COMPARATIVO TÉCNICO ENTRE BANCOS DE BATERIAS DE PRIMEIRA E SEGUNDA VIDA PARA APLICAÇÃO ON-GRID DE PORTE COMERCIAL

Vinícius Zago Cantú – viniciuszac@gmail.com
Aline Kirsten Vidal de Oliveira
Marília Braga
Matheus Hohmann
Amanda Mendes Ferreira Gomes
Daniel Odilio dos Santos
Ricardo Rüther
Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

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

Resumo. *Veículos elétricos são uma tecnologia alternativa para redução das emissões na atmosfera, quando combinados com a geração de energia de fontes renováveis. Porém, após alguns anos de uso, suas baterias perdem parte da capacidade original e precisam ser substituídas. Estudos e aplicações recentes apontam a viabilidade de reuso dessas baterias após serem retiradas de veículos elétricos, aplicação conhecida como segunda vida da bateria. Esse trabalho apresenta a aplicação de segunda vida de baterias provenientes de veículos Nissan LEAF para uso em um banco de baterias de porte comercial (100kWh) e comparação com um banco de primeira vida de mesmo porte instalado no mesmo ambiente e submetido às mesmas condições. A medição de capacidade dos dois bancos foi realizada através de ensaios de carga e descarga que demonstraram que ambas foram reduzidas, devido às perdas inerentes ao sistema, como cargas auxiliares e consumo interno dos equipamentos. A capacidade real em relação à nominal do banco de segunda vida, como esperado, foi inferior ao de primeira vida, em razão de fatores como a limitação de tensão máxima e mínima de operação do banco pelo Power Conversion System (PCS), o aumento da resistência interna das células, desequilíbrio entre as células, o aumento de temperatura, entre outros. O uso de baterias de segunda vida para esse tipo de aplicação se demonstrou tecnicamente viável, porém apresenta desafios como a falta de sistemas eletrônicos de controle compatíveis no mercado e a necessidade de caracterização dos módulos para o uso de baterias com diferentes históricos em um mesmo sistema.*

Palavras-chave: *Armazenamento de Energia, Veículos Elétricos, Bateria de Segunda Vida*

1. INTRODUÇÃO

A expansão mundial da tecnologia solar fotovoltaica vem contribuindo para a diversificação das matrizes energéticas de diversos países e é componente fundamental para o combate às mudanças climáticas. Outra tecnologia que vêm sendo vista como aliada na transição energética é a mobilidade elétrica, que vem se expandindo muito nos últimos anos (de Oliveira et al., 2020). Porém, a expectativa de adoção em grande escala de veículos elétricos (VE) resultará no descarte de grandes quantidades de baterias de íons de lítio ao final de sua vida útil para a tração elétrica, visto que estas são as mais utilizadas pra esta aplicação, devido à alta potência disponível, capacidade energética e durabilidade (Mirzaei Omrani and Jannesari, 2019). Essas baterias, no entanto, são ainda totalmente adequadas para uso em sistemas estacionários (Ahmadi et al., 2017). O uso desta segunda vida das baterias de lítio é visto na literatura como uma oportunidade para aumentar a competitividade dos veículos elétricos, diminuindo os preços de venda e popularizando a tecnologia.

A segunda vida de baterias de VEs é comumente definida como a utilização de baterias para uma segunda aplicação, a partir do momento que a capacidade de carga atinge 70% a 80% da capacidade original (Mirzaei Omrani and Jannesari, 2019). O desempenho elétrico das baterias de segunda vida é semelhante ao de baterias de íons de lítio novas, mas a redução da capacidade de carga representa para os VEs uma limitação muito grande, razão pela qual elas são descartadas (Assunção, Moura, and de Almeida, 2016). Para aplicações estacionárias esta redução de capacidade representa apenas a ocupação de um maior volume em comparação ao volume de baterias novas. Assim, as baterias de segunda vida têm uma excelente razão custo/benefício para sistemas energéticos estacionários.

A tecnologia solar fotovoltaica associada às baterias de segunda vida de íons de lítio pode disponibilizar energia renovável e de baixo impacto ambiental, produzida junto ao ponto de consumo (geração distribuída) e em quantidade compatível com toda a demanda energética adicional resultante da mobilidade elétrica. Adicionalmente, baterias de segunda vida podem ser utilizadas em conjunto com usinas de geração centralizada, visando reduzir a intermitência na geração das fontes renováveis solar e eólica (Campos et al., 2019). Com isso, a avaliação dos desafios e vantagens técnicas

da aplicação desses sistemas é de extrema relevância. Neste contexto, o laboratório Fotovoltaica/UFSC vem desenvolvendo desde 2018, em parceria com a fabricante de automóveis japonesa Nissan, uma linha de pesquisa para a utilização em segunda vida das baterias descartadas de veículos Nissan LEAF. Essas baterias foram testadas, selecionadas e montadas em sistemas de armazenamento para diversas aplicações, desde sistemas de pequeno porte para aplicações de refrigeração e iluminação *off-grid*, até o sistema avaliado neste estudo, de porte comercial e operação *on-grid*, visando avaliar o desempenho técnico do sistema em ambiente de operação real em comparação com um sistema de primeira vida.

Este trabalho tem como objetivos analisar a viabilidade do uso de um sistema de armazenamento que utilize baterias de íons de lítio de segunda vida provenientes de veículos elétricos, analisar os aspectos técnicos da instalação de um sistema de armazenamento de segunda vida para porte comercial (aproximadamente 100 kWh), elencar as principais barreiras na implementação de um sistema que utilize baterias de segunda vida, apresentar a capacidade real disponível com base nas medições em um sistema piloto e comparar com sistema de primeira-vida submetido a condições semelhantes.

1.1 Projeto e contexto

Este trabalho faz parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento executado pelo Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (Fotovoltaica/UFSC) no contexto da chamada estratégica 021/2016 da ANEEL e contou com o apoio financeiro da Engie e da Guascor, além das doações das baterias descartadas de 12 veículos Nissan LEAF, cedidas pela NISSAN em 2018 para subsidiar os estudos do laboratório Fotovoltaica/UFSC nesta área. O projeto intitulado "Um investimento = múltiplas funções: Desenvolvimento e avaliação técnica, regulatória e econômica de sistemas de armazenamento de energia aplicados a sistemas de geração centralizada e distribuída." objetiva explorar todos os possíveis papéis que um sistema de armazenamento de energia pode desempenhar. Neste contexto, com o objetivo de avaliar as aplicações de baterias em geração distribuída de médio porte comercial, foi instalado um sistema de armazenamento de energia de 200 kWh de baterias de íons de lítio no laboratório Fotovoltaica/UFSC em Florianópolis-SC. Dentre a capacidade de armazenamento supracitadas, 100 kWh são compostos de baterias novas, aqui denominadas como primeira vida, e os outros 100 kWh são advindos de baterias usadas provenientes de veículos elétricos, aplicação conhecida na literatura como segunda vida.

2. BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Dentre as diversas características técnicas de baterias, os principais conceitos utilizados nesse trabalho são: capacidade, SOC (Estado de carga, do inglês *State of Charge*), profundidade de descarga DOD (Profundidade da descarga, do inglês *Depth of Discharge*) e taxa C. A capacidade é a quantidade máxima de energia que teoricamente pode ser armazenada pela bateria. O SOC indica a energia armazenada remanescente na bateria em razão da capacidade total, enquanto o DOD indica a energia já descarregada em razão da capacidade total (Narayan et al., 2018), de forma que o SOC e DOD são complementares. A taxa C corresponde a uma taxa de carregamento ou descarregamento igual a capacidade da bateria por hora. Dessa forma, para uma bateria de capacidade 10 kWh, uma descarga a 1C corresponde a uma potência de 10 kW, enquanto uma descarga a 0,3C corresponde a 3 kW.

As baterias de íons de lítio são necessariamente conectadas a um sistema de gerenciamento eletrônico conhecido como BMS (*Battery Management System*) para garantir o funcionamento e segurança das baterias, e que possui como principais funções o monitoramento do estado de carga e limitação de tensão máxima e mínima (Kim and Cho, 2013). A eficiência global do banco de baterias pode ser analisada através de um indicador conhecido como *roundtrip efficiency*, que é definido como a relação entre a energia de descarga fornecida e a energia de carga recebida ao carregar e descarregar consecutivamente um banco de baterias. Os ensaios de carga e descarga devem ser realizados nas mesmas taxas, em amplitudes de estado de carga idênticas, medidos no mesmo ponto e incluir cargas parasitas e auxiliares (Electric Power Research Institute EPRI, 2019).

3. CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO

O sistema de armazenamento utilizado neste estudo compreende um banco de baterias de primeira vida e um de segunda vida, ambos conectados a um *Power Conversion System* (PCS), sendo que cada banco é dividido em dois racks, conforme apresentado na Fig. 1. O PCS pode ser conectado ao banco de primeira ou de segunda vida, porém não aos dois bancos simultaneamente. No banco de primeira vida, os dois racks funcionam apenas juntos, enquanto no banco de segunda vida os dois racks podem entrar em operação juntos ou individualmente.

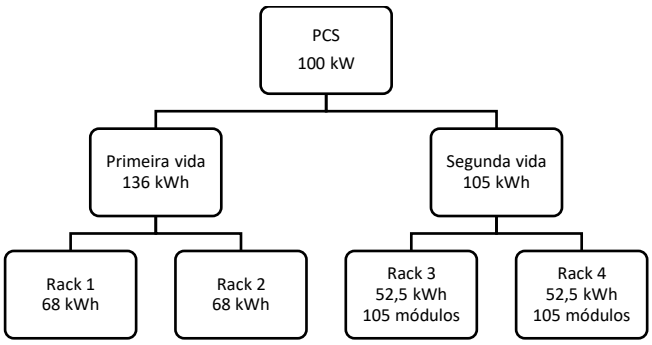


Fig. 1 - Configuração do sistema de armazenamento, detalhando a configuração e capacidade nominal dos bancos de baterias de primeira e segunda vida.

O banco de baterias de primeira vida (Fig. 2) consiste em baterias da família M2F do fabricante Samsung SDI, enclausuradas em módulos que são acomodados em racks, com BMS de três níveis integrado da própria Samsung SDI. Cada rack possui capacidade nominal (0,3C) de 68 kWh, totalizando 136 kWh. O banco possui tensão nominal de 728 V e a amplitude de tensão varia entre 630 V e 822 V.

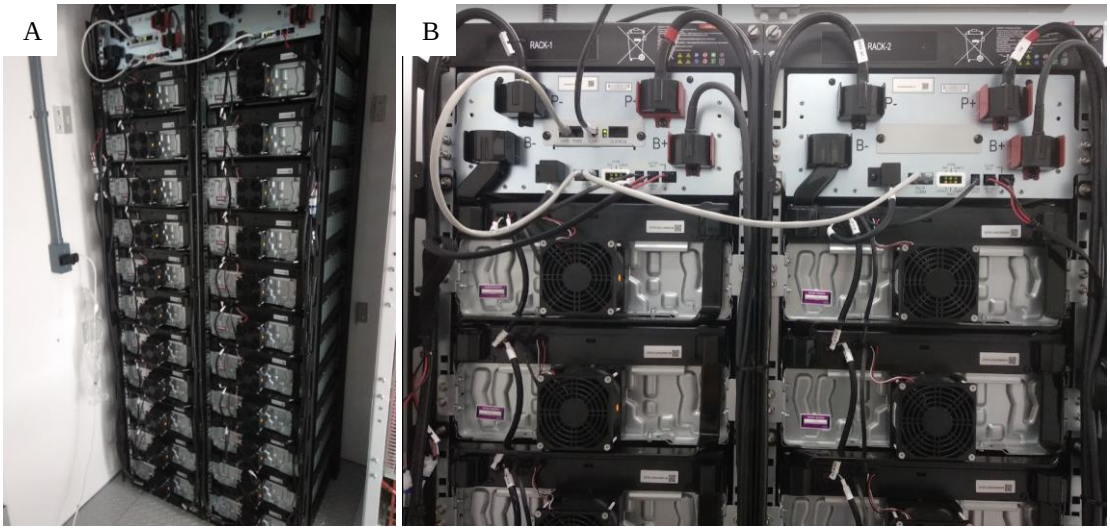


Fig. 2 - A: Racks 1 e 2 do banco de baterias de primeira vida; B: detalhe superior dos racks 1 e 2 com caixa de junção e sistema de BMS, além dos três primeiros módulos de bateria de cada rack.

Para o banco de baterias de segunda vida, foram utilizados módulos de bateria do Nissan LEAF modelo 2012 (Fig. 3A), os quais contém quatro células de íons de lítio cada, na configuração duas em série e duas em paralelo, resultando em uma tensão equivalente nominal de 7,5 V, capacidade (0,3C) de 66 Ah (495 Wh) e uma massa total de 3,7 kg. As células são construídas no formato de bolsas (Fig. 3B) e usam tecnologia LMO-LNO/GR (cátodo de $LiMn_2O_4$ com $LiNiO_2$ e ânodo de grafite). O sistema de gerenciamento da bateria (BMS) utilizado é do modelo Lithiumate Lithium-ion BMS da fabricante americana Elithion, que foi selecionado devido às características técnicas que inclui a versatilidade e adaptabilidade a diversos tipos de bateria e a fácil instalação e parametrização. O BMS conta com monitoramento de tensões e temperatura de cada célula e usa um sistema passivo de balanceamento entre elas, que usa um resistor para descarregar as células com tensões mais elevadas que as outras.

Os módulos do banco de segunda vida foram divididos em dois racks individuais (como mostrado na Fig. 1 e na Fig. 4), conectados em paralelo ao controlador PCS. Em cada rack, foram montados 105 módulos em série, organizados em 16 bancos com seis ou sete módulos em cada grupo (Fig. 4). Em cada banco, os módulos foram distanciados em 11 mm para melhorar a refrigeração através da circulação de ar. Os módulos foram retirados de seis veículos com aproximadamente cinco anos de uso (cada veículo contém 48 módulos, totalizando 23,8 kWh). O banco de segunda vida possui tensão nominal de 787 V e a amplitude de tensão varia entre 570 V e 870 V.

A capacidade energética nominal de cada rack é de 52,5 kWh quando considerada a capacidade nominal de primeira vida de cada módulo. Quando testados individualmente, os módulos de segunda vida apresentam perda de cerca de 40% da capacidade inicial. Dessa forma, a capacidade de cada rack é estimada em 31,5 kWh, totalizando 62,9 kWh de capacidade total do banco com dois racks. Uma amostra dos módulos utilizados foi testada para verificação de seus parâmetros. Os testes incluíram um ciclo completo de carga e descarga a 0,3C, com verificação das tensões máximas e mínimas durantes os testes. Foram testadas as capacidades de ao menos seis módulos de cada carro e selecionados carros que apresentaram capacidade superior a 60% da capacidade nominal original.

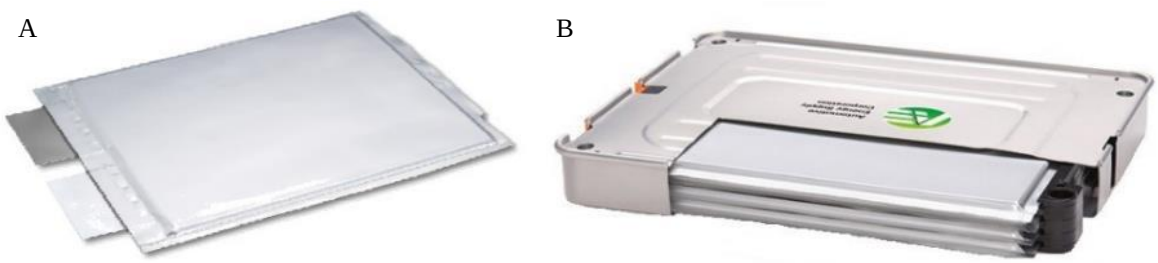


Fig. 3 - A: Célula individual do tipo bolsa; B: módulo de bateria que contém quatro células. Fonte: AESC, 2018.

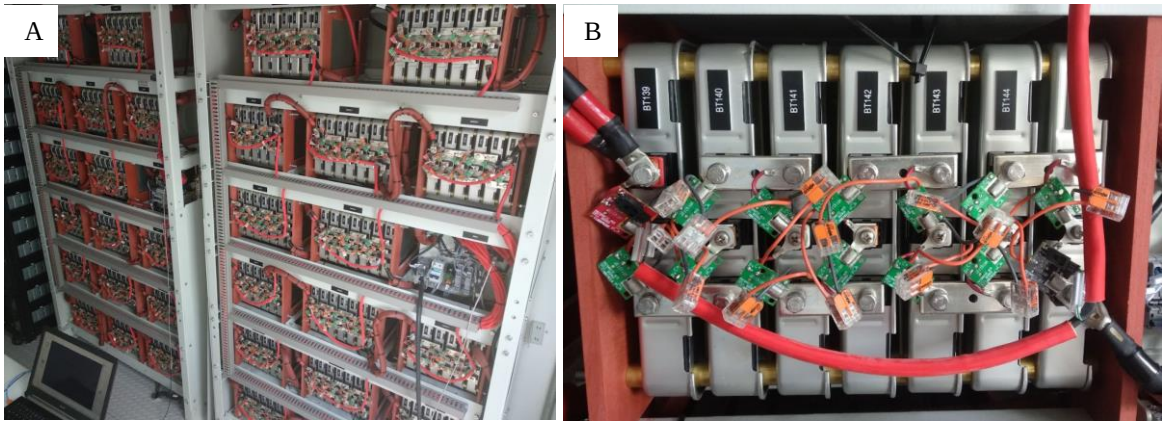


Fig. 4 - A: Racks do banco de segunda vida; B: grupos de sete módulos para montagem do banco de baterias de segunda vida.

Os bancos de baterias (primeira e segunda vida) foram instalados em um container, preparado para essa aplicação, nas dependências do laboratório Fotovoltaica/UFSC em Florianópolis, SC. O container está dividido em duas salas, a primeira acomoda os dois bancos de baterias (primeira e segunda vida) e na segunda ficam os equipamentos de controle e potência, como quadros elétricos CC e CA, PCS e transformador, UPS do sistema, PLC, *datalogger* e IHM.



Fig. 5 - A: Foto externa do container do sistema de armazenamento; B: sala com equipamentos de controle e potência; C: sala com os bancos de baterias.

O ambiente que contém os bancos de baterias de primeira e segunda vida é condicionado artificialmente por dois condicionadores de ar de 36.000 BTUs, configurados para manter a temperatura ambiente em 23°C, e por um desumidificador de 313 W, configurado para manter a umidade relativa do ar menor que 60%. A sala também está protegida com sistema de detecção e extinção de incêndio com base em aerossol de sais de potássio. O sistema inclui equipamentos para medição das variáveis necessárias para o controle e monitoramento do equipamento, dentre elas:

- Potência ativa e reativa;
- Tensão do banco de bateria;
- Corrente elétrica;

- SOC (*State Of Charge*) – Estado de carga da bateria;
- Tensão individual das células (medidas para controle, não armazenadas).

De acordo com Electric Power Research Institute (EPRI, 2019), a avaliação do Sistema de Armazenamento de Energia (Energy Storage System - ESS) deve incorporar todos os componentes, incluindo, mas não se limitando a, meios de armazenamento (bateria, *flywheel*, etc.), cargas auxiliares (aquecedores de processo, bombas, resfriamento, etc.), equipamento de conversão de energia, equipamento HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning* – equipamento de ventilação, aquecimento e condicionamento de ar) e o transformador de energia no ponto de acoplamento comum à rede. Dessa forma, os resultados do teste fornecerão informações de capacidade úteis para validar a capacidade de entrega de energia do ESS testado como um todo.

Os dados das medições da instalação analisada nesse trabalho são coletados através de *datalogger* e registrados em banco de dados SQL. O multimedidor das grandezas elétricas mede a potência do PCS diretamente no ponto de conexão à rede do prédio. Assim, as medições de capacidade apresentadas neste trabalho representam a energia fornecida pelo ESS diretamente no ponto de conexão do mesmo com a rede, já sendo descontados consumos energéticos de cargas auxiliares como do transformador de acoplamento, do BMS, do equipamento de HVAC e do sistema de prevenção de incêndio.

Para a avaliação da capacidade real dos dois bancos de baterias, foram realizados procedimentos controlados de carregamento e descarregamento, com potência limitada de acordo com a taxa C do ensaio. A potência utilizada para a carga e descarga nos ensaios foi de 30 % da taxa nominal de descarga (0,3C, equivalente a 30 kW). Esse valor foi selecionado para permitir um comparativo com os dados apresentados nas fichas técnicas das baterias, onde os fabricantes (AESC e Samsung) apresentam a capacidade da bateria na taxa 0,3C. Os ensaios foram realizados entre os estados de carga (SOC) mínimo de 10% e máximo de 90%.

Em cada ensaio de medição de capacidade dos bancos de baterias, foram realizados dois ciclos completos de carga e descarga, iniciando com a bateria no nível mais baixo. A energia total utilizada nos ensaios de carga e descarga foi calculada através da integral da potência (P) medida entre o tempo de início (t_0) e fim (t) do ensaio (Eq. 1), com resultado apresentado em kWh.

$$Energia\ [kWh] = \int_{t_0[inicial]}^{t[final]} P_{ensaio}[kW] * dt \qquad (1)$$

4. RESULTADOS

Na Fig. 6 e na Fig. 7 são apresentados dados de alguns ensaios realizados nos bancos de baterias de primeira vida e segunda vida, respectivamente. Nos gráficos, a linha em azul representa a potência em kW (escala no eixo vertical esquerdo) ao longo do tempo, onde valores negativos indicam que a potência é entregue da bateria para a rede (descarregamento) e valores positivos indicam que a potência é entregue da rede para a bateria (carregamento). A linha laranja representa a tensão da bateria em Volts (escala no eixo vertical direito) ao longo do tempo. Os intervalos de cargas (C1 e C2) e descargas (D1 e D2) estão destacados nos gráficos para exemplificação do comportamento das baterias durante alguns ensaios.

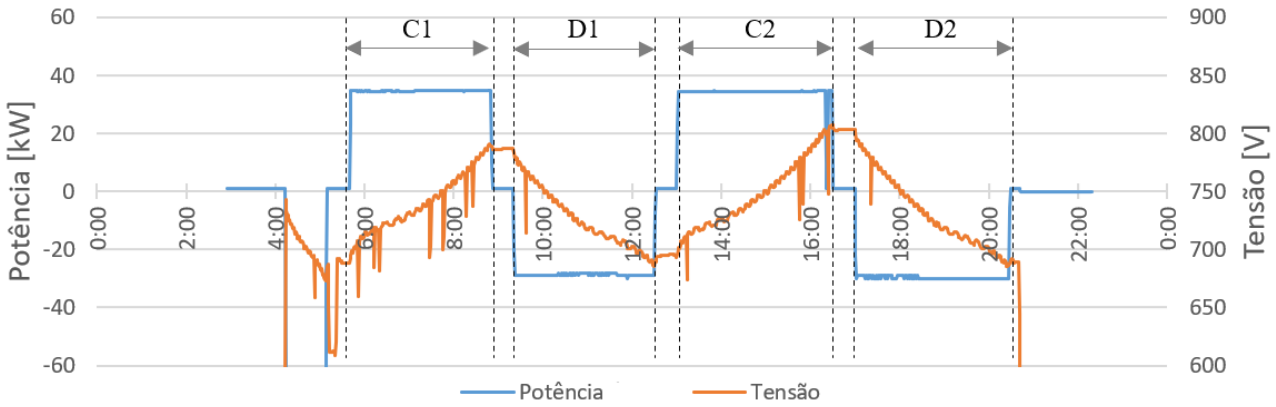


Fig. 6 - Ensaios de carga e descarga do banco de primeira vida, realizados em 02/11/2021. Os períodos C1 e C2 representam cargas, enquanto D1 e D2 representam descargas.

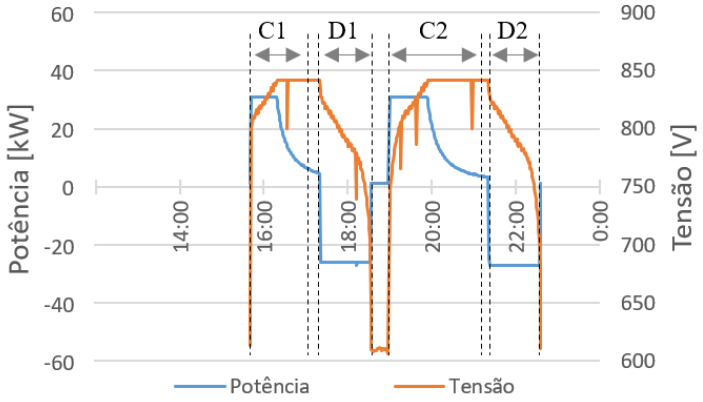


Fig. 7 - Ensaios de carga e descarga do banco de segunda vida, realizados em 12/12/2021. Os períodos C1 e C2 representam cargas, enquanto D1 e D2 representam descargas.

A capacidade da bateria é calculada a partir da média dos resultados obtidos nos ensaios de descarregamento. O banco de primeira vida foi ensaiado com os dois racks (R1 e R2) conectados simultaneamente, enquanto o banco de segunda vida foi ensaiado de duas formas: com os dois racks em paralelo (R3 e R4) e apenas com o rack 3 (R3). Em todos os ensaios, a taxa de descarregamento utilizada foi 0,3C e a faixa de estado de carga (SOC) utilizada foi de 10% a 90%. Na Tab. 1 são apresentados os resultados de medição realizados para os dois bancos de baterias, onde constam os valores médio, máximo e mínimo de capacidade encontrados nos ensaios de descarregamento.

Tab. 1 - Resultado dos ensaios de capacidade dos bancos de baterias de primeira e segunda vida.

Banco e Rack (R)	**Taxa**	**Capac. real média [kWh]**	**Capac. real Máxima [kWh]**	**Capac. real Mínima [kWh]**	**80% da capac. nominal [kWh]**	**Capac. real em relação à nominal [%]**	**Roundtrip Efficiency [%]**	**Núm. de ensaios**
Primeira vida R1 e R2	0,3C	87,2	96,4	79,5	108,0	80%	70,8%	3
Segunda vida R3 e R4	0,3C	27,9	31,6	21,6	84,0	33%	66,1%	8
Segunda vida R3	0,3C	13,6	14,3	12,8	42,0	32%		3

Na Tab. 1 também é apresentado um comparativo entre a capacidade real obtida através dos ensaios e a capacidade nominal da bateria. Como os ensaios foram realizados entre os limites de estado de carga (SOC) de 10% e 90%, a referência utilizada para realizar a comparação foi 80% da capacidade nominal. O resultado dessa relação foi de 80% para a bateria de primeira vida e 33% para o banco de segunda vida. Deve-se observar que é esperado que a capacidade real seja menor que a nominal visto que essa medida considera o sistema de armazenamento como um todo, incluindo as cargas auxiliares e perdas de conversão.

Para a segunda vida de baterias de íon de lítio, devido à degradação do uso, é esperado uma capacidade remanescente de aproximadamente 60% da original. Considerando que a capacidade real medida para o banco de primeira vida foi de 80% (que inclui as perdas do sistema), é possível considerar uma expectativa para a capacidade real do banco de segunda vida como a multiplicação desses dois valores (60% e 80%), ou seja 48%. A partir dessa avaliação fica mais claro o baixo valor de capacidade real encontrado para o banco de segunda vida. Assim, a capacidade do sistema de segunda vida foi 31% inferior ao esperado para o banco avaliado. Otimizações dos sistemas da bateria de segunda vida (relacionadas ao BMS e PCS) são ainda esperadas e estão em desenvolvimento para que estes valores possam ser aumentados.

A avaliação da eficiência global do sistema é feita através do indicador *roundtrip efficiency*, apresentado na Tab. 1. Esse indicador representa a fração de energia líquida que é possível extrair da energia que foi injetada no sistema de armazenamento. A energia injetada se refere a toda energia medida no ponto de entrada e inclui energia utilizada para carregar as baterias, perdas em conversão e nas cargas auxiliares. O valor de *roundtrip efficiency* identificado para a bateria de primeira vida foi de 70,8% e de 66,1% para o banco de segunda vida.

Observa-se, através dos indicadores mencionados, que o banco de segunda vida manteve um índice de eficiência próximo ao de primeira vida (66,1% e 70,8% respectivamente), mas apresenta uma perda de capacidade de carga maior que a de primeira vida quando as baterias são utilizadas no sistema de armazenamento (33% e 80% respectivamente). Esse resultado inclui as perdas devido a degradação natural das células, proveniente do intenso uso nos veículos elétricos, e as perdas do sistema. Os fatores identificados que influenciaram na baixa capacidade medida do banco de segunda vida são:

Limitação pelo PCS. O PCS foi dimensionado para o banco de primeira vida, o qual apresenta uma amplitude de tensão entre 630 e 822 V. Já o banco de segunda vida apresenta uma amplitude maior, de 570 V a 870 V. Sendo assim, o banco de segunda vida não atinge o SOC máximo e mínimo que poderia chegar, e dessa forma, o PCS limita a utilização total desse banco. De acordo com a curva de tensão por SOC do fabricante, é possível estimar que o PCS utilizado permite que o banco chegue a no máximo 80% de SOC. Isso significa que as medições realizadas podem representar apenas 70% da capacidade do banco ou menos, a depender do SOC mínimo atingido. Ao longo do tempo, o baixo DOD de operação regular do sistema poderá significar que a degradação das baterias durante o tempo será inferior.

Resistência interna. Por se tratar de baterias usadas, o desgaste faz com que algumas células apresentem maior resistência interna que outras. O aumento da resistência interna equivalente do banco faz com que a tensão de saída fique mais alta durante a carga e mais baixa durante a descarga, consequentemente atingindo precocemente a tensão máxima e mínima configuradas pelo sistema de controle, limitando a utilização da capacidade real das células.

Desequilíbrio entre as células. Embora a tensão de todas as células seja monitorada, ocorre frequentemente o desequilíbrio entre elas. A funcionalidade do BMS que reequilibra as células é eficaz quando as tensões estão altas (células carregadas), porém o mesmo não ocorre com tensões baixas. Esse desequilíbrio, mesmo que apenas em uma célula, limita a tensão mínima do banco e, consequentemente o uso completo da sua capacidade. Este problema é mais comum em sistemas de segunda vida pois os módulos utilizados vêm de diferentes carros, com diferentes históricos de utilização e com isso diferentes capacidades.

Controle de temperatura. O BMS estima indiretamente a temperatura das células através da temperatura do circuito conectado nos bornes da bateria, já que em razão dos invólucros dos módulos de bateria, a medição direta da temperatura das células é limitada. Esse sistema visa garantir a segurança do banco e abre o circuito quando a temperatura ultrapassa o limite configurado. O processo de balanceamento entre as células com tensões desequilibradas utiliza um resistor, o qual frequentemente aquece durante esse processo. O aquecimento desse resistor pode induzir a um falso diagnóstico de alta temperatura nas células, visto que o resistor e o sensor de temperatura ficam integrados na mesma placa. Situações como essa foram identificadas e ocasionam interrupções nos ensaios e, portanto, serão alvo de esforços de otimização.

Problemas de comunicação. Ao contrário de baterias de primeira vida que tem sua estrutura e conexões preparadas de fábrica para serem adaptadas a um modelo específico de BMS, as baterias de segunda vida devem ser adaptadas a produtos disponíveis no mercado, visto que elas não são usadas na mesma configuração que no veículo para qual foram inicialmente projetadas. Por diversas vezes, essas adaptações geram incompatibilidades, como por exemplo problemas de comunicação entre componentes. Tais falhas de comunicação geraram interrupções durante a operação do sistema que aumentam as incertezas nas medições.

5. DISCUSSÃO

O uso de segunda vida de baterias de íon de lítio provenientes de veículos elétricos representa uma oportunidade de atender a demanda por bancos de baterias para serem usados conjuntamente com usinas eólicas e fotovoltaicas de geração centralizada e distribuída e ao mesmo tempo fornecer uma solução para ampliação do uso das baterias desses veículos. A aplicação prática desse conceito mostra que há alguns desafios a serem trabalhados para que esse tipo de uso possa se tornar realidade.

Sistemas auxiliares compatíveis. Para a utilização dessas baterias aplicadas em sistemas estacionários, é necessário a utilização de sistemas auxiliares como PCS e BMS, os quais devem ser compatíveis com o modelo de bateria e com a configuração de instalação utilizada. Para aplicação no projeto apresentado, a disponibilidade de equipamentos compatíveis com esse tipo de aplicação mostrou-se limitada. Além disso, mesmo o mercado de veículos elétricos sendo ainda muito recente, já existem diversos modelos e tecnologias de baterias de íons de lítio, o que dificulta a utilização de um mesmo equipamento de controle para diferentes projetos. Outro ponto importante identificado é que os equipamentos utilizados para os bancos de segunda vida devem possuir funcionalidades específicas para esse tipo de aplicação, como uma solução eficaz para a questão do desequilíbrio acentuado entre as células. O desenvolvimento de novos equipamentos e sua disponibilização para o mercado será um ponto relevante para que esse tipo de aplicação se torne realidade.

Para o projeto aqui apresentado, a escolha do PCS foi limitada pelos equipamentos disponíveis no mercado e pelo uso do mesmo equipamento para dois bancos distintos (primeira e segunda vida) com características diferentes. Sem essas limitações, um PCS com uma faixa de tensão mais adequada permitiria a construção de bancos mais uniformes, que usam apenas módulos de um mesmo carro. No caso do Nissan LEAF, um banco completo de um carro totaliza 360 V com os 48 módulos originalmente instalados no veículo. Considerando essa hipótese, também seria viável a utilização do BMS próprio desse modelo de veículo, o qual foi desenvolvido especificamente para esse modelo de bateria íons de lítio.

Falta de acesso a informações e controles. Apesar da possibilidade técnica de utilizar o BMS próprio do veículo, o acesso às configurações de programação desse equipamento é essencial para utilização do mesmo para o funcionamento

do banco de bateria para aplicação ao sistema estacionário. Esse tipo de controle, bem como acesso a informações detalhadas sobre o BMS e as células de íons de lítio se apresentaram como barreiras para aplicação nesse projeto.

Baterias com diferentes históricos. Idealmente as baterias utilizadas em um mesmo banco devem possuir as mesmas características. Para um banco de segunda vida, mesmo que utilizados apenas baterias provenientes de um mesmo modelo de veículo, ou seja, que as características originais são idênticas, serão utilizadas unidades retiradas de diversos veículos distintos, as quais foram submetidas a diferentes condições de ciclos de carga e descarga, temperatura de operação, taxas de carregamento e forma de direção do condutor. Essas condições fazem com que as baterias apresentem diferentes características técnicas, como estágio no ciclo de vida e resistência interna. O processo de testagem e seleção das baterias é importante para a criação de bancos mais homogêneos e com bom funcionamento, visto que as baterias de pior qualidade acabam limitando a capacidade de todo o banco.

Observa-se que os resultados obtidos nesse trabalho, apesar de apresentar importantes resultados sobre a aplicação prática de tais sistemas, são limitados às condições e à configuração aqui descritas e não podem ser generalizados para qualquer uso de bateria de segunda vida.

6. CONCLUSÕES

O reuso dos módulos de baterias de íons de lítio de veículos elétricos é uma alternativa interessante para prolongar a vida desses componentes antes do seu descarte ou reciclagem, embora apresente desafios a serem trabalhados. A aplicação de baterias de segunda vida em um banco de armazenamento de energia de médio porte realizado neste trabalho demonstrou que o sistema mantém uma eficiência (*roundtrip efficiency*) similar à primeira vida, porém a capacidade real dos dois sistemas de armazenamento é significativamente reduzida, devido às perdas inerentes ao sistema, como cargas auxiliares e consumo interno dos equipamentos. Além disso, como esperado, o banco de baterias de segunda vida apresenta uma capacidade inferior à bateria de primeira vida, não só decorrente de sua capacidade reduzida em função do tempo de uso, mas também por outros fatores como a deterioração e aumento da resistência interna das células que ocorre de forma desigual, de modo que as células com pior qualidade limitam a capacidade de todo o banco. Além dos fatores de desgaste, foi identificado que a baixa oferta de equipamentos de controle eletrônico, como PCS e BMS também é um fator que limita as opções de projeto e a escolha desses equipamentos interfere na operação e pode reduzir a utilização real da capacidade disponível nas células. O maior desenvolvimento de pesquisas na área, com o estudo de novas técnicas para caracterização e triagem de módulos se mostra vital para o crescimento deste mercado. Além disso, o apoio e envolvimento dos fabricantes de células de íons de lítio e de sistemas de controle eletrônico será fundamental para a aplicação e ampliação do uso de segunda vida das baterias para sistemas de armazenamento de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), bem como à Engie Brasil Energia e à Guascor do Brasil pelo suporte e apoio financeiro no projeto P&D Estratégico ANEEL 021/2016. Os autores também agradecem a Nissan automóveis do Brasil pela cessão das baterias descartadas de veículos Nissan LEAF que possibilitaram a realização deste trabalho. Marília Braga e Amanda Mendes Ferreira Gomes agradecem o apoio recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) através de suas bolsas de doutorado e mestrado, respectivamente. Daniel Odilio dos Santos agradece o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através da sua bolsa de mestrado. Os autores agradecem também aos colegas do laboratório Fotovoltaica/UFSC que não participaram diretamente desta pesquisa, mas auxiliaram na idealização, especificação, desenvolvimento, instalação e manutenção dos sistemas utilizados no estudo, e pelas discussões frutíferas sobre os temas abordados nesse artigo.

REFERÊNCIAS

AESC. 2018. “Cell, Module, and Pack for EV Applications.” http://www.eco-aesc-lb.com:80/en/product/liion_ev/%0D.

Ahmadi, Leila, Steven B. Young, Michael Fowler, Roydon A. Fraser, and Mohammad Ahmadi Achachlouei. 2017. “A Cascaded Life Cycle: Reuse of Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Packs in Energy Storage Systems.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (1): 111–124. doi:10.1007/s11367-015-0959-7.

Assunção, André, Pedro S. Moura, and Aníbal T. de Almeida. 2016. “Technical and Economic Assessment of the Secondary Use of Repurposed Electric Vehicle Batteries in the Residential Sector to Support Solar Energy.” *Applied Energy* 181: 120–131. doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.056.

Campos, Rafael Antunes, Marilia Braga, Lucas Nascimento, Ricardo Ruther, and Gabriel Simoes. 2019. “The Role of Second Life Li-Ion Batteries in Avoiding Generation Curtailment in Utility-Scale Wind + Solar Parks in Brazil.” *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, no. April 2020: 2078–2081. doi:10.1109/PVSC40753.2019.8980869.

de Oliveira, Aline Kirsten Vidal, Amanda Mendes Ferreira Gomes, Vitor Volpato Goulart, Alexandre de Albuquerque Montenegro, and Ricardo Rüther. 2020. "Analysis of the Integration of an Electric Bus and an Electric Vehicle with Grid-Connected PV Systems and a Storage System." *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019*, 1574–1581. doi:10.18086/swc.2019.31.02.

Electric Power Research Institute (EPRI). 2019. "Energy Storage Integration Council (ESIC) Energy Storage Test Manual." https://www.epri.com/research/products/000000003002013530.

Kim, Jonghoon, and B. H. Cho. 2013. "Screening Process-Based Modeling of the Multi-Cell Battery String in Series and Parallel Connections for High Accuracy State-of-Charge Estimation." *Energy* 57. Elsevier Ltd: 581–599. doi:10.1016/j.energy.2013.04.050.

Mirzaei Omrani, Mahyar, and Hamid Jannesari. 2019. "Economic and Environmental Assessment of Reusing Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries for Load Leveling in the Residential, Industrial and Photovoltaic Power Plants Sectors." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 116. doi:10.1016/j.rser.2019.109413.

Narayan, Nishant, Thekla Papakosta, Victor Vega-Garita, Zian Qin, Jelena Popovic-Gerber, Pavol Bauer, and Miroslav Zeman. 2018. "Estimating Battery Lifetimes in Solar Home System Design Using a Practical Modelling Methodology." *Applied Energy* 228 (July). Elsevier: 1629–1639. doi:10.1016/j.apenergy.2018.06.152.

TECHNICAL COMPARISON BETWEEN FIRST AND SECOND LIFE BATTERY BANKS FOR COMMERCIAL-SIZE ON-GRID APPLICATION

Abstract. *Electric vehicles are an alternative technology for reducing emissions into the atmosphere, when combined with the generation of energy from renewable sources. However, after a few years of use, the batteries lose some of their original capacity and need to be replaced. Recent studies and applications point to the feasibility of reusing these batteries after being removed from electric vehicles, an application known as second battery life. This work presents the application of second life batteries from Nissan LEAF vehicles for use in a commercial battery bank (100kWh) and comparison with a first life bank of the same size installed in the same environment and subjected to the same conditions. The capacity measurement of the two banks was carried out through loading and unloading tests which showed that both were reduced, due to the losses inherent to the system, such as auxiliary loads and internal consumption of the equipment. The real capacity in relation to the nominal capacity of the second life bank, as expected, was lower than that of the first life, due to factors such as the maximum and minimum operating voltage limitation of the bank by the Power Conversion System (PCS), the increase in internal resistance of cells, unbalance between cells, increase in temperature, among others. The use of second life batteries for this type of application proved to be technically feasible, but it presents challenges such as the lack of compatible electronic control systems in the market and the need to characterize the modules for the use of batteries with different background in the same system.*

Key words*: Energy Storage, Electric Vehicles, Second Life Battery*