

MODELO MATEMÁTICO DOS DADOS DE TENSÃO PARA A AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENEGÉTICA DE UMA BATERIA DE LÍTIO POR SÉRIES DE POTÊNCIAS COMO FERRAMENTA DE ENSINO PARA ENGENHARIA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6210

Autores: *LAVíNIA MARIA SOARES SOUZA,EDUARDO DA PAZ SILVA,ALBERTO HELENO ROCHA DA SILVA,RODRIGO LUSTOSA PERONICO*

Resumo: *O artigo propõe um modelo matemático baseado em séries de potência para avaliar a eficiência energética de baterias de lítio, visando contribuir para a transição energética global. A metodologia envolveu a coleta de dados experimentais de quatro baterias (800 mAh a 7800 mAh) utilizando um circuito divisor de tensão e um microcontrolador ESP32, seguido pela modelagem de séries de potência ajustada por mínimos quadrados. Os resultados revelaram uma correspondência próxima entre as curvas teóricas e experimentais, com um erro quadrático médio (MSE) variando de 2,01% a 4,01%, validando a precisão do modelo em capturar o decaimento exponencial e as variações locais de tensão durante a descarga. O estudo destaca a importância de abordagens interdisciplinares em engenharia, combinando matemática aplicada, eletroquímica e programação para otimizar sistemas de armazenamento e acelerar a descarbonização de setores como mobilidade elétrica e redes de energia renovável.*

Palavras-chave: *Bateria de Lítio,Séries de potências,Eficiência Energética*

MODELO MATEMÁTICO DOS DADOS DE TENSÃO PARA A AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENEGÉTICA DE UMA BATERIA DE LÍTIO POR SÉRIES DE POTÊNCIAS COMO FERRAMENTA DE ENSINO PARA ENGENHARIA

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor energético é o que mais demanda a exploração contínua de combustíveis fósseis para geração de energia (Boffardi, 2025; Santos, 2024). A principal consequência é o aumento das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera (Silva & Oreiro, 2024). Assim, a matriz energética mundial encontra-se atualmente numa mudança significativa em seus processos produtivos, tendo a China um dos principais influenciadores nessa nova tendência, da qual propaga que até 2050 toda sua matriz energética estará influenciada por fontes renováveis de geração de energia (Cazalbón, 2023). Essas alterações são consequência, não apenas, do acordo de Paris de 2015, do qual levantaram preocupações sobre o processo de aquecimento global e os impactos ambientais que surgirão no futuro. Assim, as nações se encontraram pressionadas e desenvolver uma mudança considerável no planejamento de geração de energia dos países ao redor do mundo (Cazalbón, 2023; Grünewald, 2012).

O marco da transição energética é impulsionada pelas novas tecnologias emergentes e pelas descobertas de recursos naturais para mudar o ideal fóssil, já que ainda hoje os combustíveis fósseis tenham uma dependência a matriz energética mundial em relação a fontes não renováveis de energia devido a exploração intensa e descontrolada dos recursos naturais, sendo destaque neste contexto, o papel crítico para soluções de armazenamento energético, como fonte principal as baterias de lítio (Santos, 2025; Borsa, 2024). Essas tecnologias emergem como pilares essenciais na viabilização de fontes energéticas intermitentes, como solar e eólica, ao equilibrar oferta e demanda e propor garantir estabilidade às redes elétricas atuais (Nhambiu, 2025; Huang, 2023; Kalair, 2021). Além disso, são caracterizadas por grandes mudanças no setor elétrico, que agora busca integrar a eficiência e sustentabilidade (Fróes, 2024).

A transição para uma matriz elétrica renovável trouxe desafios intrínsecos ao paradigma energético, especialmente por causa da produção de energia limpas (Santos, 2024). Conclui-se em Maksoud (2021) que se torna indispensável o desenvolvimento e versatilidade dos sistemas de armazenamento, desaguando essa demanda técnica aos cursos formativos da área de eletrotécnica e engenharia elétrica. O caráter educacional, nesse contexto, correlaciona conteúdos de cunho geral (i.e., Eletromagnetismo, Modelagem Matemática, Cálculo, etc.) e de centralidade técnica (i.e., Circuitos Elétricos, Eficiência Energética, Materiais Elétricos, etc.) buscando evidenciar a interdisciplinaridade adotada nas grades curriculares desses cursos, integrando-se em pesquisa que auxiliem os estudantes a direcionar sua formação profissional. Assim, para superar estes obstáculos, a educação em Engenharia surge como alicerce para a inovação sustentável, capacitando profissionais a desenvolver modelos avançados para ajudar na análise do problema, materiais alternativos e sistemas integrados que harmonizem desempenho técnico, custo e impacto ambiental dessas tecnologias (Martins, 2024).

Nessa perspectiva, um modelo matemático é necessário para o estudo de previsibilidade dos dados de tensão para uma bateria de lítio como forma de simplificar sistemas complexos como o do comportamento de baterias. Dessa maneira, a aplicação

de um método numérico de estudo para a construção desse modelo é essencial para o estudo da eficiência da bateria, e por isso, será adotado um polinômio por séries de potência como método para aproximar os dados de tensão, que melhor prever a eficiência energética e obtém o menor erro para esta configuração proposta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos para a transição energética

A transição energética é um processo histórico na substituição de fontes fósseis por renováveis, impulsionado pelos compromissos globais como o Acordo de Paris (2015) e pressionado por crises climáticas ao longo dos anos. Autores como Vaclav Smil destacam que essa mudança de perspectiva não é apenas tecnológica, mas também política e cultural, exigindo a superação de dependências estruturais aos países. O trilema energético (segurança, equidade, sustentabilidade) proposto pelo World Energy Council ilustra os desafios sistêmicos, como a intermitência de fontes renováveis e a escassez de minerais críticos (lítio, cobalto), sendo temas explorados por Benjamin K. Sovacool no livro Global Energy Justice. A transição requer, portanto, uma abordagem abrangente que integre inovação tecnológica e justiça socioambiental.

2.2 Impacto na educação em engenharia

A reestruturação curricular na Engenharia é uma resposta direta às demandas da transição energética. Dessa forma, Instituições como o MIT e a Stanford University têm integrado disciplinas como sustentabilidade e economia circular em seus programas de ensino, alinhando-se às diretrizes da ABET e da UNESCO no Brasil. Arjen Wals, em seus trabalhos sobre educação para sustentabilidade, argumenta que é essencial desenvolver competências na análise do ciclo de vida (ACV) e gestão de recursos, além de habilidades críticas para projetos como a otimização de baterias de lítio. A interdisciplinaridade ganha destaque, conectando Engenharia Elétrica, Química e Ciências Sociais, como no modelo da Aalborg University, que usa *Project-Based Learning* (PBL) como método de ensino em projetos do mundo real para resolver problemas.

A formação do engenheiro moderno deve transcender a técnica pura, incorporando ética e responsabilidade socioambiental (Pissolito, 2024) Jeffrey Sachs, em *The Age of Sustainable Development*, enfatiza o papel estratégico da Engenharia na descarbonização, enquanto Caroline Whitbeck defende a integração de dilemas éticos em currículos, como os impactos ambientais da mineração de lítio.

2.3 Metodologias para integração curricular

A revisão de modelos educacionais revela lacunas nas escolas, como a falta de enfoque na reciclagem de baterias ou eficiência energética em grades curriculares tradicionais aos países. Estudos de caso, como o programa Green Talents do governo alemão, mostram como parcerias entre universidades e indústrias aceleram a aplicação prática do conhecimento.

2.4 Funcionamento e importância das baterias de lítio em sistemas renováveis

"As energias renováveis são uma solução muito interessante na substituição das fontes de energias tradicionais, pois provêm de recursos naturais e inesgotáveis e são produzidas de modo não poluente." (Serôndio, 2018, p.25) Portanto, observa-se um crescente interesse no âmbito do armazenamento de energia em baterias, sendo impulsionado pela busca por tecnologias sustentáveis, que vêm sendo amplamente adotadas em diversas áreas como nos setores de mobilidade elétrica e de dispositivos eletrônicos (Ali, 2024; Rawat, 2024). Devido a elevada dependência energética desses equipamentos, torna-se necessário o desenvolvimento de soluções que possam tentar reduzir a sua conexão dependência com a rede elétrica convencional (Pedro, 2023). Desse modo, este desafio tem incentivado a pesquisa e a implementação de sistemas inovadores com o uso de baterias de lítio, capazes de otimizar processos de carregamento e armazenamento, garantindo maior eficiência e autonomia (Sousa, 2019) Nesse viés, surge a necessidade da incorporação de meios de suporte ao armazenamento de energia, como para baterias eletroquímicas (Serôndio, 2018)

A bateria é um dispositivo eletroquímico composto por células interligadas a uma associação série ou paralela. Essas células eletrolíticas, por meio de reações de oxirredução (redox) entre seus componentes internos — como ânodo, cátodo e eletrólito — , convertem energia elétrica em energia química durante o carregamento, e ao armazenamento de forma reversível (Junior, 2021) Durante o descarregamento, a bateria está conectada em uma carga, isto acarretará num processo inverso de forma que haja uma liberação de energia elétrica convertida da energia química armazenada, restabelecendo o fluxo de elétrons da bateria. Devido a essa dinâmica de redox que realiza transferência de elétrons entre os materiais ativos, permite a sua aplicação em equipamentos que necessitam de portabilidade e autonomia energética.

As baterias de íon - lítio são responsáveis em desempenhar um papel essencial no desenvolvimento sustentável na evolução tecnológica e na sustentabilidade energética em diversas aplicações na engenharia (Carvalho, 2023) A estimativa precisa do Estado de Carga (SOC, *State of Charge*) de uma bateria é crítica para maximizar a eficiência operacional do sistema de gerenciamento de energia em dispositivos eletrônicos. Essa medição não apenas quantifica a carga disponível em relação à capacidade total da bateria, como também atua como mecanismo de proteção contra descargas profundas e sobrecargas (Tertuliano, 2021)

2.5 Teoria matemática das séries de Potência e sua aplicação em engenharia

A teoria matemática das séries de potência foi fundamentada na representação de funções como somas infinitas para termos polinomiais, constitui uma ferramenta analítica essencial para a modelagem e resolução de problemas complexos em engenharia. Essas séries, que expressam funções na forma

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n (x-a)^n \quad (1)$$

fazem aproximações locais para curvas com comportamentos não lineares, facilitando a análise de problemas como para vibrações mecânicas, distribuição de calor em materiais e resposta de circuitos elétricos (Kreyszig, 2018)

Na engenharia elétrica, por exemplo, a expansão em série de Taylor é empregada para linearizar equações diferenciais em torno de pontos de operação, viabilizando o projeto de controladores robustos (Boyce, 2024) A convergência dessas séries, garantida pelo raio de convergência, assegura precisão em aplicações práticas, como na otimização de algoritmos de machine learning para predição de falhas estruturais. Assim, a integração

entre teoria matemática e demandas tecnológicas evidencia o papel das séries de potência como ponte entre abstração teórica e soluções inovadoras em engenharia.

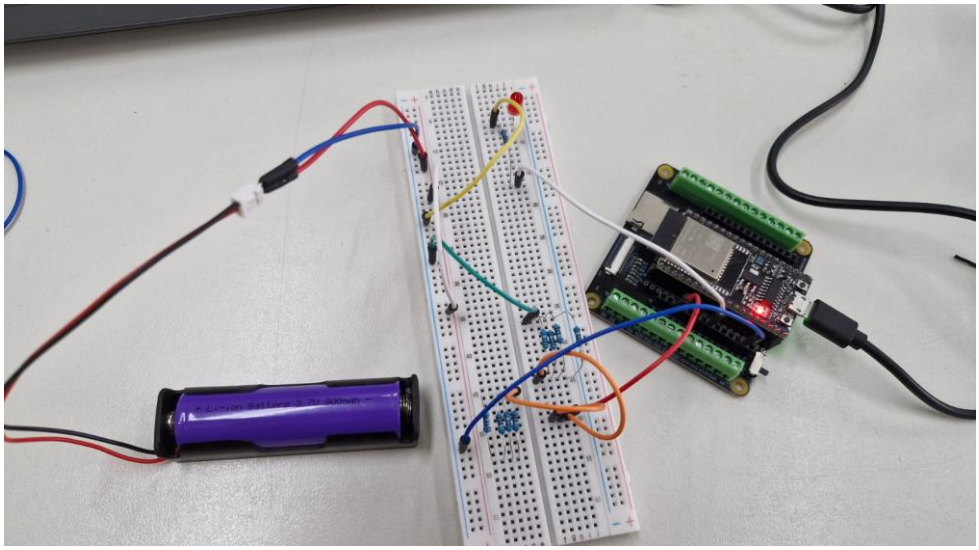
3 METODOLOGIA APLICADA

3.1 Processo de coleta de Dados Experimentais

Na Coleta de dados de tensão realizou-se testes com quatro baterias de lítio sendo elas de 800 mAH, 2200 mAH, 6800 mAH e 7800 mAH, e assim foi feita a análise das curvas de descarga dessas baterias de lítio, a fim de que fosse obtido a avaliação da eficiência energética dos dados e a construção do modelo matemático que melhor se ajusta as medições.

Para a coleta experimental verificou – se a utilização de um circuito divisor de tensão com quatro resistores em paralelo de dez ohms em série com quatro resistores do mesmo utilizado na descarga das baterias, que está em comunicação com um microcontrolador ESP32 onde será realizada a leitura dos dados experimentais para cada bateria a ser avaliada pelo software ARDUINO IDE. Na figura 1, pode ser vista a montagem prática do circuito usado.

Figura 1: Montagem prática do circuito para descarga de baterias de lítio.



Fonte: Autores, 2025.

3.2 Desenvolvimento do Modelo com Séries de Potências

Primeiramente, supondo que f seja qualquer função que possa ser representada por uma série de potências:

$$f(x) = c_0 + c_1(x-a) + c_2(x-a)^2 + c_3(x-a)^3 + c_4(x-a)^4 + \cdots, |X-a| < R \quad (2)$$

A partir disso iremos determinar quais coeficientes c_n devem aparecer em termos de f (Stewart, 2015) Ao observar a função f(x), caso colocarmos x = a na equação 2, então os outros termos da série será 0 e obteríamos

$$f(a) = c_0 \quad (3)$$

Então, passamos a adotar um valor arbitrário para 'a' que representa o ponto de inflexão da função, com o intuito de evitar a ocorrência desta condição. Em seguida, aplicamos uma aproximação da função pelo método dos Mínimos Quadrados. Assim, após considerar uma função contínua f, definida por um intervalo $[a, b]$, onde a aproximação foi feita por uma combinação linear das funções

$$f^*(x) = c_0\varphi_0(x) + c_1\varphi_1(x) + c_2\varphi_2(x) + \cdots + c_n\varphi_n(x) \quad (4)$$

Com um incremento de n + 1 funções φ_i, $0 \leq i \leq n$, onde os coeficientes c_i, $0 \leq i \leq n$, serão determinados para que a norma euclidiana ponderada do vetor erro $f^* - f$ (Sperandio, 2003), ou seja,

$$\|f^* - f\|^2 = \int_a^b |f^*(x) - f(x)|^2 \times w(x)\, dx \quad (5)$$

Para o problema analisado foi necessário a utilização do caso contínuo na análise do erro quadrático sendo assim

$$\|f^* - f\|^2 = \sum_{i=0}^{m} |f^*(x) - f(x)|^2 \times w_i \quad (6)$$

Após encontrar os coeficientes do polinômio utilizado foi obtido uma função modelo para o ajuste da trajetória das curvas de descargas das baterias de lítio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos dados brutos de tensão coletados experimentalmente

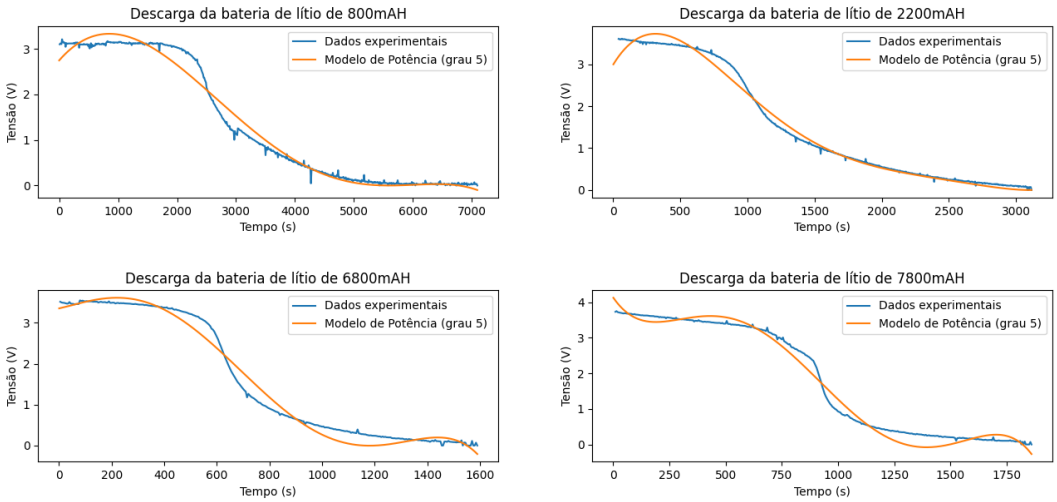
O estudo de dados de tensão obtidos experimentalmente faz parte de uma etapa crítica para validar modelos teóricos, diagnosticar falhas no sistema de medição e otimizar o desempenho dos dispositivos. Inicialmente, os dados são coletados por meio de alguns tipos de sensores (como osciloscópios, multímetros digitais ou placas de aquisição de dados) e armazenados em formato temporal, registrando variações de tensão em função do tempo ou de outras variáveis operacionais.

4.2 Resultados da aplicação do modelo matemático

Após o processo de coleta dos dados experimentais por meio do circuito de descarregamento da bateria de lítio, realizou - se a simulação do modelo matemático proposto por séries de potência. O objetivo foi otimizar o ajuste da curva experimental e minimizar o erro associado a cada trajetória de descarga. Para isso, o modelo incorporou termos polinomiais de ordem variável, ajustados iterativamente por meio do método dos mínimos quadrados, garantindo a convergência dos parâmetros.

Na figura 2, observam – se as curvas geradas pelo modelo matemático, sobrepostas aos dados experimentais. Nota – se uma alta aderência entre as previsões do modelo (linhas contínuas) e os valores medidos (pontos discretos), especialmente nas regiões de estabilidade da tensão. A consistência do ajuste da curva de tensão foi quantificada pelo cálculo do erro quadrático médio (EQM), que variou entre 2,01% e 4,01% para as diferentes taxas de descargas analisadas, indicando robustez na representação do fenômeno físico – químico.

Figura 2: Modelos matemáticos obtidos para as curvas de descarga das baterias de lítio.



Fonte: Autores, 2025.

A implementação computacional foi conduzida no ambiente Visual Studio Code, utilizando a linguagem Python com as bibliotecas NumPy para manipulação numérica e Matplotlib para visualização gráfica e para a análise da otimização dos parâmetros. Destaca – se que a flexibilidade das séries de potência permitiu capturar não apenas o decaimento exponencial característico das células de lítio, mas também variações locais na degradação da sua capacidade, como evidenciado nos intervalos de 3,2V e 2,7V.

Esse resultado mostra não apenas a viabilidade técnica, como também revela seu potencial como recurso didático em sala de aula. A construção de modelos com séries de potências, a partir de dados reais de descarga de baterias de lítio, pode ser aplicada em atividades práticas para ensinar conteúdos de cálculo, eletricidade e programação. Ao utilizar ferramentas acessíveis como o microcontrolador ESP32 e o software Arduino IDE, os alunos podem coletar dados experimentais e compará-los com previsões matemáticas, promovendo o aprendizado ativo. Essa proposta permite que os estudantes compreendam conceitos abstratos por meio de aplicações reais, além disso, estimula a interdisciplinaridade ao aplicar matemática e programação, tornando o processo de ensino mais dinâmico.

4.3 Interpretação física dos coeficientes do ajuste polinomial

Como mencionado na seção 3.2, foi utilizado para ajuste um polinômio de Taylor de grau 5 com centro em a de modo que podemos escrever a equação 2 do seguinte modo:

$$V(t) \approx V(a) + \frac{dV(a)}{dt}(t-a) + \frac{1}{2!}\frac{dV(a)}{dt}(t-a)^2 + \frac{1}{3!}\frac{dV(a)}{dt}(t-a)^3 + \frac{1}{4!}\frac{dV(a)}{dt}(t-a)^4 + \frac{1}{5!}\frac{dV(a)}{dt}(t-a)^5 \quad (7)$$

Assim, comparando a equação 2 com a equação acima, conclui-se que:

$$c_0 = V(a);\ c_1 = \frac{dV(a)}{dt};\ c_2 = \frac{1}{2!}\frac{dV(a)}{dt};\ c_3 = \frac{1}{3!}\frac{dV(a)}{dt};\ c_4 = \frac{1}{4!}\frac{dV(a)}{dt};\ c_5 = \frac{1}{5!}\frac{dV(a)}{dt} \quad (8)$$

A tabela abaixo contém os valores dos coeficientes c_n, com $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ para as baterias de 800 mAh, 2200 mAh, 6800 mAh e 7800 mAh.

Tabela 1: Tabela dos coeficientes do polinômio.

	Bateria de 800mAh	Bateria de 2200mAh	Bateria de 6800mAh	Bateria de 7800mAh
C_0	7,15E-14	7,01E-12	-1,01E-06	-5,81E-07
C_1	-2,23E-11	-3,73E-09	6,21E-04	-1,56E-03
C_2	1,30E-07	1,40E-06	2,75E-06	9,40E-06
C_3	-8,51E-11	1,83E-09	-1,50E-08	-9,64E-10
C_4	-2,04E-14	1,09E-12	-1,98E-11	-1,77E-11
C_5	-6,90E-19	1,98E-16	-6,15E-15	-9,30E-15

Fonte: Autores, 2025.

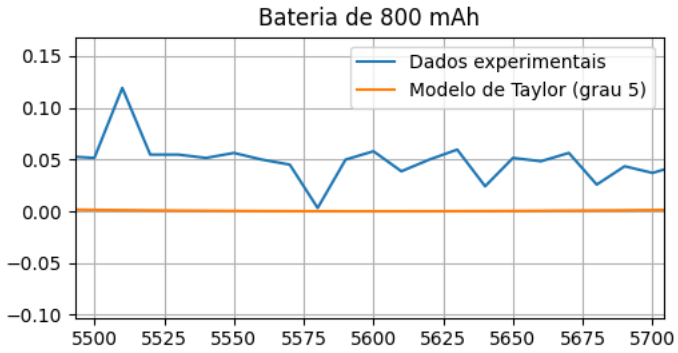
Os valores dos coeficientes foram obtidos considerando centros a que melhor ajustavam o modelo polinomial aos dados coletados experimentalmente. Aproximando os valores experimentais por um polinômio de grau 5 notou-se que a qualidade da aproximação dependia significativamente da escolha do ponto central da avaliação, visto que, a depender do valor adotado a aproximação piorava ou melhorava significativamente.

Tomando como exemplo o gráfico obtido para a bateria de 800 mAh, foi tomado um valor de $a = 5600$, de modo que, como mostra o gráfico, a aproximação é satisfatória. No entanto, quando a é movido para uma região mais central dos valores de tempo, o modelo não representa bem o comportamento dos dados experimentais.

Tal observação leva a questionamentos sobre o motivo do fenômeno. Analisando o comportamento real do gráfico de Tensão por Tempo da descarga da bateria, é visível sua divisão em três importantes intervalos: mantêm-se constante durante o início da descarga, depois apresenta uma queda rápida, quase exponencial, e estabiliza no final. No contexto de série de potências, uma provável causa de o modelo apresentar falhas quando a é tomado no centro dos valores de tempo é que nessa região temos uma variação acentuada dos valores de tensão em comparação com as duas outras regiões, e um polinômio de grau 5 talvez não seja o suficiente para modelar com precisão grandes variações, ao passo que quando a é tomado numa região mais estável do gráfico, a aproximação melhora. Vale ressaltar que a proposta era trazer uma aproximação utilizando séries de potências, de modo que não necessariamente este método seja o mais eficiente para aproximar o comportamento dos dados experimentais e, apesar disso, ainda sim, fazendo uma análise qualitativa do melhor valor de a, foi possível obter uma boa representação dos dados. Certamente existem formas de obter o melhor valor para o centro da série, mas este não é o objetivo deste trabalho, de modo que a análise gráfica já produziu um resultado satisfatório para a proposta.

Dado que os coeficientes encontrados estão diretamente relacionados com as derivadas de ordem n, é conveniente interpretar fisicamente os valores obtidos. O mais simples é o valor do coeficiente c_0, que fornece o valor da tensão no ponto tomado como centro da série, ou seja, escolhido $a = 5600$ para a bateria de 800 mAh, c_0, indica o valor de tensão em $t = 5600\ s$.

Figura 3: Análise dos coeficientes do polinômio.



Fonte: Autores, 2025.

Na figura 3, aplicando um zoom nas redondezas de $a = 5600$, para a bateria de 800 mAh, observa-se que o valor do modelo é praticamente zero em $t = 5600\ s$, como indica a tabela 1, enquanto o valor experimental apresenta um valor ligeiramente maior, mas que na realidade, numa análise real, também é considerado como sendo zero, já que se fosse utilizado um multímetro comum sua leitura de tensão da bateria seria de 0V. Desse modo o modelo representou bem o comportamento da tensão na bateria neste instante.

O coeficiente c_1, é a taxa de variação da tensão com o tempo (primeira derivada) no instante $t = a$, e sua unidade é volts por segundo (V/s). Ele indica se a bateria está carregando ou descarregando, caso $c_1 < 0$ a bateria está descarregando, e caso $c_1 > 0$, a bateria está carregando. Podemos avaliar esta interpretação ainda tomando como exemplo a bateria de 800 mAh, notando, pela tabela de coeficientes, que $c_1 < 0$ para $t = a$, o que condiz com uma bateria em descarga. O coeficiente c_2, é a taxa de aceleração da queda de tensão da curva no ponto experimental (segunda derivada) no momento que t = a, e sua unidade é volts por segundo ao quadrado (V/s^2). Sendo assim, após satisfazer essa condição, caso $c_2 > 0$ a tensão da bateria vai se estabilizar, e caso $c_2 < 0$,a queda de tensão será mais rápida de um ponto medido para o outro.

5 Considerações FINAIS

O presente estudo de baterias demonstrou a viabilidade de aplicar séries de potência na modelagem matemática de dados de tensão para avaliação da eficiência energética de baterias de lítio. A abordagem proposta no artigo é fundamentada em polinômios ajustados pelo método numérico dos mínimos quadrados, mostrou ser uma análise robusta ao apresentar o erro quadrático médio (EQM) entre 2,01% e 4,01%, validando sua precisão na representação de curvas experimentais de descarga. A flexibilidade do modelo permitiu capturar tanto o decaimento exponencial característico das células de lítio quanto variações locais na degradação de sua capacidade, especialmente na faixa crítica de 3,2 V a 2,7 V, reforçando sua utilidade prática em sistemas de gerenciamento de energia.

O artigo integrou conhecimentos de matemática aplicada, eletroquímica e programação computacional, destacando a importância de currículos educacionais que combinem teoria e prática para enfrentar desafios no processo de transição energética vigente. A aplicação de séries de potência proporcionou uma ferramenta de aproximação para sistemas não lineares onde oferece um ideal replicável em estudos de armazenamento energético, com potencial para otimizar algoritmos de predição da vida útil e eficiência. Ao aprimorar a avaliação de baterias de lítio, o modelo contribui indiretamente para a

descarbonização de setores elétricos, como na mobilidade elétrica e integração de energias renováveis.

Mais do que um resultado técnico, o estudo também tem um valor importante para o ensino. A proposta pode ser usada como ferramenta didática em cursos de Engenharia Elétrica, integrando matemática, eletrônica e programação. Com materiais simples, como o ESP32 e o software Arduino IDE, os alunos podem aplicar na prática o que aprendem em sala de aula, tornando o aprendizado mais claro, interessante e conectado com problemas reais.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos vão aos professores Rodrigo Lustosa Peronico e Alberto Heleno Rocha da Silva, ao Instituto Federal de Alagoas *Campus* Palmeira dos Índios.

REFERÊNCIAS

ALI, Ziad M. et al. Review of batteries reliability in electric vehicle and E-mobility applications. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 15, n. 2, p. 102442, 2024.

BOFFARDI, Raffaele et al. How to promote green energy transition in the age of geopolitical crises and international shocks: Evidence from the EU-27. **Environmental Science & Policy**, v. 164, p. 104007, 2025.

BORSA, Julia Garcia. **O lítio na transição energética: implicações geoeconômicas e estratégicas para a economia política internacional.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Relações Internacionais) – Escola de Humanidades, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Disponível em: https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/26989/1/2024_2_JULIA_GARCIA_BORSA_TCC.pdf . Acesso em: 07 abr. 2025.

BOYCE, W. E.; DIPRIMA, R. C. **Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno**. 12. ed. São Paulo: LTC, 2024.

CARVALHO, G. A.; MONTEIRO, A. C. S.; MONTEIRO, V. N. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO DESEMPENHO E DA VIDA ÚTIL DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO E SÓDIO. **Apoena**, *[S. l.]*, v. 7, p. 401–416, 2023.

CAZALBÓN, A. Y. AGUILERA; KERR-OLIVEIRA, L.. INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA NA AMÉRICA DO SUL: RETROSPECTIVA E DESAFIOS NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. **Revista Tempo do Mundo**, n. 32, p. 61-96, 31 ago. 2023.

FRÓES, Ana Klara Orichuela; DUARTE, Luciano. Contradições da transição energética: o circuito espacial produtivo do lítio na América Latina e os conflitos socioambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOGRAFAS E GEÓGRAFOS, 8., 2024, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Associação dos Geógrafos Brasileiros, p. 1-17, 2024.

GRÜNEWALD, Philipp H.; COCKERILL, Timothy T.; CONTESTABILE, Marcello; PEARSON, Peter J.G. The sociotechnical transition of distributed electricity storage into future networksSystem value and stakeholder views**. Energy Policy**, v. 50, p. 449–457, 2012.

HUANG, Wei-Chieh; ZHANG, Qianzhi; YOU, Fengqi. Impacts of battery energy storage technologies and renewable integration on the energy transition in the New York State. **Advances in Applied Energy**, v. 9, p. 100126, 2023.

JACOMO, Luis Henrique Mangilli. **Avaliação dos impactos ambientais de uma bateria utilizada em smartphones**. 2024. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista, 2024. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6643bbd4-62f3-485f-9641-d3ec81833b9d/content. Acesso em: 07 abr. 2025.

JUNIOR, J. D. S. L.; PEREIRA, John Icaro Matos; DE LIMA LIRA, Ricardo. Sistema individual de Energia Elétrica com fonte intermitente fotovoltaico off grid implantada em uma habitação ribeirinha no Município de Manacapuru-AM. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, p. 118458-118475, 2021.

KALAIR, Anam et al. Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. **Energy Storage**, v. 3, n. 1, p. e135, 2021.

KREYSZIG, E. **Matemática Superior para Engenharia**. 10. ed. v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LIU, Fu; FAN, Zhanxi. Defect engineering of two-dimensional materials for advanced energy conversion and storage. **Chemical Society Reviews**, v. 52, n. 5, p. 1723-1772, 2023.

MAKSOUD, M. I. A. ABDEL et al. Advanced materials and technologies for supercapacitors used in energy conversion and storage: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, p. 375-439, 2021.

MARTINS, V. A.; VIEIRA, A. C.; ANDRADE, A. F. da S. L. de; COSTA, A. L. da; SILVA, D. S.; NEVES JÚNIOR, F. J. das; REZENDE, L. G. de; RIOS, R. A. S. Desafios e oportunidades no uso do armazenamento de energia por baterias na transição energética brasileira. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, *[S. l.]*, v. 22, n. 7, p. e5777, 2024.

NHAMBIU, Jorge; CHICHANGO, Fernando. Comprehensive Analysis of the Energy Transition in Mozambique: Opportunities and Challenges for Achieving the Established Global Goals. **Energy**, v. 14, n. 2, 2024.

PEDRO, Evandro José Pereira; NOGUEIRA, Fernando José. Elaboração de projeto de rede de distribuição de energia elétrica. **Caderno de Estudos em Engenharia Elétrica**, v. 5, n. 2, 2023.

PISSOLITO, Vanessa. **Educação ambiental e geoética: o que dizem educadores de escolas públicas sobre a transição energética**. 2024. Dissertação (Mestrado em Educação) - Programa de Pós-Graduação em Educação, Escola de Ciências Humanas, Jurídicas e Sociais, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024. Disponível em: https://repositorio.sis.puc-

campinas.edu.br/bitstream/handle/123456789/17699/cchsa_ppgedu_disserta%c3%a7%c3%a3o_pissolito_v.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 14 abr. 2025.

RAMOS, Caroline Chantre. **A difusão da tecnologia de armazenamento de energia no contexto da transição energética: uma análise sob a perspectiva multinível.**2021. 127 f. Dissertação (Mestrado em Políticas Públicas, Estratégias e Desenvolvimento) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.ie.ufrj.br/images/IE/PPED/Dissertacao/2021/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20CAROLINE%20CHANTRE%20RAMOS_VF.pdf . Acesso em: 07 abr. 2025.

RAWAT, Sandeep et al. Advancements and Current Developments in Integrated System Architectures of Lithium-Ion Batteries for Electric Mobility. **World Electric Vehicle Journal**, v. 15, n. 9, p. 394, 2024.
SACHS, Jeffrey D. **The age of sustainable development**. Columbia University Press, 2015.

SANTOS, A. N. S. dos; FELIPPE, J. N. de O.; SILVA, K. L.; ASSUNÇÃO, I. D.; PEREIRA, K. R. de O.; LOPATIUK, C.; FLUMINHAN, A.; OZÓRIO, J. D. R.; HERNÁNDEZ, Y. D.; INEZ, B. R.; DUQUE, R. R.; GOMES, W. R. M.; CARDOSO, A. B.; PAIXÃO, J. L. da; SILVA, H. F. da; FERNANDES, F. de S. Transição energética e preservação: integração de fontes renováveis, biodiversidade e economia verde em tempos de crise climática. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 23, n. 3, p. 01-37, 2025.

SANTOS, Rosana Rodrigues dos; LEITE, Clauber Barão; ALMEIDA, Marina; SANTOS, Edlayan Passos Cunha dos. Desafios da transição energética: A renovabilidade da matriz elétrica em contexto global e suas implicações.**Revista Brasileira de Avaliação**, [S. l.], v. 13, n. 2 spe, p. e131824, 2024.

SERÔDIO, Pedro Miguel Serôdio Basílio.**Desenvolvimento de um conversor CC-CC bidirecional interleaved para testes de baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO4)**. 2018. Dissertação de mestrado em Engenharia Eletrónica e de Computadores, Universidade do Minho, 2018.

SILVA, K. M. da; OREIRO, J. L.; TEIXEIRA, D. M. da C. Mudanças climáticas, emissão de gases do efeito estufa e a contribuição do Brasil no período de 2000-2020.**Práticas de Administração Pública**,*[S. l.]*, v. 8, p. e88650, 2024. DOI: 10.5902/2526629288650. Disponível em: https://periodicos.ufsm.br/pap/article/view/88650. Acesso em: 30 abr. 2025.

SMIL, Vaclav. **Energy Transitions: History, Requirements, Prospects**. Santa Barbara: Praeger/ABC CLID, 2010.

SOUSA, ARM de; SANTOS, PR dos; FONSECA, W. da S.; MANITO, ARA; ARAÚJO, RCF; LOBATO, EP de S. Automação residencial e eficiência energética: um estudo de caso / Automação residencial e eficiência energética: um estudo de caso.**Revista Brasileira de Desenvolvimento,** *[S. l.]*, v. 8, pág. 13086–13101, 2019.

SOVACOOL, Benjamin K.; DWORKIN, Michael H.**Global energy justice**. Cambridge University Press, 2014.

SPERANDIO, Décio; MENDES, João Teixeira; SILVA, Luiz Henry Monkey e. **Cálculo numérico: características matemáticas e computacionais dos métodos numéricos.** São Paulo: Prentice Hall, 2003.

STEWART, James. **Cálculo I.** v.1. 7.ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2015.

TERTULIANO, Fillippe José Gadelha. **Estimação do estado de carga em baterias de Lítio – Íon baseada em filtro de Kalman Unscented**. 2021. Dissertação (Mestrado) – UFPB/CEAR. João Pessoa, 2021.

WALS, Arjen E.J. Learning Way of Sustainability. **Journal of Education for Sustainable Development,** v5 n2 p.177-186, 2011.

WHITBECK, Caroline. **Ethics in engineering practice and research**. Cambridge University Press, 2011.

MATHEMATICAL MODEL OF VOLTAGE DATA FOR EVALUATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF A LITHIUM BATTERY BY POWER SERIES

Abstract: *The paper proposes a mathematical model based on power series to evaluate the energy efficiency of lithium batteries, aiming to contribute to the global energy transition. The methodology involved the collection of experimental data from four batteries (800 mAh to 7800 mAh) using a voltage divider circuit and an ESP32 microcontroller, followed by power series modeling adjusted by least squares. The results revealed a close correspondence between the theoretical and experimental curves, with a mean square error (MSE) ranging from 2.01% to 4.01%, validating the accuracy of the model in capturing the exponential decay and local voltage variations during discharge. The study highlights the importance of interdisciplinary approaches in engineering, combining applied mathematics, electrochemistry and programming to optimize storage systems and accelerate the decarbonization of sectors such as electric mobility and renewable energy networks.*

Keywords: *Lithium battery, power series, energy efficiency.*