PVDF max. 120 °C (subject to the medium) |

Fonte: Lutz-Jesco (2023).