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

Projeto PD 0403-0042/2016

Relatório de Características do Sistema de Armazenamento de Energia (SAE) de 1 MWh/1 MW com íons de lítio.

Florianópolis 2022.

SUMÁRIO

1 Introdução 3
2 Premissas para a analise do sae 3
2.1 RESULTADOS 4
2.2 Consumo dos sistemas auxiliares 10
3 Viabilidade técnica das funcionalidades 11
3.1 Suporte de TENSÃO 11
3.2 Suporte de Frequência 12
3.3 Suavização de potência 13

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 centralizada de grande porte.

Este documento apresenta a descrição das características do sistema de armazenamento avaliará o desempenho da bateria de grande porte em situação de operação real, instalada em uma usina híbrida eólica-solar em Capivari de Baixo-SC. Será avaliada a capacidade real da bateria de 1 MW/1 MWh utilizando diversas potências de carregamento e descarregamento, bem como o comportamento do sistema nestas diversas situações. Além disso, são considerados as perdas por degradação, *roundtrip* e as eficiências dos equipamentos. Ademais, será analisado a viabilidade técnica das funcionalidades implementadas no sistema.

2 PREMISSAS PARA A ANALISE DO SAE

O SAE está instalado em um contêiner de 40 pés (12 metros). Ele abriga todos os componentes de potência e comunicação do sistema. Na parte de potência, o sistema utiliza um conversor de potência (PCS – Power Convertion System) de 1 MW que funciona como interface entre o sistema de armazenamento em corrente contínua (CC) e a rede elétrica em corrente alternada (CA) a 60 Hz. O sistema de armazenamento possui 144 módulos de baterias de íons de lítio da fabricante Samsung®. Cada módulo possui uma capacidade de armazenamento nominal de 92 Ah, e tensão nominal de 80,96 V, sendo que a tensão de operação varia entre 70,4 V e 91,3 V. Para o correto funcionamento das baterias, é necessário que a umidade do ambiente não ultrapasse 80% e que a temperatura interna das mesmas em operação estejam 23 °C ±5 °C, portanto o sistema não opera em temperaturas menores a 18 °C e superiores a 28 °C.

O ciclo completo de carga dessa bateria é composto por 80% da capacidade nominal de energia (de 10% a 90% de estado de carga (SOC)), tanto para a carga quanto para a descarga. Portanto, a capacidade energética se dá pela análise da energia despachada nesse processo. Uma métrica comum para mensurar o nível de despacho de sistemas de armazenamento é a razão de capacidade (C), dada pela relação entre a potência de despacho e a capacidade nominal energética.

A análise em diferentes cenários de despacho de potência é necessária, pois ao modificar a potência despachada, modifica-se também as características eletroenergéticas do sistema. A modificação da corrente de despacho das baterias pode impactar na temperatura, nas perdas do PCS e na resistência interna das baterias. Essas modificações alteram as perdas internas da bateria ocasionando uma variabilidade na quantidade de energia entregue pelo SAE. O procedimento do teste de capacidade aqui realizado é composto por dois ciclos completos, considerando um intervalo de 30 min entre cargas e descargas. O ciclo inicial de carga e descarga tem o objetivo de equilibrar a tensão das baterias, sendo que os parâmetros elétricos para cálculo da eficiência

são extraídos apenas do segundo ciclo. Assim, o intervalo de tempo entre carga e descarga permite que as baterias atinjam o equilíbrio térmico para a temperatura inicial não interferir no ciclo de teste. Os rendimentos analisados nesse documento caracterizam a operação e os equipamentos utilizados na construção do SAE. A EQUAÇÃO (1) apresenta a eficiência do ciclo, dada pela energia de carga sobre a energia de descarga do respectivo ciclo. Na EQUAÇÃO (2), a eficiência do PCS é apresentada, que representa a eficiência de conversão de energia CC em CA, medido no PCS sem considerar as perdas do SAE.

$$\eta_{ciclo} = \frac{E_{carga}}{E_{descarga}} \quad (1)$$

$$\eta_{PCS} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} \quad (2)$$

Onde:

$\eta ciclo$ - Eficiência do SAE para o ciclo [%];

ηPCS - Eficiência do PCS [%];

$Ecarga$ - Total de energia de carga [kWh];

$Edescarga$ - Total de energia de descarga[kWh];

ECA - Energia de saída (CA) do PCS [kWh];

ECC - Energia de entrada (CC) do PCS [kWh].

Os dados são medidos com resolução temporal de um minuto pelos sensores espalhados pelo contêiner e sensores internos das baterias. Os dados são concentrados no CLP e enviados para o sistema supervisório (SCADA) e servidores da usina.

Para as análises de degradação do sistema, são analisados diferentes testes de capacidade realizados em diferentes períodos visando analisar a perda de capacidade energética do SAE ao longo do tempo. As baterias tendem a degradar ao longo do tempo de operação e essa degradação é relacionada principalmente ao modo de operação. Portanto, quanto maior a quantidade de ciclos profundos, maior o nível de degradação da bateria. Além disso, o nível de potência de utilização das baterias impacta diretamente na degradação das baterias, pois quando submetidas a maiores potências elas tendem a trabalhar com uma temperatura mais elevada, ocasionando uma maior degradação.

2.1 RESULTADOS

A avaliação da capacidade energética foi realizada através da análise das curvas de operação do sistema, considerando todas as oscilações reais e possíveis perdas do sistema. A FIGURA 1 apresenta as curvas resultantes do teste de capacidade para a operação em ⅓C (aproximadamente 300 kW). A FIGURA 2 apresenta o teste de

capacidade para a operação em ½ C (aproximadamente 500 kW), e a FIGURA 3 apresenta o teste de capacidade para a operação em 1 C (cerca de 1000 kW). A TABELA 1 apresenta as informações medidas obtidas de cada teste.

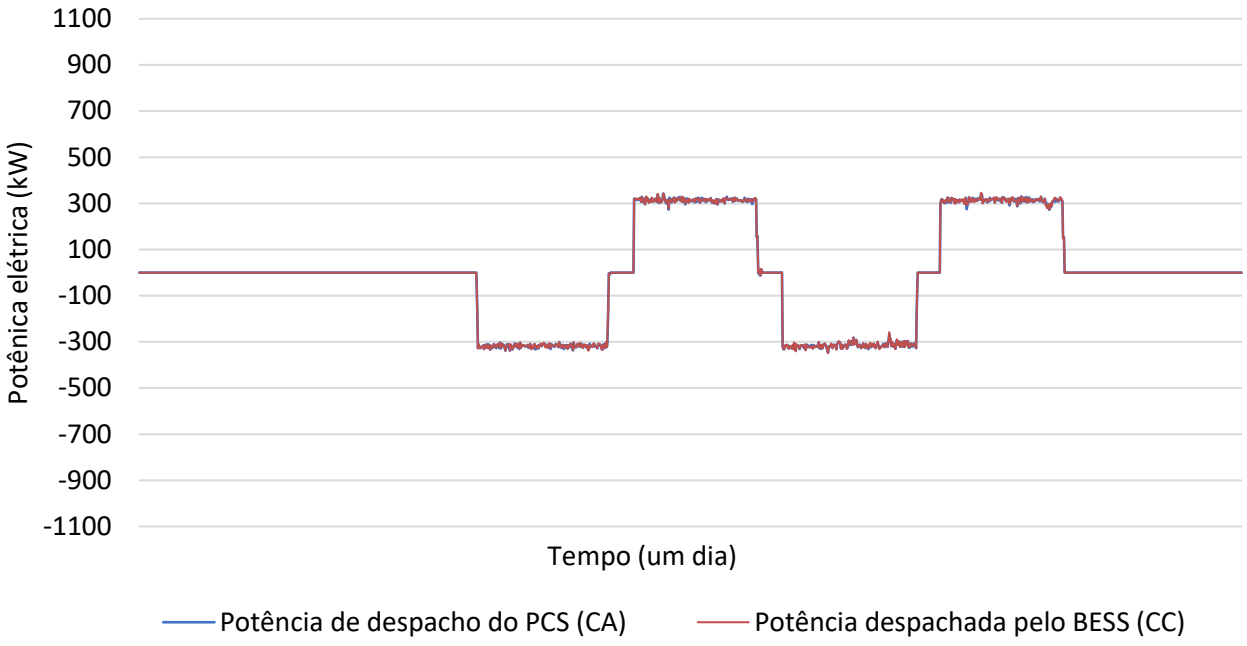


FIGURA 1 - TESTE DE CAPACIDADE PARA 1/3C

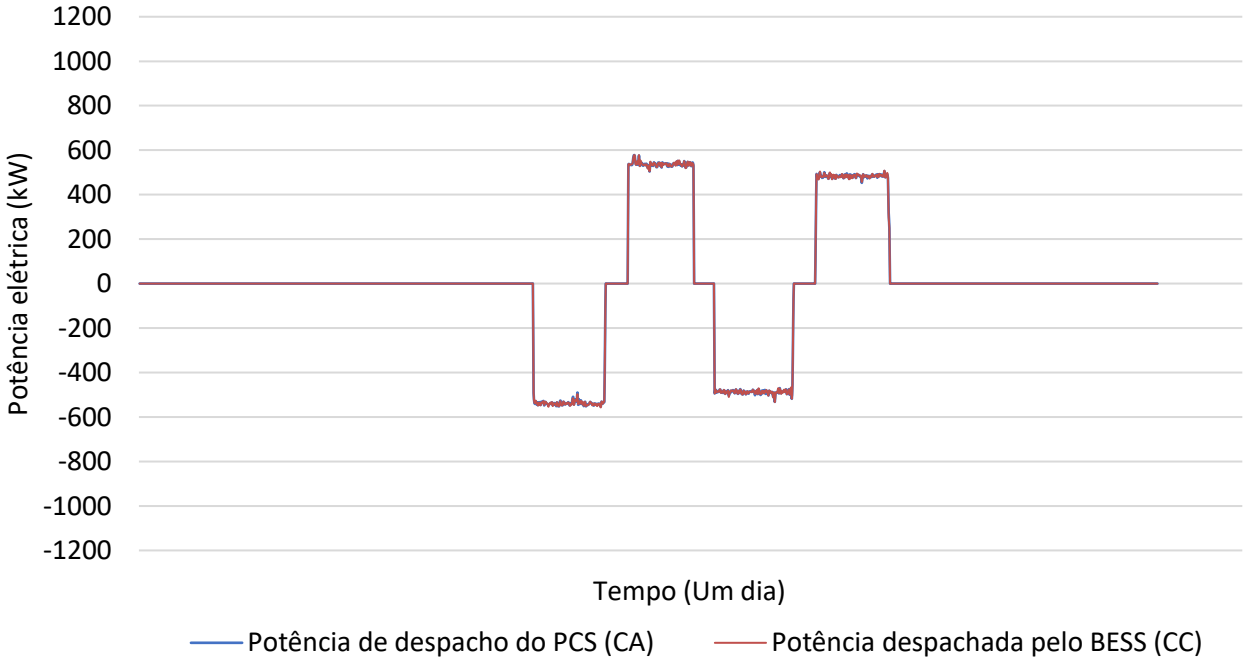


FIGURA 2 - TESTE DE CAPACIDADE PARA 1/2C

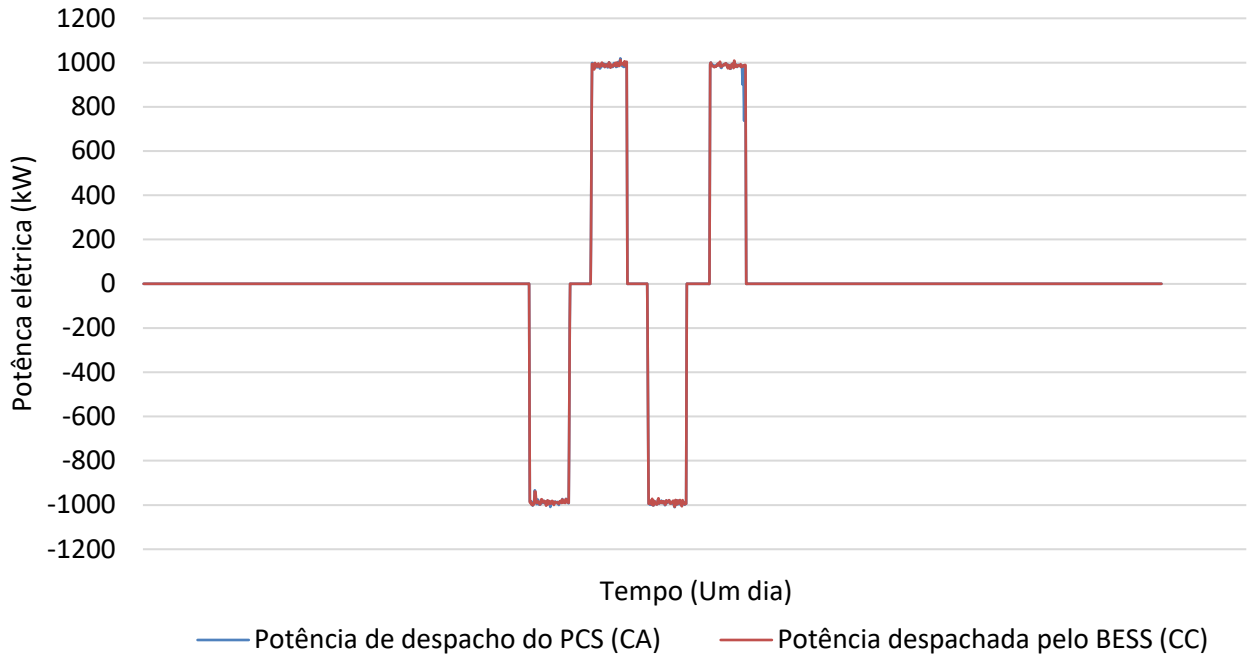


FIGURA 3 - TESTE DE CAPACIDADE PARA 1C

TABELA 1 - DADOS MÉDIOS NOS ENSAIOS

PARÂMETRO	⅓C	½C	1C
Média da potência do PCS (CA) na carga (kW)	-314,92	-485,07	-980,94
Média da potência no SAE (CC) na carga (kW)	-314,51	-484,89	-979,97
Rendimento do PCS na carga (%)	99	99	99
Energia total na carga (kWh)	908,75	905,47	899,20
Média da potência do PCS (CA) na descarga (kW)	286,05	447,53	933,26
Média da potência no SAE (CC) na descarga (kW)	286,36	447,32	949,64
Rendimento do PCS na descarga (%)	99	99	98
Energia total na descarga (kWh)	839,10	835,38	824,45
Porcentagem em relação à capacidade nominal (%)	97,78	97,36	96,08
Eficiência do ciclo (%)	92,33	92,26	91,72
Capacidade energética no ciclo (carga + descarga) (kWh)	1747,85	1740,85	1723,97
Temperatura máxima medida nas baterias (ºC)	24,44	24,78	27,60

Como esperado, para o ensaio a 1C temos a menor capacidade de energia para o sistema de armazenamento. Além disso, podemos observar que durante o teste a temperatura máxima do sistema chegou próximo ao limite superior de operação. Os ensaios a ½C e ⅓C apresentaram valores próximos de capacidade de energia. O PCS utilizado nesse sistema entrega um rendimento elevado, porém o processo de carga e descarga apresenta uma variação considerável em seu rendimento, chegando a perdas próximas a 8% nos testes

com menor potência. Isso significa que cerca de 87 kWh de energia são perdidos por ciclo, uma perda considerável para a análise financeira do sistema. Para todos os cenários de despacho, a tanto a potência CC quanto a CA oscilam em torno do valor definido e essa variação pode ocasionar variações no despacho de energia do sistema. A FIGURA 4 apresenta o impacto dessa variabilidade na potência do sistema.

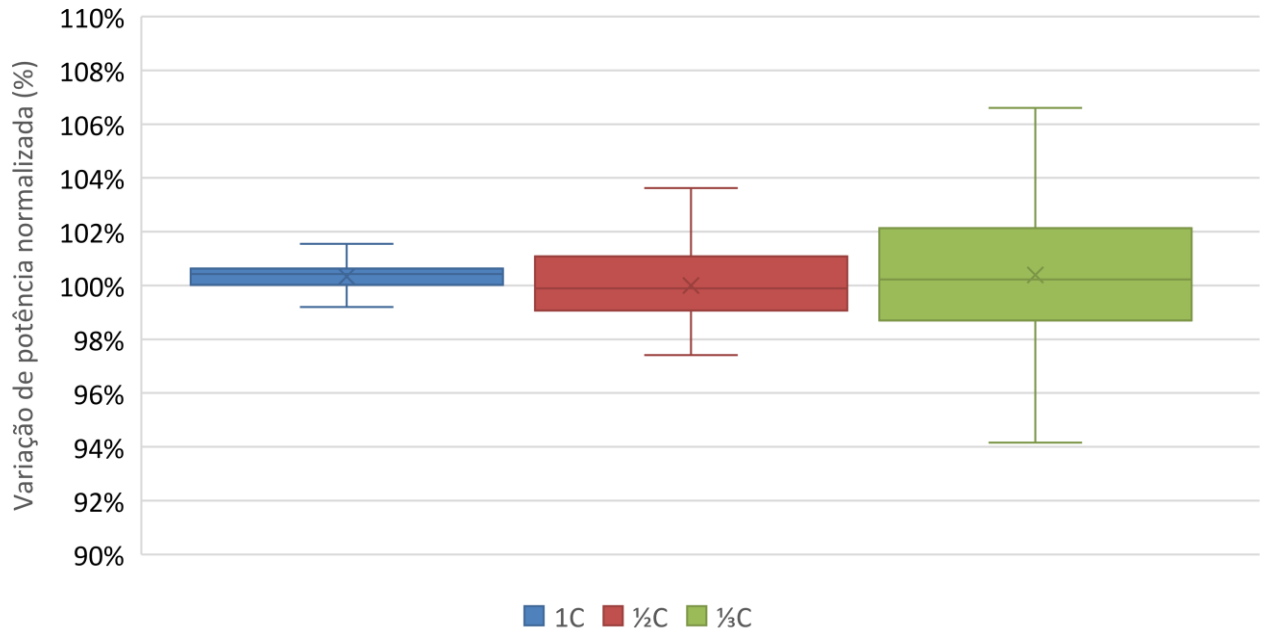


FIGURA 4 - - VARIABILIDADE DA POTÊNCIA DESPACHADA NO SISTEMA DURANTE OS TESTES DE CAPACIDADE PARA DIFERENTES DESPACHOS.

Observa-se que o despacho de potência tem oscilação máxima de 13 % para o despacho em ⅓C, 6% para o despacho em ½C, e 2% para 1C. Essa oscilação é proveniente da margem de erro da operação do PCS, sendo que as variações são mais perceptíveis no despacho com menor potência, pois esta margem de erro é fixa em relação a potência nominal do equipamento (1 MW). Esta análise é de extrema importância, pois demonstra que o erro deve ser considerado com cautela no momento da escolha de estratégia de despacho da bateria, evitando aplicações que necessitem uma precisão de potência despachada mais alta do que a observada.

Visando uma análise de degradação, utiliza-se a metodologia para os testes de capacidade. Avaliando os testes de capacidade realizados em março de 2022, a seguinte as FIGURA 5, FIGURA 6 e FIGURA 7 apresentam os testes para 1/3C, 1/2C e 1C, a TABELA 2 apresenta as características analisadas dos testes. Após esse teste foi realizado um teste de SOH do sistema, que é um procedimento indicado pela fabricante que consiste em carregar a bateria em sua totalidade (100%) e depois descarregá-la até 8%.

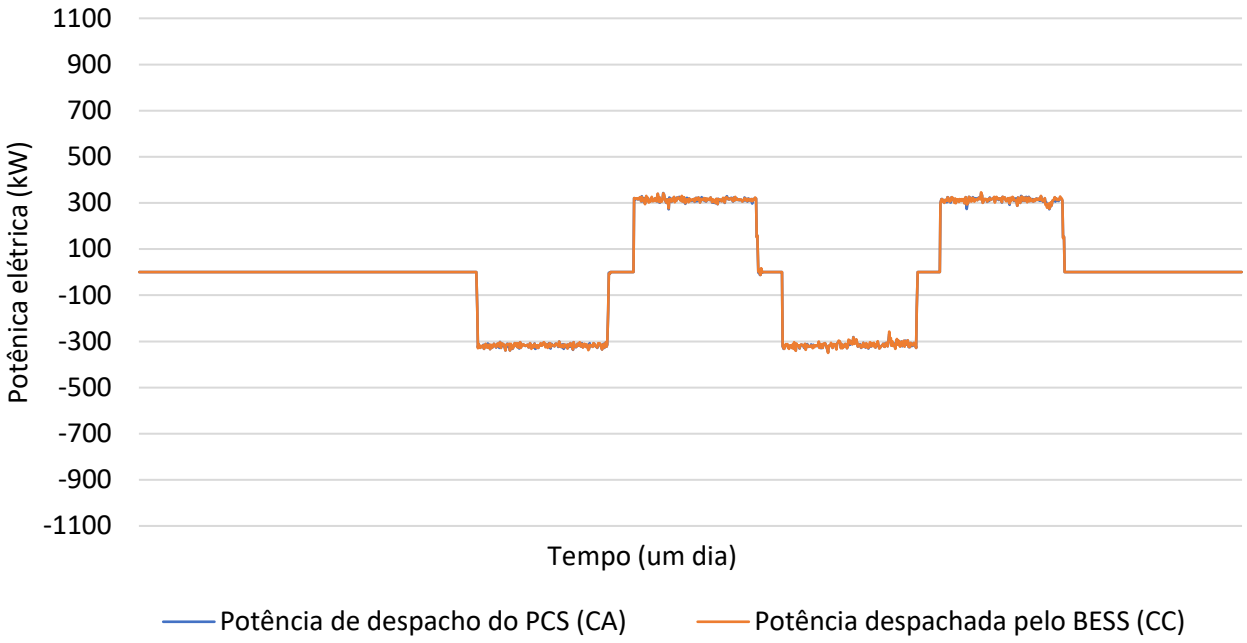


FIGURA 5 - TESTE DE CAPACIDADE PARA 1/3C.

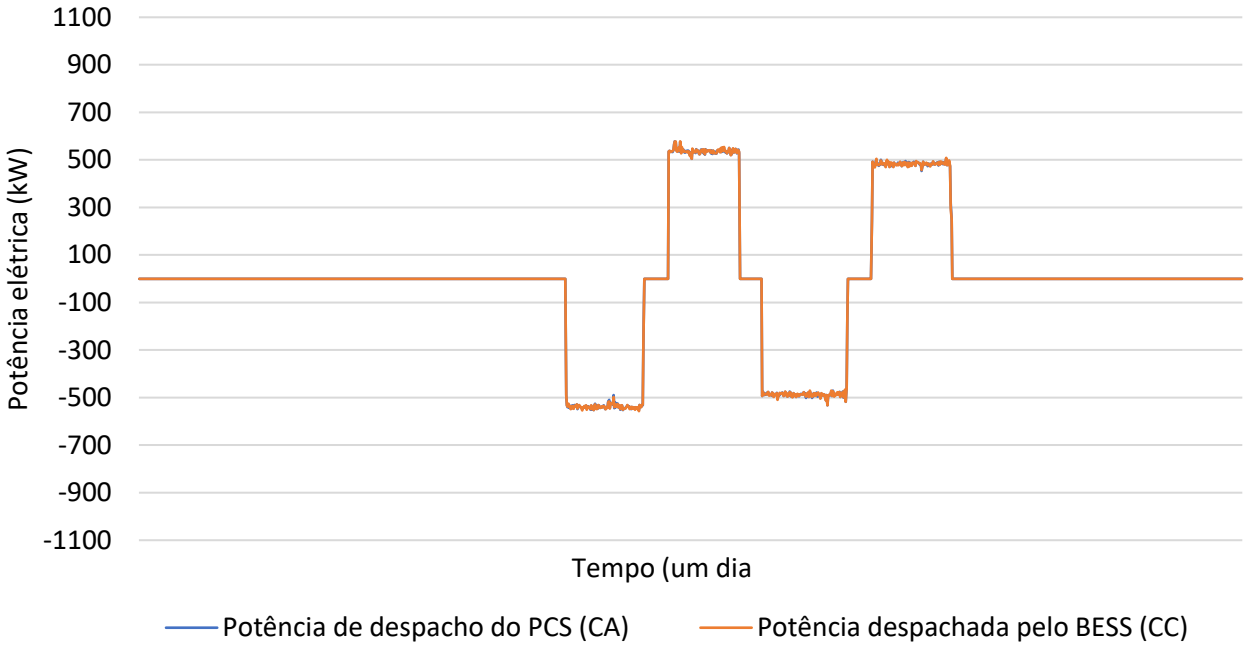


FIGURA 6 - TESTE DE CAPACIDADE PARA 1/2C.

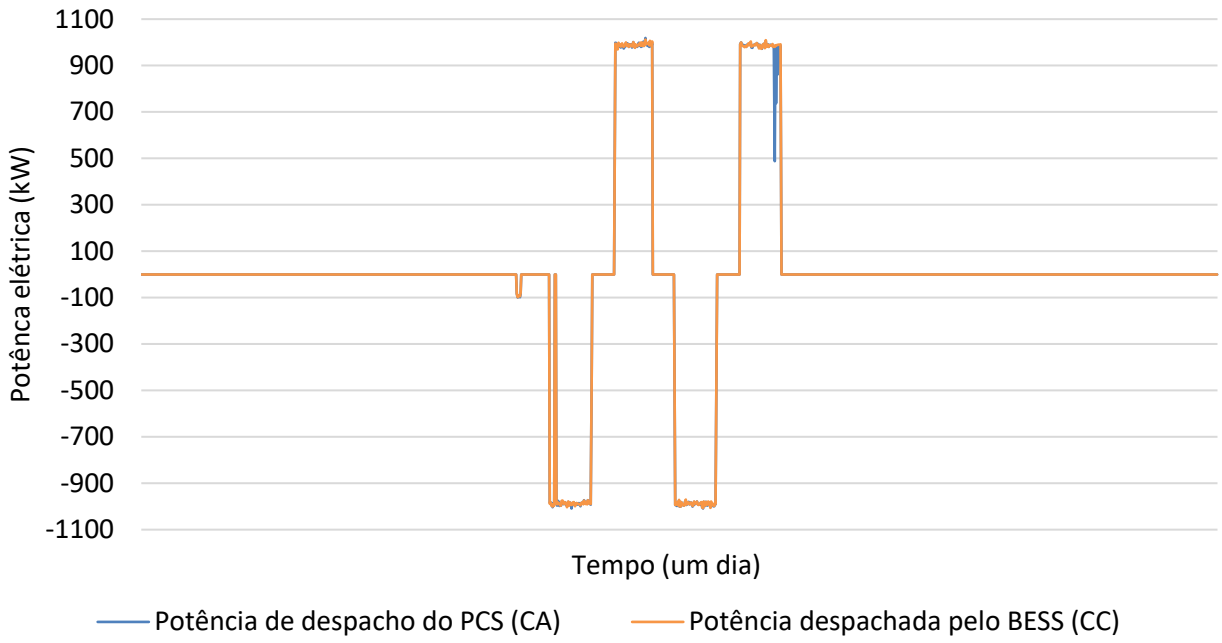


FIGURA 7 - TESTE DE CAPACIDADE PARA 1C.

TABELA 2 - DADOS MÉDIOS NOS ENSAIOS

PARÂMETRO	⅓C	½C	1C
Média da potência do PCS (CA) na carga (kW)	-312,086	-480,704	-972,112
Média da potência no SAE (CC) na carga (kW)	-311,68	-37,76	-979,97
Rendimento do PCS na carga (%)	99	99	99
Energia total na carga (kWh)	889,44	886,23	880,09
Média da potência do PCS (CA) na descarga (kW)	279,97	438,02	913,43
Média da potência no SAE (CC) na descarga (kW)	280,28	437,81	929,46
Rendimento do PCS na descarga (%)	99	99	98
Energia total na descarga (kWh)	821,27	817,63	806,93
Porcentagem em relação à capacidade nominal (%)	95,70	95,29	94,04
Eficiência do ciclo (%)	91,00	91,03	89,99
Capacidade energética no ciclo (carga + descarga) (kWh)	1710,71	1703,86	1687,02
Temperatura máxima medida nas baterias (ºC)	23,21	23,28	27,82

Com a análise realizada em março de 2022, Após 7 meses de operação, foi possível observar que para o despacho em ⅓C, temos uma capacidade energética disponível de 821,3 kWh (uma queda de 2,1%), com uma eficiência de ciclo de 91,00%, e uma temperatura máxima de operação de 23,21 °C. Para o despacho em ½C temos uma capacidade energética de e descarga de 817,63 kWh (uma queda de 2,1%), com uma eficiência de ciclo de 91,03%, e uma temperatura máxima de 23,28 °C. Para o despacho em 1C temos uma capacidade

energética de 806,93 kWh (uma queda de 2,1%) , com uma eficiência de ciclo de 89,99% e uma temperatura máxima de 27,82 °C. O PCS tem uma margem de erro fixa relacionada a sua potência nominal (1 MW). O SOH da bateria medido após o teste foi de 96,7%, o que condiz com a redução de capacidade observada nos testes realizados.

2.2 CONSUMO DOS SISTEMAS AUXILIARES

A operação com alta potência de operação tende a uma temperatura de operação que chega próxima do limite especificado pelo fabricante (28ºC). Por isso, o sistema de climatização é de suma importância e representa um consumo energético significativo. A FIGURA 8 apresenta a potência e a energia despendida pelos sistemas auxiliares, principalmente o de controle térmico, ao longo de um dia em que não há operação de despacho do SAE.

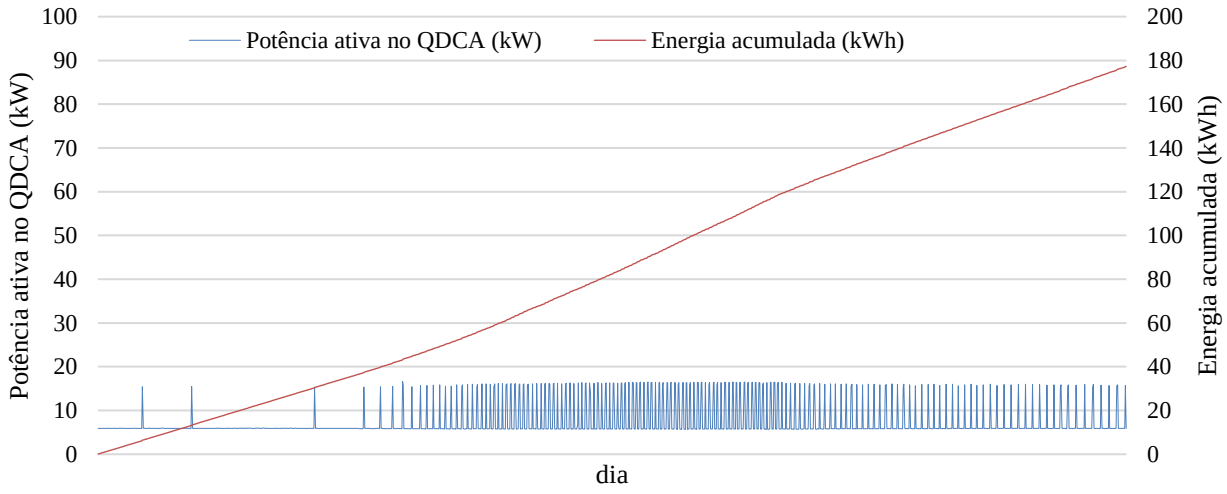


FIGURA 8 - DEMANDA E CONSUMO ENERGÉTICO DOS SISTEMAS AUXILIARES DO SAE AO LONGO DE UM DIA SEM OPERAÇÃO DE DESPACHO DE BATERIA.

No dia selecionado não ouve operação do SAE, assim todo o gasto energético é gerado pelos sistemas auxiliares. O sistema auxiliar consome em torno de 180 kWh em um dia, o que corresponde a 20% da capacidade total de armazenamento de energia do SAE. Nos dias com operação da bateria, esse consumo pode aumentar pois o sistema de refrigeração funciona de forma mais constante.

No dia a dia da operação, observou-se a necessidade de um aparelho de climatização robusto. Em operações com despacho de potência a 1C, a temperatura apresentou constantemente valores próximos ao limite superior indicado pelo fabricante, sendo que este limiar foi rompido em algumas ocasiões, gerando uma falha por sobre temperatura e resultando na interrupção da operação do sistema. Para correção desse

problema, foi necessária uma reestruturação do sistema de climatização, colocando dutos para canalização do ar e utilizando um aparelho de climatização que permite maior controlabilidade da temperatura do sistema.

3 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 de PLD foi testada através do agendamento da operação otimizada, que é apresentada juntamente aos seus resultados em relatório a parte.

3.1 SUPORTE DE TENSÃO

A funcionalidade suporte de tensão, atua injetando ou consumindo energia reativa do sistema. Para o teste, durante um dia o sistema de armazenamento é configurado para atuar no suporte de tensão da rede, observado as variáveis elétricas durante a função e a estabilidade da rede. O sistema de armazenamento deve reduzir as variações de tensão da rede, considerando a velocidade de resposta do sistema de armazenamento.

A FIGURA 9 apresenta um exemplo de teste de suporte de tensão, realizado no dia 19/10/2021. É possível observar que as falhas de instabilidade do PCS, que ocasionam períodos em que a potência reativa é zerada.

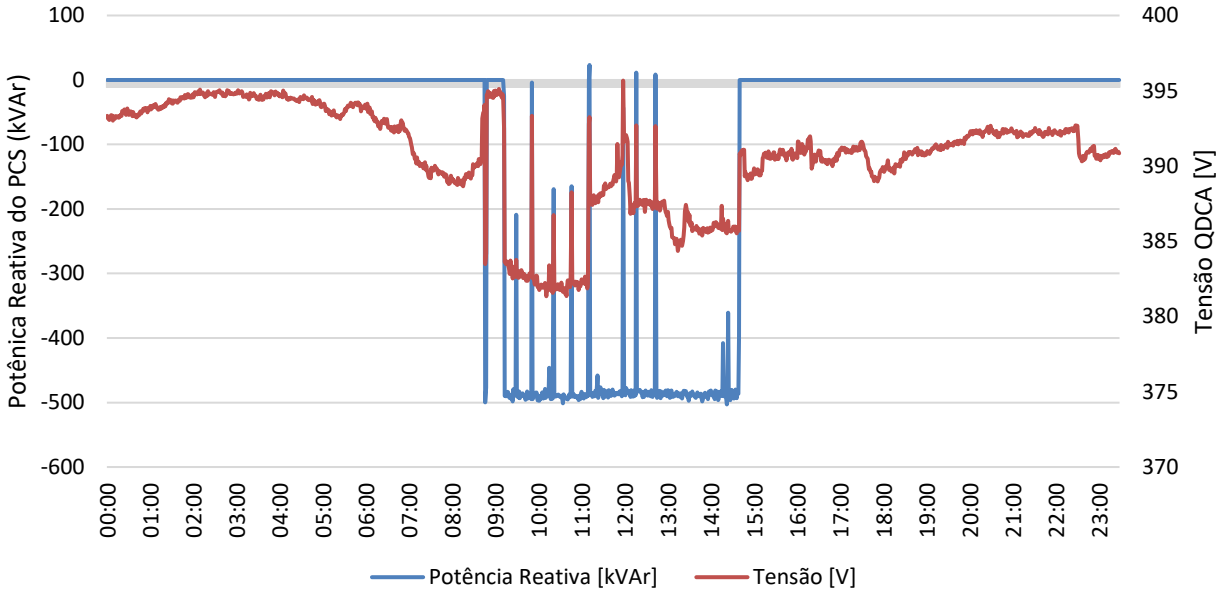


FIGURA 9 - SUPORTE DE TENSÃO (19/10/2021).

Para o caso específico deste SAE, o ponto de conexão está atrelado a barra de conexão da usina termoelétrica Jorge Lacerda, portanto, considerado um início de linha de transmissão. Esse aspecto ocasiona uma característica onde a tensão de operação é propositalmente elevada para que as perdas de tensão ao longo da linha sejam mitigadas, para que a tensão no final da linha esteja nos valores determinados. Com a atuação da funcionalidade, quando observado a tensão de operação medida em seu QDCA, o SAE mantém a tensão em torno de 380V, diminuindo a tensão de operação do sistema injetando reativo no sistema. Nesse modo de

operação, o consumo e a injeção de potência ativa são praticamente zerados, havendo apenas a tensão flutuante de operação proveniente do erro de potência do PCS.

Esse recurso se mostrou eficaz mesmo sendo utilizado numa situação de extremidade de linha de transmissão, e deve ser considerado quando se analisa a viabilidade de um SAE, pois ele pode empregar serviços ancilares a rede sem que seja necessária uma máquina síncrona para isso. Além disso, o SAE pode ser colocado estrategicamente num ponto da rede de modo a garantir o consumo ponta e além promover uma tensão nivelada ao longo do dia, garantido a correta operação do sistema.

Com o aumento da inserção de fonte intermitente no sistema a utilização do SAE para o controle ativo de tensão na rede de distribuição, tende a ser precificado no futuro, e com essa função tende a aumentar a viabilidade financeira do sistema.

3.2 SUPORTE DE FREQUÊNCIA

A funcionalidade de suporte de frequência é realizada quando o SAE consome ou injeta potência ativa dando suporte para o controle da frequência da barra. Para a realização do teste, durante um dia o sistema de armazenamento é configurado para atuar no suporte de frequência da rede, observado as variáveis elétricas durante a função e a estabilidade da rede. O teste visa avaliar o desempenho do sistema de armazenamento em reduzir as variações de frequência da rede, considerando a velocidade de resposta do sistema de armazenamento.

A FIGURA 10 apresenta um exemplo de resultado do teste realizado em 14/10/2021, que mostra a funcionalidade de suporte de frequência, alternado com o carregamento da bateria. Os testes foram realizados com limitação de potência ativa de 600 kW de maneira a evitar o sobreaquecimento das baterias. No gráfico, é possível observar que a frequência não é afetada pela ação da bateria, em razão do baixo impacto da potência de 600 kW no ponto de conexão.

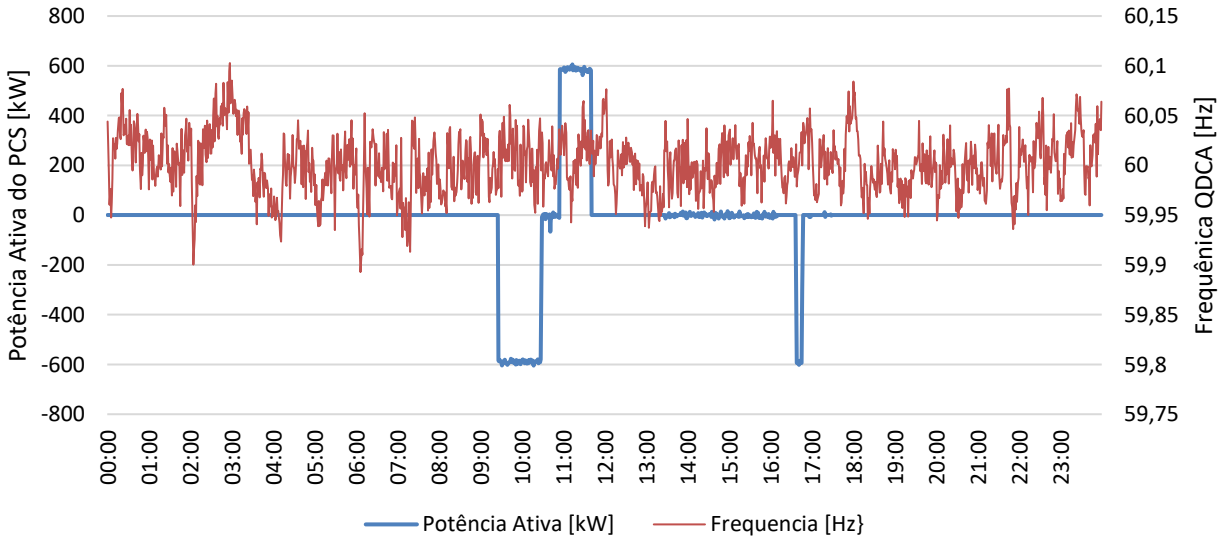


FIGURA 10 - SUPORTE DE FREQUÊNCIA (14/10/2021)

Para o ponto de conexão ao qual foi instalado o sistema, a variação de injeção de potência ativa se torna insignificante frente a injeção de potência ativa da usina termoelétrica conectada na mesma barra, portanto a frequência nesse ponto é definida única e exclusivamente pela usina termoelétrica. Portanto, essa funcionalidade não se mostrou viável para o SAE conectado na rede principalmente quando conectado próximo a uma grande central geradora, pois a capacidade de potência ativa injetada pelo SAE se torna insignificante frente a magnitude das potências do sistema.

3.3 SUAVIZAÇÃO DE POTÊNCIA

A suavização de potência é uma funcionalidade que visa mitigar a variabilidade das fontes renováveis de energia, o sistema de armazenamento irá operar para atenuar grandes variações da potência destes sistemas, proporcionando uma maior estabilidade ao ponto de conexão. Considerando o comportamento intermitente do sistema FV em períodos parcialmente nublados, o sistema será configurado de maneira a suavizar rampas de potência.

Nesse sistema a comunicação entre o SAE e os medidores das fontes intermitentes possuíam um atraso, que não pode ser corrigido em razão da capacidade da rede de comunicação entre os sistemas. Entretanto, foram feitos testes dessa função considerando o atraso existente. Nos testes, o sistema teve capacidade de leitura do medidor e conseguiu agir aumentando ou diminuindo a quantidade de energia armazenada quando havia variação de geração.

Portanto, essa funcionalidade se torna útil para a aplicação do SAE em quaisquer sistemas com geração intermitente. O SAE pode garantir um nível de despachabilidade para o sistema garantindo um melhor aproveitamento da energia gerada ao longo do dia. Entretanto, as barreiras técnicas de comunicação devem ser avaliadas, pois, em grandes sistemas deve-se ter um perfeito sincronismo de informações entre a leitura do sistema intermitente e o SAE para ele conseguir agir eficazmente as variações de geração.