

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Abner Fernandes de Paula**

**Análise da utilização de baterias de íons de lítio em equipamentos de  
movimentação logística: Uma perspectiva técnica e financeira**

Juiz de Fora

2024

**Abner Fernandes de Paula**

**Análise da utilização de baterias de íons de lítio em equipamentos de movimentação logística: Uma perspectiva técnica e financeira**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Modalidade: Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Gomes Barbosa

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

de Paula, Abner Fernandes.

Análise da utilização de baterias de íons de lítio em equipamentos de movimentação logística: Uma perspectiva técnica e financeira / Abner Fernandes de Paula. – 2024.

54 p. : il.

Orientador: Pedro Gomes Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica, 2024.

1. Transição Energética. 2. Bateria de Íons de Lítio. 3. Veículos Elétricos. I. Barbosa, Pedro Gomes, orient. II. Título.

**Abner Fernandes de Paula**

**Análise da utilização de baterias de íons de lítio em equipamentos de movimentação logística:**  
Uma perspectiva técnica e financeira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica. Modalidade: Energia.

Aprovada em 02 de outubro de 2024.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Pedro Gomes Barbosa** - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof. Dr. Israel Filipe Lopes**

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 03/10/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Gomes Barbosa, Professor(a)**, em 03/10/2024, às 16:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Israel Filipe Lopes, Professor(a)**, em 03/10/2024, às 17:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---

*Este projeto é dedicado ao meu avô Waldenor  
Fernandes (in memoriam), maior exemplo de um ser  
humano íntegro e ético.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, porque sem ele nada seria possível.

Agradeço aos meus pais, Ilza de Paula e Carlos Alberto de Paula, e ao meu irmão, Filipe de Paula, pelo carinho, atenção e apoio incondicional que sempre me ofereceram ao longo da minha vida. O amor e a dedicação de vocês foram essenciais para que eu pudesse alcançar meus objetivos, e sou eternamente grato por tudo o que fizeram por mim.

Agradeço à minha esposa, Sara de Paula, e ao meu filho, Bernardo de Paula, por compreenderem as várias horas em que estive ausente devido à graduação. O apoio e a paciência de vocês foram fundamentais durante esse período. Vocês são minha maior motivação e fonte de inspiração.

À meu orientador, Prof. Dr. Pedro Gomes Barbosa, expresso minha sincera gratidão pela oportunidade, confiança, paciência, amizade e apoio incondicional durante a elaboração deste trabalho e ao longo da graduação. Sua orientação foi fundamental para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Também agradeço a todos os meus colegas de curso pela oportunidade de convívio e pela colaboração mútua ao longo destes anos. Em especial, quero reconhecer meu amigo Eduardo Cid, cuja amizade e companheirismo foram fundamentais para tornar essa jornada possível.

Não poderia deixar de agradecer a todos do Grupo Bahamas, em especial à minha liderança, Claudio Taiba, Gustavo Suzano e Flávio Finzer, por me apoiar durante a graduação ao disponibilizar horários para que eu pudesse assistir às aulas. O apoio, o incentivo e a orientação de vocês foram importantes para meu desenvolvimento e aprendizado. Sou muito grato pela confiança e por todas as oportunidades que tive de crescer profissionalmente ao lado de vocês.

Agradeço aos membros da banca avaliadora, pela disponibilidade de participar e pelas contribuições dadas neste texto.

Sou grato a todo o corpo docente da Universidade Federal de Juiz de Fora, que sempre transmitiu seu conhecimento com grande profissionalismo. Também agradeço pelo suporte educacional e pela infraestrutura laboratorial disponibilizados pela Faculdade de Engenharia e pela Universidade Federal de Juiz de Fora, sem os quais o desenvolvimento deste trabalho não teria sido possível.

## RESUMO

Este estudo aborda o uso de baterias de íons de lítio em equipamentos de movimentação para logística interna, destacando vantagens tecnológicas e econômicas importantes em comparação às baterias de chumbo-ácido convencionais. O estudo de caso oferece uma visão abrangente das aplicações, demonstrando benefícios operacionais e econômicos em diversos cenários, além de estratégias para mitigar os impactos de falhas de energia nas operações logísticas. A simulação e a análise de dados fornecem informações valiosas para otimizar o desempenho das baterias e aumentar a resiliência do sistema no contexto logístico.

Palavras-chave: Transição Energética. Bateria de Íons de Lítio. Veículos Elétricos.

## ABSTRACT

This monograph examines the application of lithium-ion technology in handling devices for intralogistics, emphasizing its significant technological and economic advantages over conventional lead-acid batteries. The case study offers a comprehensive overview of various implementations and processes that enable operational and economic benefits across multiple scenarios, alongside compensatory actions aimed at minimizing the impact of power outages on internal logistics. The simulation and data analysis provide valuable insights for optimizing battery performance and enhancing the resilience of logistics operations.

Keywords: Energetic Transition. Lithium-ion Battery. Electric Vehicle.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Componentes da empilhadeira contrabalançada. . . . .	15
Figura 2	– Componentes da empilhadeira retrátil. . . . .	17
Figura 3	– Densidade de energia <i>versus</i> energia específica para diferentes tipos de bateria. . . . .	18
Figura 4	– Esquema básico de bateria de chumbo-ácido. . . . .	21
Figura 5	– Gráfico de estado de carga <i>versus</i> tensão de uma célula de chumbo-ácido. . . . .	22
Figura 6	– Número de ciclos <i>versus</i> profundidade de descarga (DoD) para bateria de chumbo-ácido. . . . .	23
Figura 7	– Esquema de uma célula de bateria de íon de lítio de fosfato de ferro (LiFePO <sub>4</sub> ). . . . .	26
Figura 8	– Gráfico de estado de carga <i>versus</i> tensão de uma célula de íon-lítio. . . . .	27
Figura 9	– Diagrama da composição de uma bateria. . . . .	28
Figura 10	– Esquema básico de componentes do <b>BMS</b> . . . . .	29
Figura 11	– Percurso do VDI 2198. . . . .	35
Figura 12	– Fluxograma de tratamento de dados de telemetria dos equipamentos. . . . .	38
Figura 13	– Fluxograma do algoritmo de modelagem e cálculo do SoC da bateria. . . . .	39
Figura 14	– Estado de carga (SoC) da bateria ao longo do tempo com utilização leve. . . . .	40
Figura 15	– Estado de Carga (SoC) da Bateria ao Longo do Tempo com Utilização Média. . . . .	41
Figura 16	– Estado de carga (SoC) da bateria ao longo do tempo com utilização pesada. . . . .	41
Figura 17	– Fluxograma do algoritmo para tratar os dados de faltas de energia elétrica. . . . .	42
Figura 18	– Fluxograma do processo de criação e análise de dados de faltas. . . . .	43
Figura 19	– Frequência de interrupções de fornecimento de energia por mês em 2022. . . . .	45
Figura 20	– Frequência de interrupções de fornecimento de energia por mês em 2023. . . . .	45
Figura 21	– Histograma de frequência interrupções de fornecimento de energia anual (2018-2023). . . . .	46
Figura 22	– Estado de carga (SoC) da bateria ao longo do tempo no pior cenário de falta de energia elétrica. . . . .	47

Figura 23	– Comparação do CTP acumulado 3 turnos: bateria de íon-lítio vs chumbo-ácido em pu. . . . .	50
Figura 24	– Comparação do CTP acumulado 2 turnos: baterias de íon-lítio vs chumbo-ácido em pu. . . . .	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características principais das baterias de lítio. . . . .	25
Tabela 2 – Dados Técnicos das Empilhadeiras. . . . .	30
Tabela 3 – Dados Técnicos do Carregador de Baterias IEB D400 G48 . . . .	31
Tabela 4 – Horários de Início e Fim, Intervalos de Almoço, Pausas para Café e Paradas Pessoais. . . . .	31
Tabela 5 – Informações da bateria. . . . .	36
Tabela 6 – Parâmetros de modelagem da bateria. . . . .	36
Tabela 7 – Informações dos equipamentos. . . . .	37
Tabela 8 – Resultados da simulação de faltas de energia. . . . .	47
Tabela 9 – Comparação entre baterias de íon-lítio e chumbo-ácido . . . . .	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**Ah** ampère-hora

**BMS** Sistema de Gerenciamento da Bateria (do inglês, *Battery Management System*)

**CTP** Custo Total de Propriedade

**DoD** profundidade de descarga (do inglês, *Depth of Discharge*)

**OCV** tensão de circuito aberto (do inglês, *Open Circuit Voltage*)

**SoC** estado de carga (do inglês, *State of Charge*)

**VDI** Associação de Engenheiros Alemães (do Alemão, *Verein Deutscher Ingenieure*)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>12</b>
1.1	MOTIVAÇÃO . . . . .	12
1.2	OBJETIVOS . . . . .	13
1.3	METODOLOGIA . . . . .	13
1.4	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA . . . . .	13
<b>2</b>	<b>EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO E SUAS APLICA- ÇÕES . . . . .</b>	<b>14</b>
2.1	LINHA DO TEMPO DA HISTÓRIA DAS EMPILHADEIRAS . . . . .	14
2.2	EMPILHADEIRAS CONTRABALANÇADAS . . . . .	15
2.3	EMPILHADEIRAS RETRÁTEIS . . . . .	16
2.4	BATERIA . . . . .	17
2.4.1	Estado de carga das baterias . . . . .	18
2.4.2	Profundidade de descarga . . . . .	20
2.4.3	Índice de descarga . . . . .	20
2.4.4	Baterias de chumbo-ácido . . . . .	20
2.4.5	Baterias de íon-lítio . . . . .	23
2.5	SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA BATERIA . . . . .	28
<b>3</b>	<b>DEFINIÇÕES GERAIS DO PROJETO . . . . .</b>	<b>30</b>
3.1	Parâmetros técnicos da empilhadeira elétrica retrátil . . . . .	30
3.2	Parâmetros técnicos do carregador de baterias . . . . .	30
3.3	INFORMAÇÕES DA OPERAÇÃO DO ARMAZÉM . . . . .	31
3.4	CARACTERIZAÇÃO DE CARGA . . . . .	32
3.4.1	Cálculo de potência instalada . . . . .	32
<b>4</b>	<b>MODELAGEM DA OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO INDUSTRIAL . . . . .</b>	<b>34</b>
4.1	PREMISSAS GERAIS . . . . .	34
4.1.1	Padrão de teste VDI 2198 . . . . .	35
4.2	MODELAGEM . . . . .	35
4.3	SIMULAÇÃO . . . . .	39
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DE RISCOS . . . . .</b>	<b>42</b>
5.1	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DAS INTERRUPÇÕES DE ENERGIA . . . . .	42
5.1.1	Tratamento da base de dados . . . . .	42
5.1.2	Análise dos dados filtrados . . . . .	43
<b>6</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICA . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>52</b>
7.1	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	52
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A logística desempenha diversas responsabilidades na gestão de indústrias e empresas, garantindo eficiência, agilidade e segurança nos processos industriais e empresariais. Ao analisar, planejar e implementar sistemas voltados para o transporte, armazenamento, aquisição de suprimentos, distribuição e entrega de produtos, a logística contribui de forma significativa para a redução de custos e a melhoria das operações.

Antes da Revolução Industrial, a produção era majoritariamente artesanal e localizada. No entanto, a partir do século XVIII, com o surgimento de máquinas e tecnologias de produção em massa, a capacidade das indústrias cresceu exponencialmente. Isso exigiu o desenvolvimento de métodos mais eficientes para armazenamento, transporte e controle dos produtos.

Nesse contexto, a logística passou por cinco grandes revoluções, sendo que a segunda ocorreu simultaneamente à Primeira Revolução Industrial. As etapas seguintes foram marcadas por avanços tecnológicos, que permitiram aumentar a produção tanto na indústria quanto na agricultura.

Em meados dos anos 1900, começou a quarta revolução da logística, marcada pela utilização econômica da eletricidade, a criação do motor a combustão, o refino do petróleo e os avanços nas indústrias químicas. Com isso, os meios de transporte se tornaram muito mais rápidos, alterando drasticamente as relações comerciais no mundo (SILVEIRA, 2009).

Desse modo, o aumento na produção e avanço tecnológico propiciou a criação de equipamentos específicos para realizar a movimentação interna de matérias-primas, insumos, produtos prontos e diversas outras atividades. Em 1906, a Pennsylvania Railroad introduziu caminhões de plataforma alimentados por baterias, que eram utilizados para movimentar bagagens (JÚNIOR; SPEJORIM, 2012).

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente demanda por eficiência energética e sustentabilidade nas operações logísticas impulsiona a busca por tecnologias avançadas de armazenamento de energia. As baterias de íons de lítio surgiram como uma solução para alimentar empilhadeiras contrabalançadas e retráteis devido às suas vantagens em termos de densidade de energia, vida útil e fácil manutenção. A substituição de empilhadeiras movidas a combustão interna por modelos elétricos equipados com baterias de íons de lítio resulta em uma diminuição dos custos operacionais, além de não emitirem gases poluentes, contribuindo para um ambiente de trabalho mais limpo e seguro.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise da aplicação de baterias de íons de lítio em equipamentos de movimentação, com enfoque técnico e financeiro. Ao final do estudo, será possível determinar se a aplicação dessa tecnologia é coerente não apenas do ponto de vista técnico, mas também econômico.

## 1.3 METODOLOGIA

A metodologia envolve uma revisão da literatura existente sobre a evolução das baterias e suas aplicações. Serão coletados dados técnicos e operacionais do uso de equipamentos, além de informações sobre custos de implantação e operação, bem como dados sobre emissões das empilhadeiras. Os algoritmos de simulação e análise dos dados foram implementados em Python, utilizando bibliotecas como Pandas<sup>1</sup>, NumPy<sup>2</sup> e Matplotlib<sup>3</sup>. A análise técnica avaliará as baterias de íon-lítio em termos de densidade de energia, capacidade e aplicação na planta modelada.

## 1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Além da Introdução este documento está dividido em mais cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

No Capítulo 2 é realizada uma revisão da história da evolução dos equipamentos de movimentação apresentando os principais marcos tecnológicos e a apresentação dos equipamentos que serão utilizados nos próximos capítulos.

No Capítulo 4 é descrito o sistema proposto neste trabalho e os parâmetros técnicos que, a partir deles, serão desenvolvidos os cenários e considerações para a modelagem do armazém.

No Capítulo 5 é modelado todo o sistema, apresentando as premissas e definições gerais a serem consideradas durante a modelagem e análise dos resultados.

No Capítulo 6 é apresentado um estudo de caso, no qual são avaliados os impactos no armazém gerados por interrupções de energia elétrica. O modelo do sistema é utilizado para simular o tempo de parada do equipamento devido à falta de energia.

Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

---

<sup>1</sup> Pandas Development Team. (2020). Pandas: Powerful data structures for data analysis in Python. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>

<sup>2</sup> Harris, C. R., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357-362. Disponível em: <https://numpy.org/>

<sup>3</sup> Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90-95. Disponível em: <https://matplotlib.org/>

## 2 EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO E SUAS APLICAÇÕES

Os equipamentos de movimentação industrial desempenham um papel central na otimização de processos e na maximização da eficiência operacional. Esta maior eficiência é alcançada por meio de várias capacidades específicas desses equipamentos, que facilitam a rápida movimentação, armazenamento e distribuição de materiais e produtos dentro de instalações industriais e comerciais.

### 2.1 LINHA DO TEMPO DA HISTÓRIA DAS EMPILHADEIRAS

As empilhadeiras surgiram devido à necessidade de movimentação de materiais acima do nível do chão, seja para aproveitar a verticalização do armazenamento, seja para movimentar cargas que antes eram muito difíceis de manusear. Antes de apresentarmos os modelos mais recentes de equipamentos, será feita uma revisão histórica de como as empilhadeiras evoluíram ao longo dos anos. É importante mencionar que, durante os dois períodos de guerra, houve um avanço expressivo nas tecnologias de equipamentos de movimentação, pois a logística é extremamente importante no setor militar. Como todos os recursos são limitados, a logística tem como princípio a gestão de recursos e meios que possibilitam a entrega de produtos em um determinado local de maneira tempestiva e com o menor custo possível Júnior e Spejorim (2012).

- **Meados da Década de 1800:** *Durante a Revolução Industrial* - Invenção do carrinho de mão manualmente propulsionado, precursor das empilhadeiras modernas.
- **1867:** Primeira patente de um dispositivo que poderia levantar e transportar materiais. Este dispositivo consistia de uma estrutura vertical com um guincho e uma plataforma, podendo ser acoplado a um carrinho(MCGRAW, 2000).
- **1906:** *Pós-Revolução Industrial* - Introdução da primeira plataforma motorizada pela Pennsylvania Railroad, marcando o início da transição para equipamentos motorizados.
- **1913:** Invenção do sistema de elevação hidráulica por William T. Harris, permitindo maior capacidade de carga e altura de elevação.
- **1915:** *Durante a Primeira Guerra Mundial* - Desenvolvimento do primeiro veículo elétrico pela Baker-Raulang, projetado inicialmente para o manuseio de bombas.
- **1917:** Clark Material Handling Company desenvolve a Tructractor, considerada a primeira empilhadeira contrabalançada com assento.



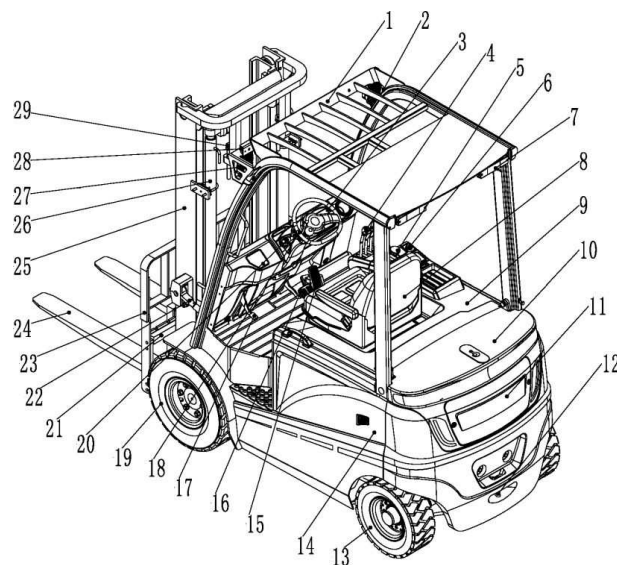
- **1923:** Yale apresenta a primeira empilhadeira elétrica com garfos e mastro, consolidando um design fundamental para as futuras empilhadeiras (Hyster-Yale Materials Handling, Inc., 2024).
- **1924:** Clark introduz uma empilhadeira de combustão interna, aprimorando significativamente a eficiência operacional.
- **Década de 1940:** *Durante e após a Segunda Guerra Mundial* - Ocorrem melhorias importantes no design das empilhadeiras e na padronização dos tamanhos de paletes.
- **1954:** Desenvolvimento da primeira empilhadeira elétrica para corredores estreitos pela Lansing Bagnall, permitindo operações em espaços apertados.
- **Década de 1960:** Introdução de melhorias de segurança, como proteções superiores e encostos de carga, para proteger os operadores.

## 2.2 EMPILHADEIRAS CONTRABALANÇADAS

As empilhadeiras contrabalançadas são amplamente utilizadas em operações logísticas para movimentar cargas pesadas. Elas são chamadas de “contrabalançadas” porque possuem um contrapeso na parte traseira para equilibrar a carga levantada na frente. Essas empilhadeiras são versáteis e podem operar tanto em ambientes internos quanto externos.

A Figura 1 ilustra uma empilhadeira contrabalançada com todos os seus componentes identificados.

Figura 1 – Componentes da empilhadeira contrabalançada.



Fonte: Adaptado de (Movelfit, 2021a).

- |                               |                                      |                            |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1. Teto                       | 11. Tampa do painel elétrico         | 20. Manopla do volante     |
| 2. Retrovisor                 | 12. Pino de tração (Reboque)         | 21. Porta garfos           |
| 3. Indicador                  | 13. Roda traseira                    | 22. Cilindro de inclinação |
| 4. Alavancas hidráulicas      | 14. Carenagem lateral                | 23. Apoio de carga         |
| 5. Botão de emergência        | 15. Pedal acelerador                 | 24. Garfo                  |
| 6. Interface USB (opcional)   | 16. Pedal de freio                   | 25. Torre                  |
| 7. Luz traseira de três cores | 17. Pedal de freio de estacionamento | 26. Cilindro de elevação   |
| 8. Assento                    | 18. Volante                          | 27. Farol                  |
| 9. Tampa da bateria           | 19. Roda frontal                     | 28. Luz de direção         |
| 10. Contrapeso                |                                      | 29. Conexão da corrente    |

As características principais das empilhadeiras contrabalançadas incluem a capacidade de levantar cargas pesadas, adequação para operações de carga e descarga, e a disponibilidade em versões elétricas e a combustão. As empilhadeiras contrabalançadas oferecem várias vantagens, incluindo a versatilidade de operar em diversos tipos de ambientes, desde armazéns até áreas externas, e a estabilidade proporcionada pelo contrapeso na parte traseira, que oferece equilíbrio e segurança ao levantar cargas pesadas.

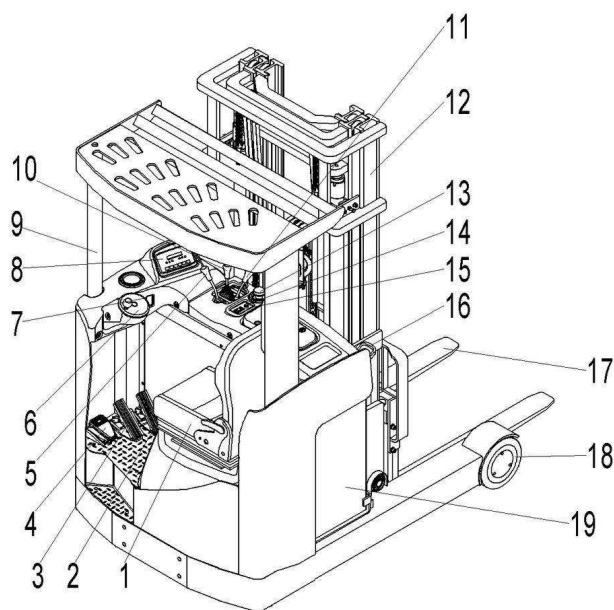
### 2.3 EMPILHADEIRAS RETRÁTEIS

As empilhadeiras retráteis foram projetadas para operar em corredores estreitos, elas são ideais para a movimentação eficiente de mercadorias paletizadas em prateleiras altas. A Figura 2 ilustra uma empilhadeira retrátil com todos os seus componentes identificados.

- |   |  |
|---|--|
| 1. Cinto de Segurança                       | trátil                                 |
| 2. Pedal de Aceleração                      | 11. Alavanca de Controle de Inclinação |
| 3. Pedal de Freio                           | 12. Mastro                             |
| 4. Pedal de Segurança                       | 13. Interruptor de Emergência          |
| 5. Alavanca de Controle de Elevação         | 14. Seleção Frente/Ré                  |
| 6. Volante de Direção                       | 15. Botão de Buzina                    |
| 7. Interruptor de Chave                     | 16. Conector da Bateria                |
| 8. Painel Indicador                         | 17. Garfo                              |
| 9. Teto Protetor                            | 18. Rodas de Carga                     |
| 10. Alavanca de Controle do Mastro Retrátil | 19. Bateria                            |

O nome “empilhadeira retrátil” é devido ao seu mastro retrátil. Esta característica permite que o mastro se estenda e retraia, facilitando a elevação e a movimentação de

Figura 2 – Componentes da empilhadeira retrátil.



Fonte: Adaptado de (Movelift, 2021b).

cargas em espaços confinados e corredores estreitos. Essa funcionalidade é essencial para maximizar o uso do espaço vertical em armazéns e centros de distribuição, permitindo que as empilhadeiras retráteis alcancem alturas significativas sem ocupar muito espaço quando não estão em uso.

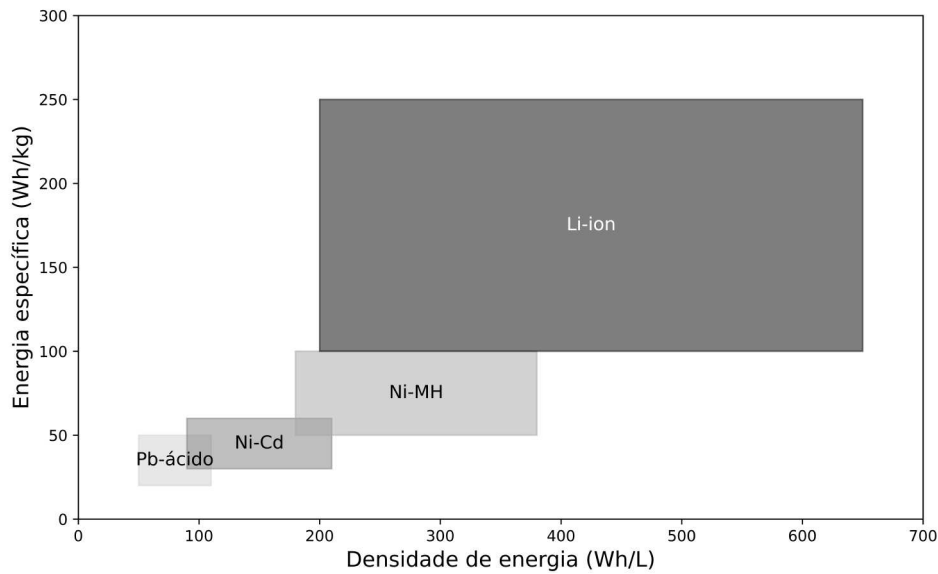
## 2.4 BATERIA

No campo dos veículos industriais, a escolha da tecnologia de bateria é um fator determinante para a eficiência operacional e a sustentabilidade econômica. As baterias são responsáveis por fornecer a energia necessária para o funcionamento desses veículos, influenciando diretamente a manutenção, o tempo de inatividade e os custos operacionais. Na Figura 3 é mostrado um gráfico comparativo da energia específica pela densidade de energia para diferentes tipos de baterias disponíveis no mercado atualmente (ENDO *et al.*, 2000).

Embora as baterias de chumbo-ácido tenham uma densidade de energia e energia específica inferiores, elas são amplamente empregadas em diversas aplicações industriais devido ao seu baixo custo e robustez. Estas baterias operam com base na formação de sulfato de chumbo ( $PbSO_4$ ) a partir de chumbo ( $Pb$ ) e dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ). Apesar de suas limitações em termos de densidade de energia e ciclo de vida relativamente curto, as baterias chumbo-ácido têm sido uma escolha padrão para sistemas de armazenamento de energia de baixo custo, especialmente em aplicações estacionárias (BERNDT, 2005).

Em contrapartida, as baterias de Lítio, que surgiram como uma tecnologia mais recente, oferecem vantagens significativas em termos de densidade de energia, vida útil

Figura 3 – Densidade de energia *versus* energia específica para diferentes tipos de bateria.



Fonte: Adaptado de Endo *et al.* (2000).

e eficiência de carga. Estas baterias estão revolucionando o setor de veículos industriais, proporcionando maior flexibilidade e desempenho. A tecnologia de baterias de lítio baseia-se na inserção e extração reversível de íons de lítio nos eletrodos, um processo que permite uma maior densidade de energia e melhor eficiência de carga (JIAO *et al.*, 2021).

Nas próximas seções, será apresentada uma análise detalhada das características técnicas, vantagens e desvantagens de ambas as tecnologias de baterias. Este estudo examinará aspectos como a química das baterias, a eficiência energética, a durabilidade, os custos envolvidos e o impacto ambiental. O objetivo é oferecer uma compreensão abrangente das aplicações e implicações dessas tecnologias no contexto dos veículos industriais.

#### 2.4.1 Estado de carga das baterias

O estado de carga (do inglês, *State of Charge*) (SoC) de uma bateria é a indicação da quantidade de energia armazenada na bateria em relação à sua capacidade total. O SoC é expresso como uma porcentagem, onde 100% representa uma bateria totalmente carregada e 0% representa uma bateria completamente descarregada. A determinação precisa do SoC é essencial para a operação eficiente e a longevidade das baterias, sejam elas de chumbo-ácido ou de lítio.

O SoC é definido conforme mostrado a seguir:

$$\text{SoC}(\%) = \left( \frac{Q_c}{Q_m} \right) \times 100, \quad (2.1)$$

onde  $Q_c$  é a carga atual da bateria (em ampère-hora, Ah) e  $Q_m$  é a capacidade máxima da

bateria (em Ah) (DEEPTI; RAMANARAYANAN, 2006a). Sendo a capacidade máxima da bateria calculado como se segue:

$$Q_m = I \times t. \quad (2.2)$$

A determinação precisa do SoC é importante para:

- **Prevenir Sobrecarga e Subcarga:** Manter o SoC dentro dos limites recomendados evita danos irreversíveis às placas da bateria, como sulfatação e corrosão em baterias de chumbo-ácido, e degradação dos eletrodos em baterias de lítio.
- **Otimização da Vida Útil:** Operar a bateria dentro de um intervalo de SoC adequado pode prolongar sua vida útil, reduzindo o desgaste químico e mecânico.
- **Garantia de Confiabilidade:** Para aplicações críticas, como sistemas de energia de backup e veículos elétricos, uma estimativa precisa do SoC é essencial para garantir a disponibilidade e a segurança da energia armazenada.

Segundo Deepti e Ramanarayanan (2006b) a determinação ou estimação do SoC de uma bateria pode ser feita a partir da:

- **Medição da tensão terminal**
  - *tensão de circuito aberto (do inglês, Open Circuit Voltage) (OCV):* A relação entre a tensão em circuito aberto e o SoC é bem estabelecida, mas pode ser influenciada por fatores como a temperatura e o envelhecimento da bateria.
  - *Tensão sob Carga:* Requer compensação pela resistência interna da bateria e outras perdas eletroquímicas, sendo mais complexa, porém útil durante a operação.
- **Medição da densidade do eletrólito**
  - A densidade do eletrólito (medida com um hidrômetro) é diretamente proporcional ao SoC. Este método é preciso, mas invasivo e requer acesso ao eletrólito da bateria. Este é um método aplicável principalmente nas baterias de chumbo-ácido.
- **Método coulombimétrico**
  - Baseia-se na integração da corrente de carga e descarga ao longo do tempo para calcular o SoC. Este é um método altamente preciso quando o estado inicial de carga é conhecido.
- **Modelos matemáticos e monitoramento *online***

- Utilizam modelos eletroquímicos ou de circuito equivalente e algoritmos de aprendizado para estimar o SoC em tempo real. Estes métodos são cada vez mais populares em sistemas de gerenciamento de baterias modernos.

#### 2.4.2 Profundidade de descarga

A profundidade de descarga (do inglês, *Depth of Discharge*) (DoD) representa a quantidade de energia que foi retirada de uma bateria em relação à sua capacidade total. É um parâmetro importante para gerenciar a vida útil e o desempenho das baterias e pode ser calculado conforme mostrado a seguir:

$$\text{DoD}(\%) = \left( \frac{\text{Capacidade Total} - \text{Capacidade Restante}}{\text{Capacidade Total}} \right) \times 100, \quad (2.3)$$

onde a Capacidade Total é a quantidade máxima de carga que a bateria pode armazenar, medida em ampère-hora (Ah) ou watt-hora (Wh), e a Capacidade Restante é a quantidade de carga ainda disponível na bateria.

#### 2.4.3 Índice de descarga

O índice de descarga ( $C$ ) caracteriza a taxa de descarga de uma bateria em relação à sua capacidade máxima, sendo calculado como se segue:

$$C = \frac{I}{Q_m}, \quad (2.4)$$

onde  $I$  representa a corrente de descarga em Ampères (A) e  $Q_m$  é a capacidade nominal da bateria em ampère-hora (Ah).

Um índice de descarga de  $1C$  indica que uma bateria de 10 Ah se descarrega completamente em 1 hora com uma corrente de 10 A, ou ainda, um índice  $2C$  que a bateria se descarrega completamente em 30 minutos com uma corrente de 20 A. Já um índice de  $0,5C$  indica que a bateria se descarrega em 2 horas com um corrente de 5 A.

O índice de descarga  $C$  está relacionado ao desempenho e à durabilidade da bateria. Taxas de descarga elevadas fornecem maior potência momentânea, necessária em aplicações que demandam alta potência instantânea, como veículos elétricos. No entanto, isso pode reduzir a eficiência energética e aumentar a geração de calor, comprometendo a segurança e a integridade da bateria. Em contrapartida, taxas de descarga mais baixas melhoram a eficiência energética e prolongam a vida útil da bateria (QU; JIANG; ZHANG, 2022).

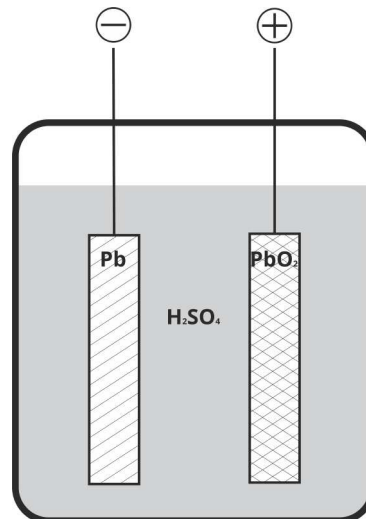
#### 2.4.4 Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido foram desenvolvidas em 1859 pelo inventor francês Gaston Planté (PLANTÉ, 1859), sendo uma das tecnologias mais antigas de baterias recarregáveis ainda em uso hoje. Apesar de algumas desvantagens, elas permanecem

populares devido ao seu custo mais baixo. Desde sua invenção, essas baterias passaram por diversas melhorias e adaptações, tornando-se indispensáveis em uma variedade de aplicações, incluindo veículos automotivos, sistemas de energia de backup e armazenamento de energia renovável.

As baterias de chumbo-ácido consistem em várias células eletroquímicas individuais, cada uma fornecendo uma tensão nominal de aproximadamente 2 volts. Os principais componentes das baterias são as placas positivas e negativas, o eletrólito, os separadores e o recipiente ou cuba. As placas positivas são compostas de dióxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ) enquanto as placas negativas são compostas de chumbo ( $\text{Pb}$ ). Essas placas são frequentemente estruturadas em forma de grade para aumentar a área de superfície, o que melhora a capacidade da bateria (PAVLOV, 2011).

Figura 4 – Esquema básico de bateria de chumbo-ácido.

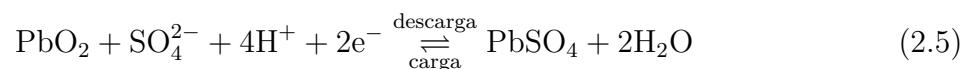


Fonte: Adaptado de Berndt (2005).

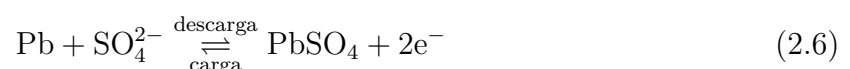
O eletrólito utilizado é uma solução de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), que facilita a transferência de íons entre as placas durante os processos de carga e descarga. Entre as placas, há separadores de material poroso para evitar o contato direto e curto-circuito, permitindo ao mesmo tempo a livre circulação do eletrólito. Todo o conjunto é contido em um recipiente resistente a ácidos, geralmente feito de polipropileno ou outro material plástico durável.

As reações são as seguintes:

#### Eletródo Positivo (Cátodo)



#### Eletródo Negativo (Ânodo)



## Reação Global

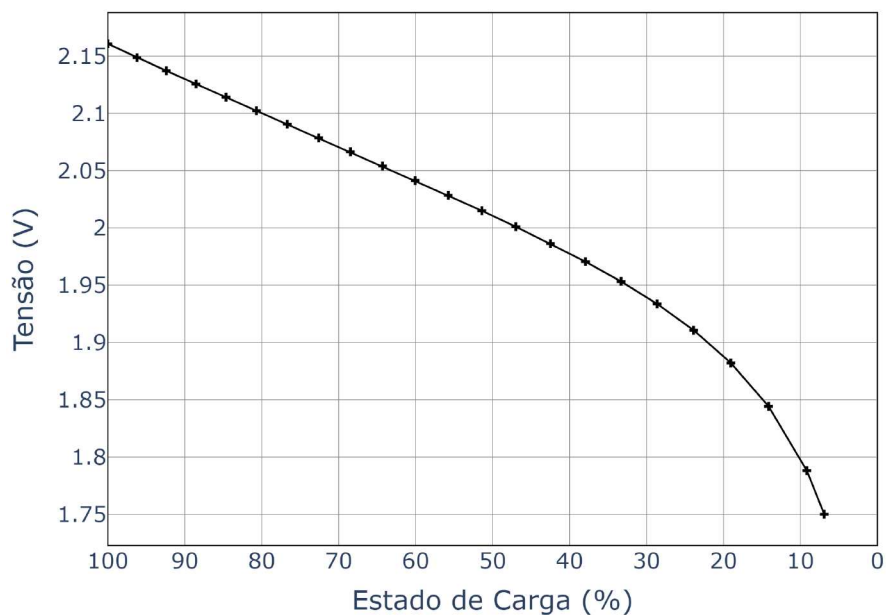


Durante a descarga, o chumbo (Pb) da placa negativa e o dióxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>) da placa positiva reagem com o ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) do eletrólito, formando sulfato de chumbo (PbSO<sub>4</sub>) em ambas as placas e água (H<sub>2</sub>O). Esta reação libera energia elétrica, que é utilizada para alimentar dispositivos externos. Durante a recarga, o sulfato de chumbo (PbSO<sub>4</sub>) em ambas as placas é convertido de volta em chumbo (Pb) na placa negativa e em dióxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>) na placa positiva. O ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) é regenerado no eletrólito, e a energia elétrica fornecida pela fonte externa é armazenada na bateria.

Dependendo das condições de operação e da qualidade dos materiais utilizados, essas baterias apresentam uma eficiência do ciclo de carga-descarga em torno de 70-85% (RAND; MOSELEY, 2015). Adicionalmente elas sofrem degradação ao longo do tempo devido a processos como sulfatação (formação de cristais de sulfato de chumbo que não podem ser revertidos) e corrosão das placas de chumbo.

As baterias de chumbo-ácido possuem uma queda de tensão durante a descarga, conforme pode ser visto na Figura 5. Essa queda de tensão é uma característica indesejada que impacta a eficiência e o desempenho da bateria, além de comprometer a capacidade de fornecer energia constante para aplicações críticas.

Figura 5 – Gráfico de estado de carga *versus* tensão de uma célula de chumbo-ácido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).



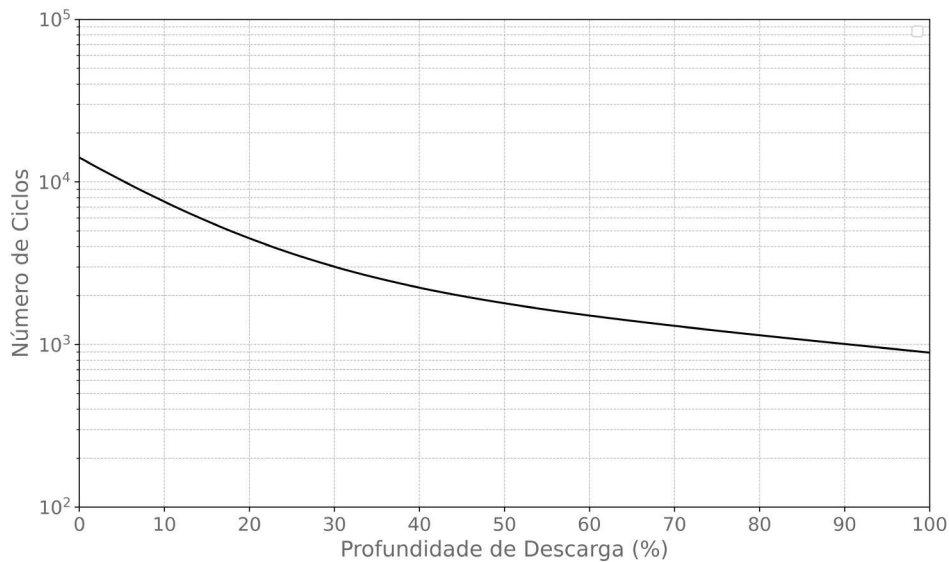
O resultado mostrado na Figura 5 foi realizada utilizando a biblioteca *PyBaMM*<sup>1</sup>, configurada para uma descarga com corrente constante de 1 A até a completa descarga da bateria. Outro fator que impacta diretamente o ciclo de vida nas baterias chumbo-ácido é a DoD.

A seguir é mostrado como a DoD influencia o ciclo de vida das baterias (LAYADI *et al.*, 2015):

$$N_c(\text{DoD}) = 11250e^{-8,087\text{DoD}} + 2863e^{-1.17\text{DoD}} \quad (2.8)$$

onde  $N_c$  é o número máximo de ciclos de carga e descarga da bateria.

Figura 6 – Número de ciclos *versus* profundidade de descarga (DoD) para bateria de chumbo-ácido.



Fonte: Adaptado de Layadi *et al.* (2015).

A Figura 6 ilustra a influência do DoD na vida útil das baterias chumbo-ácido. Essa curva foi obtida a partir de (2.8). Mais adiante, poder-se-á comparar esse resultado com o obtido para baterias baseadas em outras tecnologias.

#### 2.4.5 Baterias de íon-lítio

A comercialização das baterias de íon-lítio começou em 1991 no Japão (NAGAMINE; KATO; NISHI, 1992). Desde então, essas baterias têm se destacado devido às suas características superiores em termos de densidade de energia, vida útil e eficiência de carga quando comparadas com baterias baseadas em outras tecnologias. As baterias de íon-lítio são indicadas e utilizadas em uma variedade de aplicações, que vão dos dispositivos eletrônicos portáteis até veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia.

<sup>1</sup> PyBaMM Development Team. (2021). PyBaMM: Python Battery Mathematical Modelling. Disponível em: <https://pybamm.readthedocs.io/en/latest/>

Na Tabela 1 é mostrada as diferentes composições de materiais utilizados nas baterias de íon-lítio. A escolha do material que será utilizado dependerá da utilização da mesma, pois cada uma possui vantagens e desvantagens.

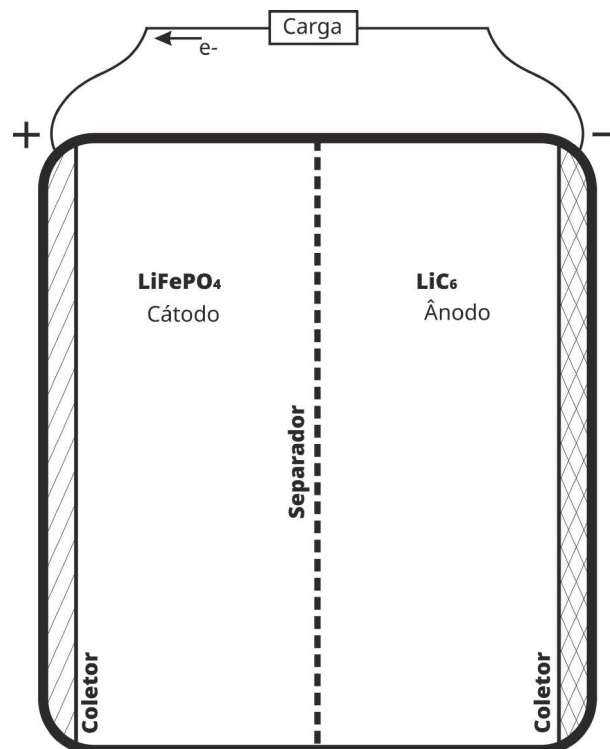
Tabela 1 – Características principais das baterias de lítio.

Material	Tensão (V)	Energia específica (Wh/kg)	Densidade de energia (Wh/L)	Ciclo de vida	Vantagens	Desvantagens
Íon de Lítio	3,6	90-150	180-300	1000-2000	Alta energia específica, baixa auto-descarga	Requer proteção de segurança, caro
Polímero de Lítio	3,7	100-200	300	1000-2000	Alta energia específica, flexível, leve	Requer proteção de segurança, caro
LiFePO <sub>4</sub>	3,25	90-120	170	1400	Seguro, longa vida útil	Menor densidade de energia, tecnologia em desenvolvimento

Fonte: Adaptado de Nitta *et al.* (2014).

Na Figura 7 é ilustrada a estrutura de uma célula da bateria íon-lítio de fosfato de ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ). O cátodo é composto por fosfato de ferro-lítio ( $\text{LiFePO}_4$ ), sendo responsável pelo movimento dos íons de lítio durante os processos de carga e descarga. Durante a descarga, os íons de lítio se deslocam do ânodo para o cátodo, e durante o carregamento, eles se movem do cátodo para o ânodo. O ânodo é feito de grafite ( $\text{C}_6$ ), um material comum em baterias de íon de lítio devido à sua capacidade de armazenar íons de lítio.

Figura 7 – Esquema de uma célula de bateria de íon de lítio de fosfato de ferro ( $\text{LiFePO}_4$ ).



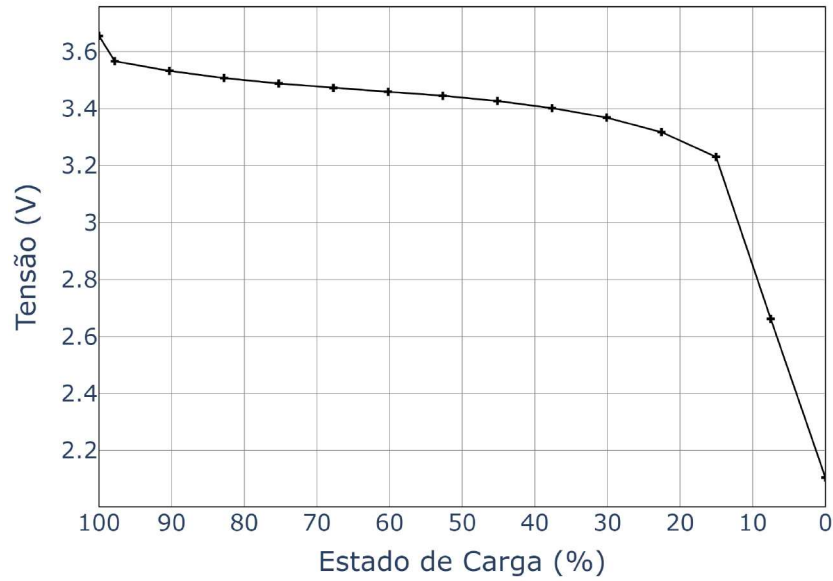
Fonte: Adaptado de Cheng *et al.* (2016).

Na Figura 8 é mostrada a característica da tensão durante o descarregamento da bateria, sendo uma característica muito próxima de constante.

O separador é um material poroso que impede o contato direto entre o ânodo e o cátodo, evitando curtos-circuitos, mas permitindo a passagem de íons de lítio entre os eletrodos durante os processos de carga e descarga. Os coletores de corrente conduzem os elétrons para fora e para dentro da célula durante os processos de carga e descarga. O coletor do cátodo é geralmente feito de alumínio, enquanto o do ânodo é feito de cobre.

Durante o processo de descarga, os elétrons fluem do ânodo para o cátodo através de um circuito externo, fornecendo energia elétrica para alimentar dispositivos. Durante o processo de carga, uma fonte de energia externa força os elétrons a se moverem do cátodo para o ânodo, conforme as reações químicas mostradas a seguir (GARCHE *et al.*, 2013):

Figura 8 – Gráfico de estado de carga *versus* tensão de uma célula de íon-lítio.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

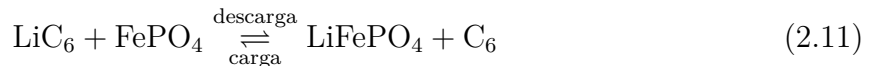
### Eletrodo Positivo (Cátodo)



### Eletrodo Negativo (Ânodo)



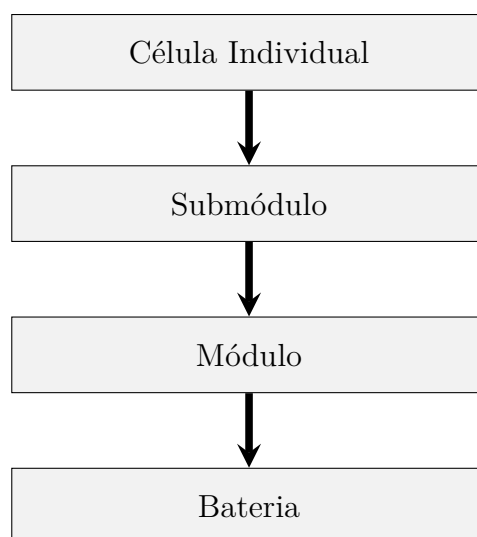
### Reação Global



As reações descritas anteriormente ocorrem em uma única célula. No entanto, para obter a tensão e a corrente necessárias para alimentar uma carga, é preciso conectar várias células em série e em paralelo, formando assim uma bateria.

Na Figura 9 é ilustrada a estrutura de uma bateria, desde a célula individual até o sistema completo. A célula única é a unidade mínima de montagem e controle das células. Várias células formam um submódulo, que fornece resistência mecânica, design térmico e segurança, além de controlar as células em termos de monitoramento, balanceamento e comunicação. Os submódulos são agrupados em módulos que executam essas mesmas funções em uma escala maior. Diversos módulos compõem um sistema de bateria completo, incluindo todos os componentes necessários como módulos, controlador da bateria, contadores e sistema de resfriamento.

Figura 9 – Diagrama da composição de uma bateria.

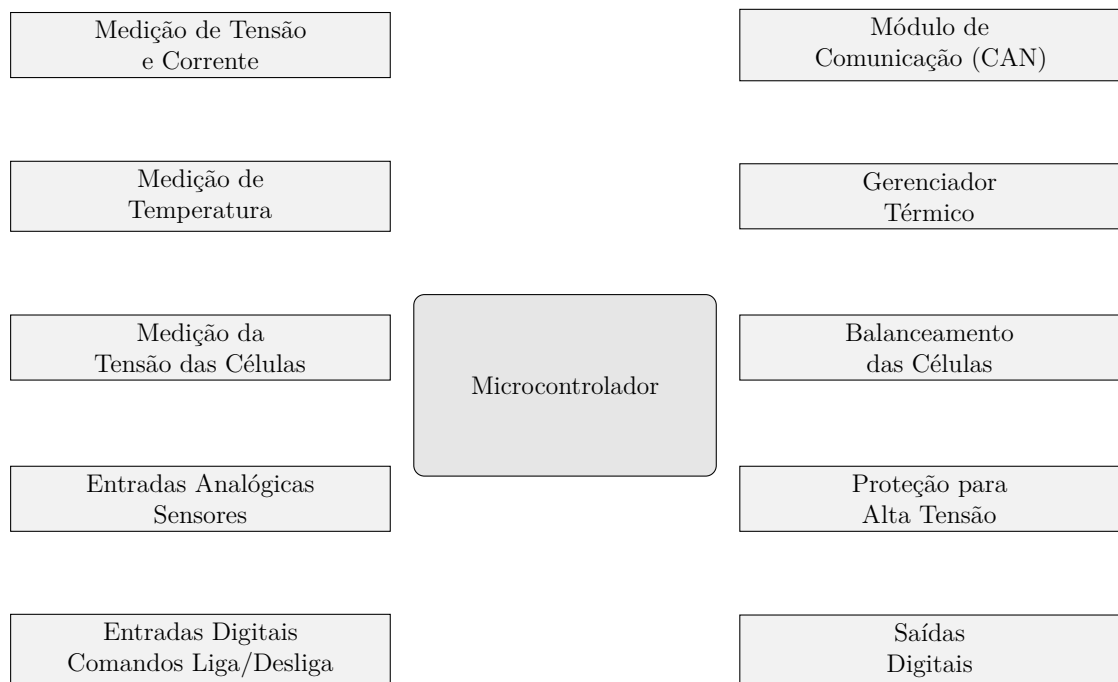


Fonte: Adaptado de Garche *et al.* (2013).

## 2.5 SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA BATERIA

O Sistema de Gerenciamento da Bateria (do inglês, *Battery Management System*) (BMS) é um componente essencial das baterias, encarregado de gerenciar variáveis críticas como temperatura, tensão e corrente durante o processo de carga e descarga. Esse sistema cuida da segurança tanto dos componentes quanto da própria bateria e suas células. Ele realiza essa função através da aquisição e processamento de dados coletados de diversas fontes, incluindo placas e sensores do equipamento. Além disso, estima o SoC e realiza o balanceamento das células, sendo essa a função mais importante, pois o desbalanceamento das células causa desgaste prematuro, redução na capacidade total da bateria e diminuição da vida útil.

Conforme observado na Figura 10, o BMS recebe as informações e, através do algoritmo de processamento, realiza a estimativa do SoC, da saúde da bateria, detecta possíveis falhas e, como mencionado, executa sua principal função de manter as células balanceadas.

Figura 10 – Esquema básico de componentes do **BMS**.

Fonte: Adaptado de R e Ghosh (2021).

### 3 DEFINIÇÕES GERAIS DO PROJETO

Neste capítulo serão definidos os parâmetros dos equipamentos do projeto em questão. Esses parâmetros serão adotados para as análises subseqüentes. Serão especificados a capacidade das baterias, quais carregadores serão utilizados, quantos equipamentos serão adotados, a taxa de utilização dos equipamentos, horários de carregamento e potência instalada do projeto.

Garantir que todos os aspectos técnicos sejam devidamente considerados e compreendidos é importante para a operação eficiente do armazém. Entre as informações apresentadas, estão as especificações da empilhadeira elétrica retrátil e do carregador de baterias, que são críticos para a operação diária do armazém.

Serão estabelecidos os horários de funcionamento, ou seja, como os turnos irão operar. Com isso é possível observar as janelas de oportunidade para que os equipamentos sejam carregados.

#### 3.1 Parâmetros técnicos da empilhadeira elétrica retrátil

A empilhadeira elétrica retrátil modelo ETV216i da Jungheinrich foi escolhida devido à sua capacidade de carga e altura de elevação superiores, tornando-a ideal para operações em armazéns de grande porte. A tabela 2 apresenta os principais dados técnicos deste equipamento.

Tabela 2 – Dados Técnicos das Empilhadeiras.

<b>Características</b>	<b>Detalhes</b>
Capacidade de carga	1600 kg
Altura máxima de elevação	10700 mm
Tensão e capacidade da bateria	51,2 V / 390 Ah
Consumo de energia	3,3 kWh/h <sup>a</sup>
Emissão equivalente de CO <sub>2</sub>	1,7 kg/h <sup>b</sup>
Velocidade de deslocamento	14 km/h
Pressão de trabalho para acessório	150 bar
Peso do equipamento (incluindo bateria)	3438 kg

<sup>a</sup> conforme a norma VDI 2198

<sup>b</sup> conforme a norma EN 16796

Fonte: Adaptado de (JUNGHEINRICH, 2023).

#### 3.2 Parâmetros técnicos do carregador de baterias

O carregador de baterias IEB D 400 G 48 / 150 B30-FP foi selecionado devido à sua alta eficiência, essencial para otimizar a operação das empilhadeiras elétricas. Este



modelo apresenta uma eficiência de 97%, proporcionando confiabilidade e reduzindo o consumo de energia. A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas detalhadas deste carregador.

Tabela 3 – Dados Técnicos do Carregador de Baterias IEB D400 G48

<b>Características</b>	<b>Detalhes</b>
Modelo	D 400 G 48 / 150 B30-FP
Tensão de saída	48 V
Corrente de saída	150 A
Tensão de operação	440 V trifásico
Corrente de entrada	11,65 A
Potência	8 kW
Peso	37 kg
Eficiência	97%

Fonte: Adaptado de (IEB, 2018).

### 3.3 INFORMAÇÕES DA OPERAÇÃO DO ARMAZÉM

Aqui são definidos quais serão os dados operacionais adotados, pois essas definições irão guiar a modelagem de utilização dos equipamentos. A operação tem três turnos e serão utilizados os momentos de parada para que as baterias sejam recarregadas. Haverá três momentos de parada, sendo eles:

- **Almoço:** Intervalo intrajornada de 1h15min;
- **Café:** Intervalo de 15 minutos;
- **Pessoais:** Intervalo para ida ao banheiro e ingestão de água, considerando 10 minutos. A ocorrência dessas paradas é considerada estocástica, pois depende da individualidade do operador.

Tabela 4 – Horários de Início e Fim, Intervalos de Almoço, Pausas para Café e Paradas Pessoais.

<b>Turno</b>	<b>Início e Término</b>	<b>Almoço</b>	<b>Café</b>	<b>Paradas Pessoais</b>
Primeiro Turno	07:00 - 15:30	11:00 - 12:15	09:00 - 09:15	Estocásticas
Segundo Turno	13:00 - 21:35	17:00 - 18:15	16:00 - 16:15	Estocásticas
Terceiro Turno	22:00 - 05:35	02:00 - 03:15	04:00 - 04:15	Estocásticas

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DE CARGA

A partir da definição dos equipamentos que irão integrar o projeto, deve-se seguir para o dimensionamento dos componentes para alimentar os carregadores. O carregador escolhido tem a possibilidade de operar com tensões que variam de 220 V a 440 V trifásico. Para que circule correntes menores em no circuito, a tensão nominal será de 444 V. O conceito aplicado a esse projeto é o de espalhar a instalação dos carregadores ao longo da operação, trazendo a possibilidade de realizar cargas de oportunidade em momentos de paradas pessoais ou de café.

#### 3.4.1 Cálculo de potência instalada

Para calcular a potência total instalada, será considerada a quantidade de carregadores a serem utilizados e a potência de cada um. Esse dado é fornecido nas especificações técnicas do fabricante, e a quantidade é definida pelo número de equipamentos, ou seja, serão um total de 10 carregadores. Será calculada a potência para um único carregador e multiplicar pelo total de carregadores. As potências são calculadas como:

$$P_{\text{carregador}} = \sqrt{3} \times 440 \text{ V} \times 11.65 \text{ A} \times 0.9$$

$$P_{\text{carregador}} = \sqrt{3} \times 440 \times 11.65 \times 0.9$$

$$P_{\text{carregador}} \approx 8 \text{ kW}$$

$$Q_{\text{carregador}} = \sqrt{3} \times 440 \text{ V} \times 11.65 \text{ A} \times \sin(\cos^{-1}(0.9))$$

$$\sin(\cos^{-1}(0.9)) \approx 0.436$$

$$Q_{\text{carregador}} = \sqrt{3} \times 440 \times 11.65 \times 0.436$$

$$Q_{\text{carregador}} \approx 3.9 \text{ kVAr}$$

$$S_{\text{carregador}} = \sqrt{3} \times 440 \text{ V} \times 11.65 \text{ A}$$

$$S_{\text{carregador}} = \sqrt{3} \times 440 \times 11.65$$

$$S_{\text{carregador}} \approx 8.9 \text{ kVA}$$

Onde:

- $P_{\text{carregador}}$  é a potência ativa de um carregador.

- $Q_{carregador}$  é a potência reativa de um carregador.
- $S_{carregador}$  é a potência aparente de um carregador.

Cálculo da potencia total do projeto:

$$P_T = 10 \times P_{carregador}$$

$$P_T = 10 \times 8 \text{ kW}$$

$$P_T = 80 \text{ kW}$$

$$Q_T = 10 \times Q_{carregador}$$

$$Q_T = 10 \times 3.9 \text{ kVAr}$$

$$Q_T = 39 \text{ kVAr}$$

$$S_T = 10 \times S_{carregador}$$

$$S_T = 10 \times 8.9 \text{ kVA}$$

$$S_T = 89 \text{ kVA}$$

Com esses resultados será dimensionada a infraestrutura necessária para a implantação dos carregadores no armazém.

## 4 MODELAGEM DA OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MOVIMENTAÇÃO INDUSTRIAL

Neste capítulo, define-se as condições iniciais do projeto do equipamento de movimentação industrial, focando na capacidade da bateria. Durante a avaliação de risco do projeto será necessário realizar uma análise detalhada das interrupções de energia, já que esse fenômeno impacta nos custos de infraestrutura elétrica, podendo duplicar o valor inicialmente previsto. Dependendo da quantidade de interrupções, sua duração e o lucro cessante da operação, é necessário dimensionar a instalação de um gerador que suporte o carregamento de todos os equipamentos simultaneamente. A necessidade surge devido às características de carregamento adotadas nas premissas do projeto, para garantir assim a continuidade da operação e mitigar os riscos associados à interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Adicionalmente será feita uma análise para verificar se as especificações técnicas escolhidas terão aderência à operação dos equipamentos de movimentação sem causar danos às baterias. Será desenvolvido um algoritmo que recebe os dados de utilização das empilhadeiras, retirados de um sistema de telemetria que coleta os dados de utilização e os compila em um relatório com o total de minutos que os motores das empilhadeiras foram acionados. Com isso, serão definidos os tempos de trabalho e de ociosidade. Mais adiante, a abordagem utilizada será detalhada.

### 4.1 PREMISSAS GERAIS

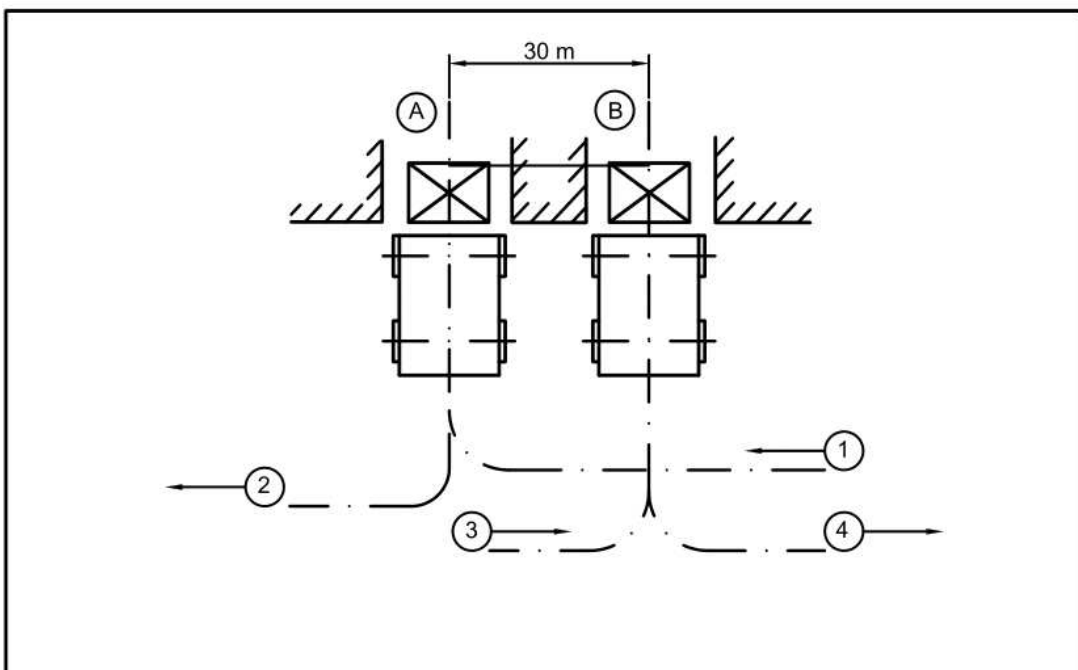
Para seguir com o dimensionamento da infraestrutura elétrica serão definidas as premissas de utilização do equipamento:

- Os dados de utilização são baseados em uma operação real, retirados do serviço de telemetria;
- As cargas de oportunidade serão realizadas nos horários estipulados na Tabela 4;
- Paradas por motivo pessoal terão a probabilidade de 10% de ocorrer;
- Se um equipamento não estiver sendo utilizado, ele não será considerado em carregamento;
- Todos os carregadores serão utilizados ao mesmo tempo nos horários de parada total;
- O consumo energético das empilhadeiras será obtido a partir do manual do equipamento, seguindo o padrão da Associação de Engenheiros Alemães (do Alemão, *Verein Deutscher Ingenieure*) (VDI) 2198. Utilizar-se-á 90% deste valor, pois o teste considera um circuito sem pausas, enquanto na operação real há períodos de ociosidade.

#### 4.1.1 Padrão de teste VDI 2198

A metodologia de teste utilizada, do ponto de vista da eficiência energética conforme a norma VDI 2198, avalia o consumo de energia de empilhadeiras elétricas em condições padronizadas. Inicialmente, a empilhadeira é inspecionada e a bateria é carregada completamente. Em um ambiente controlado, a empilhadeira realiza um ciclo de trabalho que simula operações típicas, como levantamento, transporte e descida de cargas. A Figura 11 apresenta a disposição do fluxo de movimentação utilizado no teste de eficiência energética, conforme a norma VDI 2198. As setas numeradas (1, 2, 3 e 4) indicam as rotas de movimentação que o equipamento deve seguir durante o teste. Os pontos A e B representam as posições de utilização da torre de elevação do equipamento.

Figura 11 – Percurso do VDI 2198.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Durante o ciclo, o consumo de energia é monitorado com precisão, registrando a quantidade de energia utilizada e o tempo de operação até o esgotamento da bateria. Esses dados são utilizados para calcular a eficiência energética, levando em consideração o consumo total de energia e a quantidade de trabalho realizado Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2012).

#### 4.2 MODELAGEM

Definidas as hipóteses básicas do problema, inicia-se o tratamento dos dados que servirão de entrada para o algoritmo de simulação operacional. Inicialmente, define-se a capacidade útil das baterias utilizadas nos equipamentos, uma vez que a DoD máxima é

estabelecida de forma a evitar uma descarga profunda, que pode danificar os componentes de forma irreversível.

A profundidade máxima adotada será a de 95% conforme mostrada na Tabela 5. É importante reforçar que esse valor é necessário para não provocar um dano irreversível na bateria. Contudo, quanto menor o DoD mais saudável a bateria permanece ao longo dos ciclos. O ideal é que a DoD fique sempre o mais próximo possível de 60 % para evitar perda de capacidade nas baterias (GUENA; LEBLANC, 2006). Adicionalmente, há mais dois itens importantes para a modelagem: o ponto ideal de carregamento da bateria e, por restrição do equipamento, o ponto crítico para o início do processo de carregamento.

Tabela 5 – Informações da bateria.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Tensão da bateria	51,2 V
Capacidade teórica da bateria	390 Ah
Profundidade máxima de descarga (DoD máx)	95,0%
Capacidade útil da bateria	370,50 Ah

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 6 são mostrados o SoC mínimo e crítico. O SoC mínimo representa o valor do estado de carga onde ocorre o equilíbrio entre tempo de uso e a degradação das baterias. Já o SoC crítico indica o valor do estado de carga no qual as funções de elevação do equipamento são comprometidas, permanecendo apenas a função do motor de tração.

Tabela 6 – Parâmetros de modelagem da bateria.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
SoC Mínimo	40 %
SoC Crítico	20 %

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 7 são fornecidos os parâmetros básicos para modelar o consumo energético das empilhadeiras durante a operação baseado no teste VDI. Contudo, como os testes serão realizadas de maneira contínua, esses valores serão corrigidos para 80% a 90% do valor encontrado. Assim, determinada a demanda de corrente do equipamento, pode-se modelar seu consumo de energia em **ampère-hora (Ah)**.

Desse modo, a energia gasta pelo equipamento pode ser calculada como se segue:

$$E_{gasta(Ah)} = I_{equipamento} \times t_{operação}, \quad (4.1)$$

onde  $E_{gasta(Ah)}$  é a energia consumida em Ah,  $I_{equipamento}$  é a corrente utilizada pelo equipamento em ampères, e  $t_{operação}$  é o tempo de operação em horas.

Tabela 7 – Informações dos equipamentos.

Parâmetro	Valor
Ciclo VDI	3,3 kWh/h
Fator de utilização VDI	90,0%
Demanda corrente dos equipamentos	58,01 A
Temperatura de operação	25°C
Taxa de carregamento	150 A

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Enquanto a energia carregada é calculada por:

$$E_{carregada(Ah)} = I_{carregador} \times t_{carga}, \quad (4.2)$$

onde  $E_{carregada(Ah)}$  indica a energia armazenada em Ah,  $I_{carregador}$  representa a corrente fornecida pelo carregador em ampères, e  $t_{carga}$  é o tempo de carga em horas.

O padrão de utilização é outro ponto bastante importante para a modelagem. Esses dados serão extraídos de uma base de dados de telemetria considerando uma operação real, e divididos em categorias de utilização leve, média e pesada. Com essa estratificação, terá uma visão completa da operação dos equipamentos, abrangendo tanto os momentos de maior quanto de menor utilização do equipamento. Esses dados serão extraídos de uma plataforma de telemetria de uma operação real e tratados de acordo com os passos descritos na Figura 12.

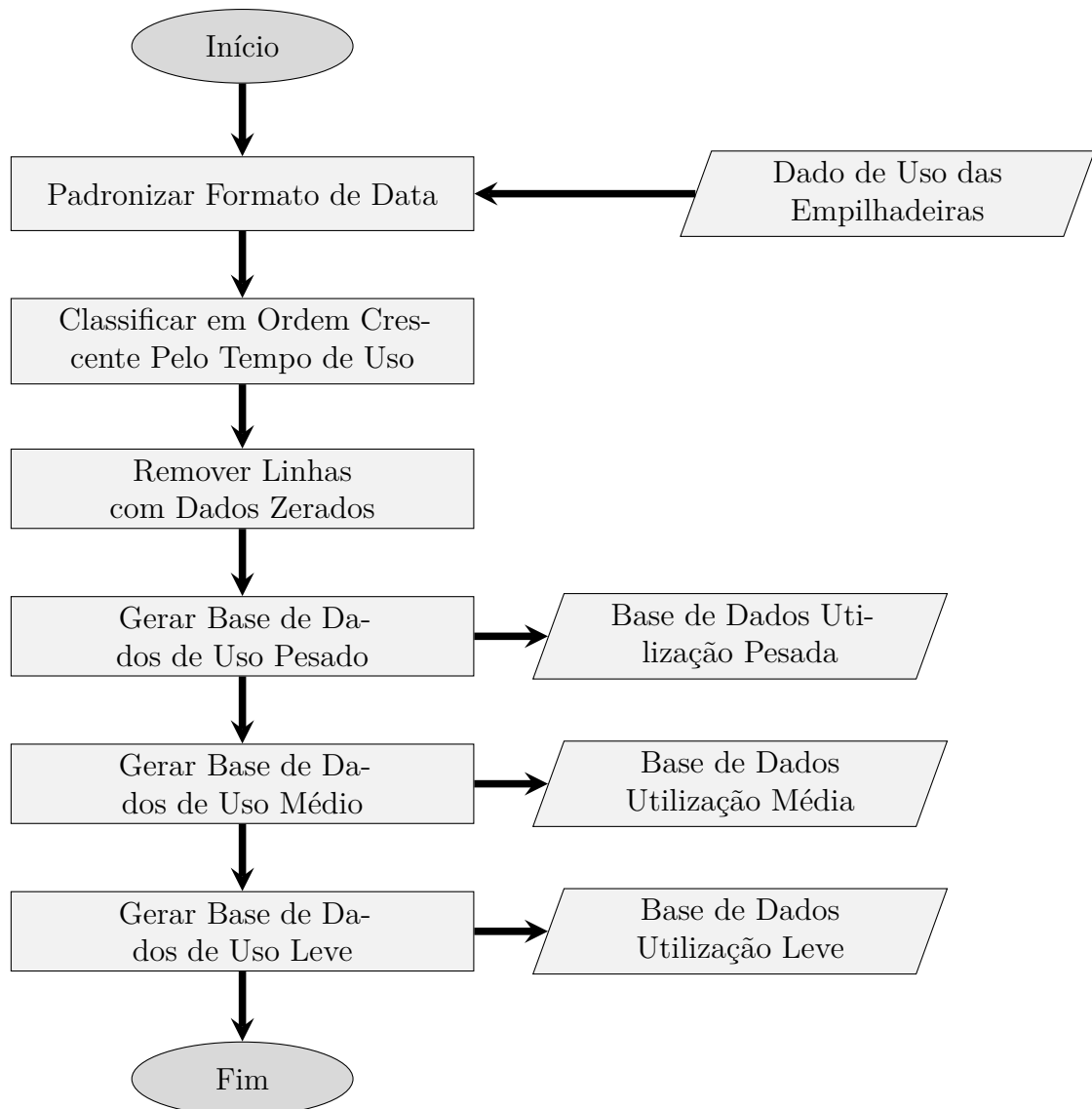
Pode-se então passar para a etapa de tratamento dos dados da utilização da bateria. Porém antes, os dados de utilização devem ser convertidos utilizando (2.2). Como o tempo de utilização e o consumo médio do equipamento são conhecidos pode-se realizar operações minuto a minuto para determinar o SoC do equipamento.

A primeira etapa da modelagem consiste na geração de um vetor de tempo, que indica a utilização dos equipamentos durante o uso. Este vetor é composto por intervalos de tempo específicos, normalmente divididos em minutos, que representam o ciclo de operação dos equipamentos ao longo de um dia típico.

Cada coordenada do vetor de tempo será composta por três grandezas:  $(u, c, o)$ , onde  $u$  é o tempo em utilização,  $c$  representa o tempo em carregamento e  $o$  indica o tempo ocioso. Com isso, são obtidas 144 coordenadas que indicam a utilização do equipamento dentro de uma hora, garantindo que  $u + c + o$  seja sempre igual a 60 minutos. Isso ocorre porque a análise é feita de hora em hora.

Os dados de carregamento são retirados da Tabela 4, onde são definidos os horários específicos em que os equipamentos estarão em modo de carregamento. As paradas pessoais, por sua vez, são modeladas como eventos aleatórios com uma probabilidade de ocorrerem em 10% dos horários que não coincidem com as paradas obrigatórias.

Figura 12 – Fluxograma de tratamento de dados de telemetria dos equipamentos.



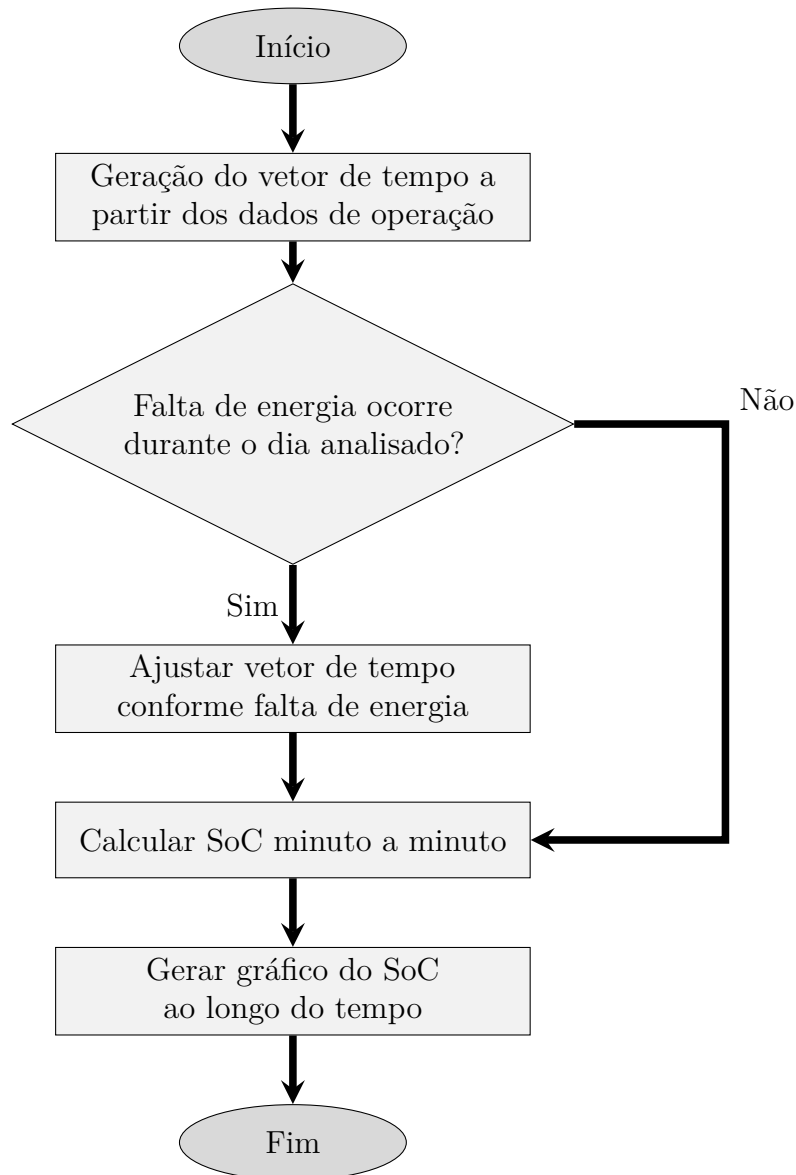
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Pode-se também incorporar à modelagem a possibilidade de falta de energia. Esse ajuste será integrado ao algoritmo após a criação do vetor de tempo. A modelagem será realizada da seguinte forma: quando ocorrer uma falta de energia com início e duração conhecidos, o algoritmo modificará o vetor de tempo para refletir essa interrupção, zerando o tempo de carregamento desde o início até o fim da falta de energia. É importante ressaltar que os tempos de utilização e ociosidade não serão alterados. Durante o período em que a bateria deveria estar carregando, o nível de carga (SoC) permanecerá constante devido à falta de energia. Além disso, se o nível de SoC atingir 20%, o equipamento não será utilizado, e o SoC continuará constante até o próximo momento de recarga.

Para finalizar, o vetor de tempo é repassado para o algoritmo de cálculo do SoC, que opera minuto a minuto. Após iterar por todo o vetor de tempo, o algoritmo retorna



Figura 13 – Fluxograma do algoritmo de modelagem e cálculo do SoC da bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

uma base de dados que contém as coordenadas (minuto, SoC), possibilitando a plotagem do gráfico de utilização da bateria, conforme a Figura 13.

### 4.3 SIMULAÇÃO

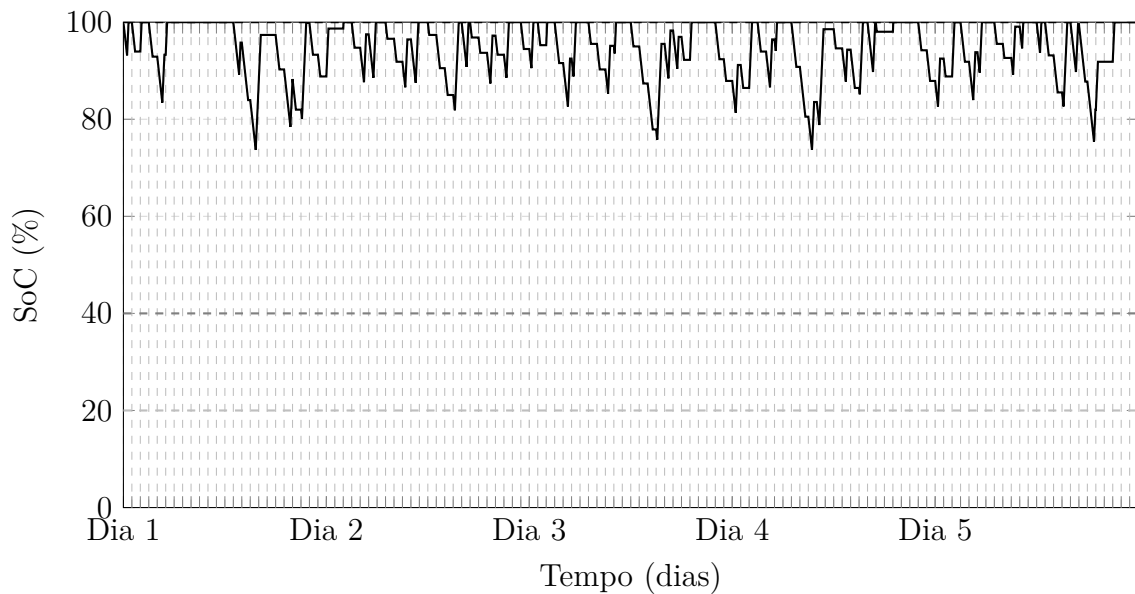
A simulação realizada neste trabalho visa avaliar o desempenho das baterias de íon-lítio em diferentes cenários de operação de equipamentos de movimentação logística. Para isso, foi desenvolvida uma modelagem detalhada que considera tanto o padrão de uso dos equipamentos quanto as condições de recarga das baterias.

A Figura 14 mostra o perfil de consumo de energia na condição de carga leve. Esta curva característica permite avaliar se os equipamentos foram dimensionados corretamente

já que o custo da bateria tem um grande impacto no custo inicial da instalação, uma vez que quanto maior a sua capacidade maior será o seu custo.

Analisando a Figura 14 observa-se uma subutilização tanto da capacidade da bateria quanto do carregador. Para essa situação, é necessário reavaliar as especificações do projeto, visando uma redução dos custos, pois o SoC não chega nem perto do recomendado pelo fornecedor, que é 40%.

Figura 14 – Estado de carga (SoC) da bateria ao longo do tempo com utilização leve.

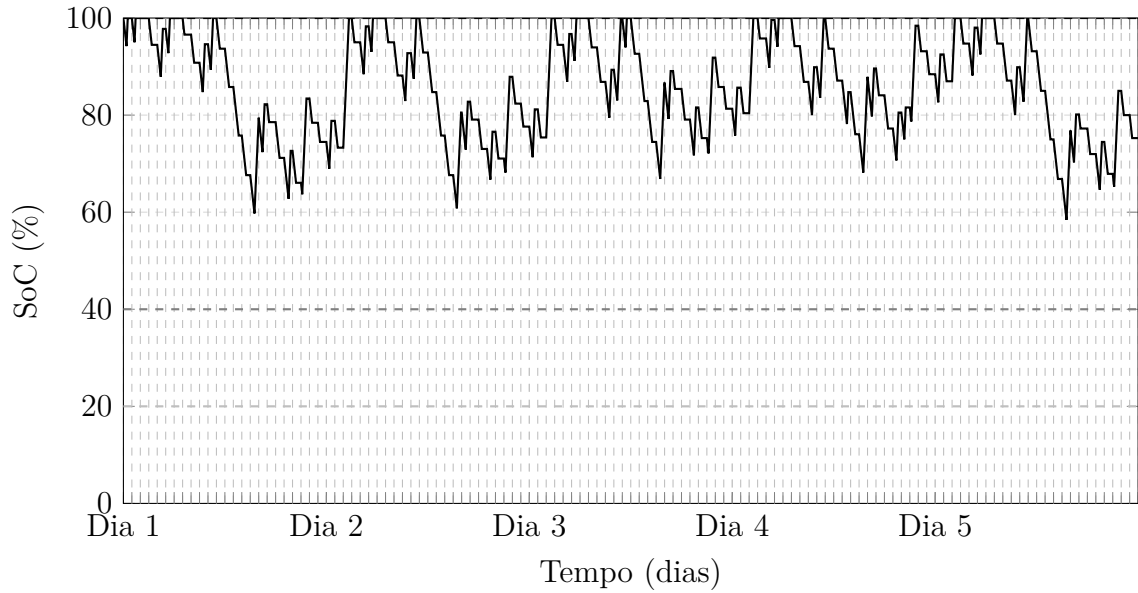


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 15 ilustra que a utilização dos equipamentos está próxima da metade da capacidade. Nesta condição, a maior intensidade de utilização dos equipamentos permite observar que, caso a demanda aumente, ainda haverá uma capacidade excedente nas baterias para acomodar os níveis necessários.

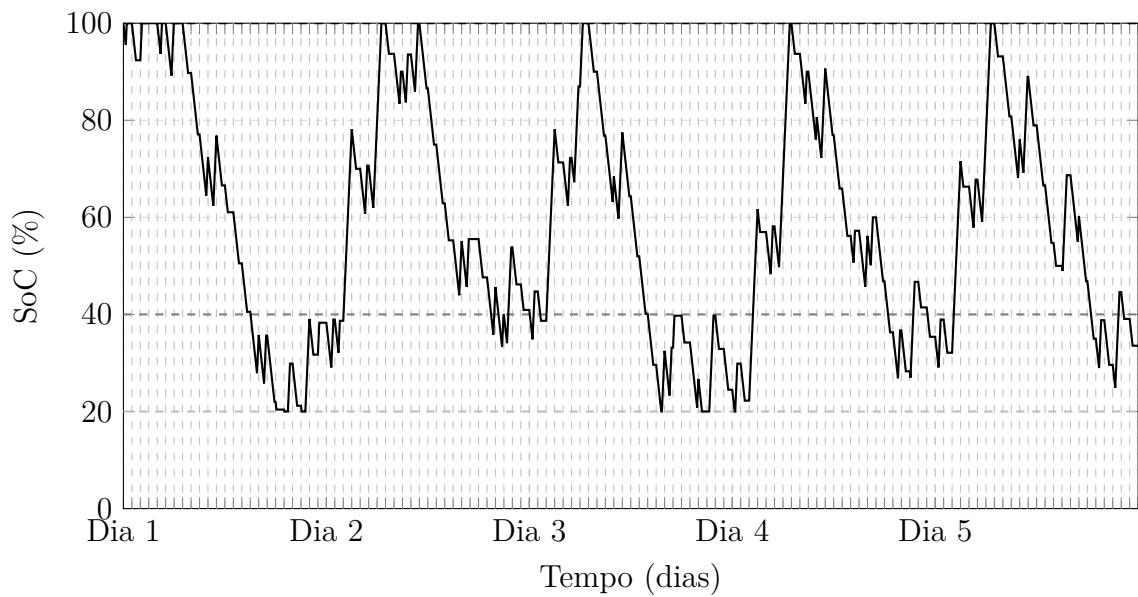
Ao simular uma utilização pesada, observa-se que, em vários momentos, o equipamento opera com o SoC abaixo de 40%. Em alguns casos, o SoC chega a 20%, resultando em aproximadamente 2 horas de operação perdidas devido à falta de carga na bateria.

Figura 15 – Estado de Carga (SoC) da Bateria ao Longo do Tempo com Utilização Média.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 16 – Estado de carga (SoC) da bateria ao longo do tempo com utilização pesada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

## 5 AVALIAÇÃO DE RISCOS

Neste capítulo serão investigados os impactos nos equipamentos estudados frente as interrupções de energia elétrica ocorridos na rede de distribuição. Para isso, será utilizada a modelagem apresentada no capítulo anterior para analisar os possíveis cenários de risco.

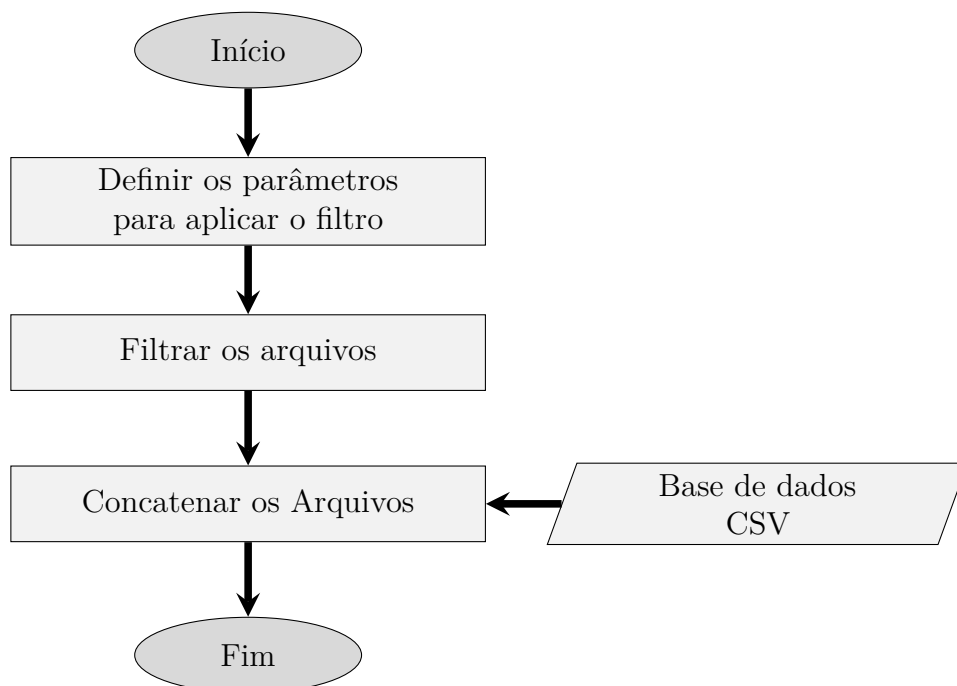
### 5.1 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DAS INTERRUPÇÕES DE ENERGIA

As empilhadeiras escolhidas são do tipo com baterias embutidas, o que impede a troca em caso de baixo nível de carga. Sendo assim, é necessário avaliar os índices de interrupção do fornecimento da rede elétrica de distribuição (*por exemplo*, duração, frequência e horário de ocorrência). Nesta seção, será realizado todo o tratamento e a avaliação dos resultados obtidos.

#### 5.1.1 Tratamento da base de dados

Os dados estão disponíveis no site GOV.BR, onde é possível encontrar informações sobre todas as interrupções ocorridas nas redes de distribuição do Brasil desde 2017. O volume de dados a ser processado exige considerável esforço computacional. Para reduzir o tempo de processamento, utilizaremos a biblioteca Pandas para extrair da base de dados apenas as informações relevantes .

Figura 17 – Fluxograma do algoritmo para tratar os dados de faltas de energia elétrica.



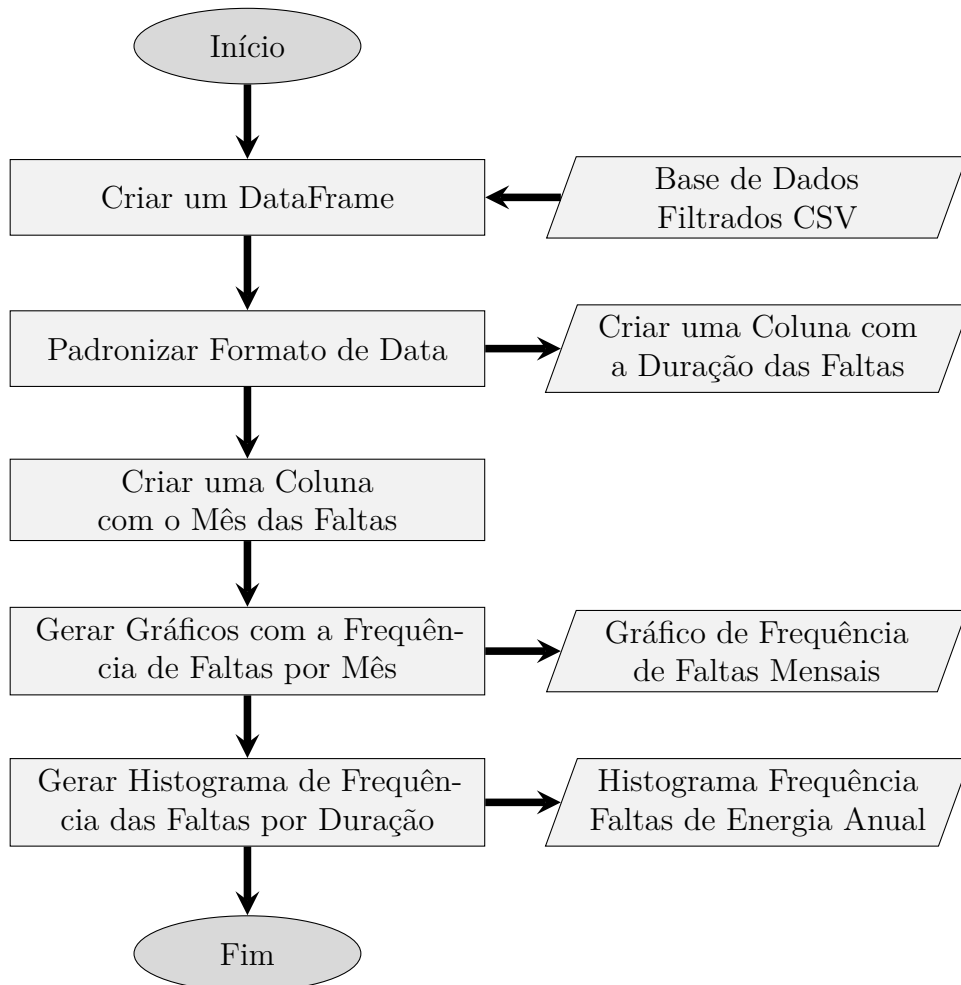
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Seguindo o fluxograma apresentado na Figura 17 deve-se inserir parâmetros de entrada do algoritmo o Nível de Tensão de Alimentação, Alimentador, Ano Inicial e Final. A partir dos dados anteriores tem-se os arquivos individuais para cada ano. Após esta etapa, deve-se concatenar os arquivos para gerar um arquivo no formato CSV (do inglês, *comma-separated values*)<sup>1</sup> antes de executar o algoritmo de análise.

### 5.1.2 Análise dos dados filtrados

Com os dados filtrados, realiza-se a análise do padrão de quedas de energia da planta, a qual será realizada por meio de gráficos e histogramas. Conforme o fluxograma ilustrado na Figura 18, os dados filtrados obtidos servem como entrada para o **Algoritmo de Tratamento dos Dados**.

Figura 18 – Fluxograma do processo de criação e análise de dados de faltas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O primeiro passo consiste em padronizar as colunas de datas disponíveis para

<sup>1</sup> arquivo no código padrão americano para o intercâmbio de informação (ASCII) com os campos separados por vírgula

evitar problemas na realização de operações com essas informações. Esse procedimento é fundamental, pois será necessário realizar operações de subtração entre as datas para calcular com precisão a duração das quedas de energia.

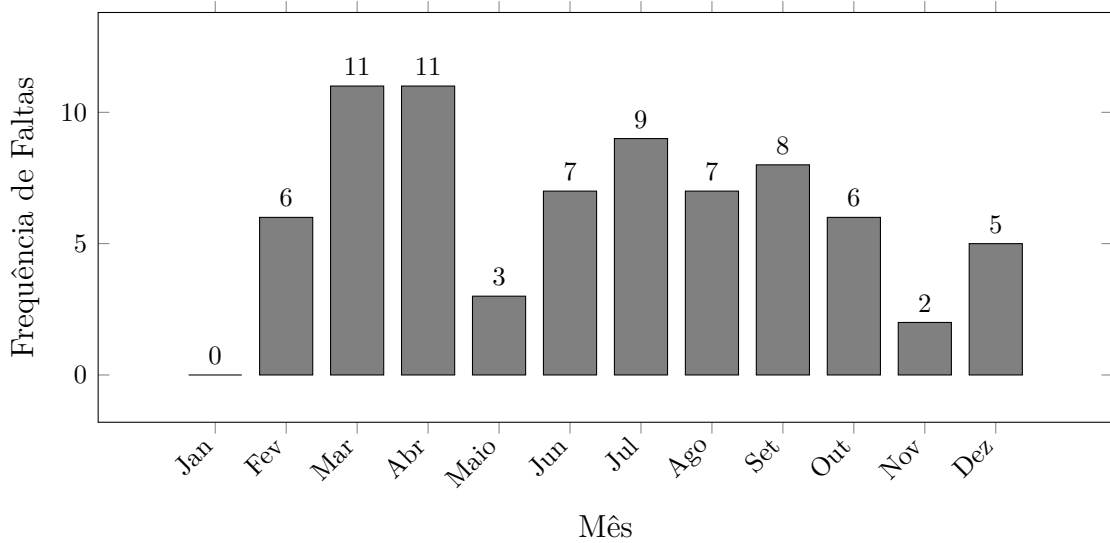
O conjunto de dados inclui as seguintes informações: **DatGeracaoConjuntoDados** (Data em que o conjunto de dados foi gerado), **IdeConjuntoUnidadeConsumidora** (Identificador único do conjunto de unidades consumidoras), **DscConjuntoUnidadeConsumidora** (Descrição do conjunto de unidades consumidoras), **DscAlimentadorSubestacao** (Descrição do alimentador da subestação), **DscSubestacaoDistribuicao** (Descrição da subestação de distribuição), **NumOrdemInterrupcao** (Número da ordem de interrupção), **DscTipoInterrupcao** (Descrição do tipo de interrupção), **IdeMotivoInterrupcao** (Identificador do motivo da interrupção), **DatInicioInterrupcao** (Data e hora de início da interrupção), **DatFimInterrupcao** (Data e hora do fim da interrupção), **DscFatoGeradorInterrupcao** (Descrição do fato gerador da interrupção), **NumNivelTensao** (Nível de tensão em volts da unidade consumidora), **NumUnidadeConsumidora** (Número de unidades consumidoras afetadas), **NumConsumidorConjunto** (Número de consumidores no conjunto afetado), **NumAno** (Ano do evento de interrupção), **NomAgenteRegulado** (Nome do agente regulado responsável pela distribuição de energia), **SigAgente** (Sigla do agente regulado), **NumCPF/CNPJ** (CPF ou CNPJ do agente regulado), **Duracao** (Duração da interrupção em horas) e **Ano** (Ano de referência dos dados).

O algoritmo calcula a duração das interrupções de energia subtraindo a data e hora de término da interrupção da data e hora de início. Para assegurar a consistência dos dados, todas as linhas com duração igual a zero são excluídas, eliminando potenciais ruídos no conjunto de dados. Com o *DataFrame* devidamente tratado, a análise gráfica pode ser realizada, permitindo a visualização dos padrões de interrupções no alimentador. O primeiro gráfico a ser plotado representa as quedas de energia anuais divididas por mês, oferecendo uma visão clara da distribuição das interrupções ao longo do tempo.

A análise dos gráficos apresentados nas Figura 19 e Figura 20 permite identificar padrões e tendências nas interrupções do fornecimento de energia ao longo dos meses dos anos de 2022 e 2023. Adicionalmente, observa-se a variação na frequência das interrupções de um mês para o outro, o que pode ser correlacionado a diferentes fatores, como condições climáticas, manutenção programada e falhas técnicas. A análise detalhada desses gráficos proporciona uma melhor compreensão sobre os períodos do ano em que as interrupções foram mais frequentes, assim como a tendência de aumento ou diminuição ao longo do horizonte temporal investigado.

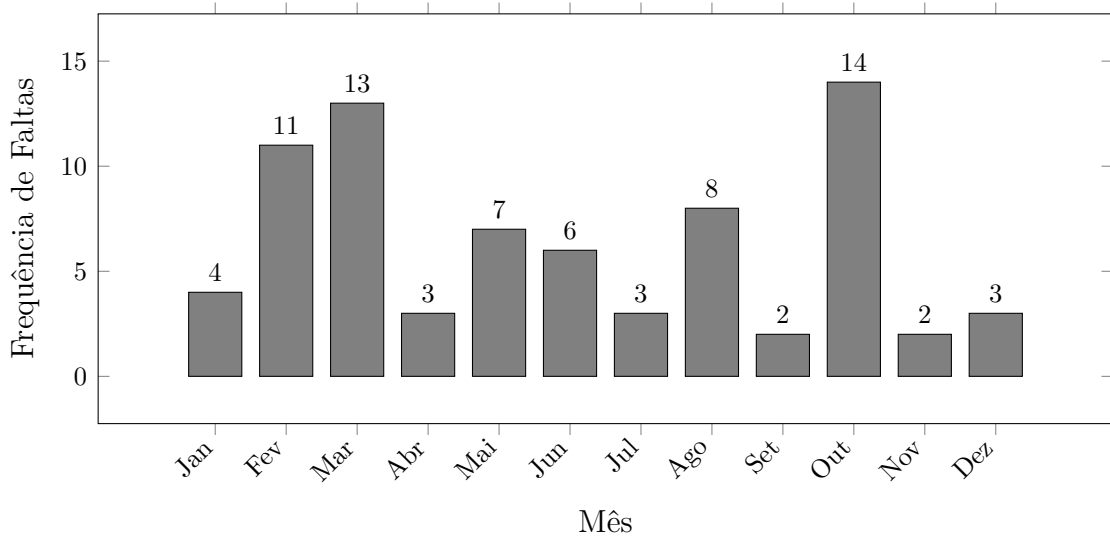
Entretanto, não é possível identificar padrões ou sazonalidades consistentes entre os anos, o que prejudica a avaliação da necessidade de medidas mitigatórias para os impactos das quedas de energia. Isso se deve às características distintas de utilização em cada mês do ano, influenciadas por variações sazonais e outros fatores externos.

Figura 19 – Frequência de interrupções de fornecimento de energia por mês em 2022.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 20 – Frequência de interrupções de fornecimento de energia por mês em 2023.

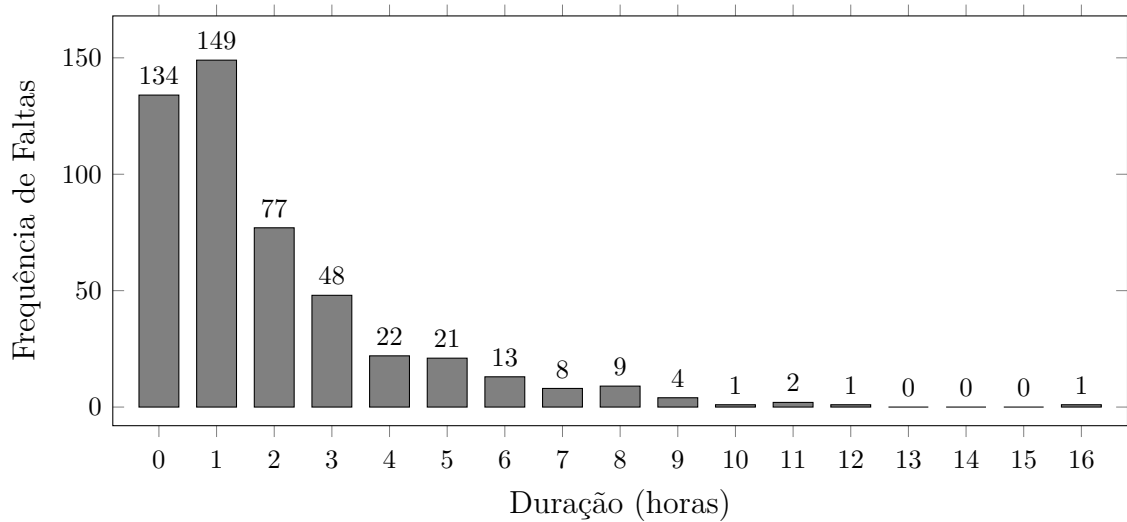


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Dessa forma, será realizada uma avaliação da frequência das quedas de energia com base na duração dos eventos. Para isso, será utilizada uma ferramenta apropriada: a plotagem em formato de histograma. Essa abordagem permitirá a identificação de pontos críticos e padrões de recorrência, o que possibilitará a aplicação desses dados em simulações de cenários operacionais. Por meio dessa análise, será possível otimizar estratégias para mitigar os impactos das interrupções de energia, além de auxiliar no planejamento e na tomada de decisões.

A análise quantitativa do histograma indica que a maioria das interrupções de energia apresenta uma duração relativamente curta, concentrando-se principalmente no

Figura 21 – Histograma de frequência interrupções de fornecimento de energia anual (2018-2023).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

intervalo de 0 a 2 horas. Em particular, o intervalo de duração de 1 hora apresenta a maior frequência, com 149 eventos registrados. Esse dado sugere que, apesar do alto número de interrupções, a maioria é resolvida em um período breve, o que pode ser indicativo de uma resposta operacional eficiente na resolução desses eventos.

À medida que a duração das interrupções aumenta, observa-se uma diminuição significativa na frequência dos eventos. Interrupções com durações superiores a 6 horas são raras, com poucas ocorrências registradas além de 10 horas. Esta distribuição ressalta que eventos de longa duração, embora menos frequentes, possuem potencial para causar impactos mais severos e, portanto, requerem maior atenção na formulação de estratégias de mitigação.

Com os dados sobre as faltas de energia, é possível simular como a duração e a hora de início impactam a utilização dos equipamentos. A simulação das quedas será realizada com a modelagem descrita no capítulo anterior, utilizando o vetor de tempo para inserir as interrupções, zerando a coordenada correspondente ao carregamento durante o período em que a falta de energia ocorrer. Para otimizar essa avaliação e abranger todas as situações possíveis, cria-se um conjunto de séries de combinações para interrupções com duração de 1 a 9 horas, iniciando em diferentes momentos do dia. Dessa forma, obtêm-se os piores cenários possíveis, ou seja, aqueles em que os equipamentos permanecerão parados por mais tempo devido à falta de energia.

Conforme ilustrado na Tabela 8, o tempo de parada é influenciado não apenas pela duração das faltas de energia, mas também pelo horário de início dessas interrupções. A operação dos equipamentos não segue um padrão linear, apresentando momentos de maior e menor utilização. Nesse contexto, a ferramenta de simulação é fundamental, pois



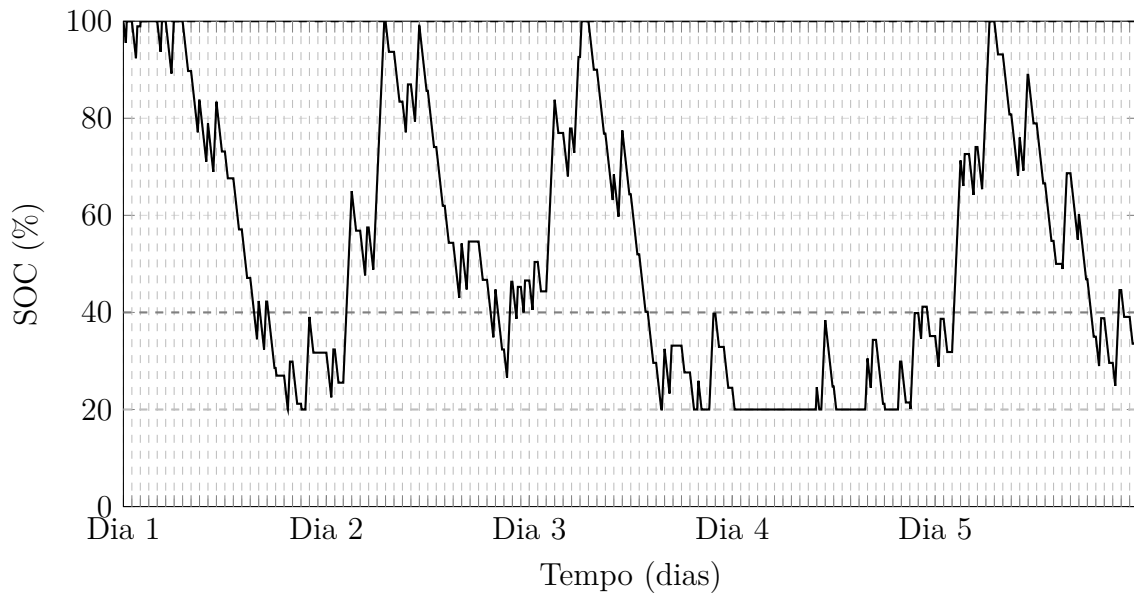
Tabela 8 – Resultados da simulação de faltas de energia.

Caso	Tempo de parada (h)	Horário de Início (h)	Duração (h)	Dia
1	15,83	0	7	4
2	15,75	0	9	4
3	15,73	2	9	2
4	15,17	22	9	3
5	14,73	23	8	3
6	14,30	0	8	4
7	14,30	0	8	4
8	14,00	2	9	4
9	13,98	23	8	1
10	13,92	0	9	2
11	13,82	2	6	4

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

possibilita a modificação da origem dos dados de acordo com as características específicas do local de aplicação.

Figura 22 – Estado de carga (SoC) da bateria ao longo do tempo no pior cenário de falta de energia elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao simular o pior cenário, pode-se construir a curva apresentada na Figura 22, que ilustra como a falta de energia afetou negativamente a utilização do equipamento em condições de uso intenso, resultando em 15,83 horas de inatividade. Esse tempo de parada impacta diretamente o lucro cessante da operação, o que pode acarretar prejuízos significativos, dependendo da aplicação e do contexto operacional. A identificação dessas

situações permite desenvolver estratégias para mitigar os efeitos negativos das interrupções no desempenho e na eficiência logística.

## 6 ANÁLISE ECONÔMICA

O ponto de vista econômico da análise que será apresentada deverá ser considerado ao longo dos anos, pois é o cenário em que a bateria de íon-lítio se torna mais vantajosa, já que seu custo inicial é mais elevado na maioria dos casos (JIAO *et al.*, 2021). Um fator importante no projeto em questão, é que não se deve comparar os itens individualmente, mas sim o mínimo necessário para que a operação do projeto funcione adequadamente. Devido à tecnologia de recarga de oportunidade que pode ser aplicada nas baterias de íon-lítio, não é necessário implementar uma segunda bateria para a mesma empilhadeira.

Embora no Capítulo 5 a utilização pesada tenha demonstrado momentos de parada por falta de bateria, pode-se solucionar isso alterando o carregador para um com uma taxa de carregamento maior ou até mesmo aumentando a capacidade da bateria. Isso impactaria muito pouco no valor inicial do projeto e ainda mantém as vantagens qualitativas das baterias de íon-lítio em relação às de chumbo-ácido.

Tabela 9 – Comparação entre baterias de íon-lítio e chumbo-ácido

Item	Íon-lítio	Chumbo-ácido
<b>Quantidade de baterias</b>	1	2
<b>Quantidade de carregadores</b>	1	1
<b>Custo Unitário Bateria (pu)</b>	1	0,34
<b>Custo de Manutenção Anual (pu)</b>	0,014	0,03
<b>Eficiência Geral (%)</b>	95	75
<b>Tempo de Vida Estimado (anos)</b>	10	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O fator determinante para a avaliação provém da operação dos equipamentos, uma vez que as baterias de íon-lítio se mostram vantajosas em operações com três turnos. Devido à sua maior eficiência, menor necessidade de manutenção e maior tempo de vida, elas se sobressaem a partir dessa condição. Para analisar essa situação, utiliza-se o Custo Total de Propriedade (CTP) conforme fórmula abaixo:

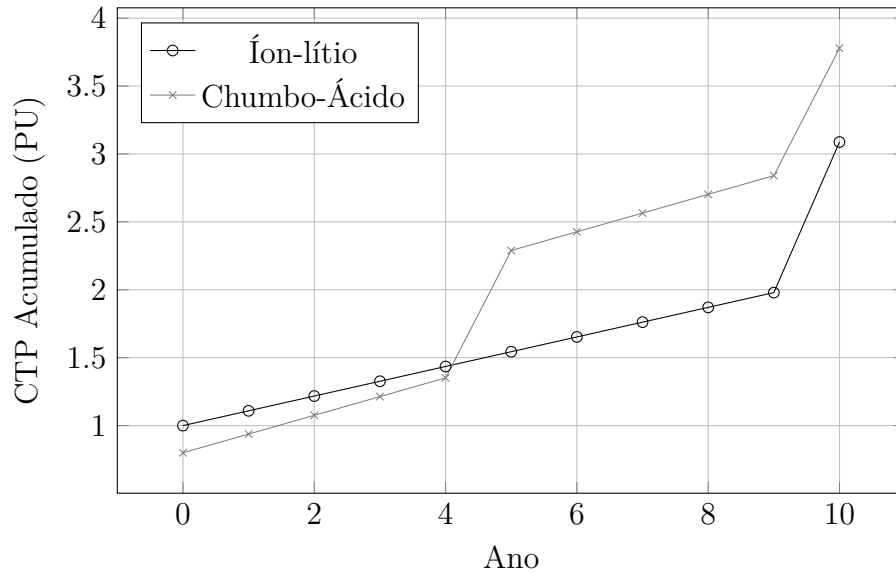
$$CTP = C_{\text{inicial}} + \sum_{t=1}^n (C_{\text{energia},t} + C_{\text{manutenção},t}) + \sum_{t=1}^n C_{\text{substituição},t} \quad (6.1)$$

onde  $C_{\text{inicial}}$  representa o custo inicial de aquisição do equipamento, incluindo a bateria e o carregador,  $C_{\text{energia},t}$  refere-se ao custo anual de energia no ano  $t$ ,  $C_{\text{manutenção},t}$  é o custo anual de manutenção no mesmo ano. Adicionalmente,  $C_{\text{substituição},t}$  representa o custo de substituição da bateria, que ocorre em anos específicos, dependendo da vida útil da mesma.

Desse modo, vai-se aplicar (6.1) em uma operação que funciona em 3 turnos, e requer 2 baterias de chumbo-ácido para cada equipamento em operação. Além disso, a previsão de operação é de 3000 horas/ano. Com a plotagem do gráfico, obtém-se como

resultado a Figura 23, que demonstra que, após o quarto ano nessa condição, as baterias de íon-lítio se tornam significativamente mais vantajosas em relação às de chumbo-ácido.

Figura 23 – Comparação do CTP acumulado 3 turnos: bateria de íon-lítio vs chumbo-ácido em pu.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Apresentando outro cenário de uma operação que funciona em 2 turnos, com uma utilização anual de 2000 horas, o resultado visto na Figura 24 mostra que a utilização do íon-lítio não se revela tão eficaz quanto na situação anterior. Por isso, torna-se importante a avaliação correta do projeto, para evitar uma avaliação incorreta dos custos.

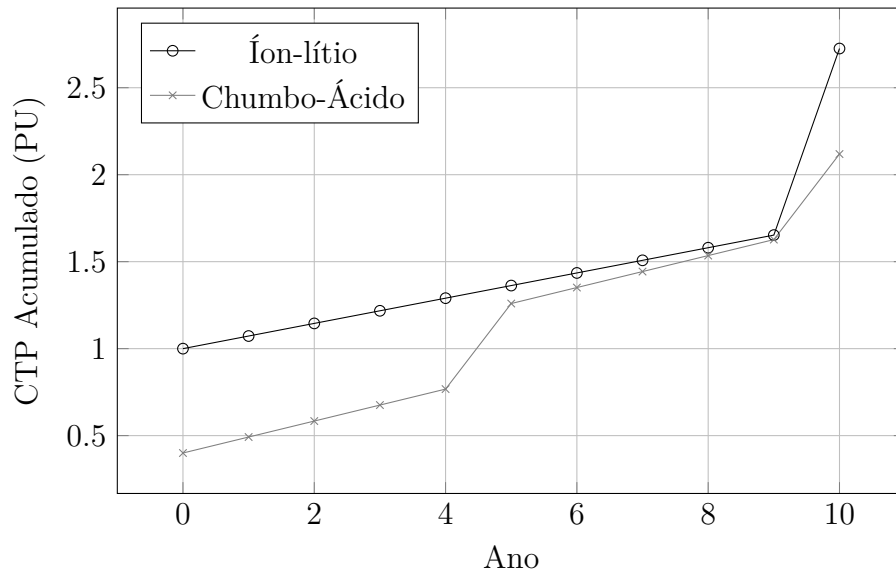
Outro fator importante a ser analisado como consequência das avaliações anteriores é o impacto financeiro causado pelo tempo de inatividade dos equipamentos. Uma indústria depende de seus equipamentos para diversas operações de armazenamento, movimentação, descarga e expedição de sua produção. Dessa forma, é possível avaliar o custo da oportunidade perdida durante os momentos em que o equipamento necessitava ser utilizado, mas não estava operacional.

Esse custo pode ser modelado pelo Lucro Cessante, que é uma estimativa de quanto deixou de ser produzido devido à impossibilidade momentânea. A seguir, apresenta-se a fórmula:

$$LC = (P \times Q) \times T \quad (6.2)$$

onde  $LC$  é o lucro cessante,  $P$  é o preço de venda do produto ou serviço por unidade,  $Q$  é a quantidade de produtos ou serviços que deixaram de ser vendidos ou produzidos, e  $T$  é o tempo durante o qual a produção ou venda foi interrompida.

Figura 24 – Comparação do CTP acumulado 2 turnos: baterias de íon-lítio vs chumbo-ácido em pu.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O Lucro Cessante funciona como um balizador para avaliar a aplicação de medidas mitigadoras em casos de quedas de energia, paradas inesperadas, manutenções corretivas e situações emergenciais. Analisando um resultado obtido na análise de risco, onde ocorreram 15,83 horas de máquina parada devido a uma queda de energia, utiliza-se o conceito de Lucro Cessante para determinar a viabilidade da aplicação de um gerador, de baterias de reserva ou de outras medidas mitigatórias para essa situação.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a viabilidade técnica e econômica da utilização de baterias de íon-lítio em equipamentos de movimentação logística, comparando-as com as tradicionais baterias de chumbo-ácido. Ao longo do estudo, ficou evidente que, embora as baterias de íon-lítio apresentem um custo inicial mais elevado, elas proporcionam benefícios significativos em termos de eficiência energética, durabilidade e redução de custos operacionais a longo prazo.

As simulações realizadas demonstraram que, em cenários de alta demanda operacional, onde os equipamentos operam em múltiplos turnos, as baterias de íon-lítio tornam-se substancialmente mais vantajosas após alguns anos de uso. Esse diferencial deve-se principalmente à maior eficiência das baterias de íon-lítio, à sua capacidade de recarga rápida e à necessidade reduzida de manutenção.

Adicionalmente, a utilização de baterias de íon-lítio elimina a necessidade de uma sala específica para a troca de baterias, liberando espaço valioso nas instalações. Além disso, o ganho de produtividade proporcionado pela eliminação de trocas frequentes de baterias contribui para a continuidade das operações, reduzindo os tempos de inatividade e aumentando a eficiência geral.

A análise de risco revelou que a aplicação de medidas mitigadoras, como a instalação de geradores ou o uso de baterias de reserva, deve ser realizada para minimizar os impactos financeiros causados por quedas de energia e garantir a continuidade das operações, especialmente quando as perdas superam o custo de implementação dessas medidas.

Por fim, conclui-se que a escolha entre baterias de íon-lítio e chumbo-ácido deve ser feita com base em uma análise detalhada das necessidades específicas de cada operação. Em ambientes onde a eficiência, o espaço físico e a continuidade operacional são prioritários, o investimento em baterias de íon-lítio justifica-se plenamente, oferecendo não apenas retorno financeiro, mas também contribuindo para a sustentabilidade e a otimização das operações logísticas.

### 7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para aperfeiçoar o sistema desenvolvido são apresentadas, a seguir, algumas propostas de continuidade deste trabalho.

- a) Analisar a viabilidade do uso de fontes de energia renovável para alimentar as empilhadeiras;
- b) Refinar os modelos de carregamento e descarregamento das baterias e carregadores.

## REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Interrupções de Energia Elétrica nas Redes de Distribuição**. 2024. Dados Abertos ANEEL. Acessado em 22 de junho de 2024. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/interrupcoes-de-energia-eletrica-nas-redes-de-distribuicao>.
- BERNDT, D. A look back at forty years of lead-acid-battery development; a survey especially regarding stationary applications. In: **INTELEC 05 - Twenty-Seventh International Telecommunications Conference**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 269–275.
- CHENG, Q.; HE, W.; ZHANG, X.; LI, M.; SONG, X. Recent advances in composite membranes modified with inorganic nanoparticles for high-performance lithium ion batteries. **RSC Adv.**, The Royal Society of Chemistry, v. 6, p. 10250–10265, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1039/C5RA21670B>.
- DEEPTI, D.; RAMANARAYANAN, V. State of charge of lead acid battery. In: **2006 India International Conference on Power Electronics**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 89–93.
- DEEPTI, D. J.; RAMANARAYANAN, V. State of charge of lead acid battery. In: **IEEE. 2006 India International Conference on Power Electronics**. [S.l.], 2006. p. 89–93.
- ENDO, M.; KIM, C.; NISHIMURA, K.; FUJINO, T.; MIYASHITA, K. Recent development of carbon materials for li ion batteries. **Carbon**, v. 38, n. 2, p. 183–197, 2000. ISSN 0008-6223. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622399001414>.
- GARCHE, J.; DYER, C.; MOSELEY, P.; OGUMI, Z.; RAND, D.; SCROSATI, B. **Encyclopedia of Electrochemical Power Sources**. Elsevier Science, 2013. ISBN 9780444527455. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=TAi\\_QBsTz5UC](https://books.google.com.br/books?id=TAi_QBsTz5UC).
- GUENA, T.; LEBLANC, P. How depth of discharge affects the cycle life of lithium-metal-polymer batteries. In: **INTELEC 06 - Twenty-Eighth International Telecommunications Energy Conference**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–8.
- Hyster-Yale Materials Handling, Inc. **History of Hyster-Yale Materials Handling, Inc.** 2024. <https://www.hyster-yale.com/history>. Accessed: 2024-07-02.
- IEB. **IEB Product Brochure Filon FuturE 2018**. IEB, 2018. Accessed: 2024-07-21. Disponível em: [https://www.energyon.pl/wp-content/uploads/2019/07/IEB\\_Product\\_Brochure\\_Filon\\_FuturE\\_2018.pdf](https://www.energyon.pl/wp-content/uploads/2019/07/IEB_Product_Brochure_Filon_FuturE_2018.pdf).
- JIAO, M.; PAN, F.; HUANG, X.; YUAN, X. Evaluation on total cost of ownership of electric forklifts with lithium-ion battery. In: **2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–5.
- JUNGHEINRICH. **ETV 216i Manual**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://manuals.prod.scw.jungheinrichcloud.com/51858088/51858088.pdf>.
- JÚNIOR, I. d. B.; SPEJORIM, W. Gestão estratégica de armazenagem. 1. **Curitiba: IESDE Brasil SA**, 2012.

LAYADI, T.; CHAMPENOIS, G.; MOHAMMED, M.; ABBES, D. Lifetime estimation tool of lead–acid batteries for hybrid power sources design. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 54, p. 36–48, 05 2015.

MCGRAW, G. The history of forklifts. **Manufacturing Engineering Journal**, 2000. Accessed: 2024-07-21.

Movelift. **Manual de Instruções Strong 4RL 30**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://movelift.com.br/wp-content/uploads/2021/05/MANUAL-DE-INSTRU%C3%87%C3%95ES-STRONG-4RL-30-MOVELIFT.pdf>.

Movelift. **Manual de Instruções ERN20 Movelift**. [S.l.], 2021. Acesso em: 30 maio 2024. Disponível em: <https://movelift.com.br/wp-content/uploads/2021/05/MANUAL-DE-INSTRU%C3%87%C3%95ES-ERN20-MOVELIFT.pdf>.

NAGAMINE, M.; KATO, H.; NISHI, Y. Characteristics of new lithium ion rechargeable batteries. In: **Proc. Abstracts 33rd Battery Symposium**. Tokyo, Japan: [s.n.], 1992. v. 1C11, p. 83–84.

NITTA, N.; WU, F.; LEE, J.; YUSHIN, G. Li ion battery materials: Present and future. **Materials Today**, v. 18, 11 2014.

PAVLOV, D. **Lead-Acid Batteries: Science and Technology**. Elsevier Science, 2011. ISBN 9780080931685. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=8bMoshJhC-wC>.

PLANTÉ, G. **Recherches sur l'électricité**. Paris: J.-B. Baillièrre et fils, 1859.

QU, J.; JIANG, Z.; ZHANG, J. Investigation on lithium-ion battery degradation induced by combined effect of current rate and operating temperature during fast charging. **Journal of Energy Storage**, v. 52, p. 104811, 2022. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22008209>.

R, A. C.; GHOSH, A. Battery management system in electric vehicle. In: **2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.

RAND, D. A.; MOSELEY, P. T. Chapter 13 - energy storage with lead–acid batteries. In: MOSELEY, P. T.; GARCHE, J. (Ed.). **Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing**. Amsterdam: Elsevier, 2015. p. 201–222. ISBN 978-0-444-62616-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444626165000139>.

SILVEIRA, M. R. **QUESTÕES NACIONAIS E REGIONAIS DO TERRITÓRIO BRASILEIRO**. 2009.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI). **VDI 2198: Flurförderzeuge und Hubwagen – Technische Daten und Prüfungen**. [S.l.], 2012. Düsseldorf: VDI Verlag.