

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO E DA VIDA ÚTIL DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO E SÓDIO

Gilson Amorim Carvalho¹

Analecia Cruz Santana Monteiro²

Vanessa Nascimento Monteiro³

RESUMO

O presente artigo destaca a importância das baterias de íons de lítio e sódio em aplicações modernas, abordando o desafio da degradação ao longo do tempo. Utilizando simulações computacionais com um modelo matemático simples em Python, o estudo revela diferenças no comportamento entre as duas baterias. A análise de sensibilidade destaca a relevância da resistência interna na vida útil das baterias de íons de lítio. Estratégias de gerenciamento adaptativas, derivadas dessas simulações, mostram potencial para otimizar eficiência e longevidade, embora demandem equilíbrio entre desempenho imediato e durabilidade. Este trabalho fornece insights valiosos para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de gerenciamento de baterias, enquanto sugere áreas futuras de pesquisa, como materiais avançados e estratégias de controle adaptativas.

Palavras-chave: baterias de íons de lítio, baterias de íons de sódio, simulação computacional, gerenciamento de baterias, vida útil

1. Introdução

As baterias de íons de lítio e íons de sódio desempenham um papel crucial na evolução tecnológica e na promoção da sustentabilidade energética, alimentando uma variedade de aplicações modernas. Desde dispositivos eletrônicos cotidianos até a mobilidade elétrica, essas tecnologias de armazenamento de energia têm transformado a sociedade. As baterias de íons de lítio, com sua alta densidade de energia e eficiência na recarga, tornaram-se

¹ Bacharel em Física pela UFBA; Mestre em Ensino, Filosofia e História das Ciências; Docente do Centro Universitário Jorge Amado. ; e-mail: gilson.carvalho@unijorge.edu.br

² Engenheira Civil, Economista, Especialista em Gerenciamento de Projetos e Coordenadora dos Cursos de Engenharia da UJ. ; e-mail: analecia.monteiro@unijorge.edu.br

³ Química, UESC (2005); Mestre em Química, UNEB (2007); Matemática, UNIP (2018); Engenheira Química, Centro Universitário Jorge Amado (2022) e Docente do Centro Universitário Jorge Amado; e-mail: vanessa.nascimento@unijorge.edu.br

predominantes em dispositivos portáteis, impulsionando a conectividade constante em um mundo digital. No entanto, com a busca crescente por alternativas sustentáveis, as baterias de íons de sódio surgem como uma promissora opção devido à abundância e acessibilidade do sódio em comparação ao lítio, oferecendo soluções para desafios relacionados à disponibilidade de recursos.

A ascendência das baterias de íons de lítio como a escolha predominante para dispositivos portáteis, desde smartphones a laptops, é evidência de suas propriedades excepcionais. Sua alta densidade de energia e eficiência na recarga revolucionaram a mobilidade e a praticidade, permitindo uma conectividade constante em um mundo cada vez mais digital. Além disso, essas baterias têm papel fundamental em sistemas de armazenamento de energia, viabilizando a transição para fontes renováveis e a estabilidade na oferta de eletricidade. Com a crescente busca por alternativas sustentáveis, as baterias de íons de sódio emergem como uma promissora opção. O sódio, sendo mais abundante e acessível do que o lítio, sugere um potencial solução para desafios relacionados à disponibilidade de recursos (BABBITT, 2020).

Segundo Zhang et al. (2021), a vida útil das baterias é um fator crítico que permeia todas essas aplicações. A eficiência de dispositivos eletrônicos, a autonomia de veículos elétricos e a confiabilidade dos sistemas de armazenamento de energia estão intrinsecamente ligadas à capacidade das baterias de manterem seu desempenho ao longo do tempo. Para Patel (2023) e Peters et al. (2023), no entanto, a degradação natural das baterias ao longo dos ciclos de carga e descarga, influenciada por fatores como temperatura, corrente elétrica e padrões de uso, apresenta desafios significativos. Este artigo busca abordar esse desafio através da simulação do desempenho de baterias de íons de lítio e íons de sódio. Nosso objetivo é compreender melhor os mecanismos de degradação e, assim, contribuir para o desenvolvimento de estratégias que prolonguem a vida útil dessas tecnologias essenciais.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Princípios de Funcionamento das Baterias de Íons de Lítio e Íons de Sódio

Segundo Zhang et al. (2023), as baterias de íons de lítio e íons de sódio compartilham, em grande parte, os princípios fundamentais de funcionamento das baterias íon-lítio, sendo suas principais diferenças associadas aos materiais utilizados nos eletrodos e no eletrólito.

Nas baterias de íons de lítio, os eletrodos consistem em materiais intercalados com íons de lítio, movendo-se do cátodo para o ânodo durante a descarga e no sentido oposto durante a carga. O eletrólito, geralmente composto por sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos, facilita o movimento iônico, enquanto a barreira separadora impede o contato direto entre os eletrodos (HWANG, 2023).

Já nas baterias de íons de sódio, segundo Pan Z et al. (2023), a química é semelhante, mas com o sódio substituindo o lítio. O ânodo pode ser composto por materiais como o fosforeto de ferro e o disseleneto de titânio, enquanto o cátodo pode incorporar sulfeto de ferro, por exemplo. O eletrólito continua sendo uma solução iônica, mas ajustado para suportar a movimentação de íons de sódio.

2.2. Fatores que Influenciam a Vida Útil

A temperatura é um fator crítico que impacta significativamente a vida útil das baterias, influenciando as taxas de reações químicas internas. Temperaturas elevadas aceleram processos de degradação, enquanto temperaturas muito baixas podem comprometer a eficiência e a capacidade das baterias. A regulação térmica torna-se, assim, essencial para preservar o desempenho a longo prazo, buscando um equilíbrio entre condições operacionais ideais.

A corrente de carga e descarga, conforme discutido por Pan Z et al. (2023), desempenha um papel crucial no desempenho das baterias. Correntes elevadas durante esses processos podem gerar calor excessivo, levando a uma degradação acelerada. Estratégias de gerenciamento de energia que otimizam a corrente elétrica podem ser implementadas para minimizar esses efeitos adversos, contribuindo para uma operação mais eficiente e prolongada.

O número de ciclos de carga e descarga é um elemento fundamental na vida útil das baterias, como apontado por Zhang (2023). Ciclos parciais, envolvendo carga/descarga parciais, podem ser mais benéficos para prolongar a vida útil em comparação com ciclos completos. Compreender como os ciclos afetam a degradação é crucial para otimizar a utilização prática e maximizar a durabilidade das baterias.

Além disso, o monitoramento constante do Estado de Carga (SOC) e do Estado de Saúde (SOH), conforme destacado por Hwang (2023), é vital. O SOC representa a quantidade de carga presente em uma bateria em um dado momento, enquanto o SOH reflete a condição geral da bateria ao longo do tempo. O controle preciso do SOC evita operações extremas que podem acelerar a degradação, enquanto a avaliação contínua do SOH permite a previsão de falhas e a otimização do uso, contribuindo para a eficácia e a longevidade dessas tecnologias.

Por fim, o efeito memória, embora menos pronunciado em baterias de íons de lítio, como observado por Pan Z et al. (2023), ainda é considerado em alguns casos. Estratégias de gerenciamento devem ser implementadas para minimizar esse fenômeno, que ocorre quando uma bateria é recarregada antes de ser completamente descarregada, resultando em uma perda temporária de capacidade. A compreensão desses princípios e fatores é crucial para a modelagem precisa do desempenho das baterias de íons de lítio e íons de sódio, permitindo simulações realistas e fornecendo insights valiosos para otimizar a vida útil dessas tecnologias essenciais.

3. Modelagem Matemática

3.1. Equações Matemáticas para Descrever o Comportamento das Baterias

Para Jin et al. (2022), a modelagem matemática das baterias visa capturar os processos físicos e químicos que ocorrem durante os ciclos de carga e descarga. Embora modelos precisos possam ser bastante complexos, uma abordagem

comum é utilizar o circuito equivalente de uma célula de bateria, que consiste em elementos como resistências, capacitâncias e fontes de corrente.

1. Modelo RC de Circuito Equivalente

$$V(t) = V_{oc} - i(t) \cdot R_{int} - Q(t) \cdot R_{ext}$$
$$i(t) = C \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t) - V_{oc}}{R_{int}}$$

Onde:

- $V(t)$ é a tensão da bateria no tempo t ,
- $i(t)$ é a corrente,
- V_{oc} é a tensão em circuito aberto,
- R_{int} é a resistência interna,
- $Q(t)$ é a carga na bateria,
- R_{ext} é a resistência externa,
- C é a capacitância.

3.2. Modelo Termodinâmico Segundo Jin et al. (2022), modelos mais avançados podem incorporar equações termodinâmicas para descrever a variação de entropia, temperatura e reações químicas, fornecendo uma visão mais abrangente do comportamento da bateria ao longo do tempo.

3.3. Modelos na Literatura para Simulação de Baterias

Diversos modelos matemáticos são empregados na simulação de baterias para capturar nuances específicas do seu comportamento sob distintas condições operacionais. O Modelo de Circuito Elétrico Equivalente (ECM), proposto por Magri (2023), representa a bateria como um circuito equipado com resistores, capacitores e fontes de corrente, permitindo uma simulação precisa que responde às diferentes condições operacionais. Outra abordagem, o Modelo de Difusão de Lítio, também apresentado por Magri (2023), baseia-se na teoria de difusão de lítio para descrever o movimento dos íons de lítio nos eletrodos, considerando coeficientes de difusão e concentrações para prever a variação da capacidade ao longo do tempo.

Modelos mais avançados, como os Modelos Térmicos-Eletroquímicos Acoplados discutidos por Osara (2019), incorporam o acoplamento entre equações térmicas

e eletroquímicas, essencial para compreender como a temperatura influencia o desempenho e a vida útil das baterias. Além disso, Osara (2019) destaca modelos empíricos baseados em dados experimentais, como os de envelhecimento, que estabelecem correlações entre a degradação da capacidade e o número de ciclos ou carga total acumulada. A escolha entre esses modelos depende dos objetivos específicos da simulação, da disponibilidade de dados experimentais e da complexidade desejada, ressaltando o papel crucial da modelagem matemática na previsão do desempenho e na compreensão do comportamento das baterias ao longo do tempo.

4. Simulações com Python

4.1. Introdução ao uso de Python para simulação de sistemas dinâmicos. O

Python emergiu como uma ferramenta amplamente utilizada para simulações de sistemas dinâmicos devido à sua popularidade, facilidade de uso, vasta comunidade de desenvolvedores e a disponibilidade de uma ampla gama de bibliotecas científicas (LYNCH, 2018). A flexibilidade e eficiência proporcionadas pelo Python tornam-no uma escolha ideal para modelar e analisar sistemas complexos. A utilização de bibliotecas como NumPy e SciPy oferece suporte crucial para computação numérica e científica, possibilitando a manipulação eficiente de matrizes, álgebra linear e resolução de equações diferenciais. Por sua vez, as bibliotecas de visualização, como Matplotlib e Seaborn, desempenham um papel significativo na representação gráfica dos resultados das simulações, tornando-os mais acessíveis e interpretáveis.

As bibliotecas Python específicas para simulações, como NumPy, SciPy, Matplotlib, Seaborn e Pandas, são mencionadas como componentes essenciais para a realização eficaz de simulações e análises de sistemas dinâmicos (LYNCH, 2018). Além disso, a linguagem de programação interpretada do Python é destacada como uma vantagem, permitindo uma abordagem experimental e iterativa no desenvolvimento de modelos. A natureza interpretada do Python, juntamente com o intérprete interativo, oferece aos desenvolvedores a capacidade de testar ideias rapidamente, contribuindo para a eficiência e agilidade no processo de simulação.

Por fim, o Python se destaca como uma escolha preferida para simulações de sistemas dinâmicos, apoiado por bibliotecas especializadas e sua natureza interpretada que facilita a experimentação e o desenvolvimento iterativo de modelos (SAYAMA, 2013). Essa combinação faz do Python uma ferramenta poderosa e acessível para a modelagem e análise de sistemas complexos.

4.2. Implementação de um modelo de simulação em Python para baterias de íons de lítio e íons de sódio

Na definição do modelo de comportamento da bateria, é essencial começar estabelecendo as equações que regem seu funcionamento, conforme indicado por Lynch (2018) e Mahmoud (2022). Estas equações podem ser de natureza diferencial, algébrica, ou uma combinação de ambas, dependendo do modelo escolhido para representar o sistema. A utilização de NumPy é recomendada pelos mesmos autores para a criação eficiente de matrizes e a realização de operações numéricas essenciais, enquanto a biblioteca SciPy, especialmente através do solver odeint, oferece ferramentas específicas para a solução de equações diferenciais, contribuindo para a precisão do modelo.

De acordo com as orientações de Lynch (2018) e Mahmoud (2022), a visualização dos resultados desempenha um papel crucial na interpretação do comportamento da bateria ao longo do tempo. Recomenda-se o emprego das bibliotecas Matplotlib e Seaborn, conforme indicado por Machado (2023), para criar gráficos representativos de variáveis como carga, descarga e variação de temperatura. Estes gráficos fornecem uma visão clara e informativa do desempenho da bateria, facilitando a análise dos resultados obtidos a partir do modelo.

Além disso, Yao-Ching Hsieh et al. (2021) destacam a importância de considerar as condições operacionais ao desenvolver o modelo. Implementar a capacidade de variar fatores como temperatura, corrente de carga e padrões de ciclo permite analisar de forma abrangente como essas variáveis influenciam o desempenho e a vida útil da bateria. Por fim, para garantir a compre-

ensão e manutenção eficazes do código, é recomendável seguir as sugestões de Machado (2023) para documentação adequada e modularidade, o que facilita a reutilização de componentes em simulações futuras.

Figura 1 - Exemplo de Pseudo-Código

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint

# Definição do modelo de bateria (equações diferenciais)
def modelo_bateria(y, t, parametros)
    # Implementação das equações diferenciais
    # ...

# Condições iniciais e parâmetros
y0 = ...
parametros = ...

# Tempo de simulação
tempo = np.linspace(0, tempo_final, num_pontos)

# Solução das equações diferenciais
solucao = odeint(modelo_bateria, y0, tempo, args=(parametros,))

# Visualização dos resultados
plt.plot(tempo, solucao[:, 0], label='Tensão da Bateria')
# Adicionar mais gráficos conforme necessário

plt.xlabel('Tempo')
plt.ylabel('Valor')
plt.legend()
plt.show()
```

Fonte: elaborado pelos autores, utilizando o interpretador Python no Pycharm

Vamos escolher um modelo simples, como o modelo RC de circuito equivalente, para ilustrar uma simulação em Python. Nesse modelo, consideraremos uma bateria de íons de lítio.

Modelo RC de Circuito Equivalente

Segundo Yao-Ching Hsieh et al. (2021), o modelo RC é um modelo elétrico que representa a bateria como uma combinação de uma resistência (R) e um capacitor (C). As equações que descrevem o modelo são:

$$V(t) = V_{oc} - i(t) \cdot R_{int} - Q(t) \cdot R_{ext}$$

$$i(t) = C \cdot \frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t) - V_{oc}}{R_{int}}$$

Aqui, $V(t)$ é a tensão da bateria, $i(t)$ é a corrente, $Q(t)$ é a carga, R_{int} é a resistência interna, R_{ext} é a resistência externa, C é a capacitância e V_{oc} é a tensão de circuito aberto.

Figura 2 - Exemplo de Simulação em Python de uma bateria de íons de lítio, usando como modelo um circuito RC com fonte externa.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint

# Definição do modelo de bateria (equações diferenciais)
def modelo_bateria(y, t, V_oc, R_int, R_ext, C):
    V, Q = y
    dVdt = (V_oc - V - R_int * (V - Q * R_ext)) / (R_int * C)
    dQdt = -V / R_ext
    return [dVdt, dQdt]

# Condições iniciais e parâmetros
V_oc = 4.2 # Tensão de circuito aberto
R_int = 0.1 # Resistência interna
R_ext = 1.0 # Resistência externa
C = 1000.0 # Capacitância
y0 = [V_oc, 0] # Condições iniciais

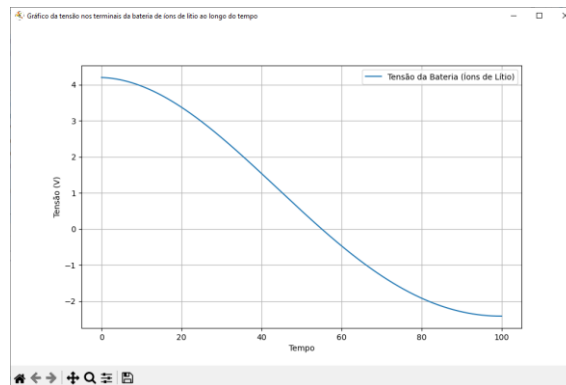
# Tempo de simulação
tempo = np.linspace(0, 100, 1000)

# Solução das equações diferenciais
solucao = odeint(modelo_bateria, y0, tempo, args=(V_oc, R_int, R_ext, C))

# Visualização dos resultados
plt.figure(figsize=(10, 6), num='Gráfico da tensão nos terminais da bateria de íons de lítio ao longo do tempo')
plt.plot(tempo, solucao[:, 0], label='Tensão da Bateria (Íons de Lítio)')
plt.xlabel('Tempo')
plt.ylabel('Tensão (V)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Fonte: elaborado pelos autores, utilizando o interpretador Python no Pycharm

Figura 3 – Gráfico do comportamento da tensão nos terminais de uma bateria de íons de lítio ao longo do tempo.



Fonte: elaborado pelos autores, utilizando o interpretador Python no Pycharm

No exemplo acima, a escala do tempo é definida pela variável **tempo**, que é gerada usando o NumPy no seguinte trecho de código:

```
# Tempo de simulação  
tempo = np.linspace(0, 100, 1000)
```

Neste caso, o tempo varia de 0 a 100 unidades de tempo e é dividido em 1000 pontos para criar uma representação mais suave da evolução temporal. A escolha específica da escala do tempo depende do contexto da simulação e da unidade de tempo relevante para o sistema que está sendo modelado. No exemplo, a unidade de tempo pode ser, por exemplo, segundos, minutos, ou qualquer outra unidade adequada para a aplicação específica da bateria de íons de lítio.

Para adaptar o programa em Python para simular uma bateria de íons de sódio em vez de íons de lítio, algumas alterações precisariam ser feitas nas equações do modelo. A principal diferença seria nos parâmetros específicos da bateria de íons de sódio, como a tensão de circuito aberto, resistência interna, capacitância, e coeficientes de difusão.

Aqui está um exemplo de como o código poderia ser ajustado para modelar uma bateria de **íons de sódio**:

Figura 4 - Exemplo de Simulação em Python de uma bateria de íons de sódio, usando como modelo um circuito RC com fonte externa.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint

# Definição do modelo de bateria de íons de sódio (equações diferenciais)
def modelo_bateria_sodio(y, t, V_oc, R_int, C):
    V, Q = y
    R_ext = 1.0 # Adicionando resistência externa como um exemplo
    dVdt = (V_oc - V - R_int * (V - Q * R_ext)) / (R_int * C)
    dQdt = -V / R_ext
    return [dVdt, dQdt]

# Condições iniciais e parâmetros para bateria de íons de sódio
V_oc_sodio = 3.5 # Tensão de circuito aberto para íons de sódio
R_int_sodio = 0.2 # Resistência interna para íons de sódio
C_sodio = 800.0 # Capacitância para íons de sódio
y0_sodio = [V_oc_sodio, 0] # Condições iniciais

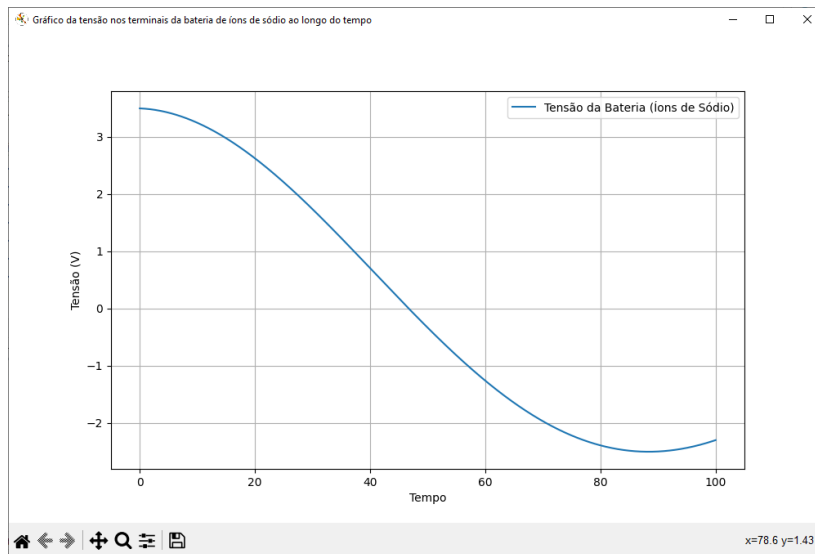
# Tempo de simulação
tempo_sodio = np.linspace(0, 100, 1000)

# Solução das equações diferenciais para íons de sódio
solucao_sodio = odeint(modelo_bateria_sodio, y0_sodio, tempo_sodio, args=(V_oc_sodio,
R_int_sodio, C_sodio))

# Visualização dos resultados para íons de sódio
plt.figure(figsize=(10, 6), num='Gráfico da tensão nos terminais da bateria de íons de sódio ao longo do tempo')
plt.plot(tempo_sodio, solucao_sodio[:, 0], label='Tensão da Bateria (Íons de Sódio)')
plt.xlabel('Tempo')
plt.ylabel('Tensão (V)')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Fonte: elaborado pelos autores, utilizando o interpretador Python no Pycharm

Figura 5 – Comportamento da tensão nos terminais de uma bateria de íons de sódio ao longo do tempo.



Fonte: elaborado pelos autores, utilizando o interpretador Python no Pycharm

Neste exemplo, a função **modelo_bateria_sodio** foi criada para representar o modelo específico de uma bateria de íons de sódio. Os parâmetros como **V_oc_sodio**, **R_int_sodio**, e **C_sodio** foram ajustados para refletir características típicas de uma bateria de íons de sódio.

Lembrando que esses valores são fictícios e devem ser substituídos por dados reais ou valores obtidos a partir de literatura especializada e experimentos para uma bateria de íons de sódio específica.

5. Considerações Práticas Aplicação nas Estratégias de Gerenciamento de Bateria

A simulação e análise do comportamento das baterias de íons de lítio e íons de sódio oferecem insights valiosos aplicáveis nas estratégias práticas de gerenciamento de bateria. Essas considerações práticas abrangem desde ajustes nas estratégias de carga e descarga, com base na compreensão dos parâmetros que impactam o desempenho da bateria, até a adaptação às condições ambientais variáveis, como reduzir a corrente de carga em climas mais quentes para pre-

servar a vida útil. Além disso, a implementação de algoritmos de controle adaptativos, a manutenção preditiva baseada em simulações e a otimização de sistemas de armazenamento de energia são aspectos importantes para maximizar a eficiência e a durabilidade das baterias em diversas aplicações. A análise de *trade-offs* entre diferentes parâmetros, a consideração contínua de inovações e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis são fundamentais para equilibrar a extensão da vida útil com as demandas de desempenho e eficiência, promovendo práticas sustentáveis desde eletrônicos portáteis até sistemas de armazenamento em larga escala.

6. Conclusão

6.1. Resumo dos Principais Resultados Obtidos com as Simulações

As simulações do comportamento das baterias de íons de lítio enfatizam características específicas, como a relação entre tensão, resistência interna e capacidade ao longo do tempo. Esses insights são cruciais para compreender a dinâmica dessas baterias. Para as baterias de íons de sódio, observamos um comportamento distinto, incluindo uma tensão de circuito aberto inicial mais baixa e uma resistência interna específica. Este entendimento é valioso para o desenvolvimento e otimização desses sistemas.

Ao aplicar estratégias de gerenciamento adaptativas identificadas por meio das simulações, é possível ajustar correntes de carga, taxas de descarga e outras variáveis para maximizar a eficiência e prolongar a vida útil. No entanto, é importante considerar os *trade-offs* entre desempenho imediato e durabilidade a longo prazo, adaptando estratégias de gerenciamento conforme as demandas específicas de cada aplicação.

6.2. Sugestões para Futuras Pesquisas e Desenvolvimentos

A pesquisa futura no campo de armazenamento de energia pode se concentrar em diversas áreas promissoras. A investigação de materiais avançados é crucial para descobrir substâncias que ofereçam melhor desempenho e durabilidade às

baterias. Além disso, a constante evolução das técnicas de simulação é necessária para desenvolver modelos mais precisos que considerem fenômenos complexos como envelhecimento e degradação química.

A integração de dados experimentais reais continua sendo fundamental para aprimorar os modelos, proporcionando uma base robusta para as simulações. Estratégias de controle adaptativas avançadas, levando em conta não apenas as condições ambientais, mas também o histórico de uso da bateria, são essenciais para otimizar o desempenho dinâmico.

Explorar estratégias de gerenciamento específicas para aplicações como veículos elétricos, eletrônicos portáteis e sistemas de armazenamento de energia em larga escala, bem como avaliar o impacto ambiental e buscar soluções sustentáveis para o descarte e reciclagem de baterias, são aspectos críticos na busca por soluções mais eficientes e sustentáveis. A promoção de colaborações interdisciplinares entre engenheiros, cientistas de materiais e ambientalistas continua sendo uma abordagem eficaz para enfrentar os desafios complexos associados à pesquisa de baterias, impulsionando a inovação e atendendo às crescentes demandas por soluções energéticas mais eficientes e sustentáveis.

7. Referências

BABBITT, Callie W. **Sustainability perspectives on lithium-ion batteries**. Clean Technologies and Environmental Policy, [s.l.], v. 22, p. 1213–1214, 2020. Disponível em: <https://open.fau.de/items/1ed80d20-6700-451c-8ed4-96c8c9e1b911>. Acesso em: 30 dez. 2023

HWANG, Jang-Yeon; MYUNG, Seung-Taek; SUN, Yang-Kook. **Sodium-ion batteries: present and future**. Chemical Society Reviews, [s.l.], v. 46, p. 3529-3614, 2017. Disponível em: <https://www.oaepublish.com/articles/energymater.2023.61>. Acesso em: 01 jan. 2024

JIN, L.-M.; XING, G.-G.; QIN, N.; LU, Y.-Y.; ZHENG, J.-S.; ZHANG, C.-M. **An empirical model for high energy density lithium- (ion) batteries with ultra-thick electrodes**. Tungsten, [s.l.], 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42864-022-00163-4> . Acesso em: 01 jan. 2024

LYNCH, S. **Dynamical Systems with Applications using Python**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

MACHADO, J. A. T.; LOPES, A. M. **pySODM: Simulating and Optimizing Dynamical Models in Python 3**. ArXiv, Cornell University, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2301.10664>. Acesso em: 02 jan. 2024

MAGRI, L.; SEQUINO, L.; FERRARI, C. **Simulating the Electrochemical-Thermal Behavior of a Prismatic Lithium-Ion Battery on the Market under Various Discharge Cycles**. Batteries, [s.l.], v. 9, n. 8, p. 397, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-0105/9/8/397>. Acesso em: 01 jan. 2024

MAHMOUD, M. S.; XIA, Y. **Dynamic System Modelling and Analysis with MATLAB and Python: For Control Engineers**. Wiley, 2022.

OSARA, J. A.; BRYANT, M. D. **A Thermodynamic Model for Lithium-Ion Battery Degradation: Application of the Degradation-Entropy Generation Theorem**. Inventions, [s.l.], v. 4, n. 2, p. 23, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2411-5134/4/2/23>. Acesso em: 01 jan. 2024

Pan Z; Chen H; Zeng Y; Ding Y; Pu X; Chen Z. **How Lithium-ion Batteries Work**. Department of Energy, [s.l.], 2023. Disponível em: <https://www.oaepublish.com/articles/energymater.2023.61>. Acesso em: 01 jan. 2024

PATEL, Tanish. **A Comparative Study of Lithium-ion and Sodium-ion Batteries: Characteristics, Performance, and Challenges**. [s.l.], 2023. Disponível em: <https://open.fau.de/items/1ed80d20-6700-451c-8ed4-96c8c9e1b911>. Acesso em: 30 dez. 2023

PETERS, Jens; BUCHHOLZ, Daniel; PASSERINI, Stefano; WEIL, Marcel. **Life cycle assessment of sodium-ion batteries**. Energy & Environmental Science, [s.l.], v. 9, p. 1744–1751, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42341-021-00357-6>. Acesso em: 30 dez. 2023

SAYAMA, H. **PyCX: a Python-based simulation code repository for complex systems education**. Complex Adaptive Systems Modeling, SpringerOpen, v. 1, n. 2, p. 1-8, 2013. Disponível em: <https://casmode-link.springeropen.com/articles/10.1186/2194-3206-1-2>. Acesso em: 02 jan. 2024

YAO-CHING HSIEH; TIN-DA LIN; RUEI-JI CHEN; HONG-YU LIN. **Electrical Equivalent Circuit Models of Lithium-ion Battery**. In: **Management and Applications of Energy Storage Devices**. [s.l.]: IntechOpen, 2021. Disponível em: https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-pel.2013.0787?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_adgroup=SPEC_X_X0000_Nov2023_PEL2_PowerElectronics&utm_adgroupid=156624661672&utm_campaign=WIL_MRKT_GBL_SUB_ADWO_PAI_DYNA_SPEC_PEL2_X0000

[Nov2023 PowerElectronics&qclid=Cj0KCQiAhc-sBhCEARIsAOVwHu-Td xp0WMn3VajRVLmNj8WXTCc-6ukyC oOlhCGGKLX kzgaRMQiBXIa-AnDnEALw_wcB>](#). Acesso em: 01 jan. 2024

ZHANG, Xiaoqiang; HAN, Yue; ZHANG, Weiping. **A Review of Factors Affecting the Lifespan of Lithium-ion Battery and its Health Estimation Methods**. Transactions on Electrical and Electronic Materials, [s.l.], v. 22, p. 567–574, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42341-021-00357-6>. Acesso em: 30 jan. 2023

ZHANG, Xiaoqiang; HAN, Yue; ZHANG, Weiping. **Fluorine chemistry in lithium-ion and sodium-ion batteries**. Energy & Materials Advances, [s.l.], v. 1, p. 1-25, 2023. Disponível em: <https://www.oaepublish.com/articles/energymater.2023.61>. Acesso em: 30 dez. 2023