

MÉTODO PARA PARAMETRIZAÇÃO DE BATERIAS DE LÍTIO EM SEGUNDA-VIDA E DETERMINAÇÃO DE SOH

Lucas Augusto Zanicoski Sergio - augustolucaszs@gmail.com

Matheus Hohmann

Aline Kirsten Vidal de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina

Leonardo Freire Pacheco

Celesc Distribuição S.A.

Helena Flávia Napolini

Ricardo Rütther

Universidade Federal de Santa Catarina

6.5. Caracterização, análise, equipamentos e sistemas de armazenamento de energia

Resumo. Este estudo aborda a reutilização de baterias de lítio de veículos elétricos em aplicações de armazenamento de energia estacionário, enfocando a extensão de seu ciclo de vida e uso eficiente. As baterias, cruciais em diversas aplicações, enfrentam desafios de degradação de capacidade, levantando questões sobre seu reaproveitamento pós-vida útil. Utilizando modelos elétricos baseados em circuitos equivalentes de Thevenin, o estudo analisa características elétricas das baterias, focando em Estado de Saúde (SOH) e Estado de Carga (SOC). Descobriu-se que, dentro de uma faixa de 30% a 90% de SOC, a curva de Tensão de Circuito Aberto (VOC) por SOC não é influenciada pelo SOH, permitindo a utilização de uma equação padrão para simular células de modelos similares em conjuntos de módulos de baterias de diferentes veículos Nissan Leafs. A análise em cinco veículos indicou uma correlação de até 92% entre resistência série e capacidade remanescente e também uma assertividade de até 73% quando estimado a partir da capacitância de dinâmica lenta. O estudo revelou uma alta precisão do método de parametrização, com um erro máximo de apenas 3.6% em descargas pulsadas, especialmente eficaz na faixa linear de 30% a 90% de SOC. Apesar de desafios como o balanceamento de baterias e tempos prolongados de carregamento, o método provou ser eficiente na caracterização das baterias, com pequenos erros em períodos transitórios e na estimativa da curva de VOC por SOC. Este trabalho não apenas confirma a viabilidade de reutilizar baterias de lítio em aplicações de segunda vida, mas também abre caminho para pesquisas futuras em diferentes modelos e composições de baterias, contribuindo significativamente para o avanço da tecnologia de baterias e a promoção de uma economia circular no setor energético.

Palavras-chave: Baterias de Lítio, Segunda Vida, Caracterização

1. INTRODUÇÃO

A adoção crescente de veículos elétricos e a transição global para fontes de energia renováveis destacam a importância crítica do armazenamento eficiente de energia (Reid e Julve, 2016b). As baterias de lítio, amplamente utilizadas em veículos elétricos, são uma solução central nesse contexto. No entanto, ao longo do uso, essas baterias enfrentam uma redução de capacidade, o que gera questões sobre seu destino pós-vida útil nos veículos.

Com alta densidade energética e longa vida útil, as baterias de lítio têm desempenhado um papel revolucionário em uma variedade de aplicações, desde dispositivos eletrônicos portáteis até sistemas de armazenamento de energia em grande escala (Távora, Silva e Mendonça, 2020; Scrosati e Garche, 2010). Essa ampla adoção destaca a relevância contínua das baterias de lítio nas atuais tecnologias de energia.

Desde seu desenvolvimento inicial nos anos 1970, as baterias de lítio passaram por avanços significativos em termos de química, segurança e durabilidade, impulsionando sua adoção generalizada (Carvalho, Carvalho e Galvão Romão, 2019; Jarnestad, 2019). Essa evolução histórica reflete como inovações contínuas têm ampliado a utilidade e a aplicabilidade dessas baterias.

As baterias de lítio apresentam diversas composições químicas, cada uma com características próprias que influenciam sua adequação para diferentes aplicações (Thapa, 2007; Reid e Julve, 2016a). A compreensão dessas variações é essencial para otimizar o uso das baterias tanto em suas aplicações primárias quanto em usos secundários.

Em veículos elétricos, as baterias de lítio são fundamentais, mas com o tempo, elas inevitavelmente experimentam uma diminuição na capacidade e eficiência (Hertzke et al., 2019; Hohmann, 2022). Essa realidade traz à tona a questão crucial do que fazer com as baterias após seu ciclo de vida útil nos veículos.

Além dos desafios ambientais, o descarte de baterias de lítio representa uma perda significativa de materiais valiosos

(Lee et al., 2022). A reutilização dessas baterias em aplicações de segunda vida surge como uma alternativa viável e sustentável, especialmente em sistemas que integram fontes de energia renováveis intermitentes, como solar e eólica (Rahil et al., 2022).

As baterias de segunda vida, caracterizadas por terem completado seu ciclo inicial de uso, ainda retêm uma capacidade significativa (Freitas e Marchesini, 2022). Por exemplo, uma bateria de veículo elétrico que teve sua capacidade reduzida para 80% ainda pode ser valiosa para outras aplicações.

Originários de um projeto da *Nissan* em 2012, 25 unidades do *Nissan Leaf* modelo 2012 foram distribuídas entre frotas de táxis e carros policiais em São Paulo e Rio de Janeiro. Após cinco anos de uso, esses veículos foram aposentados em 2017 e suas baterias permaneceram sem uso.

Em 2018, a *Nissan* do Brasil doou 12 unidades de baterias do carro modelo *Leaf* 2012 ao Laboratório Fotovoltaica da UFSC para estudos de reutilização em diferentes aplicações. Parte destas baterias foi usada em um contêiner para gerenciamento estratégico de energia e como backup de energia para o laboratório. Outras células foram empregadas no armazenamento de energia solar em postes de luz e para alimentar geladeiras de vacinas. O mais recente projeto que utilizou deste estudo para escolha de baterias foi um banco de baterias utilizando células destes carros para um sistema carregamento de veículos elétricos.

Este estudo tem como objetivo explorar o potencial das baterias de lítio de segunda vida em aplicações de armazenamento de energia estacionário. Focamos no desenvolvimento de métodos para avaliar, selecionar e otimizar baterias usadas, visando prolongar seu ciclo de vida e maximizar sua eficiência. Com isso, buscamos contribuir para o avanço de práticas sustentáveis no gerenciamento de energia e na economia circular relacionada às baterias de lítio.

2. METODOLOGIA

Este tópico visa apresentar os conceitos que embasaram os procedimentos utilizados para aferição das características reais das baterias e a metodologia empregada para determinação do modelo matemático.

2.1 Modelagem das Baterias de Lítio

A modelagem elétrica das baterias de lítio pode ser realizada utilizando conceitos dos circuitos equivalentes de *Thevenin*, com componentes passivos como resistores e capacitores (Böttiger, Paulitschke e Bocklisch, 2017). Modelos simplificados, como o modelo de resistência série (Hohmann, 2022), são úteis para representar características da bateria como o Estado de Saúde (SOH) e Estado de Carga (SOC). A Fig. 1 ilustra esse modelo, onde U_{oc} é a tensão de circuito aberto, U_L a tensão medida nos terminais, e R_0 representa as resistências internas.

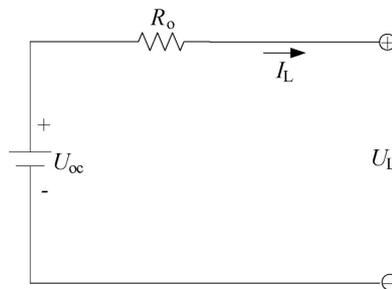


Figura 1 – Modelo elétrico simplificado de bateria. Fonte: (He, Xiong e Fan, 2011)

Em casos de perturbação na bateria, é observada uma variação acentuada de tensão, então a resistência interna pode ser calculada pela equação $R_0 = \frac{U_{oc} - U_L}{I_L}$ (S.M. Mousavi, 2014). A tensão de circuito aberto U_{oc} é medida quando a bateria está em repouso, enquanto U_L é obtida instantaneamente após a aplicação da perturbação.

Para representar as não linearidades em baterias de lítio, utilizam-se modelos de primeira ou segunda ordem de *Thevenin* (S.M. Mousavi, 2014). Esses modelos incluem um circuito adicional para determinar a tensão V_{oc} a partir do SOC, como ilustrado na Fig. 2. Ele representa três dinâmicas chave de uma bateria de lítio: queda de tensão devido a R_{int} , uma dinâmica rápida e uma lenta, ambas associadas a pares de circuitos RC (Resistor e Capacitor em Paralelo).

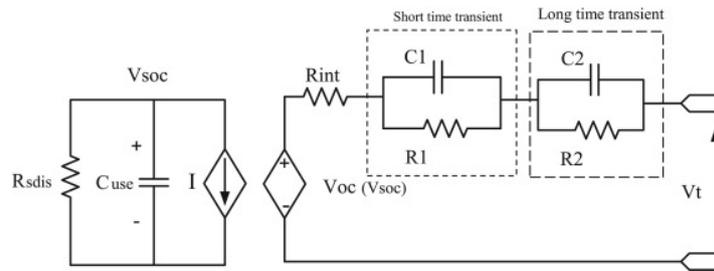


Figura 2 – Modelo elétrico combinado de bateria. Fonte: (S.M. Mousavi, 2014)

2.2 Parametrização da Bateria de Lítio

A modelagem matemática das baterias de lítio para a parametrização de suas características elétricas é essencial para otimizar o desempenho em aplicações de segunda vida. Utilizando o modelo de segunda ordem baseado nos circuitos equivalentes de *Thevenin*, propomos um método para determinar os parâmetros elétricos de baterias usadas em veículos, como o Nissan Leaf 2012. Este modelo, mais complexo, incorpora as não-linearidades intrínsecas às baterias de lítio, essenciais para um mapeamento preciso de seu comportamento (Poopanya, Sivalertporn e Phophongviwat, 2022).

A abordagem inclui a aplicação da primeira e segunda lei de *Kirchhoff* em uma malha contendo resistores e capacitores, representando os componentes internos da bateria (Fig. 3). A análise é feita considerando as dinâmicas rápidas e lentas dos circuitos RC, que são cruciais para entender a resposta da bateria a diferentes condições de carga e descarga. A tensão em cada componente e a corrente total no circuito são determinadas a partir dessas leis, levando em consideração as propriedades elétricas dos componentes (Matos et al., 2010).

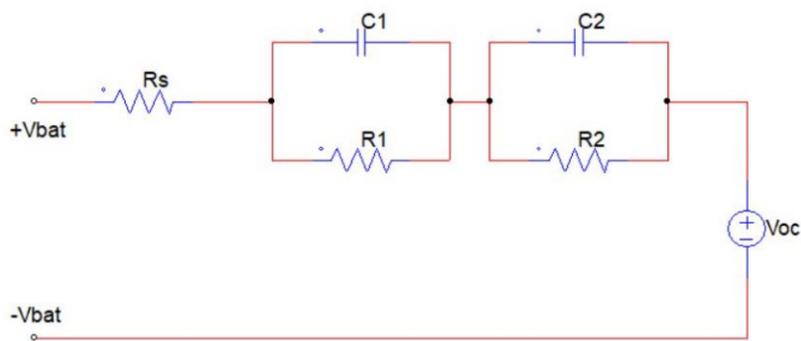


Figura 3 – Modelo teórico para parametrização.

A equação que rege o comportamento dinâmico da bateria é derivada a partir da transformada de *Laplace*, considerando as respostas dos circuitos RC à corrente aplicada. Isso resulta em uma formulação que descreve a tensão da bateria em função do tempo, capturando as nuances das respostas transitórias. As equações de *Laplace* e suas inversões fornecem uma visão clara do comportamento temporal dos componentes da bateria sob diferentes condições de operação (Böttiger, Paulitschke e Bocklisch, 2017).

O ponto central deste método é a partir das equações definidas utilizando os teoremas de circuitos selecionar pontos da curva de descarregamento da bateria (Fig. 4), montar um matriz de equações a partir destes pontos e encontrar matematicamente os valores de τ , tensões dos capacitores e resistores. A seleção cuidadosa desses pontos de tensão da curva de descarregamento é essencial para representar adequadamente as dinâmicas rápida e lenta da bateria, permitindo uma parametrização precisa das características elétricas das baterias de segunda vida.

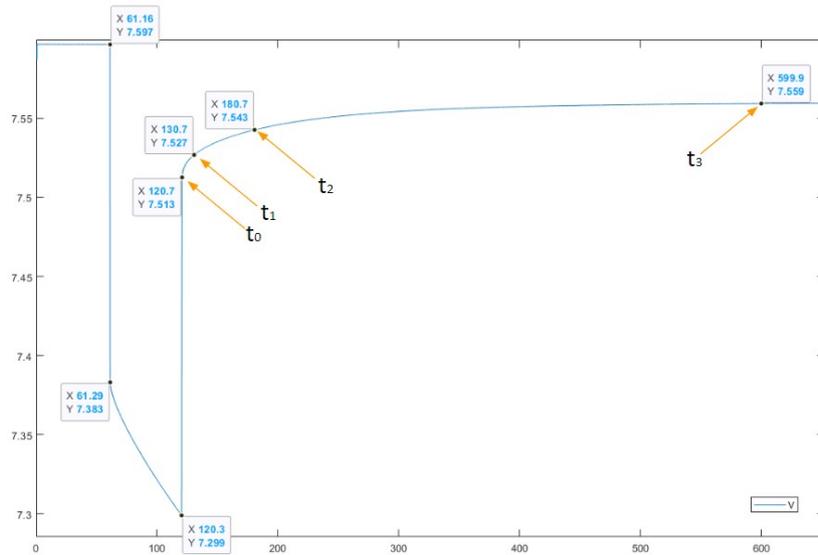


Figura 4 – Definição de pontos para resolução de sistema.

Finalmente, a Eq. (1) é formado para resolver as incógnitas da parametrização. Este sistema, composto por medições de tensão em diferentes pontos temporais, permite calcular os parâmetros elétricos internos da bateria, incluindo as resistências internas dos conjuntos RC e capacitâncias, fundamentais para a compreensão do comportamento da bateria sob diferentes condições de uso.

$$\begin{bmatrix} e\left(\frac{-t_1}{\tau_1}\right) & e\left(\frac{-t_1}{\tau_2}\right) \\ e\left(\frac{-t_2}{\tau_1}\right) & e\left(\frac{-t_2}{\tau_2}\right) \\ e\left(\frac{-t_3}{\tau_1}\right) & e\left(\frac{-t_3}{\tau_2}\right) \\ e\left(\frac{-t_4}{\tau_1}\right) & e\left(\frac{-t_4}{\tau_2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C_1}(0) \\ V_{C_2}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{bat}(t_1) - V_{co} \\ V_{bat}(t_2) - V_{co} \\ V_{bat}(t_3) - V_{co} \\ V_{bat}(t_4) - V_{co} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3 Cálculo de Curva de VOC

A criação de um modelo de bateria simulado é fundamental para comparar os resultados da parametrização com dados de testes reais. Para isto, é necessário um sistema composto por bateria, atuadores, sensores de tensão e corrente, e um modelo que represente o comportamento dinâmico da bateria (Masoudinejad, 2020).

O método de descarregamento pulsado é utilizado para coletar dados de VOC, intercalando períodos de descarga e relaxamento. Através deste teste, é possível determinar tanto a capacidade total de energia da bateria quanto a relação entre VOC e SOC, essencial para avaliar o estado de carga da bateria durante seu uso (Böttiger, Paulitschke e Bocklisch, 2017). Na (Fig. 5) é apresentado o procedimento de descarregamento pulsado de 5 baterias.

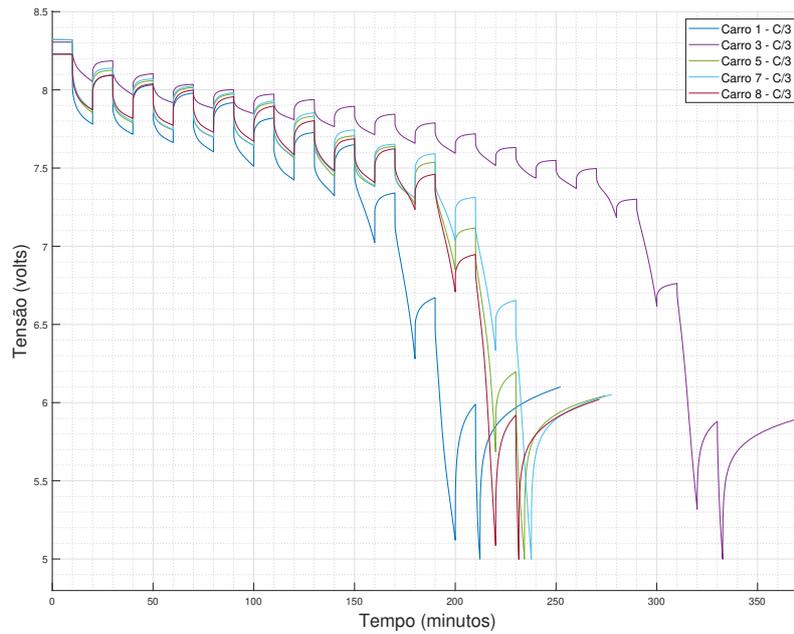


Figura 5 – Curva de descarga pulsada para aquisição de pontos VOC.

Quando a equação que representa o SOC da bateria é desconhecida, é necessário calculá-la. Para isso utilizamos os pontos de tensão de circuito aberto do teste anterior para correlacionar com a integralização da corrente ao longo do tempo e determinar empiricamente a equação que rege tal bateria. Na (Fig. 6) foram realizados o equacionamento e correlação para todas as baterias testadas.

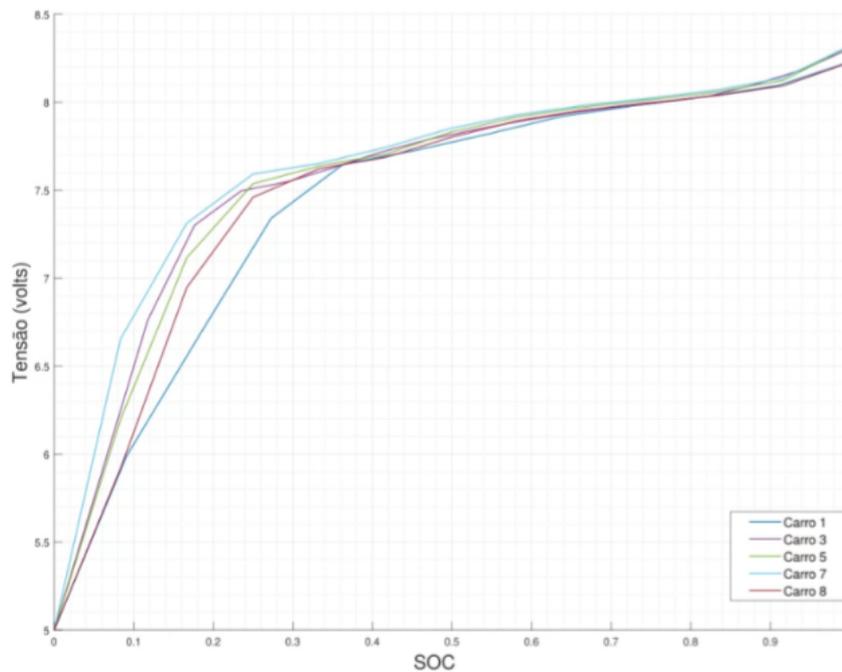


Figura 6 – Curva de VOC por SOC.

2.4 Cálculo de Capacidade Remanescente

Para compreender integralmente o comportamento de uma bateria, além da curva de VOC, é crucial determinar sua capacidade remanescente. Esta capacidade indica a utilidade da bateria em aplicações futuras e se relaciona com a energia que a bateria pode armazenar e liberar entre seus estados de carga completa e descarga completa (Casals, Amante García e Canal, 2019).

A capacidade remanescente é calculada por meio de um teste de descarga completa, utilizando o método de carregamento CC-CV. Este método possui dois estágios: um de corrente constante e outro de tensão constante (Fig. 7). A descarga é feita até o limite inferior de tensão da bateria, e a energia remanescente é medida pela integralização da corrente de descarga ao longo do tempo (Harper et al., 2019).

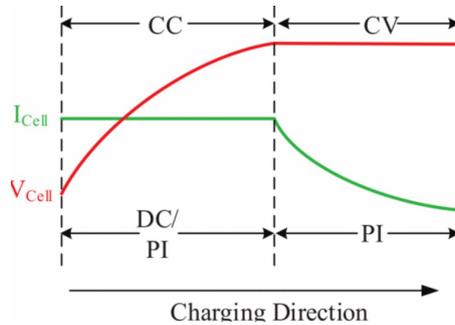


Figura 7 – Estágios do carregamento de uma bateria de lítio. Fonte: (Hoque, Hannan e Mohamed, 2016)

3. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da comparação entre o método utilizado e os dados reais de testes em baterias. As análises incluem erros relativos ao VOC, comparações de VOC medido e estimado, e tendências nas características elétricas observadas.

Durante a análise, foi observado que o SOH das baterias não apresenta influência significativa na faixa de 30% a 90% de SOC, permitindo a utilização de uma equação comum para a comparação de descargas pulsadas e pulsos unitários. No teste de pulso unitário, o erro do modelo em relação à tensão real não ultrapassou 1,22% positivo e -3,19% negativo, com variações de erro associadas à capacidade remanescente de cada bateria como representado nas curvas da (Fig. 8).

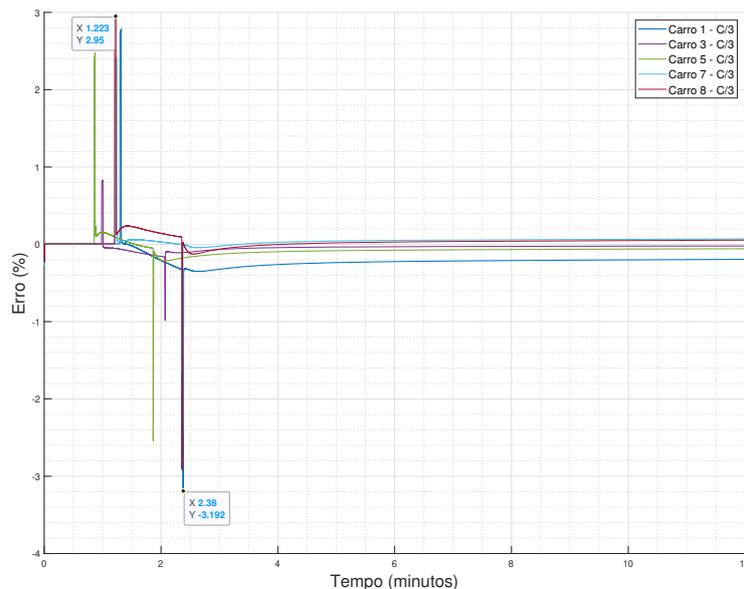


Figura 8 – Erro da resposta para Pulso Unitário.

No teste de descarga pulsada, os erros máximos observados, (Fig. 9), foram de 3,66% positivo e 3,62% negativo.

Este teste, que simula o descarregamento completo da bateria, revelou que a equação do VOC por SOC é mais relevante em regime permanente, enquanto os transitórios respeitam a tensão de circuito aberto.

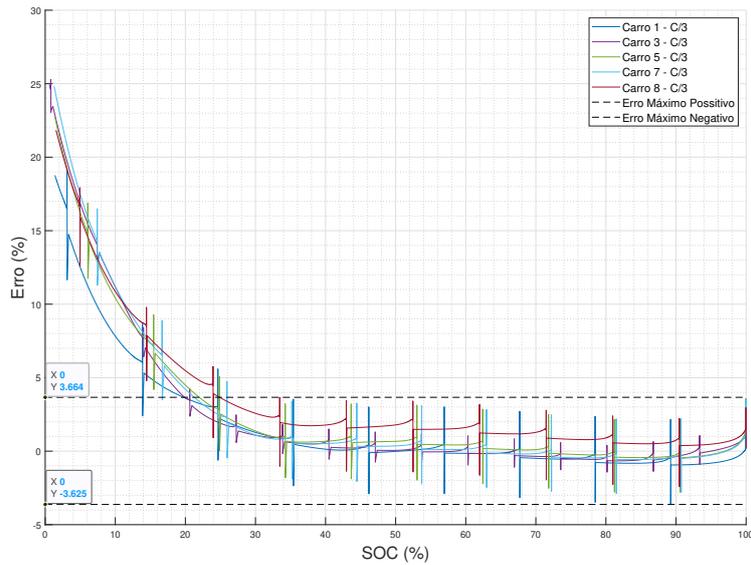


Figura 9 – Erro da resposta para Descarga Pulsada

Além disso, foi observado que variações específicas, como a recuperação de tensão mais rápida do Carro 7 em comparação com outros veículos de capacidade similar, podem indicar desbalanceamento entre células em série. Isso destaca a importância do monitoramento individual das células, geralmente realizado por um BMS (Battery Management System).

A análise de tendência dos parâmetros elétricos em relação à capacidade revelou que a resistência interna e as características dos pares RC são indicativos cruciais do estado da bateria. Usando regressão linear, foi possível estabelecer uma relação clara entre o aumento da resistência série e o decaimento da capacidade, com um coeficiente R^2 de 0,92 para a resistência série, indicando uma forte correlação como mostrado na (Fig. 10).

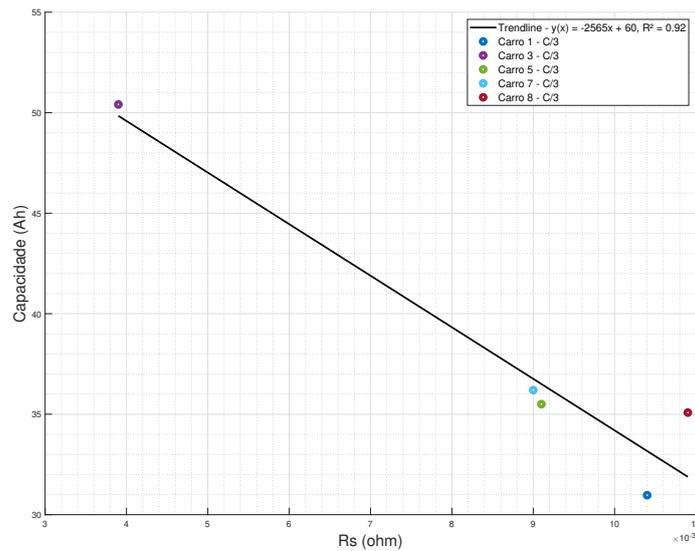


Figura 10 – Gráfico de tendência para resistência série.

Para quando observado a correlação de capacidade remanescente com as capacitâncias, perdemos um pouco de precisão caindo para a casa dos 0,73 de R^2 , como apresentado na (Fig. 11). Em resumo, os resultados demonstram que

o modelo utilizado oferece uma boa representação do comportamento real das baterias, com pequenos erros observados principalmente nos regimes transitórios. Esta análise fornece uma base sólida para entender o desempenho e a degradação das baterias em diferentes condições de uso.

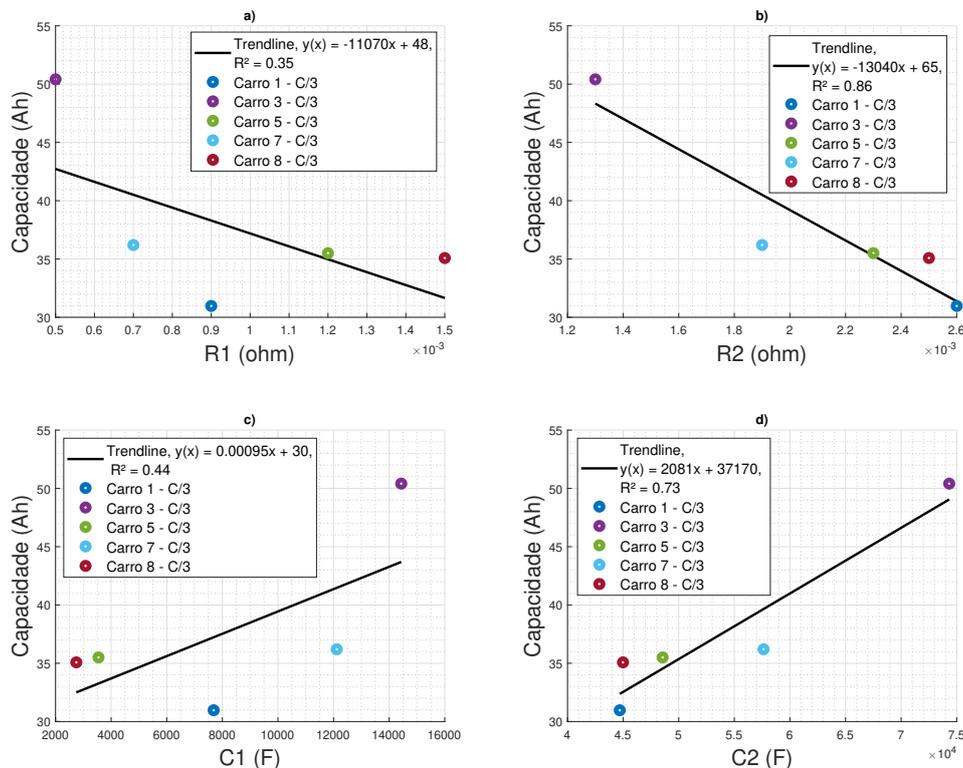


Figura 11 – Gráfico de tendência para pares RC.

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, a complexidade de obter informações precisas sobre baterias usadas de veículos elétricos foi abordada, sendo essencial para entender melhor as possibilidades de uma segunda vida para estas baterias. Durante o processo de análise, tornou-se necessário o desenvolvimento de métodos práticos e viáveis de modelagem, parametrização e testes. Estes métodos proporcionaram a determinação confiável das características elétricas das baterias.

O método adotado revelou que, numa faixa de 30% a 90% do Estado de Carga (SOC), a curva de Tensão de Circuito Aberto (VOC) por SOC não é influenciada pelo Estado de Saúde (SOH) da bateria. Isso possibilitou a aplicação de uma única equação padrão para simular células do mesmo modelo em diferentes condições de saúde, que foram sujeitas a variados ciclos de vida útil em veículos *Nissan Leaf*. A análise de tendência realizada em cinco veículos testados indicou uma correlação de até 92% entre a resistência em série e a capacidade remanescente. Na avaliação da capacitância com dinâmica lenta, uma assertividade de até 73% foi observada.

Os resultados também destacaram a alta fidelidade do modelo matemático, com um erro máximo de apenas 3,6% para descargas pulsadas. Este achado atesta a precisão do método de parametrização, especialmente na faixa linear de 30% a 90% de SOC. No entanto, o estudo enfrentou desafios significativos, como o balanceamento de baterias e o tempo prolongado necessário para carregar cada módulo, o que limitou o número de módulos testados. Apesar desses desafios, o método demonstrou ser eficaz na caracterização das baterias, apresentando pequenos erros em períodos transitórios e alta eficiência na estimativa da curva de VOC por SOC no regime operacional especificado.

Agradecimentos

Os autores expressam sinceros agradecimentos à *Nissan* Automóveis do Brasil pelo fornecimento das baterias descartadas dos veículos *Nissan LEAF*, essenciais para a condução deste estudo. Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Projeto: 383767/2022-9) pelo financiamento. Agradecem ainda a Celesc Distribuição S.A. pelo apoio financeiro proporcionado pelo projeto de P&D intitulado "Sistema de armazenamento

transportável multifunção via baterias de primeira e em segunda vida para suporte a desligamentos e atendimento a picos sazonais de demanda da rede de distribuição”(5697-0323/2023), regulamentado pela ANEEL. O projeto está sendo executado pelo Laboratório FV UFSC, da Universidade Federal de Santa Catarina, e financeiramente gerenciado pela Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina.

REFERÊNCIAS

- Böttiger, Michael, Martin Paulitschke e Thilo Bocklisch (2017). Systematic experimental pulse test investigation for parameter identification of an equivalent based lithium-ion battery model. Em: Energy Procedia 135. 11th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2017, 14-16 March 2017, Düsseldorf, Germany, pp. 337–346.
- Carvalho, Arnaldo, Amauri Carvalho e Ulisses Galvão Romão (dez. de 2019). BATERIAS DE ÍON DE LÍTIO ESTADO DA ARTE E APLICAÇÕES. Em: 5, p. 86.
- Casals, Lluc Canals, B. Amante García e Camille Canal (2019). Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis. Em: Journal of Environmental Management 232, pp. 354–363.
- Freitas, Felipe Tomaz e Márcia Maria Penteado Marchesini (2022). Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos. Em: Produto & Produção 23.3, pp. 1–20.
- Harper, Gavin et al. (nov. de 2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Em: Nature 575, pp. 75–86.
- He, Hongwen, Rui Xiong e Jinxin Fan (2011). Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. Em: Energies 4.4, pp. 582–598.
- Hertzke, Patrick et al. (2019). Expanding electricvehicle adoption despite early growing pains. Em: McKinsey & Company 26.
- Hohmann, Matheus (2022). Avaliação de métodos para a caracterização de baterias de lítio em segunda vida. Em: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Hoque, Mohammad Mozammel, Mahammad Abdul Hannan e Azah Mohamed (2016). Optimal CC-CV charging of lithium-ion battery for charge equalization controller. Em: 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES), pp. 610–615.
- Jarnestad, Johan (2019). Em: The Royal Swedish Academy of Sciences.
- Lee, Hyunjun et al. (ago. de 2022). What is the optimized cost for a used battery?: Economic analysis in case of energy storage system as 2nd life of battery. Em: Journal of Cleaner Production 374, p. 133669.
- Masoudinejad, Mojtaba (2020). Open-Loop Dynamic Modeling of Low-Budget Batteries with Low-Power Loads. Em: Batteries 6.4.
- Matos, Marino Ricardo Santos et al. (2010). Estudo e estimação de parâmetros de um modelo eléctrico de bateria. Em: Poopanya, Piyawong, Kanchana Sivalertporn e Teeraphon Phophongviwat (2022). A Comparative Study on the Parameter Identification of an Equivalent Circuit Model for an Li-ion Battery Based on Different Discharge Tests. Em: World Electric Vehicle Journal 13.3.
- Rahil, Abdulla et al. (mar. de 2022). Investigating the possibility of using second-life batteries for grid applications. Em: Journal of Power Sources 1.
- Reid, Gerard e Javier Julve (2016a). Second Life-Batterien als flexible Speicher für Erneuerbare Energien. Em: — (2016b). Second life-batteries as flexible storage for renewables energies. Em: Bundesverband Erneuerbare Energie eV (BEE).
- Scrosati, Bruno e Jürgen Garche (2010). Lithium batteries: Status, prospects and future. Em: Journal of power sources 195.9, pp. 2419–2430.
- S.M. Mousavi, M. Nikdel (2014). Various battery models for various simulation studies and applications. Em: Renewable and Sustainable Energy Reviews 32, pp. 477–485.
- Távora, G, JA Silva e S Mendonça (2020). “Evolução tecnológica no armazenamento de energia: uma perspectiva a partir das patentes de baterias”. Em: CIES2020-XVII Congresso Ibérico e XIII Congresso Ibero-americano de Energia Solar. LNEG-Laboratório Nacional de Energia e Geologia, pp. 1323–1329.
- Thapa, Arjun (jan. de 2007). “Development of Cathode Materials for Li-ion Battery and Megalo-Capacitance Capacitor”. Tese de dout.

METHOD FOR PARAMETERIZATION OF SECOND-LIFE LITHIUM BATTERIES AND DETERMINATION OF SOH

Abstract. *This study addresses the reuse of lithium batteries from electric vehicles in stationary energy storage applications, focusing on extending their lifecycle and efficient usage. These batteries, crucial in various applications, face challenges of capacity degradation, raising questions about their post-lifecycle repurposing. Utilizing electrical models based on Thevenin’s equivalent circuits, the study examines the electrical characteristics of the batteries, focusing on State of Health (SOH) and State of Charge (SOC). It was discovered that within a SOC range of 30% to 90%, the Open Circuit Voltage (VOC) curve by SOC is not influenced by SOH, allowing the use of a standard equation to simulate cells of identical models*

in different Nissan Leafs. Analysis in five vehicles indicated a correlation of up to 92% between series resistance and remaining capacity and an accuracy of up to 73% when estimated from slow dynamics capacitance. The study revealed high precision of the parametrization method, with a maximum error of only 3.6% in pulsed discharges, particularly effective in the linear range of 30% to 90% of SOC. Despite challenges such as battery balancing and prolonged charging times, the method proved efficient in characterizing the batteries, with minor errors in transient periods and in estimating the VOC curve by SOC. This work not only confirms the viability of reusing lithium batteries in second-life applications but also paves the way for future research into different models and compositions of batteries, significantly contributing to the advancement of battery technology and promoting a circular economy in the energy sector.

Keywords: *Lithium Batteries, Second Life, Characterization*