FOTOVOLTAICA UFSC:
Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina
www.fotovoltaica.ufsc.br

Coordenador
Prof. Ricardo Rüther

[P&D ENGIE/UFSC – Relatório de Testes da Bateria do Foco II – 200 kWh/100 kW]

MAIO / 2022

SUMÁRIO

SUMÁRIO **2**
1. INTRODUÇÃO **3**
2. CARACTERIZAÇÃO DAS BATERIAS DE SEGUNDA-VIDA DA NISSAN **3**
2.1. Medição de capacidade 3
2.2. Caracaterização das baterias de segunda-vida INDIVIDUALMENTE 5
2.3. Escolha dos módulos 7
3. CARACTERIZAÇÃO DOS SAES DE PRIMEIRA E SEGUNDA-VIDA **8**
3.1. Testes de Capacidade do SAE 11
3.2. Eficiência de Roundtrip 13
3.3. Consumo dos Sistemas Auxiliares 14
3.4. Comparação entre primeira e segunda vida 14
4. VIABILIDADE TÉCNICA DAS FUNCIONALIDADES **16**
4.1. Redução da demanda contratada 16
4.2. Economia de Energia 19
5. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES **22**
6. REFERÊNCIAS **23**

1. INTRODUÇÃO

O Projeto de P&D ENGIE/UFSC, da chamada estratégica P&D 021/2016 da ANEEL tem como um de seus objetivos aplicações em geração distribuída de porte comercial. No escopo, foi instalado um Sistema de Armazenamento de Energia (SAE) de 200 kWh/200 kW, no Laboratório Fotovoltaica/UFSC, no Sapiens Parque, em Florianópolis-SC, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema na referida unidade consumidora (UC). Este documento apresenta os resultados da caracterização dos sistemas de armazenamento (SAE) de primeira e segunda-vida, avaliando o desempenho da bateria de médio porte em situação de operação real, em suas diferentes funcionalidades.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS BATERIAS DE SEGUNDA-VIDA DA NISSAN

Para a caracterização e escolha das baterias de segunda-vida a serem utilizadas no SAE de segunda-vida, os conjuntos de baterias dos carros foram desmontados e etiquetados de maneira a registrar a origem de cada módulo e sua posição dentro do conjunto. Esta identificação se fez necessária devido à grande quantidade de baterias obtidas com a desmontagem dos carros e para que se tenha um rastreamento das células no futuro. A FIGURA 1 mostra algumas imagens deste processo.



(a) (b) (c)

Figura 1 - Fotos do processo de montagem e separação das baterias do Nissan LEAF utilizadas neste estudo: (a) conjunto de baterias completo retirado da base do carro (b) conjunto de baterias sendo desmontado (c) módulos de baterias desmontados e etiquetados.

2.1. MEDIÇÃO DE CAPACIDADE

A definição de capacidade de uma bateria é a competência de fornecer uma corrente com uma determinada intensidade e durante um determinado tempo, medido em horas. Toda bateria possui este valor definido pelo fabricante através de um processo chamado teste de capacidade e este por sua vez

possui algumas disposições a serem seguidas. A medição da capacidade remanescente de baterias de segunda vida está intimamente ligada à determinação da viabilidade técnica de sua utilização. Dentro da literatura, este é um procedimento bastante discutido, principalmente referente à corrente utilizada durante o teste, valor que influencia diretamente o tempo de teste e a confiabilidade do valor aferido. É necessário encontrar um ponto ótimo para otimização entre tempo e confiabilidade de resultados. O procedimento para realizar o teste de capacidade consiste em conectar uma célula totalmente carregada a uma carga e descarregá-la por completo. Este procedimento é realizado ao longo de um determinado tempo e com uma corrente constante. Ao finalizar o teste e realizar a integração da corrente em amperes ao longo do tempo em horas se obtém a capacidade da célula em Ah.

Para realização dos testes de capacidade neste projeto, foi utilizada uma carga eletrônica, modelo NHR 9430-12 que pode ser observada na **FIGURA 2**. Esta possibilita uma maior confiabilidade dos resultados apresentados ao final do teste, bem como uma estabilidade muito maior da corrente visto a sua capacidade de mitigar as variações de tensão da célula e resistência das cargas convencionais. Por outro lado, o modelo do equipamento utilizado possui uma tensão mínima de trabalho de 10 V, o que impossibilita realizar o teste com um único módulo, sendo necessário conectar 3 módulos em série para realização dos testes.

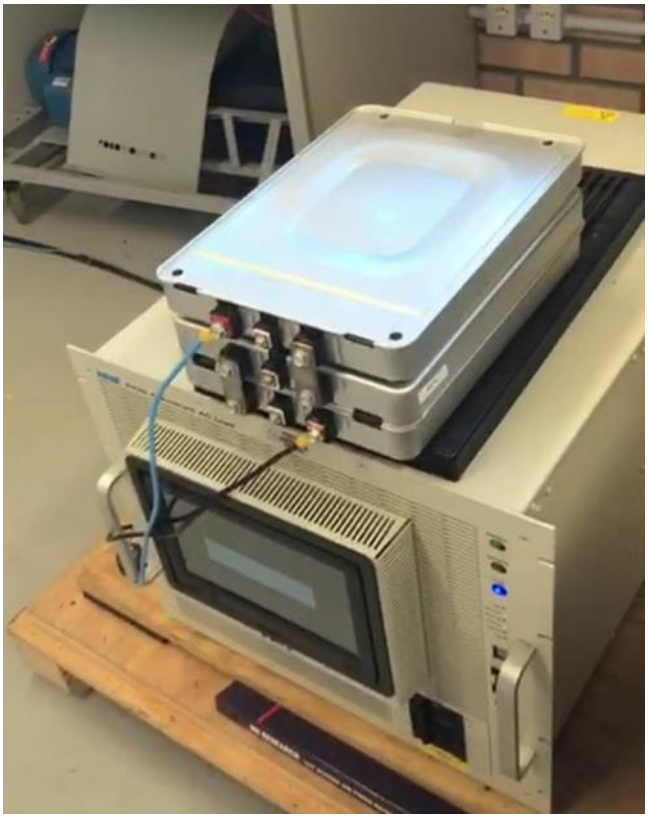


Figura 2 - Teste de capacidade com três módulos em série conectados a uma carga eletrônica.

O teste de capacidade possui algumas condições a serem seguidas, como valores de corrente utilizada no teste e temperatura. Estas definições são estabelecidas pelo fabricante pois a capacidade é função da temperatura e corrente elétrica, e a alteração destes valores leva a variações de capacidade. Desta maneira, pode-se chegar a valores de capacidade em segunda vida equivocados, que não representam a real degradação da bateria e impossibilitam a comparação dos resultados obtidos em primeira vida. Desta forma, analisando a documentação disponibilizada pelo fabricante, neste trabalho foi utilizada uma corrente de 22 A (0,33C) para a realização dos testes de capacidade.

2.2. CARACATERIZAÇÃO DAS BATERIAS DE SEGUNDA-VIDA INDIVIDUALMENTE

Inicialmente é importante esclarecer que os testes foram realizados utilizando três módulos em série, devido às limitações do equipamento, como comentado anteriormente. Devido a essa conexão, a capacidade do conjunto fica limitado à bateria que possui menor capacidade, visto que esta atingirá seu limite inferior de tensão primeiro, levando à conclusão do teste.

Para agrupar módulos similares entre si, optou-se por seguir a sequência de conexão original do carro, de acordo com a numeração da conexão em série, iniciando em 1 no módulo mais positivo da série e terminando em 48 no módulo mais negativo. Assim, os módulos 1, 2 e 3 resultam em um teste, 4, 5 e 6 em outro, até 46, 47 e 48. Este método foi escolhido com o objetivo de obter uma menor influência da variação da temperatura devido à proximidade física dos módulos. Esta forma de agrupar as células se mostrou apropriada em 81.25% dos conjuntos, implicando que em 18.75% dos testes houve limitação por parte de uma das células do conjunto. Esta limitação é decorrente de uma degradação desigual entre as células do veículo.

A TABELA 1 tem como objetivo demonstrar as variações de capacidade existentes entre diferentes carros avaliados, realizando uma análise utilizando o valor médio de capacidade medida, para representar como os diferentes perfis de utilização do veículo interferem no SoH da bateria.

Como comentado anteriormente, os veículos utilizados nesse estudo eram táxis que circulavam na cidade de São Paulo e Rio de Janeiro ao longo de cinco anos. Neste período, os veículos foram usados nas mais variadas situações, incluindo diferentes jornadas de trabalho, tipos de cargas e percursos. Todas essas variações causam diferentes estresses térmicos e elétricos no banco de baterias levando a diferentes degradações da célula e consequentemente, diferentes capacidades remanescentes.

Estas disparidades entre as capacidades dos carros são representadas na TABELA 1, onde se pode observar valores médios com 35% de diferença entre as capacidades medidas. Tal valor representa uma diferença de 23 Ah entre as células no caso mais extremo. Analisando resultados mais moderados, pode-se observar uma variação entre 10 e 15%, resultado que ainda representa uma parcela expressiva de energia visto que a tecnologia de lítio-íon possui uma alta densidade energética.

Tabela 1 - Valores de estado de saúde referente aos carros testados.

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%

Os resultados obtidos apontam para a importância da realização do teste de capacidade para classificação das células, principalmente se o banco de segunda vida tiver origens de módulos de primeira vida diferentes. Realizar a montagem de um sistema de armazenamento de segunda vida com baterias dos carros 1, 3 e 6 em série, sem realizar nenhum tipo de teste de seleção de módulos, irá gerar problemas de balanceamento e autonomia. Talvez este problema de operação não seja sanado apenas com testes de capacidade, mas eles indicarão as melhores baterias bem como a configuração adequada para atingir os objetivos iniciais do banco.

De acordo com o perfil de uso de veículos como táxis, é possível deduzir que alguns dos veículos foram frequentemente carregados com carregadores rápidos, pois precisavam voltar para a rotina de trabalho rapidamente, e outros foram submetidos a cargas lentas ao longo de uma noite inteira. Durante este processo de carregamento, o banco de baterias é submetido a situações heterogêneas cuja repetição leva a uma degradação mais ou menos acentuada. Além disso, espera-se que cargas rápidas sejam utilizadas com uma frequência alta para que em pouco tempo o veículo volte a circular e consequentemente percorra uma distância maior, causando assim uma maior degradação. Esta deterioração pela utilização já é característica das baterias de lítio-íon, mas o que se busca salientar é como a utilização pode influenciar e intensificar esse processo.

A segunda análise que se pode realizar baseada na TABELA 1, é sobre a diferença entre os estados de saúde máximos e mínimos dentro de um mesmo veículo. Os resultados apresentam valores consideráveis de desequilíbrio energético entre células do mesmo carro, que por sua vez não deveria ser tão acentuado, pois todas as células então conectadas em série e consequente submetidas à mesma demanda energética. Analisando este fenômeno com um pouco mais de detalhe, observa-se que esta diferença se apresenta de forma mais significativa quando comparados os resultados dos testes de capacidade das células 1, 2 e 3 com o teste das células 46, 47 e 48, ou seja, a diferença se mostra mais acentuada quando se confronta os módulos do início e fim do carro.

A FIGURA 3 tem como objetivo demonstrar essas diferenças, apresentando duas colunas com valores medidos de capacidade e uma terceira coluna representando a diferença entre estes valores. Para

esta análise, o carro 3 não foi utilizado, devido à não realização dos testes de capacidade na configuração citada, mas ainda é possível observar variações analisando a **TABELA 1**.

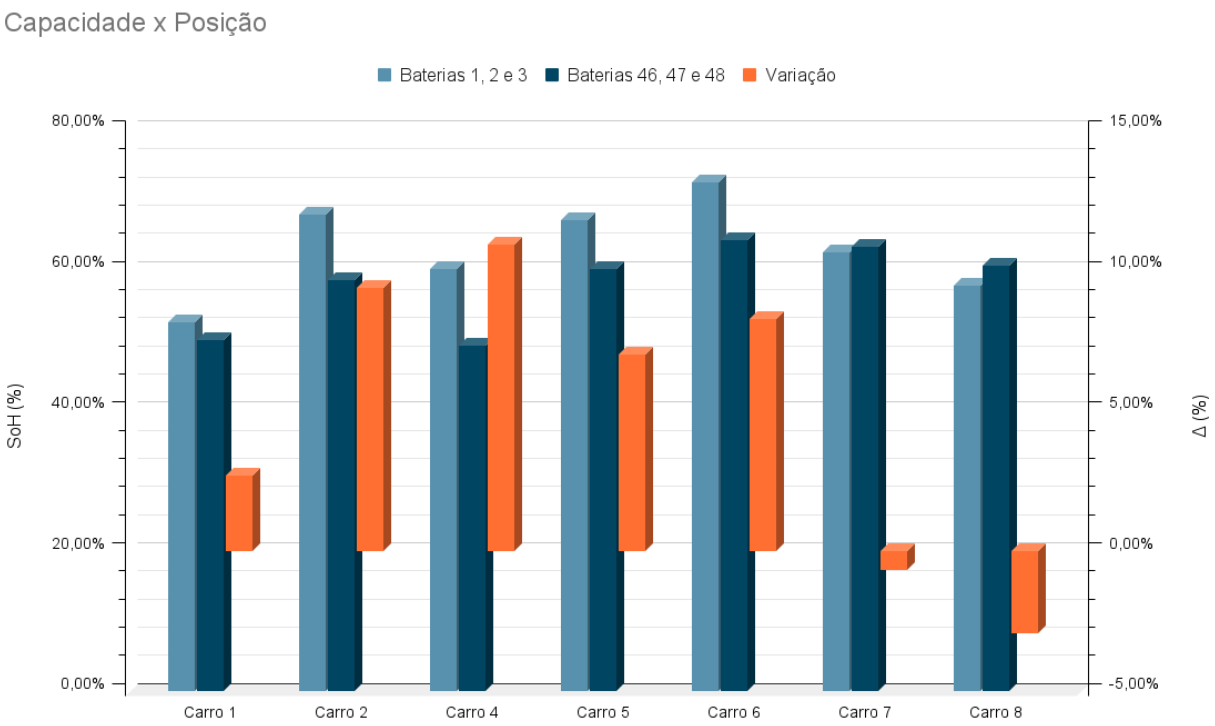


Figura 3 - Comparativo de capacidade entre módulos de um mesmo carro.

Observando-se a **FIGURA 3**, é possível perceber diferenças de até 10,86% de capacidade dentro de um mesmo carro e analisando estes resultados, pode-se estabelecer algumas hipóteses sobre o que ocasionou este desbalanço. Uma hipótese para a causa dessa disparidade entre as capacidades é a diferença de temperatura a que cada um dos módulos é submetido dentro do conjunto de baterias, devido à alta sensibilidade que a baterias de lítio-íon possuem à temperatura. Esta ideia ganha mais força à medida que se observa a falta de um sistema de refrigeração ativa nos modelos de 2012, sendo essa refrigeração realizada apenas de maneira passiva.

2.3. ESCOLHA DOS MÓDULOS

Como citado anteriormente, as variações de capacidade encontradas nos testes demonstram que a seleção de módulos para compor um novo banco de baterias não é muito simples, principalmente quando se é necessário utilizar módulos de diversos veículos para compor um novo banco.

Para tentar contornar os problemas já comentados se optou pelas escolhas das baterias com capacidade remanescente mais próximas e que tivessem a quantidade de módulos necessários para montagem do banco. Como se pode observar no tópico anterior foram aferidos módulos com SoH próximo a 80%, que em primeiro momento poderia ser uma ótima bateria para se utilizar, mas

observando as capacidades das outras baterias que irão compor o banco observasse que não é viável utilizá-la em uma serie onde tem outros módulos com 55%-60% de SoH.

Desta maneira a estratégia tomada para seleção dos módulos foi sempre buscando a maior capacidade possível, mas também buscando uma homogeneidade entre as baterias selecionadas. Na TABELA 2 podemos observar a quantidade de módulos que foi utilizado de cada veículo, bem como o SoH da menor bateria selecionada do respectivo carro.

Tabela 2 - Baterias selecionadas para constituir o bando de segunda vida.

Carro	SoH mínimo	Número de células
2	60%	40
4	55%	24
5	60%	42
6	70%	41
7	62%	48
8	57%	48

3. CARACTERIZAÇÃO DOS SAES DE PRIMEIRA E SEGUNDA-VIDA

O sistema de armazenamento analisado 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 FIGURA 4. 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.

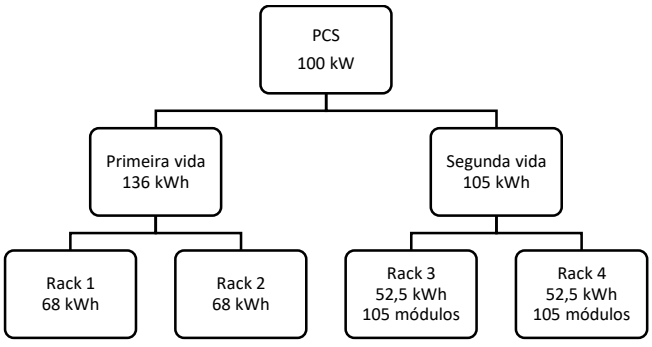
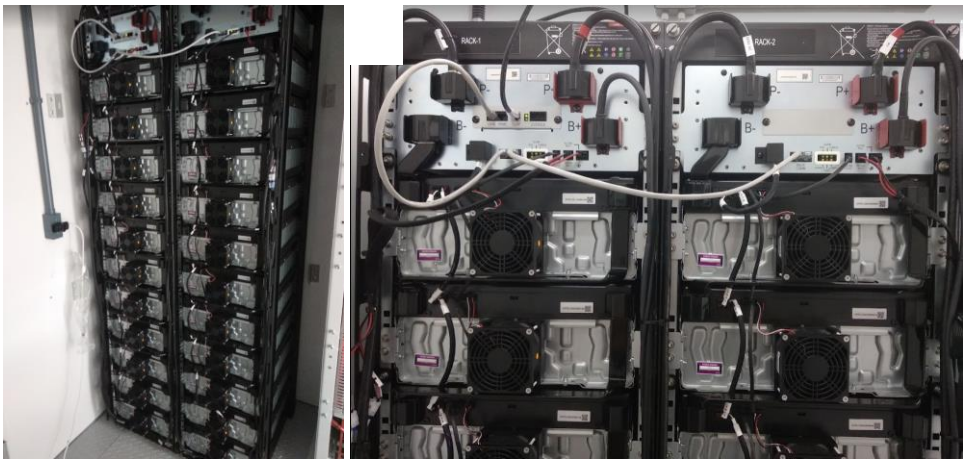


Figura 4 - Configuração do sistema de armazenamento, detalhando a configuração e capacidade nominal dos bancos de baterias de primeira e segunda vida.

O banco de baterias de primeira vida (FIGURA 5) 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.



(a) (b)

Figura 5 - 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 (**FIGURA 6A**), 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 (**FIGURA 6B**) 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 **FIGURA 4** e na **FIGURA 7**), 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 (**FIGURA 7**). 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.



Figura 6 - A: Célula individual do tipo bolsa; B: módulo de bateria que contém quatro células [1].



(a) (b)

Figura 7 - 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 (**FIGURA 8**). 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.



(a) (b) (c)

Figura 8 - 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;
- Estado de carga (SOC - *State Of Charge*);
- Tensão individual das células (medidas para controle, não armazenadas).

3.1. TESTES DE CAPACIDADE DO SAE

De acordo com Electric Power Research Institute (EPRI, 2019), a avaliação da capacidade do SAE 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.

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

Na **FIGURA 9** e na **FIGURA 10** 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.

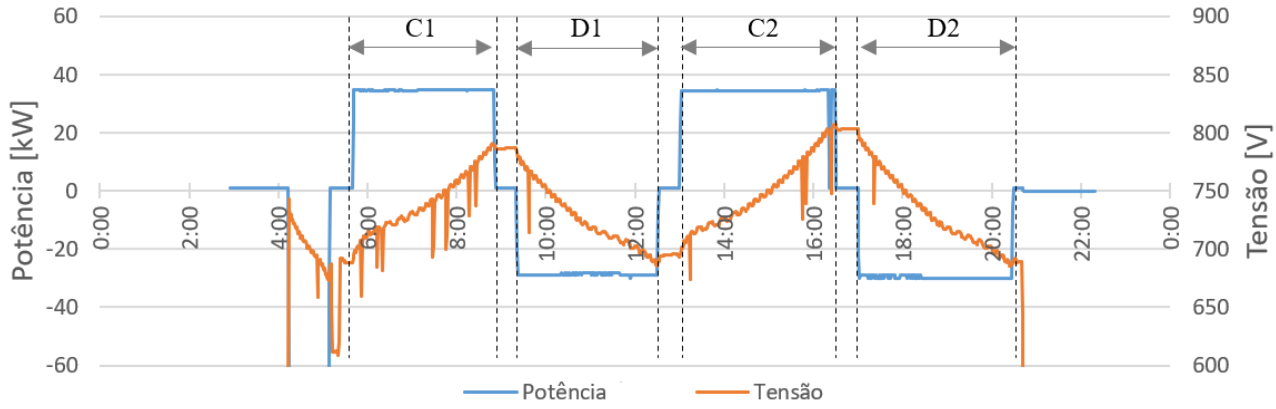


Figura 9 - Ensaios de carga e descarga do banco de primeira vida, realizados em 02/11/2021. Os períodos C1 e C2 representam cargas, enquanto D1 e D2 representam descargas.

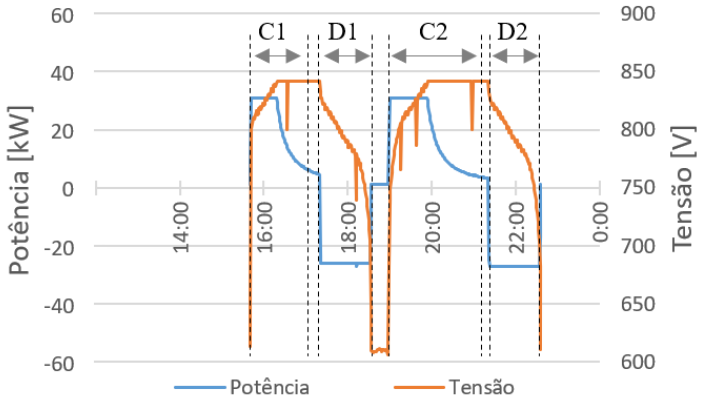


Figura 10 - Ensaios de carga e descarga do banco de segunda vida, realizados em 12/12/2021. Os períodos C1 e C2 representam cargas, enquanto D1 e D2 representam descargas.

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 **TABELA 3** 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.

Tabela 3 - 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 [%]	Núm. de ensaios
Primeira vida R1 e R2	0,3C	87,2	96,4	79,5	108,0	80%	3
Segunda vida R3 e R4	0,3C	27,9	31,6	21,6	84,0	33%	8
Segunda vida R3	0,3C	13,6	14,3	12,8	42,0	32%	3

3.2. EFICIÊNCIA DE ROUNDTRIP

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 [2].

O valor de *roundtrip efficiency*, apresentado na **TABELA 4**, 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 a 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.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios de Roundtrip Efficiency dos bancos de baterias de primeira e segunda vida.

Banco e Rack (R)	Roundtrip Efficiency [%]
Primeira vida R1 e R2	70,8%
Segunda vida R3 e R4	66,1%

3.3. CONSUMO DOS SISTEMAS AUXILIARES

O consumo dos sistemas auxiliares, responsáveis por manter as condições ambientais e de segurança adequadas para o funcionamento dos bancos de bateria (ar-condicionado, desumidificador, sistema de prevenção de incêndio e iluminação) representa uma perda significativa de energia no sistema.

Conforme é apresentado na TABELA 5, durante o tempo de ensaios, com duração média de 1h48min, o consumo médio dos equipamentos auxiliares foi de 4,56 kWh, o que representa aproximadamente 13,8% da energia que é consumida pelo Sistema de Armazenamento. O consumo médio dos sistemas auxiliares para 1 hora foi de 2,5 kWh, o que representa um valor de 60,3 kWh quando extrapolado para 24 horas.

Tabela 5 - Consumo dos sistemas auxiliares.

Consumo médio durante ensaios [kWh]	Consumo médio por hora [kWh]	Consumo estimado para 24 horas [kWh]	Percentual da energia do ensaio usada para HVAC [%]
4,6	2,5	60,3	12,8 %

Observa-se, a partir da potência nominal dos equipamentos auxiliares, que a maior potência é referente aos equipamentos de ar-condicionado. Por esse motivo, observou-se que o consumo é maior durante o período do dia, quando há sol, e menor nos períodos noturnos, conforme pode ser verificado na TABELA 6.

Tabela 6 - Consumo dos sistemas auxiliares ao longo do dia.

Hora de início do ensaio	Consumo [kWh/h]
00:00 - 06:00	1,026
06:00 - 09:00	2,852
09:00 - 12:00	2,928
12:00 - 15:00	2,891
15:00 - 18:00	2,404
18:00 - 21:00	2,717
21:00 - 23:59	2,036

3.4. COMPARAÇÃO ENTRE PRIMEIRA E SEGUNDA VIDA

Na TABELA 3 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.

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.

4. VIABILIDADE TÉCNICA DAS FUNCIONALIDADES

Durante a etapa de testes do SAE, algumas funcionalidades intrínsecas do equipamento foram testadas quanto a sua viabilidade técnica e são apresentadas a seguir. Além das funcionalidades aqui apresentadas, a arbitragem tarifária foi testada através do agendamento da operação otimizada, que é apresentada juntamente aos seus resultados em relatório a parte.

4.1. REDUÇÃO DA DEMANDA CONTRATADA

A FIGURA 11 mostra um exemplo mostra um exemplo de curvas de potências durante os testes de redução da demanda contratada realizados no dia 25/12/2021, que faz a bateria atuar como um limitador da demanda da UC. Este teste é executado em um cenário hipotético de mudanças de legislação, já que para UCs prossumidoras, a demanda contratada não pode ser inferior a potência total do sistema de microgeração instalado, que no caso da UC em estudo, o Laboratório Fotovoltaica/UFSC, é de 105 kWp. No dia apresentado no gráfico, foi utilizada a limitação de potência da rede para manter potência de saída do QDCA dentro do intervalo entre 0 e 60 kW de injeção de potência na rede. Dessa maneira, quando a geração FV faz a injeção de potência na rede ultrapassar 60 kW, a bateria absorve o excedente da geração

FV. Com isso, a energia acumulada na bateria nesses períodos é utilizada para suprir as cargas do laboratório quando não há excedente FV.

A FIGURA 12 mostra a utilização desta funcionalidade durante uma semana do mês de dezembro de 2021. É possível observar que mesmo com a variação de irradiância ao decorrer os dias, a bateria consegue manter a limitação de demanda da rede em 60 kW, permitindo assim a redução da demanda contratada da UC.

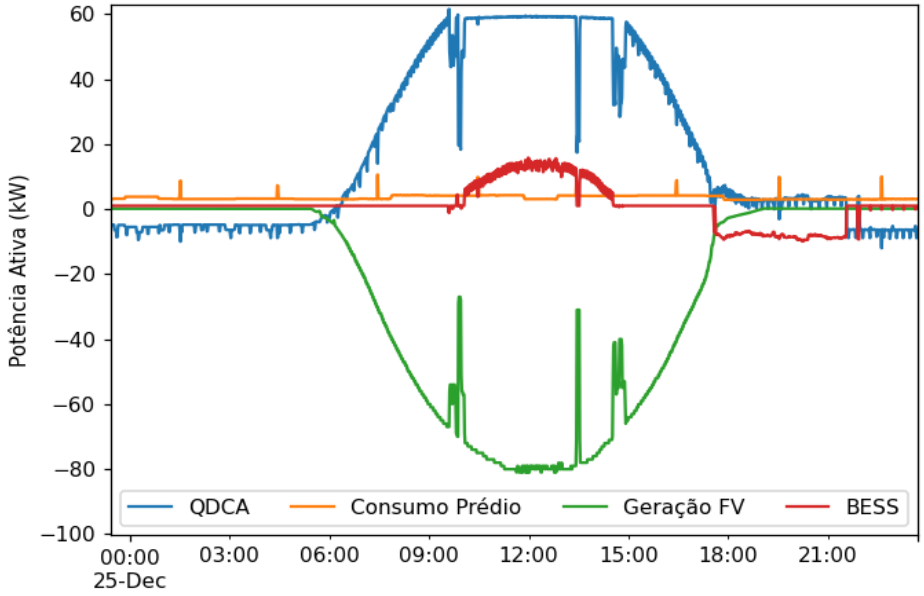


Figura 11 - Gráfico de potência ativa para diferentes pontos de medição do Laboratório Fotovoltaica-UFSC no dia 25/12/2021, quando a funcionalidade de redução da demanda contratada foi testada.

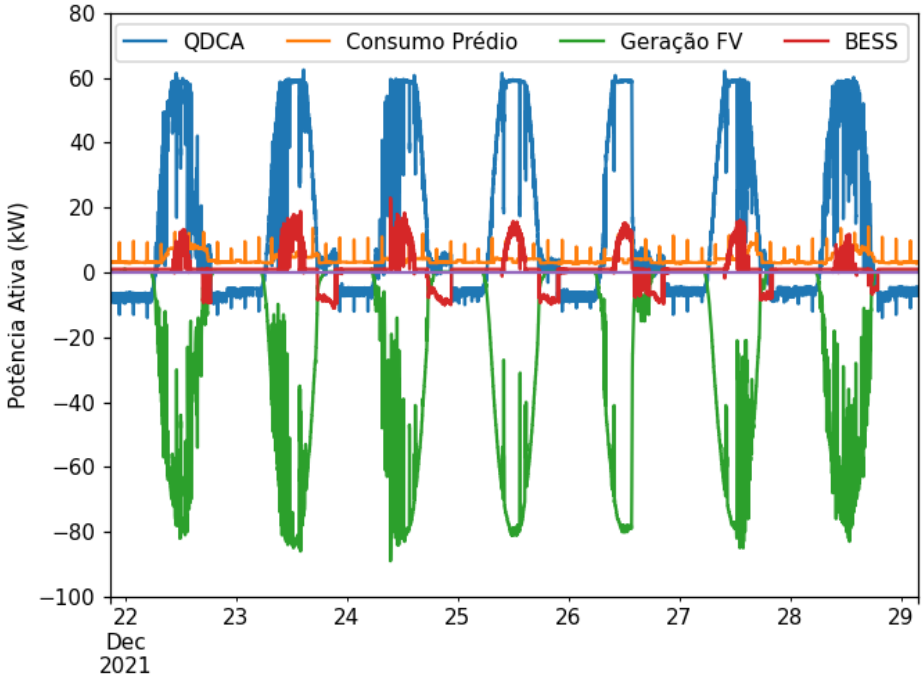


Figura 12 - Gráfico de potência ativa para diferentes pontos de medição do Laboratório Fotovoltaica-UFSC durante uma semana do mês de dezembro de 2021, quando a funcionalidade de redução da demanda contratada foi testada.

Pequenas exceções de ultrapassagem de injeção da potência de 60 KW ocorrem durante poucos minutos, como é mostrado no exemplo da **FIGURA 13**, que mostra o período de principal geração FV do dia 27/12/2022. No gráfico, é possível observar a injeção máxima de 62,5 kW de potência na rede da concessionária, advinda do excedente de geração FV, injeção que dura pouco menos que um minuto. Estes picos isolados acontecem em razão do atraso da resposta da bateria para se adaptar a mudanças bruscas de produção FV e de consumo da UC. Porém, estas curtas ultrapassagens na demanda de 60 kW não significam que a UC irá pagar excedente de demanda, já que segundo a RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021 [3], a distribuidora deve adicionar ao faturamento regular a cobrança pela ultrapassagem se a demanda medida se exceder em 5% em relação à demanda para consumidores. Assim, estes pequenos desvios inferiores a 5% não acarretam multas.

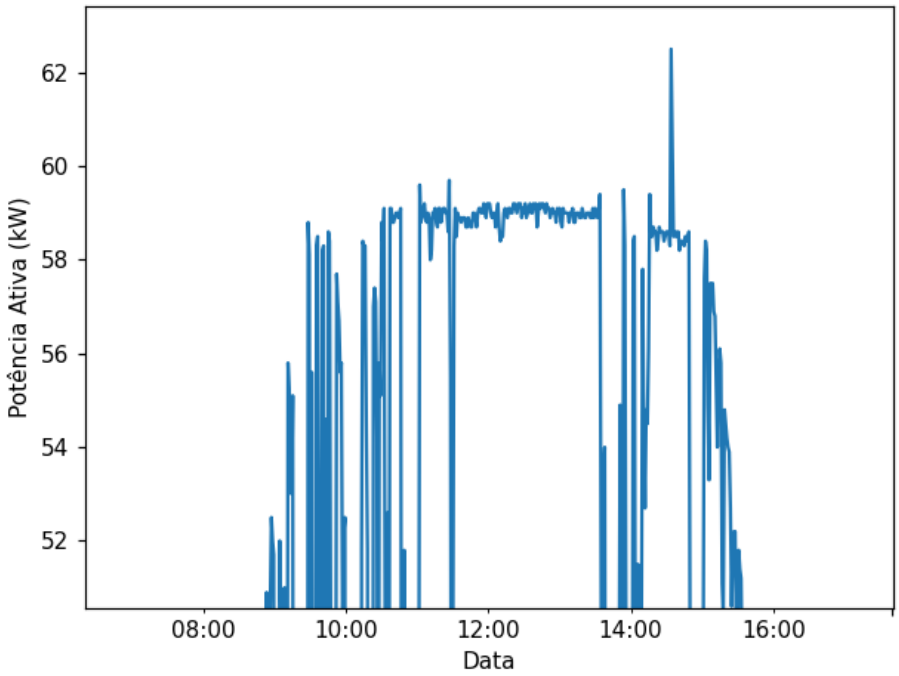


Figura 13 - Gráfico de potência ativa da rede do Laboratório Fotovoltaica-UFSC no dia 23/12/2021, quando a funcionalidade de redução da demanda contratada foi testada.

A **TABELA 7** apresenta os resultados quantitativos da semana em análise, mostrando valores máximos de geração FV, demanda da UC, além de outros valores medidos. Os testes foram realizados durante o verão durante uma semana ensolarada, permitindo uma alta geração FV (máximo de 89 kW em 24/12/2021). A bateria chega a absorver até 23 kW de potência excedente que seria agendada na rede da concessionária. Considerando uma tarifa de R$ 18,41 por kW de demanda contratada (valor de dezembro de 2021 para a UC em estudo), esses 23 kW podem representar uma redução de até R$ 423,43 mensais na fatura da UC.

A tabela também mostra a energia absorvida e suprida pela bateria no período analisado, bem como o *round-trip efficiency* de cada dia. É possível notar que a maior eficiência é obtida no dia que mais

energia é armazenada na bateria, sendo que o uso da funcionalidade pode acarretar em um uso frequente da bateria com um *round-trip efficiency.*

É importante ressaltar que na hipótese da possibilidade da redução da demanda com o uso desta funcionalidade, é necessário se garantir a disponibilidade diária e constante do SAE de extrema importância, já que ultrapassagens na demanda contratada acarretam na cobrança do dobro do valor de demanda convencional por kW. Mesmo paradas do SAE para manutenções periódicas devem ser agendadas de forma que permitam o desligamento do sistema FV enquanto os excedentes não puderem ser armazenados. Foram também realizados testes com uma limitação da demanda em 100 kWp, porém, devido a não ultrapassagem da demanda a este valor, a funcionalidade não demonstrou vantagens técnicas e econômicas.

Tabela 7 – Resultados da análise de redução da demanda contratada.

Data	22/12	23/12	24/12	25/12	26/12	27/12	28/12
Geração Máxima FV (kW)	82,00	86,00	**89,00**	81,00	80,00	85,00	83,00
Demanda máxima (kW)	61,50	**62,50**	60,80	61,50	60,80	62,10	60,20
Demanda máxima absorvida pela bateria (kW)	13,30	18,90	**23,00**	15,80	15,30	16,00	11,70
Energia máxima armazenada (kWh)	17,82	48,30	**55,23**	47,63	41,68	25,71	11,20
Potência máxima suprida em período noturno (kWh)	-9,40	**-11,00**	-10,00	-9,90	-9,80	-8,50	-6,80
Energia máxima suprida em período noturno (kWh)	-7,51	-33,90	**-38,88**	-33,27	-28,54	-16,89	-7,46
Round-Trip Efficiency (%)	-42,15%	-70,20%	**-70,38%**	-69,85%	-68,47%	-65,68%	-66,60%

4.2. ECONOMIA DE ENERGIA

A FIGURA 14 mostra um exemplo mostra um exemplo de curvas de potências de curvas de potência obtidas durante os testes da funcionalidade de economia de energia. O gráfico mostra que a funcionalidade faz com que a bateria se carregue utilizando o excedente de geração FV durante as primeiras horas do dia. Esta energia acumulada na bateria é então utilizada para suprir as cargas do sistema quando a geração FV é reduzida. A FIGURA 15 mostra a funcionalidade sendo executada durante quatro dias do mês de março de 2022, todos dias com alta nebulosidade e no geral pouca irradiação.

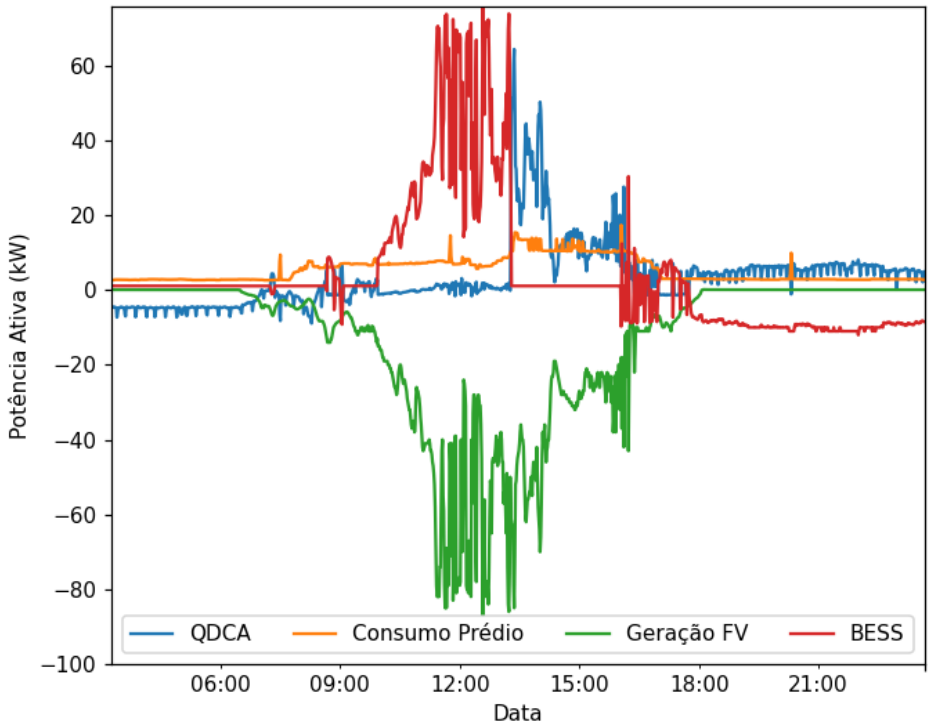


Figura 14 - Gráfico de potência ativa para diferentes pontos de medição do Laboratório Fotovoltaica-UFSC no dia 15/03/2022, quando a funcionalidade de Economia de Energia foi testada.

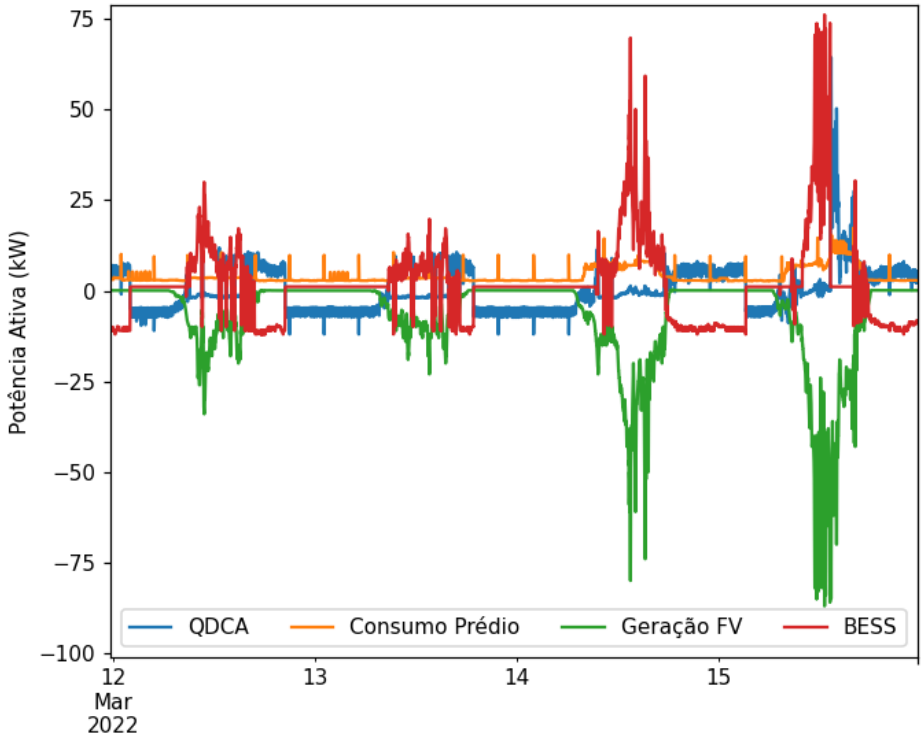


Figura 15 - Gráfico de potência ativa para diferentes pontos de medição do Laboratório Fotovoltaica-UFSC em alguns dias do mês de março de 2022, quando a funcionalidade de Economia de Energia foi testada.

A **FIGURA 16** mostra as potências da rede e do PCS do SAE isoladamente para o mesmo período do gráfico anterior, demonstrando em detalhe a redução da troca de energia com a rede. O gráfico também

mostra o fator de potência da rede durante os mesmos períodos. É possível observar que durante grande parte do dia o fator de potência da rede fica baixo, ficando acima de 0.5 apenas nos momentos em que há troca de energia com a rede. O baixo fator de potência é um problema grave para a UC pois pode acarretar multas. Porém, as multas são ponderadas pela potência ativa sendo trocada com a rede no momento do fator de potência fora dos padrões [3], e, portanto, são reduzidas nos momentos em que a troca com a rede aproxima-se de 0 kW.

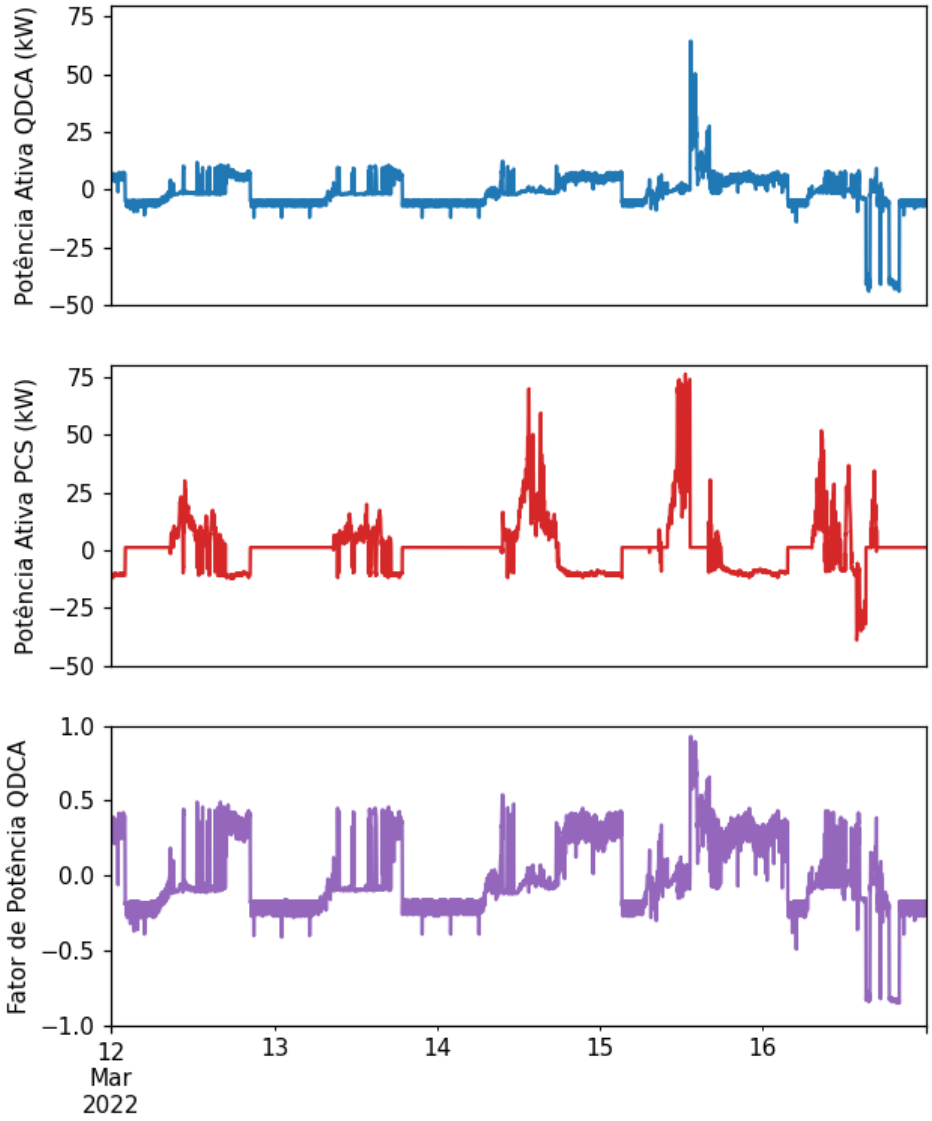


Figura 16 - Gráfico de potência ativa da Rede e do BESS do Laboratório Fotovoltaica-UFSC e do Fator de potência da rede em alguns dias do mês de março de 2022, quando a funcionalidade de Economia de Energia foi testada.

A **FIGURA 17** mostra a funcionalidade de economia de energia sendo executada utilizando-se do SAE de segunda-vida. Como esperado, a capacidade de armazenamento do excedente energético, bem como descarregamento da bateria quando não há excedente FV é reduzido em comparação com a primeira-vida.

Esta funcionalidade permite o melhor aproveitamento da energia FV gerada em excesso, reduzindo trocas com a rede da concessionária e aumentando o autoconsumo da UC. Atualmente não existe vantagem econômica para tal utilização de acordo com a legislação atual. Porém, com o projeto de lei 5.829 de 2019, sancionado no início de 2022 na Lei 14.300/22, que institui o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, os novos consumidores que participarem da Geração Distribuída de energia começarão a pagar a partir de 2023 pela Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (Tusd) do "fio B", que remunera as distribuidoras. Ou seja, os créditos gerados pelos sistemas de GD deixam de ser abatidos sobre essa parcela da conta de energia. Com isso, o aumento do autoconsumo e consequente redução da troca de energia com a rede significará a redução do pagamento da Tusd, gerando assim ganho econômico na aplicação da funcionalidade de economia de energia.

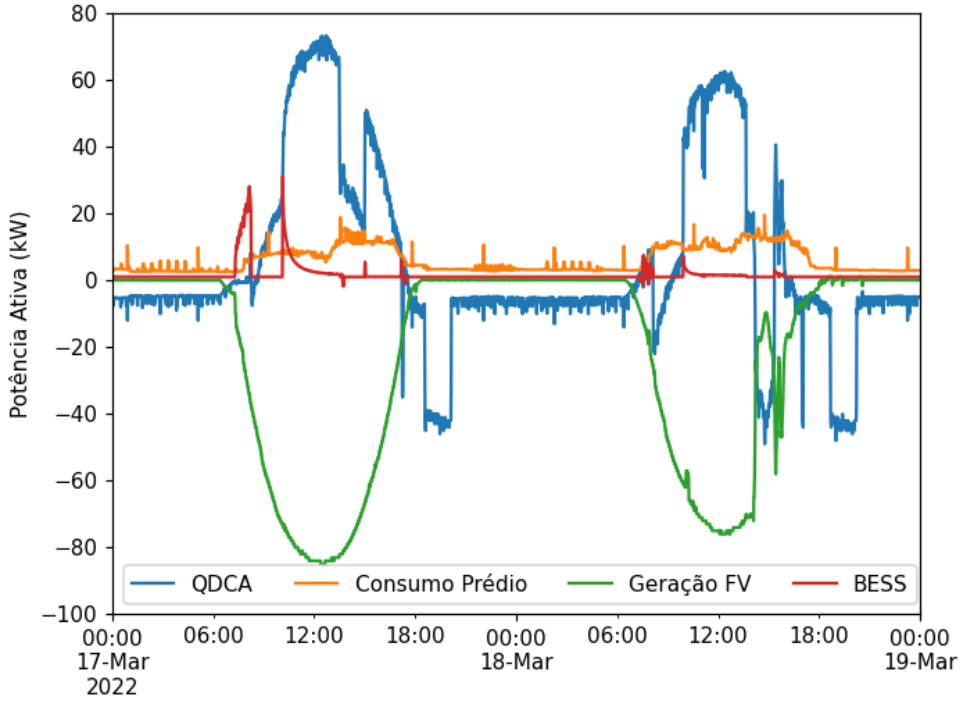


Figura 17 - Gráfico de potência ativa para diferentes pontos de medição do Laboratório Fotovoltaica-UFSC nos dias 17/03/2022 e 18/03/2022, quando a funcionalidade de Economia de Energia foi testada, utilizando o sistema de armazenamento de segunda-vida.

5. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Este relatório apresentou os resultados dos testes de caracterização do SAE de 200 kWh/100kW instalado durante o projeto e apontou as diferenças encontradas entre as baterias de primeira e segunda-vidas que compõe o sistema. O estudo também demonstrou a viabilidade técnica da utilização de duas das funcionalidades do SAE analisado: redução da demanda contratada e economia de energia, além de discutir suas viabilidades econômicas.

6. REFERÊNCIAS

[1] AESC, “Cell, Module, and Pack for EV Applications,” 2018. .

[2] Electric Power Research Institute (EPRI), “Energy Storage Integration Council (ESIC) Energy Storage Test Manual,” 2019.

[3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Resolução Normativa ANEEL nº 1.000, de 7 de Dezembro de 2021.” 2021.