

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE BATERIAS DE LÍTIO EM SEGUNDA VIDA

Matheus Hohmann – matheus.hohmann79@gmail.com

Helena Flávia Napolini

Lucas Augusto Zanicoski Sergio

Aline Kirsten Vidal de Oliveira

Universidade de Santa Catarina

Leonardo Freire Pacheco

Celesc Distribuição S.A.

Ricardo Rütther

Universidade de Santa Catarina

Resumo. Com o avanço do mercado de eletromobilidade, os consideráveis investimentos em recursos financeiros e ambientais em baterias de lítio têm motivado a busca por alternativas que minimizem esse alto custo econômico e ambiental. Nesse contexto, surge a proposta de aproveitar baterias retiradas de veículos elétricos, conhecidas como "baterias de segunda vida", devido à sua elevada densidade de energia e potência. Essas baterias podem ser reutilizadas em novas aplicações com menor demanda energética, como o suporte a geradores solares fotovoltaicos para fornecer eletricidade em áreas isoladas da rede elétrica convencional. Diante desse cenário, torna-se crucial avaliar as características técnicas dessas baterias, analisando a viabilidade técnica de sua utilização, seus parâmetros elétricos e a determinação de sua vida útil. Este estudo tem como objetivo examinar metodologias disponíveis na literatura para a determinação de parâmetros elétricos de baterias de lítio, selecionar o método mais apropriado e aplicá-lo na determinação da capacidade e resistência interna de baterias provenientes de veículos Nissan LEAF modelo 2012, que atuaram como táxis em São Paulo/SP e Rio de Janeiro/RJ por cinco anos. Os resultados obtidos revelaram testes confiáveis de medição de capacidade dos módulos de baterias, embora com uma execução demorada. Já os testes de resistência interna foram conduzidos de forma mais ágil, utilizando diferentes valores de corrente, sendo que a corrente nominal das baterias proporcionou resultados menos variáveis. Observou-se uma variação nos parâmetros elétricos dentro do mesmo veículo, possivelmente associada à temperatura interna, além de variações entre os veículos. Foi estabelecida uma relação matemática entre capacidade e resistência interna com base nos valores médios encontrados na prática. Concluiu-se que as baterias de segunda vida representam uma alternativa viável para estender a vida útil das baterias de lítio e otimizar o processo produtivo, embora a caracterização em larga escala ainda apresente desafios.

Palavras-chave: Bateria de Segunda Vida, Caracterização de Bateria de Lítio e Veículos Elétricos.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o armazenamento de energia remonta a tempos antigos, antes mesmo da descoberta da eletricidade. A necessidade de armazenar óleos para lamparinas nas cidades reflete a busca contínua da humanidade por maneiras de contornar a variabilidade de recursos ou energia (Pressley, 1996). Hoje, a dependência da energia elétrica está profundamente enraizada em nossa sociedade, tornando impraticável consumi-la apenas nos momentos de geração disponível. Exemplos contemporâneos incluem usinas hidroelétricas, que armazenam energia potencial gravitacionalmente, e as crescentes produções de baterias utilizadas em veículos elétricos (Bloch *et al.*, 2019).

No entanto, apesar do aumento na produção de baterias, surge o desafio da gestão sustentável desses dispositivos. A degradação gradual da capacidade ao longo do tempo leva à substituição das baterias, mesmo que ainda possuam considerável potencial de armazenamento. O conceito de "bateria em segunda vida" destaca a possibilidade de reutilização desses dispositivos descartados, proporcionando benefícios financeiros e ambientais (Strickland *et al.*, 2014; Cicconi *et al.*, 2012).

A reutilização de baterias de veículos elétricos surge como uma abordagem promissora para lidar com o descarte desses componentes. Estudos indicam que, após aproximadamente cinco anos de uso em veículos, essas baterias ainda preservam considerável capacidade, variando entre 70% e 80% de sua condição inicial (Saxena *et al.*, 2015). Mesmo após atingirem o fim de sua vida útil para aplicações de eletromobilidade, essas baterias têm potencial para desempenhar um papel crucial no armazenamento de energia em outras aplicações estacionárias onde o espaço ocupado não seja um aspecto determinante (Martinez-Laserna *et al.*, 2018). O reuso em segunda vida dessas baterias não apenas contribui para a redução do desperdício, mas também representa uma estratégia eficaz para prolongar o ciclo de vida de um produto que, de outra forma, seria descartado ou reciclado, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e eficiência no gerenciamento de recursos.

Para viabilizar a utilização de baterias em segunda vida, é crucial avaliar aspectos econômicos e técnicos, detectando problemas existentes ou prevenindo futuros. Diversos métodos de caracterização têm sido explorados na literatura para essa finalidade (Dürr *et al.*, 2006; Mousavi e Nikdel, 2014; González e Francisco M., 2006). No contexto apresentado, o presente trabalho tem como objetivo investigar diversos métodos de caracterização de baterias em segunda vida, com ênfase na determinação da resistência interna e na sua correlação com a capacidade. Os resultados e métodos de determinação de capacidade foram expostos em um artigo anterior (Hohmann; Oliveira; Rütther, 2022); portanto, neste trabalho, serão conduzidos ensaios e análises complementares ao estudo já publicado.

2. METODOLOGIA

Nesta seção, são apresentadas as metodologias aplicadas nos testes de resistência interna e capacidade, que englobam o conceito de avaliação técnica de baterias em segunda vida. Essas práticas resultam de uma colaboração estabelecida em 2018 entre o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Fotovoltaica/UFSC www.fotovoltaica.ufsc.br) e a empresa Nissan Automóveis do Brasil, originada de um projeto anterior conduzido pela empresa. Em 2012, a Nissan, em parceria com as prefeituras das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, iniciou um projeto piloto para avaliar a viabilidade econômica de veículos elétricos no Brasil. Este projeto envolveu 25 veículos Nissan LEAF, que foram utilizados como táxis, percorrendo mais de 2,2 milhões de quilômetros ao longo de cinco anos (Dana, 2016). Após a conclusão bem-sucedida desse projeto, consolidou-se uma colaboração entre a Fotovoltaica/UFSC e a Nissan, focada no desenvolvimento de conhecimento acadêmico sobre baterias em segunda vida. Do projeto piloto, foram entregues ao Laboratório 12 conjuntos de baterias, impulsionando a realização de pesquisas aprofundadas nesse campo específico.

Neste estudo, são apresentados os resultados derivados de seis dos doze conjuntos de baterias cedidos pela Nissan ao laboratório Fotovoltaica/UFSC. Esses conjuntos foram retirados de veículos Nissan LEAF modelo 2012, cada um com capacidade de 24,5 kWh, proporcionando uma autonomia de 160 km quando os veículos eram novos. Cada conjunto de baterias é composto por 48 módulos conectados em série, Fig. 1, onde cada módulo possui uma tensão nominal de 7,4V e capacidade de 66 Ah. Os módulos utilizados consistem em quatro células da tecnologia LMO (Óxido de Manganês de Lítio), configuradas em 2s2p, o que significa duas células em série com outras duas em paralelo. Essas células, do tipo *pouch*, possuem uma tensão nominal de 3,7V e uma capacidade de 33 Ah.



Figura 1 - Conjuntos de baterias do Nissan LEAF aberto (Hohmann; Oliveira; Rütther, 2022).

2.1 Ensaios de Capacidade

O procedimento para condução do teste de capacidade pode ser dividido em duas fases distintas: a primeira engloba o carregamento da bateria, enquanto a segunda consiste na execução efetiva do teste de capacidade, envolvendo o descarregamento da bateria. Antes de iniciar a fase de carregamento, é necessário selecionar os módulos que serão ensaiados. O equipamento utilizado para realização dos ensaios é uma carga eletrônica NHR-9430-12, na qual possuiu uma tensão mínima de trabalho de 10V, por este motivo é necessário realizar todas as etapas deste processo com três células conectadas em série. Com o propósito de mitigar as variações de degradação ao longo do ciclo de vida inicial, optou-se por combinar módulos consecutivos e próximos fisicamente dentro do mesmo veículo. Portanto, os módulos 1,

2 e 3 foram selecionados, seguidos pelos módulos 4, 5 e 6, até o módulo 46, 47 e 48. Este procedimento foi aplicado consistentemente em todos os testes e veículos.

Com os módulos devidamente selecionados, inicia-se a fase de carregamento. Durante esse processo, os três módulos são conectados e submetidos a uma carga até atingirem a tensão de 25,2V (4,2V por célula), utilizando uma corrente de C/2. Monitora-se a tensão ao longo de todo o processo, e caso haja alguma disparidade de Estado de Carga (SOC) entre os módulos, este é removido da série e carregado separadamente. A corrente de corte para carga foi estabelecida em C/10. Em resumo, o objetivo desse processo é garantir que os três módulos alcancem a tensão máxima e a corrente de corte, seja de maneira conjunta ou individual, respeitando os requisitos que indicam a conclusão da carga total da bateria.

Após a conclusão bem-sucedida da primeira fase, procede-se à execução do teste de capacidade propriamente dito. Para isso, as três baterias carregadas são conectadas à carga eletrônica, configurando-se a corrente de descarga, dando início ao teste. A corrente utilizada nesse teste é de C/3, conforme definido na literatura (Braco *et al.*, 2020; Martinez-Laserna *et al.*, 2018), uma vez que não se dispõe do *datasheet* desta célula. Como mencionado anteriormente, a carga eletrônica realiza a contabilização de capacidade e energia drenada da bateria, dispensando a necessidade de medidas adicionais para a condução do teste.

Ao longo do teste, é efetuado o monitoramento da tensão de cada célula, visando garantir a equipotencialidade dos módulos e, por conseguinte, identificar qualquer degradação mais acentuada que possa antecipar o término do teste. O teste de capacidade é concluído quando qualquer célula atinge a tensão mínima de operação, estabelecida em 2,5V. Para determinação do estado de saúde das baterias ensaiadas basta dividir a capacidade aferida no teste pela capacidade em primeira vida.

2.2 Ensaios de Resistencia Interna

Para realização deste estudo, foi analisado o *Battery Energy Storage System* (BESS) com primeira e segunda vida localizado no Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Fotovoltaica/UFSC). O sistema de segunda-vida consiste em dois racks (Fig. 2a) conectados a um *Power Conversion System* (PCS), conversor bidirecional responsável pela carga e descarga das baterias. Cada rack é composto por baterias do Nissan Leaf, totalizando 105 módulos conectados em série, com uma tensão nominal de 787V e capacidade energética de 52,5 kWh em sua primeira vida.

Os racks são monitorados e protegidos individualmente por um *Battery Management Systems* (BMS) devido à necessidade de operação independente e limitações de hardware. Cada rack é constituído por conjuntos de módulos dispostos em 16 grupos (Fig. 2b). O ambiente tem controle de temperatura e umidade ajustados em 23°C e 60%, respectivamente.



Figura 2 - (a) Racks de baterias em segunda vida; (b) Conjuntos de baterias em segunda vida (Hohmann *et al.*, 2022).

O BMS empregado neste projeto é o Lithiumate Lithium-ion BMS (Fig. 3a), fabricado pela empresa americana Elithion. A escolha desse equipamento se deu devido à sua notável versatilidade e modularidade, proporcionando ao consumidor final a capacidade de configurar diversos parâmetros elétricos e de segurança. O BMS é compatível com diferentes químicas de baterias de lítio, apresenta balanceamento passivo e é acompanhado por um *software* (Fig. 3b) que facilita o monitoramento e a aquisição de dados durante a realização dos ensaios ou operação diária do banco.

A capacidade do BMS de coletar informações detalhadas é particularmente crucial para este estudo, pois os dados obtidos são fundamentais para a análise de viabilidade técnica das baterias em segunda vida. Para um controle mais minucioso e, conseqüentemente, uma operação mais segura do banco de baterias, a opção foi monitorar as baterias a nível de célula, não se restringindo apenas ao nível de módulo. As placas de medição entre os polos de um mesmo módulo, conforme mostrado na Fig. 2, realizam medições de parâmetros elétricos e ambientais. Essas informações são então comunicadas ao BMS, permitindo que ele tome decisões com base nessas análises.



Figura 3 - (a) BMS utilizado no BESS em segunda vida; (b) Software do BMS.

A abordagem metodológica para o teste de resistência interna revela uma influência da corrente de descarga, conforme evidenciado em estudos anteriores (Mousavi e Nikdel, 2014; Gonzalez-Longatt, 2006). Com o intuito de aprofundar essa análise, foram conduzidos testes empregando correntes de descarga de $C/4$, $C/2$ e $1C$, visando possíveis valores de corrente utilizados em aplicação de segunda vida, na qual é utilizada em regime de operação mais brando.

A natureza do teste, entretanto, apresenta algumas limitações decorrentes das características do PCS. Este sistema permite apenas a realização do teste com potência, resultando em pequenas variações na magnitude da corrente ao longo da descarga. Para contornar essa particularidade, será adotada a estratégia de calcular a média dos valores de corrente adquiridos durante o período de 20 segundos de descarga. O tempo para a realização do ensaio foi selecionado com o objetivo de ser suficientemente longo para que os efeitos dinâmicos da bateria não sejam observados ao longo do ensaio, mas suficientemente curto para que seu estado de carga não seja alterado.

Quanto ao cálculo da resistência interna foi aplicada a Eq. (1), onde é utilizado a tensão em circuito aberto (V_{oc}) em volts ligeiramente anterior ao início da descarga, valor de tensão em carga (V_t) em volts ao final do período de teste e corrente média em ampere ao longo do teste (I_{med}).

$$R_{int} = \frac{V_{oc} - V_t}{I_{med}} \quad (1)$$

Quanto à aquisição de dados, o software do BMS foi empregado para registrar as leituras de tensão e corrente durante o teste. Os registros de tensão serão capturados com três algarismos significativos e um erro de precisão de no máximo $\pm 15mV$. No caso das correntes, serão considerados dois algarismos significativos, com um erro de precisão não superior a $\pm 0,5A$, conforme especificações do fabricante.

Ao término do teste, os dados adquiridos foram integralmente utilizados na aplicação da Eq. (1), resultando no cálculo da resistência interna para cada uma das 420 células que compõem os dois racks do BESS de segunda vida. Esse procedimento proporciona uma compreensão mais aprofundada da integridade e desempenho do sistema em questão.

3. RESULTADOS

A seguir, são apresentados os resultados de capacidade, resistência interna e a correlação entre esses parâmetros para as baterias de segunda vida do Nissan Leaf. Estas análises são cruciais para determinar desempenho e a viabilidade dessas baterias em aplicações de armazenamento de energia.

3.1 Capacidade

A Tab. 1 destaca as variações de capacidade entre diferentes carros utilizados, também indica a quantidade de módulos medidos de cada carro, que variam de acordo com a disponibilidade de tempo e dos equipamentos empregados. A análise, baseada no valor médio da capacidade medida, revela uma diferença de 35% entre as capacidades médias, correspondendo a uma variação de 23 Ah no caso mais extremo. Mesmo em casos moderados, a variação ainda é expressiva, situando-se entre 10% e 15%. Essas disparidades ressaltam a importância dos testes de capacidade na classificação de células, especialmente ao considerar a formação de sistemas de armazenamento de segunda vida com módulos de origens diferentes.

Tabela 1 - Valores de estado de saúde referente aos carros testados (Hohmann; Oliveira; R  ther, 2022).

Carro #	1	2	3	4	5	6	7	8
Número de módulos medidos	15	18	9	12	24	21	12	12
SoH máxima	56,0%	67,7%	89,2%	60,3%	66,9%	72,6%	66,6%	60,5%
SoH média	51,8%	62,7%	88,0%	54,3%	62,6%	69,9%	63,2%	57,1%
SoH mínima	49,7%	57,9%	83,6%	47,8%	60,0%	64,1%	60,8%	56,1%
Variacão (máximo – mínimo)	6,30%	9,80%	5,60%	12,50%	6,90%	8,50%	5,80%	4,40%

Os resultados mostram uma grande varia  o entre capacidade para os diferentes carros analisados. Podemos inferir que a forma de utiliza  o dos veículos, notadamente como táxis, desempenha um papel crucial nas diferenças de capacidade observadas. A falta de acesso ao histórico de utiliza  o e informa  es do BMS veicular não impede a conclusão de que alguns veículos foram utilizados de forma mais severa ou prolongada do que outros, pois,    possível observar uma varia  o na capacidade remanescente das baterias. A utiliza  o de carregadores rápidos, frequentemente necessários para o retorno rápido ao trabalho, e cargas lentas ao longo de noites inteiras contribuem para diferentes níveis de degrada  o. A análise ressalta como a intensidade e frequência da utiliza  o podem influenciar no processo de degrada  o das baterias de íon de lítio.

Outro ponto destacado    a discrepância nos estados de saúde entre células do mesmo veículo, revelando um desequilíbrio considerável. Este fen  meno    mais evidente quando comparadas as células dos módulos iniciais e finais do carro, sugerindo uma varia  o mais acentuada nessas extremidades possivelmente por conta de temperatura não homog  nea dentro do conjunto de baterias. Isso levanta preocupa  es sobre problemas de balanceamento e autonomia ao formar sistemas de armazenamento de segunda vida sem testes de sele  o de módulos. Como comentado anteriormente, o objetivo principal deste artigo não    determina  o de capacidade mais sim sua correla  o com resistência interna e para informa  es mais detalhadas    recomendável consultar o artigo anterior (Hohmann; Oliveira; R  ther, 2022).

3.2 Resistência Interna

A Fig. 4 apresenta os resultados dos ensaios de resistência interna para as diferentes taxas de descargas utilizadas. Primeiramente,    possível notar que ao incrementar a corrente de avalia  o, ocorre uma redu  o no intervalo entre os valores máximos e mínimos para todos os veículos. Consequentemente, todos os dados se concentram mais em uma faixa, resultando em uma menor variabilidade nos resultados. Este fen  meno está alinhado com o que    discutido na literatura, pois a realiza  o do teste com correntes pequenas, como C/2 ou C/4, não    recomendada. Para garantir a confiabilidade dos resultados,    aconselhável empregar correntes superiores a 1C (He; Xiong; Fan, 2011; Mousavi e Nikdel, 2014; Thakkar, 2021). Assim, o uso de uma corrente inadequada para o teste pode resultar em conclusões e caracteriza  es equivocadas.

Os veículos 2, 4, 5, 7 e 8 demonstraram uma redu  o na amplitude interquartil    medida que a corrente do teste aumentava, indicando que 50% dos dados se aproximaram mais da média com o aumento da corrente. Contrariamente, no caso do veículo 6, a amplitude interquartil do teste C/2 foi menor que a do 1C. Isso pode ser atribuído    presença de *outliers*, valores excluídos da análise devido    sua significativa disparidade. No caso do veículo 6, dois *outliers* foram identificados, representando 28 módulos que foram excluídos da análise.

Observa-se que os veículos 4 e 5 apresentaram um número elevado de *outliers*, sendo valores descartados por serem consideravelmente discrepantes dos demais resultados. Portanto,    possível concluir que a variabilidade dos resultados com corrente de C/2 para os veículos 4 e 5    significativamente maior do que em outras correntes e veículos. Esse comportamento provavelmente está relacionado ao fato de que essa corrente pode não ser apropriada para o teste, resultando em valores que não refletem a realidade.

Outro padrão observado refere-se aos resultados obtidos no teste com corrente intermediária, os quais apresentaram valores médios superiores em compara  o com outras correntes. Por outro lado, os testes realizados com corrente C/4 resultaram em valores médios de resistência mais baixos, exceto para o veículo 5, que teve esse valor como intermediário.

Para a corrente mais elevada, notou-se um valor médio na posição intermediária dos resultados, com exceção do veículo 5, que apresentou esse valor como mínimo.

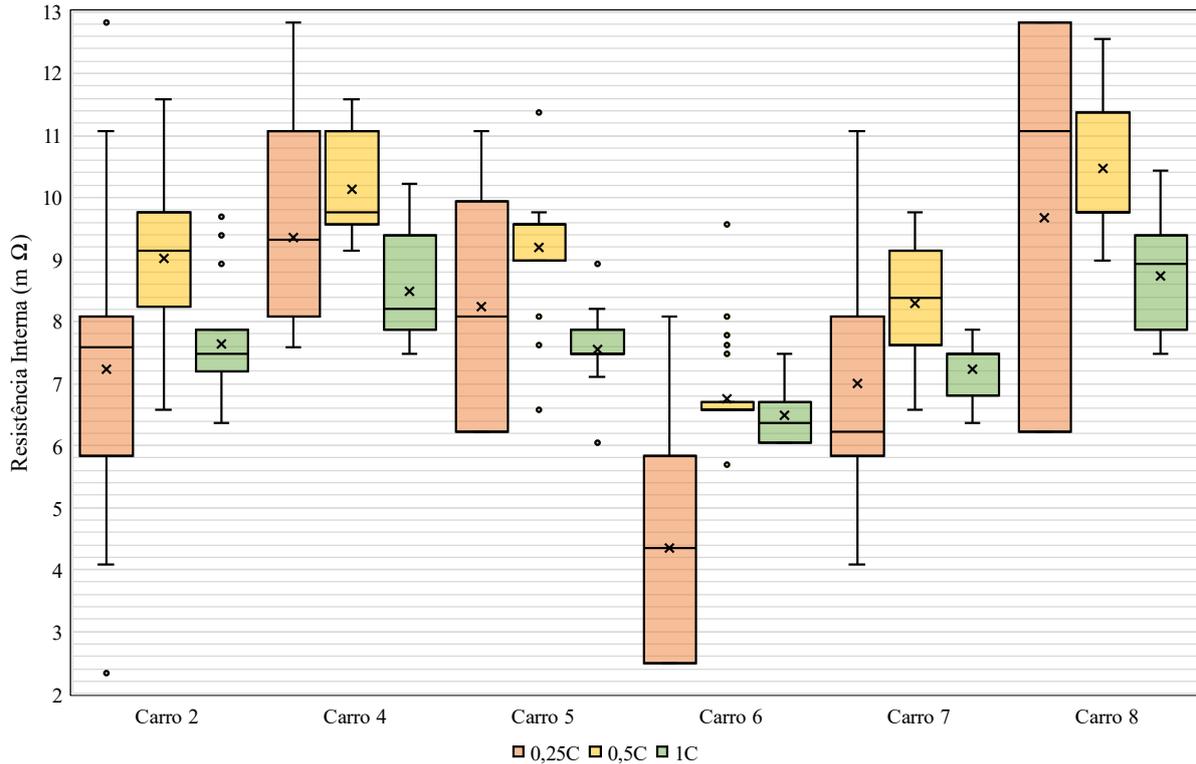


Figura 4 - Resultados ensaio de resistência interna.

Todas essas considerações estão intrinsecamente ligadas à corrente utilizada no teste. Assim, conforme evidenciado nos resultados e orientado pela literatura, é recomendável empregar correntes superiores a 1C para a determinação da resistência interna.

Uma comparação de grande relevância consiste em confrontar os dados de resistência interna com os de capacidade de um mesmo veículo em relação aos demais. Essa análise visa observar a degradação de maneira abrangente, uma vez que esses dois parâmetros são os principais indicadores de deterioração da bateria (Braco *et al.*, 2020; Martinez-Laserna *et al.*, 2018). À medida que o tempo de utilização da bateria avança, espera-se uma redução na capacidade e um aumento na resistência interna, como evidenciado pelos resultados apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 - Comparativo de capacidade e resistência interna.

Número do Carro	Resistencia Média – 1C (mΩ)	Capacidade Média (%)
6	6,48	69,89
7	7,22	63,21
5	7,55	62,71
2	7,63	62,64
4	8,49	57,92
8	8,72	54,32

Analisando os dados, é possível notar uma correlação entre os fatores de degradação, conforme mencionado na literatura. Os módulos do veículo 6 exibem a maior capacidade remanescente e a menor resistência interna, um resultado consistente com o que é encontrado na literatura. Os módulos do veículo 7 seguem a mesma conclusão aplicada ao veículo 6. Por outro lado, os veículos 5 e 2 apresentaram uma inversão: o veículo 5 é o terceiro mais degradado em termos de capacidade e o quarto em termos de resistência interna, enquanto o veículo 2 é seu antagonista em posição. No entanto, observa-se que os veículos 5 e 2 têm valores muito próximos de capacidade e resistência interna, tornando essa inversão de posição menos relevante. O principal objetivo da Tab.2 é destacar a correlação do declínio entre os parâmetros.

Outra maneira de analisar a correlação entre a diminuição da capacidade e o aumento da resistência é por meio da Fig. 5. O gráfico fornecido representa a capacidade em relação aos resultados de resistência interna a 1C de cada bateria. Assim, torna-se evidente a relação desses dois parâmetros à medida que a bateria se degrada. Além dessa observação, a Fig. 5 também oferece a possibilidade de traçar uma linha de tendência para expressar matematicamente essa relação.

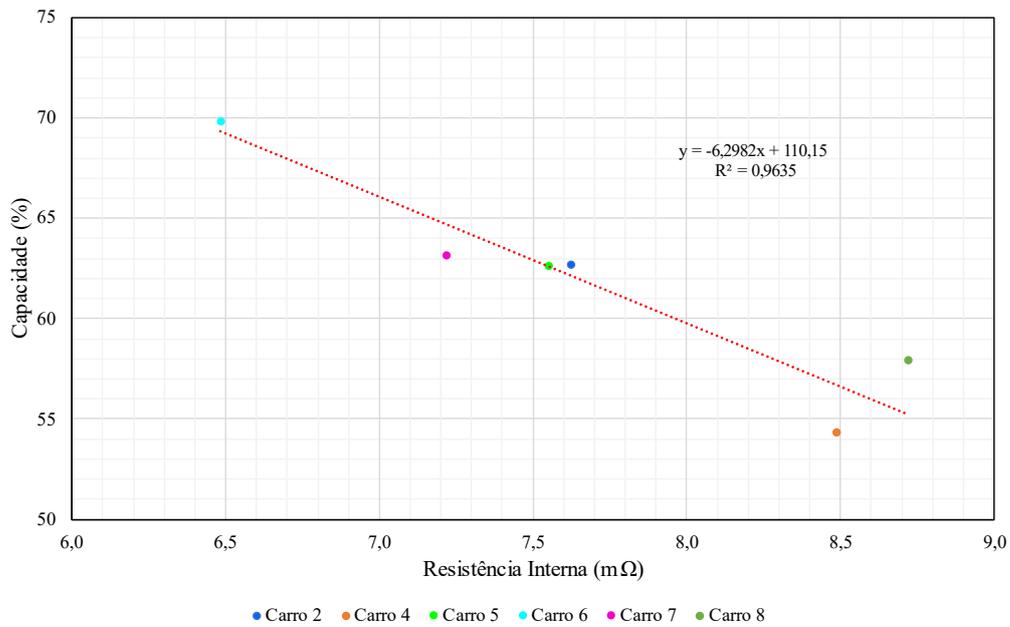


Figura 5 – Correlação entre capacidade remanescente e resistência interna.

A equação que descreve esse comportamento é de primeiro grau, indicando uma relação linear entre capacidade e resistência interna, conforme mencionado na literatura (Braco *et al.*, 2020; Martinez-Laserna *et al.*, 2018). Dessa forma, foi possível obter um valor de $R^2 = 0,9635$. Apesar de não ser tão próximo de 1, esse valor é aceitável dada a variabilidade envolvida em todos os testes. Um aspecto muito interessante dessa curva apresentada é a capacidade de realizar sua extrapolação para obter a Fig. 6.

Assim, é viável determinar a resistência interna a partir de um valor de capacidade, ou realizar o processo reverso, o que é mais vantajoso. O teste de capacidade é demorado, tornando sua realização em larga escala praticamente inviável. Por outro lado, o teste de resistência interna é rápido e pode ser concluído em apenas alguns segundos. Com a ajuda da curva apresentada na Fig. 6, seria possível estimar um parâmetro que leva horas para ser determinado, ou seja, a capacidade da bateria, com base em um parâmetro que pode ser determinado em segundos, a resistência interna. É importante considerar as ressalvas feitas anteriormente nesta análise, mas a capacidade de agilizar o processo de caracterização ou obter uma noção de um parâmetro quando o outro já foi determinado é uma conclusão de grande relevância.

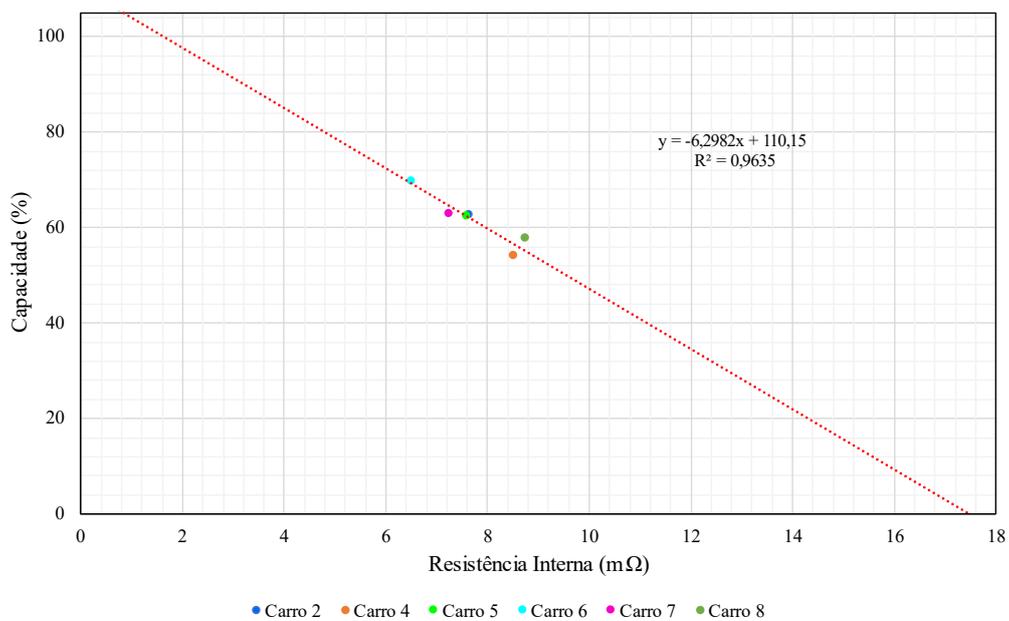


Figura 6 - Extrapolação da correlação entre capacidade remanescente e resistência interna.

4. CONCLUSÃO

Diante do elevado custo associado à aquisição e reciclagem de baterias de lítio, aliado ao crescente impulso global em direção à eletrificação de veículos, as baterias em segunda vida emergem como uma alternativa promissora para estender a vida útil desse componente. Devido à sua modularidade, alta densidade de energia e potência, essas baterias podem ser aplicadas em diversos contextos, como alimentação de eletrodomésticos em áreas com intermitência ou ausência de rede elétrica básica, postes off-grid para iluminação pública e formação de sistemas de armazenamento de energia (BESS) em containers contendo centenas de baterias. No entanto, a implementação efetiva dessa tecnologia enfrenta desafios significativos, notadamente no desenvolvimento de métodos eficientes para caracterização das baterias.

O presente estudo concentrou-se na exploração das diferentes abordagens para determinação de parâmetros de resistência interna em baterias em segunda vida. Além disso, foram conduzidos testes práticos para a determinação desses parâmetros, utilizando módulos de baterias provenientes de veículos elétricos do modelo Nissan Leaf. Os testes de resistência interna demonstraram ser de rápida execução, com resultados consistentes, especialmente quando realizados com corrente 1C. Os resultados obtidos permitiram identificar uma relação entre capacidade e resistência interna, proporcionando o desenvolvimento de equações matemáticas que quantificam essa interconexão. No entanto, também se evidenciou a dificuldade na formação de grandes arranjos de baterias para constituir um BESS, devido à considerável variabilidade na degradação das células, uma questão discutida tanto no âmbito intra-veicular quanto entre diferentes automóveis.

O desafio central observado reside na realização de uma análise técnica confiável e eficiente, tornando essa aplicação viável em larga escala. O uso de baterias de lítio em segunda vida promete aumentar a viabilidade econômica e mitigar questões ambientais associadas a essa tecnologia de armazenamento de energia. Contudo, para efetivar essa promessa em escala global, é imperativo o desenvolvimento de pesquisas e técnicas inovadoras na área, visando auxiliar na caracterização e modelagem dos parâmetros elétricos dessas baterias.

Para próximos trabalhos serão realizadas validação da equação determinada com novos carros, implementação em outras químicas de bateria de lítio e detalhamento do modelo utilizado para determinação do circuito equivalente da bateria.

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 à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Engie Brasil Energia e Guascor do Brasil pelo apoio financeiro no âmbito do projeto P&D Estratégico ANEEL 021/2016, e 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

- Braco, E. et al. Experimental assessment of cycling ageing of lithium-ion second-life batteries from electric vehicles. *Journal of Energy Storage*, v. 32, p. 101695, 2020. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X20315322>>.
- Bloch, C. et al. Breakthrough batteries: Powering the era of clean electrification. Rocky Mountain Institute, 2019.
- Cicconi, P. et al. Feasibility analysis of second life applications for li-ion cells used in electric powertrain using environmental indicators. In: 2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON). 2012. p. 985–990.
- Dana, C. Após 4 anos, nissan encerra programa experimental de táxis elétricos. 2016. Disponível em: <<https://dana.com.br/canaldana/2016/04/20/apos-4-anos-nissan-encerra-programa-experimental-de-taxis-eletricos/>>.
- Dürr, M. et al. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, v. 161, n. 2, p. 1400–1411, 2006. ISSN 0378-7753. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775306000401>>.
- González Longatt, F. M. Circuit based battery models: A review. In: Proceedings of 2nd Congreso IberoAmericano De Estudiantes de Ingenieria Electrica, Puerto la Cruz, Venezuela. 2006.
- He, H.; Xiong, R.; Fan, J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies*, v. 4, n. 4, p. 582–598, 2011. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/4/4/582>>.

- Hohmann, M. et al. Avaliação de métodos para a caracterização de baterias de lítio em segunda vida. Florianópolis, SC., 2022
- Hohmann, M.; oliveira, A. K. V. de; Rütther, R. Análise de viabilidade técnica da utilização de baterias de segunda vida retiradas de veículos elétricos. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS. 2022. p. 1–8.
- Martinez-Laserna, E. et al. Technical viability of battery second life: A study from the ageing perspective. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 54, n. 3, p. 2703–2713, 2018.
- Mousavi G., S.; Nikdel, M. Various battery models for various simulation studies and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 32, p. 477–485, 2014. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000598>>.
- Pressley, B. Conquering the darkness: primitive lighting methods. Bulletin of Primitive Technology, v. 12, p. 41–44, 1996.
- Saxena, S. et al. Quantifying ev battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. Journal of Power Sources, v. 282, p. 265–276, 2015. ISSN 0378-7753. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775315000841>>.
- Strickland, D. et al. Estimation of transportation battery second life for use in electricity grid systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, v. 5, n. 3, p. 795–803, 2014.
- Thakkar, R. R. Electrical equivalent circuit models of lithium-ion battery. Management and Applications of Energy Storage Devices, IntechOpen, 2021.

EVALUATION OF METHODS FOR CHARACTERIZATION OF SECOND LIFE LITHIUM BATTERIES

Abstract. *With the advancement of the electromobility market, substantial investments in financial and environmental resources in lithium batteries have motivated the search for alternatives to minimize this high economic and environmental cost. In this context, the proposal emerges to repurpose batteries removed from electric vehicles, known as "second-life batteries," due to their high energy and power density. These batteries can be reused in new applications with lower energy demand, such as supporting photovoltaic solar generators to provide electricity in areas isolated from the conventional electrical grid. In the face of this scenario, it becomes crucial to assess the technical characteristics of these batteries, analyzing the technical feasibility of their use, their electrical parameters, and determining their lifespan. This study aims to examine methodologies available in the literature for determining the electrical parameters of lithium batteries, select the most appropriate method, and apply it to determine the capacity and internal resistance of batteries from 2012 Nissan LEAF vehicles that served as taxis in São Paulo/SP and Rio de Janeiro/RJ for five years. The results obtained revealed reliable capacity measurement tests for the battery modules, although with a time-consuming execution. Internal resistance tests, on the other hand, were conducted more efficiently, using different current values, with the nominal battery current providing less variable results. Variations in electrical parameters were observed within the same vehicle, possibly associated with internal temperature, as well as variations between vehicles. A mathematical relationship between capacity and internal resistance was established based on the average values found in practice. It was concluded that second-life batteries represent a viable alternative to extend the lifespan of lithium batteries and optimize the production process, although large-scale characterization still presents challenges.*

Keywords: *Second-Life Battery, Lithium Battery Characterization and Electric Vehicles.*