

ANÁLISE DA CAPACIDADE ENERGÉTICA MEDIDA EM UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE GRANDE PORTE EM DIFERENTES NÍVEIS DE POTÊNCIA

Daniel Odilio dos Santos — daniel.odilio@gmail.com

Aline Kirsten Vidal de Oliveira

Marília Braga

Amanda Mendes Ferreira Gomes

Helena Flávia Napolini

Ricardo Rütther

Universidade Federal da Santa Catarina

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

Resumo Este artigo explora a eficácia energética de um sistema de armazenamento em Capivari de Baixo — SC (28,45°S, 48,97°L), com capacidade nominal de 1 MWh e 1 MW, integrado a uma usina solar de 3 MWp e uma usina eólica de 6,9 MW. As avaliações da capacidade energética foram realizadas em três diferentes níveis de potência: um terço da potência nominal alcançou 839,1 kWh com temperatura máxima de 24,44°C; metade da potência nominal resultou em 835,38 kWh com temperatura de 24,78°C; e a potência nominal completa gerou 824,45 kWh com uma temperatura máxima de 27,60°C. O estudo também analisa as oscilações no despacho de potência, observando variações máximas de 13% para um terço da capacidade, 6% para metade, e 2% para a capacidade total. Adicionalmente, o sistema auxiliar registrou um autoconsumo diário mínimo de cerca de 180 kWh, o que representa 20% da capacidade total do sistema.

Palavras-chave: Armazenamento de energia elétrica, Capacidade Energética, Sistema de grande porte

1. INTRODUÇÃO

A integração de sistemas de armazenamento de energia de grande escala baseados em baterias (Battery Energy Storage System — BESS) com usinas solares e eólicas representa um avanço significativo. Essa combinação não apenas melhora a despachabilidade de fontes renováveis, mas também fornece serviços de apoio à rede elétrica e possibilita adiar investimentos em infraestrutura, conforme indicam estudos (CAMPOS et al., 2019; DAS; KRISHNAN; MCCALLEY, 2015). Globalmente, desde o início dos anos 2000, houve um crescimento notável no desenvolvimento de novas tecnologias de baterias, especialmente aquelas empregadas em sistemas solares fotovoltaicos (LUÍS et al., 2018).

Este campo recente e amplo enfrenta desafios como custos elevados e a ausência de normas e padrões, particularmente no Brasil, onde sistemas de armazenamento com baterias de íons de lítio estão sendo implementados sem uma regulamentação específica (ANEKE et al., 2016; MELENDEZ et al., 2018).

Ainda há poucos estudos que utilizam dados de sistemas reais, especialmente no Brasil, onde a quantidade de projetos em operação é limitada. A utilização de dados reais é crucial para analisar a viabilidade das baterias, já que as simulações mais complexas muitas vezes não consideram fatores como perdas não lineares no sistema de climatização e perdas por efeito Joule devido à construção do sistema (JO; KIM; HAN, 2019; RAMOS; TUOVINEN; ALA-JUUSELA, 2021).

Com isso, analisar o desempenho de sistemas instalados, principalmente os de grande porte, é de extrema importância para avaliar as reais condições de desempenho destes sistemas em campo. A análise da real capacidade de energia que pode ser armazenada e injetada na rede em sistemas em operação, em diferentes condições de uso, contribui para o estudo da viabilidade da ampla instalação destes equipamentos. Este trabalho visa avaliar o desempenho de uma 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 quando diversas potências de carregamento e descarregamento são utilizadas, bem como o comportamento do sistema nestas diversas situações.

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 estratégica021/2016 da ANEEL e contou com o apoio financeiro da Engiee Guascor. 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.

2. METODOLOGIA

Em 2016, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) lançou uma chamada pública para a realização de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) estratégicos no tema de armazenamento de energia elétrica no contexto brasileiro (Edital P&D Estratégico ANEEL 021/2016). O laboratório Fotovoltaica-UFSC (FV-UFSC), em parceria com a Engie Brasil Energia S.A. e a Guascor do Brasil LTDA., propôs e teve aprovado o projeto de pesquisa denominado: “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”. Esse projeto engloba análises para três portes de sistemas de armazenamento com baterias de íons de lítio, contemplando o uso residencial em geração distribuída com sistemas de pequeno porte, de aproximadamente 5,6 kWh; o uso no contexto de rede distribuída, porém, com um sistema de armazenamento de médio porte, de aproximadamente 100 kW de capacidade de despacho de potência e 200 kWh de capacidade energética; e o uso em sistemas centralizados, com um sistema de armazenamento de grande porte, com aproximadamente 1 MW de despacho de potência para o SIN e 1 MWh de capacidade de energia armazenada. O presente documento analisa a operação do sistema centralizado, avaliando os impactos energéticos e funcionais para a variação do despacho de potência elétrica.

O BESS está instalado na cidade de Capivari de Baixo (28,45°S, 48,97°L), localizada ao sul de Santa Catarina.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a localidade possui clima Cfa — com verão quente (Clima subtropical úmido) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). O sistema está instalado nas dependências da Usina Solar Fotovoltaica Cidade Azul (USCA). Essa usina possui uma característica de reutilização de área degradada, por estar instalada sobre um depósito de cinzas da Usina Termoeletrica a Carvão Jorge Lacerda. A USCA conta com 3 MWp de geração solar fotovoltaica e dois geradores eólicos com potência nominal de 2,3 MW e 4,6 MW respectivamente. A Figura 1 apresenta a localização do sistema.

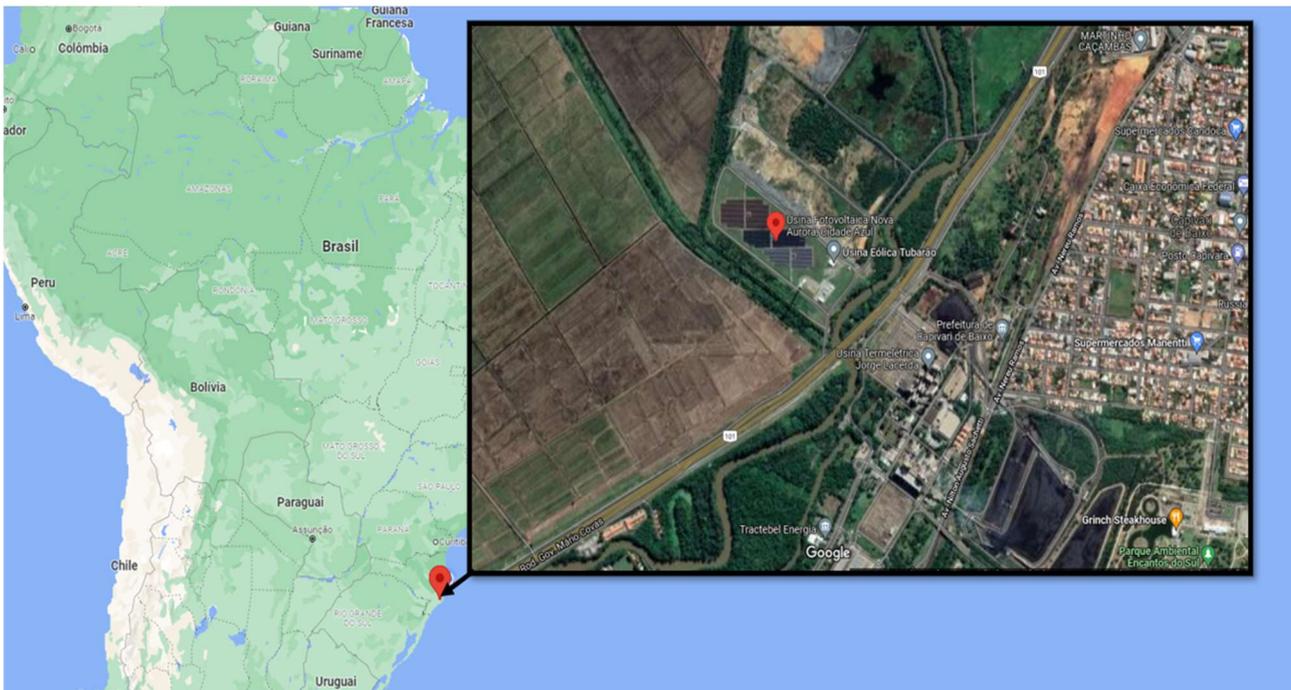


Figura 1 - Localização da USCA em Capivari de Baixo-SC (28,45°S, 48,97°L).

O BESS está instalado em um contêiner de 40 pés (12 m), onde estão todos os componentes de potência e comunicação do sistema. Na parte de potência, o sistema utiliza um conversor de potência (PCS — *Power Conversion 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 operação esteja sempre com temperatura ambiente controlada variando entre 18 °C e 28 °C. O sistema é dividido em dois subsistemas de mesma capacidade, cada um contando com 6 *racks*, sendo que cada *rack* possui 12 módulos em série. A Figura 2 apresenta a disposição física do sistema.

Nesse trabalho serão analisados dados medidos de operação do BESS para dias específicos, nos quais o sistema de armazenamento foi submetido a testes de capacidade. A medição de capacidade energética do BESS é composta por um

ciclo completo (de 10 a 90% de estado de carga - SOC) de carga e descarga, analisando a energia despachada nesse processo. A capacidade real do sistema varia em relação à potência utilizada. 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 (GUAN *et al.*, 2018).



Figura 2 - Disposição física dos módulos de baterias em *racks* no contêiner do BESS.

A análise em diferentes cenários de despacho de potência é necessária, pois a quantidade de energia entregue ao sistema pode ser afetada pelo C utilizado. 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 (XU *et al.*, 2021).

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. 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 BESS. A Eq. (2) apresenta a eficiência do ciclo, dada pela energia de carga sobre a energia de descarga do respectivo ciclo. Na Eq. (3), a eficiência do PCS é apresentada, sendo a eficiência de conversão de energia CC em CA, medido no PCS sem considerar as perdas do BESS.

$$\eta_{ciclo} = \frac{E_{carga}}{E_{descarga}} \quad (2)$$

$$\eta_{PCS} = \frac{E_{CA}}{E_{CC}} \quad (3)$$

Onde:

η_{ciclo} — Eficiência do BESS para o ciclo [%];

η_{PCS} — Eficiência do PCS [%];

E_{carga} — Total de energia de carga [kWh];

$E_{descarga}$ — Total de energia de descarga [kWh];

E_{CA} — Energia de saída (CA) do PCS [kWh];

E_{CC} — 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 supervisor (SCADA) e servidores da usina. Nesse trabalho, foram analisados apenas dados de dias em que foram realizados ensaios de capacidade. Para esse estudo, foram analisados os dados de operação do BESS para três diferentes cenários de taxa C: $\frac{1}{3} C$, $\frac{1}{2} C$ e $1C$.

3. 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 3 apresenta as curvas resultantes do teste de capacidade para a operação em $\frac{1}{3}C$ (aproximadamente 300 kW). A apresenta o teste de capacidade para a operação em $\frac{1}{2} C$ (aproximadamente 500 kW), e a apresenta o teste de capacidade para a operação em 1 C (aproximadamente 1000 kW). A Tabela 1 apresenta as informações medidas obtidas de cada teste.

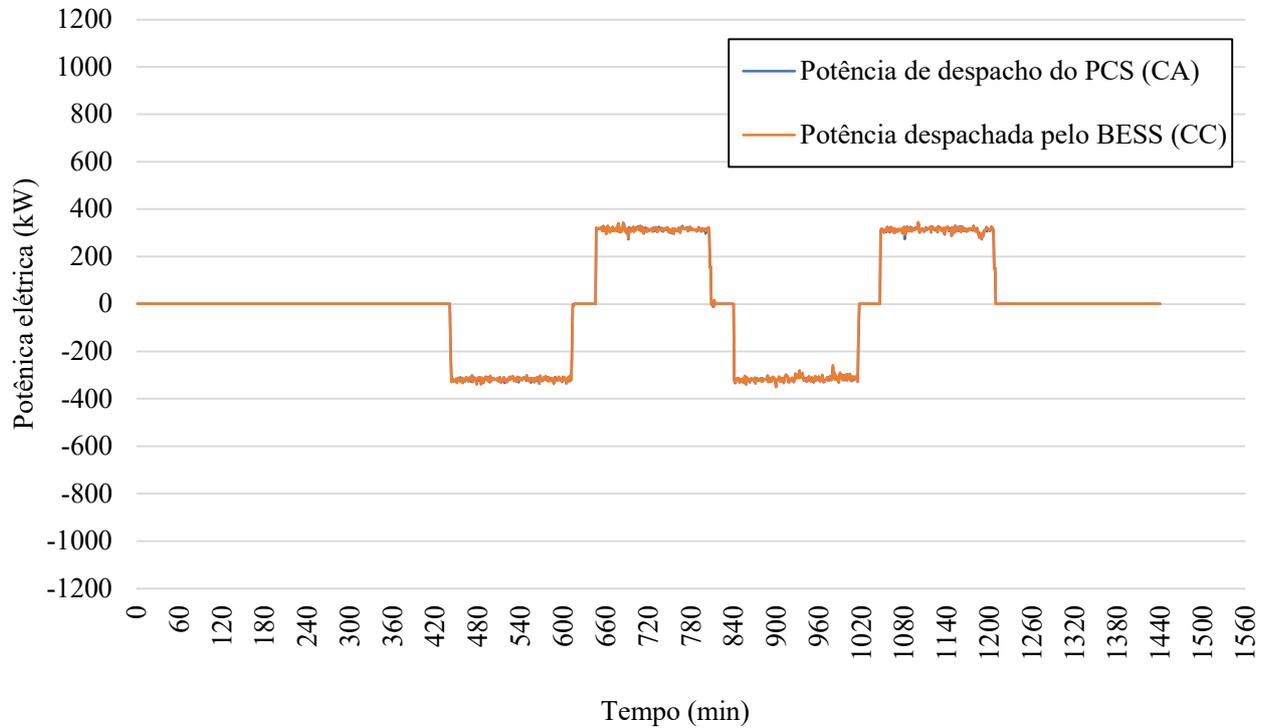


Figura 3 - Teste de capacidade para $\frac{1}{3}C$.

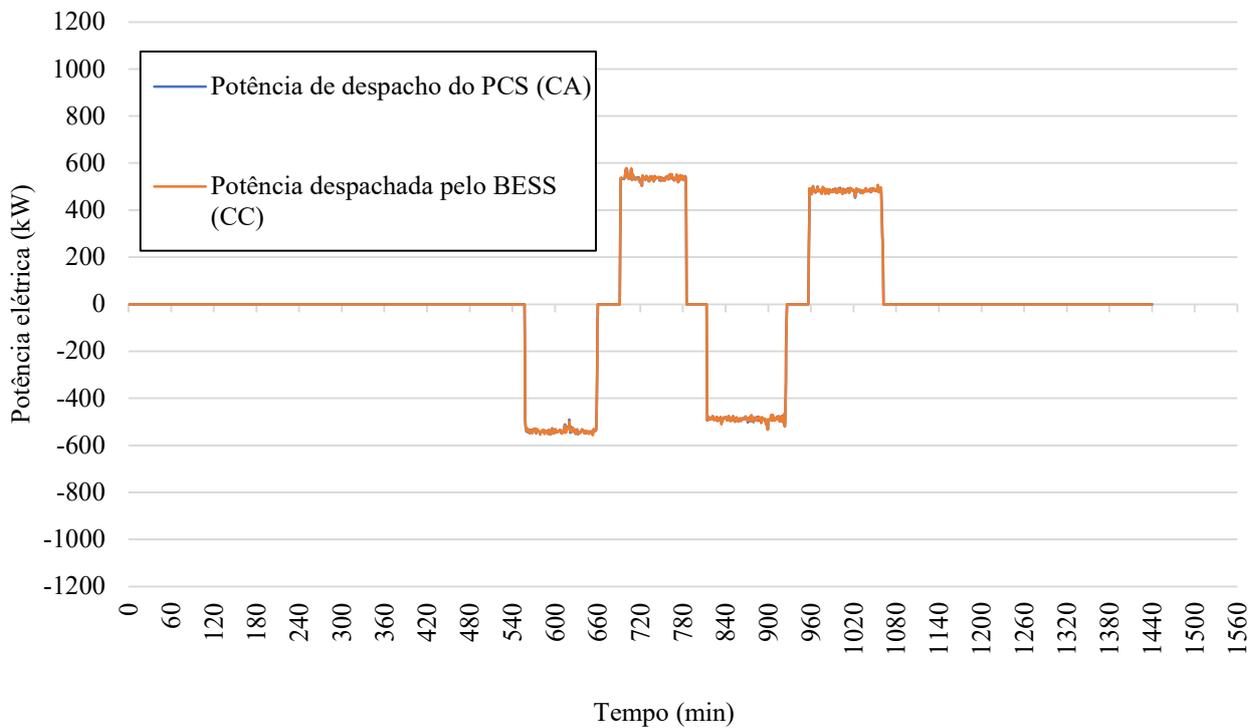


Figura 4 - Teste de capacidade para $\frac{1}{2}C$.

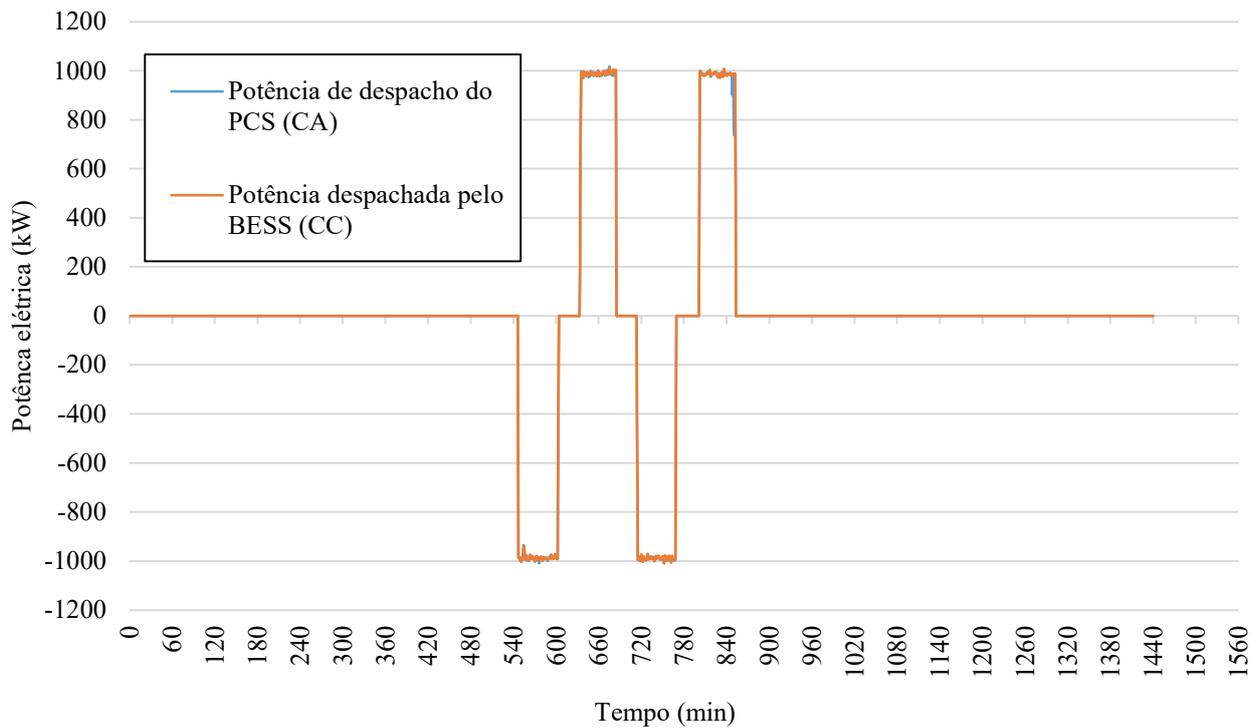


Figura 5 - Teste de capacidade para 1C.

Tabela 1 - Dados médios nos ensaios.

PARÂMETRO	1/3C	1/2C	1C
Média da potência do PCS (CA) na carga (kW)	-314,92	-485,07	-980,94
Média da potência no BESS (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 BESS (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 (°C)	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 1/2C e 1/3C apresentaram valores próximos de capacidade de energia. O PCS utilizando 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 potência tanto CC quanto em CA oscilam em torno do valor definido e essa variação pode ocasionar variações no despacho de energia do sistema. A Figura 6 apresenta o impacto dessa variabilidade na potência do sistema.

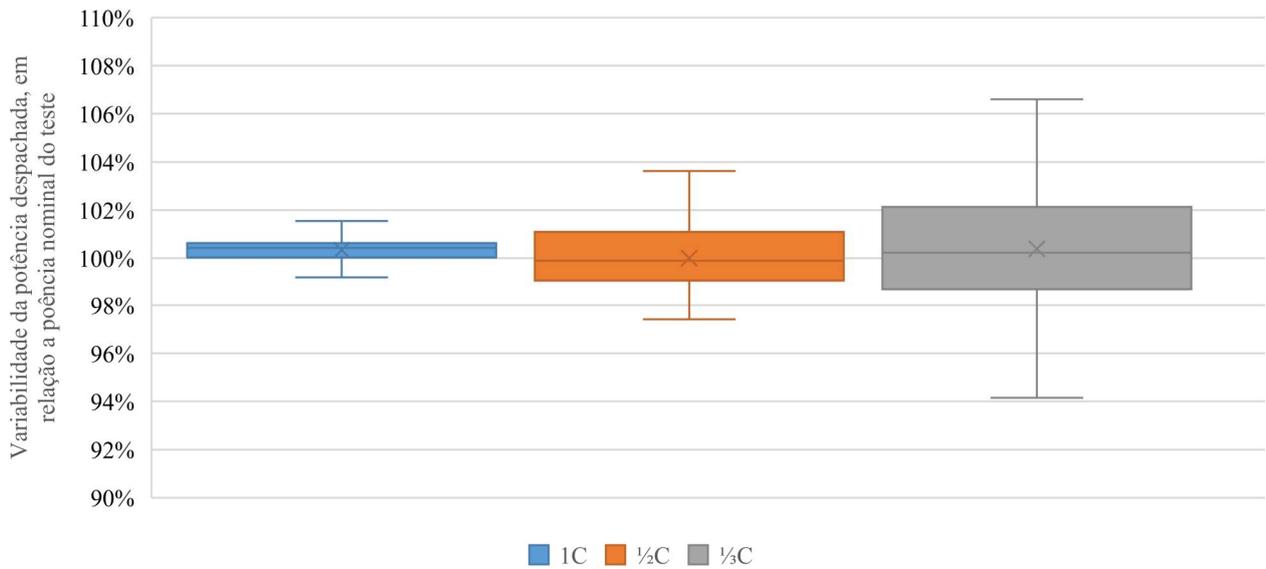


Figura 6 - Variabilidade da potência despachada no sistema durante os testes de capacidade para diferentes despachos.

Observa-se que o despacho de potência tem oscilação máxima de 13% para o despacho em $\frac{1}{3}C$, 6% para o despacho em $\frac{1}{2}C$, 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 à 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.

A operação com alta potência de operação tende a uma temperatura de operação que chega próxima do limite especificado pelo fabricante (28 °C), conforme observado na Tabela 1. Por isso, o sistema de climatização é de suma importância e representa um consumo energético significativo. A Figura 7 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 BESS.

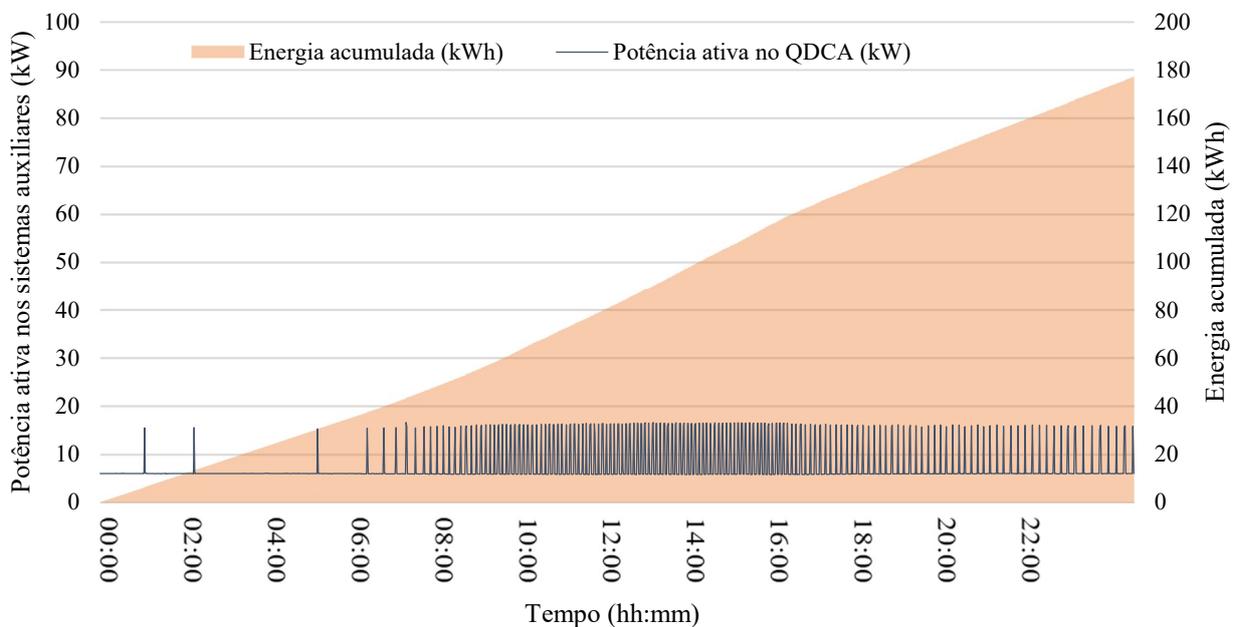


Figura 7 - Demanda e consumo energético dos sistemas auxiliares do BESS ao longo de um dia sem operação de despacho de bateria.

No dia selecionado não houve operação do BESS, assim todo o gasto energético é gerado pelos sistemas auxiliares. O sistema auxiliar consome em torno de 180 kWh em um dia, correspondendo a 20% da capacidade total de

armazenamento de energia do BESS. 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.

4. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou a análise da operação e de medições de capacidade de um BESS conectado ao SIN com 1 MWh de capacidade nominal e 1 MW de potência, instalado na cidade de Capivari de Baixo – SC (28,45°S, 48,97°L) junto a uma usina solar fotovoltaica de 3 MWp e uma usina eólica de 6,9 MW.

Com a análise realizada, foi possível observar que para o despacho em $\frac{1}{3}C$, temos uma capacidade energética disponível de 8391 kWh, com uma eficiência de ciclo de 92,33%, e uma temperatura máxima de operação de 24,44°C. Para o despacho em $\frac{1}{2}C$ temos uma capacidade energética de e descarga de 835,38 kWh, com uma eficiência de ciclo de 92,26%, e uma temperatura máxima de 24,78°C. Para o despacho em 1C temos uma capacidade energética de 824,45kWh, com uma eficiência de ciclo de 9,72% e uma temperatura máxima de 27,60°C. O PCS tem uma margem de erro fixa relacionada a sua potência nominal (1 MW), portanto o despacho tem oscilação máxima de potência de 13% para o despacho em $\frac{1}{3}C$, 6% para o despacho em $\frac{1}{2}C$, e 2% para 1C.

Os sistemas auxiliares do BESS consomem no mínimo em torno de 180 kWh, o que corresponde a 20% da capacidade total de armazenamento de energia do equipamento. Nos dias com operação da bateria esse consumo pode aumentar devido ao fato do sistema de refrigeração funcionar de forma mais constante. Além disso, a climatização do container durante a operação em potência nominal se mostrou um desafio que deve ser mais investigado.

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 PE-00403-0042/2016 da chamada de P&D Estratégico ANEEL 021/2016. Os autores agradecem também aos colegas do laboratório Fotovoltaica-UFSC e da Engie Brasil Energia que não participaram diretamente desta pesquisa, mas ajudaram na instalação e manutenção dos equipamentos utilizados, e pelas discussões frutíferas sobre os temas abordados nesse artigo. Marília Braga e Amanda Mendes Ferreira Gomes agradecem ainda o apoio recebido da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e Daniel Odilio dos santos agradece o apoio recebido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através de suas bolsas de doutorado e mestrado

REFERENCIAS

ANEKE, Mathew *et al.* Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. **Applied Energy**, [s. l.], v. 179, n. 5, p. 350–377, 2016. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>

CAMPOS, Rafael Antunes *et al.* 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**, [s. l.], p. 2078–2081, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980869>

DAS, Trishna; KRISHNAN, Venkat; MCCALLEY, James D. Assessing the benefits and economics of bulk energy storage technologies in the power grid. **Applied Energy**, [s. l.], v. 139, p. 104–118, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.017>

GUAN, Ting *et al.* The degradation of LiCoO₂/graphite batteries at different rates. **Electrochimica Acta**, [s. l.], v. 279, p. 204–212, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.04.197>

JO, Hyeondeok; KIM, Chunghun; HAN, Sekyung. Performance Evaluation of BESS for Korean Power System Using Equivalent Power System Circuit Model. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 52, n. 4, p. 246–251, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.200>

LUÍS, Alexandre *et al.* PANORAMA SOBRE TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DE BATERIAS UTILIZANDO BASES PATENTÁRIAS. [s. l.], 2018.

MELLENDEZ, Teddy A F *et al.* Geração distribuída com armazenamento conectada à rede elétrica. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, [s. l.], n. 2016, 2018.

PEEL, C. M.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 11, p. 1633–1644, 2007. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

RAMOS, Ariana; TUOVINEN, Markku; ALA-JUUSELA, Mia. Battery Energy Storage System (BESS) as a service in Finland: Business model and regulatory challenges. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 40, p. 102720, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102720>

XU, Bin *et al.* Decoupling the thermal and non-thermal effects of discharge C-rate on the capacity fade of lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, [s. l.], v. 510, p. 230390, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230390>

ANALYSIS OF MEASURED ENERGY CAPACITY IN A LARGE STORAGE SYSTEM AT DIFFERENT POWER LEVELS

Abstract. *This paper presents the energy capacity analysis measured with different power levels for a storage system installed in Capivari de Baixo - SC (28.45°S, 48.97°L), with a nominal capacity of 1000 kWh and 1000 kW, together with a 3 MWp solar photovoltaic plant and a 6.9 MW wind power plant. The capacity test performed common third of the rated power resulted in an energy capacity of 839.1 kWh, with a maximum operating temperature of 24.44°C. For the test at half the nominal power, an energy capacity of 835.38 kWh was obtained, with a maximum temperature of 24.78°C. For the test at nominal power, the resulting energy capacity was 824.45 kWh with a maximum temperature of 27.60°C. The PCS has a fixed error margin relative to its nominal power (1 MW), so the power dispatch has a maximum oscillation of 13% for dispatch at $\frac{1}{3}C$, 6% for dispatch at $\frac{1}{2}C$, and 2% for $1C$. The auxiliary system has a minimum self-consumption of approximately 180 kWh per day, which corresponds to 20% of the total energy storage capacity of the BESS.*

Key words: *Energy Storage System, Energy Capacity, Large-Scale System*