



Estratégias de Manutenção Preditiva em BESS em Nível de Transmissão: Um Estudo de Caso na ISA Energia Brasil

Tema: Gestão Ativos e Manutenção

Autores: Vitor Torquato Arioli, Daniel Robson Pinto

Co-Autores: Cristiano de Oliveira, Gabriel Martinelli Galhardo, Gláucio R. T. Hax, Luiz Antônio Soares, Marcos Roberto dos Santos, Maria de Fátima N. C. Rosolem, Raul F. Beck, Thiago Chiachio do Nascimento, Caio C. V. F. A. da Silva

Empresa: Fundação CPQD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

Resumo

Este artigo explora os desafios e estratégias na operação e manutenção de Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria (BESS) de grande escala, com foco no BESS da ISA Energia Brasil, instalado na subestação de Registro-SP. O estudo destaca a aplicação inovadora de medições de impedância interna para monitorar o estado de saúde das baterias de lítio-íon. Foram realizadas medições tanto em campo quanto em laboratório, analisando a eficiência desta técnica como ferramenta preditiva para identificar falhas e degradação das baterias. Os resultados demonstram que a manutenção preditiva baseada em impedância interna pode aumentar significativamente a confiabilidade e a eficiência dos BESS, permitindo intervenções preventivas e prolongando a vida útil dos sistemas. Este trabalho fornece recomendações para a implementação de programas de manutenção preditiva, contribuindo para a melhoria das operações de BESS no nível de transmissão e a estabilidade da rede elétrica.

1. Introdução

A crescente adoção de fontes de energia renovável e distribuída, juntamente com as mudanças no perfil de demanda, tem impulsionado uma rápida evolução nas redes elétricas [1]. Essas transformações estão sobrecarregando significativamente as infraestruturas de transmissão e distribuição de energia, tornando evidente a necessidade de adaptações para garantir a confiabilidade do sistema [1][2]. Nesse contexto, as concessionárias de energia estão reconhecendo cada vez mais o papel crucial dos Sistemas de Armazenamento de Energia em Bateria (*Battery Energy Storage System* - BESS) na gestão da intermitência e na melhoria da confiabilidade da rede.

Os BESSs são particularmente valorizados por sua modularidade, escalabilidade e facilidade de implementação em diversos cenários e localizações geográficas [1]. Além disso, o rápido declínio nos preços das Baterias de Lítio-íon (LIBs) tem tornado os BESSs uma solução atraente para atender à crescente demanda por energia [1]. Estes sistemas não apenas auxiliam na estabilização da rede, mas também fornecem serviços ancilares e aumentam a capacidade de fornecimento de energia [1]. Por exemplo, os

BESSs podem desempenhar um papel fundamental em funções como *peak-shaving*, que ajuda a suavizar os picos de demanda, aliviando congestionamentos na rede e reduzindo a necessidade de geração adicional em momentos de alta carga. Além disso, os BESSs fornecendo reserva de capacidade, garantindo que haja energia disponível para suportar flutuações imprevistas na geração ou no consumo.

Portanto, a implementação eficaz de BESSs no nível de transmissão pode resultar em uma infraestrutura elétrica mais resiliente, capaz de suportar os diferentes tipos de flutuações as quais as redes atuais estão sujeitas. Assim, os BESSs desempenham um papel essencial na transição para um sistema energético mais sustentável e eficiente, contribuindo para a segurança energética e a mitigação de interrupções no fornecimento de eletricidade [1]. Além disso, seu uso estratégico em serviços ancilares reforça a confiabilidade e a robustez do sistema elétrico em todos os níveis.

1.1 Desafios Gerais na Manutenção de BESS

Contudo, apesar dos benefícios significativos, a implantação em larga escala de BESSs apresenta desafios críticos, especialmente relacionados à segurança e à confiabilidade [1]. Com o aumento no número de instalações, diversos incidentes de segurança têm revelado riscos até então desconhecidos, destacando a necessidade urgente de desenvolvimento de padrões de segurança e melhores práticas de engenharia e comissionamento [2][3].

Incidentes recentes em instalações de BESSs evidenciam falhas decorrentes de componentes sem testes iniciais adequados, regras de comissionamento insuficientes, erros do operador e práticas de manutenção inadequadas [4][5]. A ausência de diretrizes específicas para a manutenção contínua desses sistemas, considerando todos os seus componentes, tem sido uma lacuna significativa [1].

A Operação e Manutenção (O&M) eficaz de BESSs requer monitoramento pós-instalação robusto e a implementação de práticas padronizadas, o que atualmente enfrenta desafios devido à falta de integração de dados e padronização nos sistemas. A indústria tem focado na conformidade durante a fabricação e comissionamento, porém, há uma necessidade crítica de aprimorar as estratégias de manutenção contínua para garantir a longevidade e a segurança dos sistemas [1].

1.2 Acidentes Envolvendo BESS e Principais Causas

As O&Ms de BESS são complexas devido à variedade de componentes e à necessidade de monitoramento contínuo para evitar falhas. Estudos mostram que muitos dos incidentes nestes sistemas tem ocorrido nos primeiros anos de operação, indicando possíveis falhas de projeto, fabricação ou inexperiência das equipes de O&M. Acidentes como o da instalação *APS McMicken* no Arizona [6], EUA, e o incidente no *Victorian Big Battery* na Austrália [7] evidenciam que falhas em componentes, como células defeituosas e sistemas de resfriamento ineficazes, podem levar a consequências graves, incluindo explosões e incêndios.

Portanto, apesar das normas existentes, constata-se que ainda há uma lacuna na manutenção contínua de BESS [1]. A falta de padronização em sistemas de monitoramento e integração de dados dificulta a identificação precoce de falhas e a implementação de medidas preventivas eficazes. Assim, a análise de acidentes pode fornecer lições valiosas para melhorar as práticas de O&M e tais normais.

Em um levantamento sobre acidentes em BESS [8], constatou-se que a maioria dos acidentes documentados ocorreu durante a operação normal, destacando a necessidade de medidas preventivas robustas. A instalação de sistemas de supressão de incêndio eficazes e a revisão dos protocolos de segurança são algumas das medidas que podem mitigar os riscos.

Por exemplo, o incidente no *Moss Landing Energy Storage Facility* [9], na Califórnia, levou à implementação de verificações rigorosas de sistemas de resfriamento para prevenir vazamentos futuros. Da mesma forma, a experiência da Tesla com o *Megapack* na Austrália [10] resultou em melhorias na proteção contra falhas elétricas e na resposta a emergências.

Ademais, em um *benchmarking* internacional realizado em 2023 nos EUA pelos autores deste artigo constatou-se *in loco* o que empresas com ampla experiência em BESS têm praticado em termos de O&M em seus sistemas. A manutenção preventiva incluindo a verificação de torques de conexões, ensaios de capacidade de baterias, limpeza de filtros, calibração de sensores e uso de termografia, tem se mostrado muito eficaz para garantir a operação segura e eficiente dos sistemas. Além disso, empresas como a Fractal e a Tesla também adotaram o ajuste de Estado de Carga (*State of Charge* - SoC) durante a manutenção como forma de otimizar a segurança e a longevidade das baterias. Também foi observado que a manutenção de sistemas de resfriamento líquido requer atenção especial devido à sua suscetibilidade a falhas. Baseando nessas e outras lições aprendidas, recomenda-se o desenvolvimento de protocolos de manutenção padronizados que englobem todos os aspectos dos BESS, desde os componentes elétricos até os Sistemas de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System* - EMS). A adoção de sistemas de monitoramento avançados e a integração de dados operacionais em tempo real são cruciais para detectar falhas precocemente e evitar incidentes catastróficos.

1.3 Visão Geral dos Tipos de Manutenção (Corretiva, Preventiva e Preditiva)

A manutenção de BESSs é crucial para assegurar sua eficácia, segurança e longevidade. Devido à robustez e resiliência exigidas pelo sistema elétrico ao qual estão conectados, além da manutenção corretiva e preventiva, é recomendável a adoção de manutenção preditiva. Essa abordagem visa aumentar a confiabilidade operacional e otimizar o desempenho dos sistemas, reduzindo o risco de falhas inesperadas e prolongando a vida útil dos componentes.

Cada tipo de manutenção tem características, vantagens e desvantagens específicas. A manutenção corretiva, realizada após a ocorrência de uma falha, é geralmente mais simples, mas pode resultar em tempos de inatividade prolongados e custos elevados de reparo. A manutenção preventiva, programada em intervalos regulares para prevenir falhas, ajuda a minimizar paradas inesperadas, embora possa resultar na substituição de peças ainda funcionais, aumentando os custos operacionais.

A manutenção preditiva, por sua vez, utiliza técnicas avançadas de monitoramento e análise de dados para prever falhas antes que ocorram, permitindo intervenções mais precisas e eficientes. Essa abordagem melhora a disponibilidade do sistema e reduz os custos de manutenção a longo prazo, evitando reparos desnecessários e prolongando a vida útil dos componentes ao identificar problemas em estágio inicial.

A escolha da estratégia de manutenção depende da criticidade dos ativos e das metas de confiabilidade e eficiência. Uma combinação de manutenção preditiva, preventiva e corretiva é frequentemente empregada para otimizar a gestão de ativos. No contexto dos BESSs, o monitoramento preditivo e a manutenção preventiva são essenciais para evitar falhas catastróficas e garantir a segurança e a confiabilidade dos sistemas [1]. Projetos bem planejados e seguros também desempenham um papel importante na mitigação de falhas em tempo real.

A eficácia dos programas de manutenção preventiva e preditiva depende de fatores como a seleção de equipamentos, definição de criticidade, estabelecimento de procedimentos e periodicidade de manutenção, treinamento de pessoal e planejamento das atividades. Essas medidas garantem que os sistemas operem eficientemente, reduzindo falhas inesperadas e custos associados.

1.4 O BESS da ISA Energia Brasil e Contextualização do Estudo de Caso

Contribuindo para aumentar a confiabilidade na operação desses sistemas conectados às redes elétricas, recentemente, a ISA Energia Brasil, um dos maiores grupos de transmissão de energia elétrica da América Latina, implantou com sucesso o primeiro BESS do Brasil, com capacidade de potência de 30 MW, localizado na subestação de Registro-SP. Este sistema foi projetado para operar em períodos de pico de consumo, proporcionando reforço energético substancial à rede elétrica, garantindo fornecimento adicional de energia por até duas horas, totalizando 60 MWh. Esta iniciativa estratégica é fundamental para evitar interrupções no fornecimento de energia causadas por elevada procura durante as horas de ponta, melhorando significativamente a segurança e a confiabilidade na prestação de serviços essenciais à sociedade.

Este BESS é composto por dez linhas, cada uma formada por duas unidades de armazenamento contendo nove *racks*. Dentro de cada *rack* estão presentes oito módulos, equipados com células de lítio-íon. O sistema foi projetado para fornecer até 30 MW de potência ativa por duas horas, totalizando uma capacidade de 60 MWh. Sua função primordial como provedor de serviço ancilar é o *peak-shaving*, destinado a mitigar sobrecargas na Linha de Transmissão (LT) de 138 kV, no trecho entre Parelheiros-SP e a subestação em Mongaguá-SP, durante a temporada de verão, notadamente no trecho de menor capacidade da referida LT. O sistema é composto por cinco conjuntos principais de componentes:

- **Sistema de Armazenamento de Energia:** Baterias de lítio-íon de grande capacidade, da tecnologia de Lítio Ferro Fosfato (LFP), responsáveis por armazenar a energia elétrica.
- **Sistema de Conversão de Energia (PCS):** Inclui inversores, transformadores, sistemas de resfriamento e proteções elétricas. Os inversores convertem a energia armazenada nas baterias em energia elétrica para a rede ou uso local. Os transformadores ajustam a tensão para compatibilidade com a rede elétrica, enquanto os sistemas de resfriamento mantêm a temperatura das baterias dentro de limites seguros.
- **Eletrocentro de Controle:** Monitora e gerencia a operação do BESS, incluindo o estado das baterias, recarga, descarga, tensão, corrente e outros parâmetros operacionais. O sistema de controle toma decisões para otimizar a operação, garantindo fornecimento de energia conforme necessário.
- **Eletrocentro:** Contém o EMS, que engloba todos os PCSs, BMS (*Battery Management System*), sistemas de segurança e monitoramento, além do sistema de proteção e conexão em média tensão.
- **SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas):** Protege todo o sistema contra descargas atmosféricas.

Durante a operação normal, o BESS é frequentemente despachado em dias designados como obrigatórios para aliviar a carga elétrica no litoral sul do estado de São Paulo, especialmente durante o verão. O EMS desempenha um papel crucial, gerenciando o despacho conforme a disponibilidade, e o sistema foi projetado para operar mesmo em caso de perda de uma ou mais linhas do banco de baterias, garantindo a continuidade operacional.



Figura 1. Visão geral do BESS da ISA Energia Brasil localizado em Registro-SP. Elaboração Própria.

Inspirado neste sistema, a ISA Energia Brasil, em parceria com CPQD (Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações) e IEE-USP (Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo), desenvolveu o projeto pesquisa PD-00068-0063/2023 ao qual este artigo está vinculado, no âmbito do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PROPI) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Tal projeto tem como objetivo propor recomendações para especificação, instalação, comissionamento, O&M e aspectos de fim de vida útil de um BESS.

1.5. Objetivos desse Artigo

Portanto, o presente artigo tem como objetivo apresentar um estudo detalhado sobre os desafios e estratégias na operação e manutenção preditiva de BESS de grande escala, com foco na aplicação prática e análise de um BESS em operação no nível de transmissão. O artigo busca explorar a eficácia de medições de impedância interna como uma técnica preditiva para monitorar o estado de saúde das baterias de lítio-íon, fornecendo recomendações para melhorar a confiabilidade, eficiência e segurança desses sistemas em operações reais.

2. Desenvolvimento

2.1 Programa de Manutenção Preditiva de BESS

A manutenção preditiva desempenha um papel crucial na operação eficaz e na longevidade dos BESS, baseando-se no monitoramento contínuo de parâmetros críticos para antecipar falhas potenciais e implementar ações corretivas de forma proativa, garantindo a confiabilidade do sistema.

O projeto de P&D ao qual este artigo está vinculado desenvolveu um programa inovador de análises e manutenções preditivas, centrado na medição da impedância interna de módulos específicos do BESS. Esses módulos são selecionados com base em variações e anomalias identificadas ao longo do acompanhamento e análise de dados do EMS. A aplicação dessa técnica em LiBs de grande capacidade em um sistema operacional real, como este BESS em campo, representa uma inovação significativa.

Esse programa prevê medições regulares de impedância interna, com dados armazenados e analisados para detectar antecipadamente tendências e anomalias. A identificação dessas variações permite ações preditivas que visam prevenir falhas críticas. Entretanto, os limiares que indicam pontos de atenção e a necessidade de ações ainda não são completamente conhecidos, especialmente para sistemas de grande porte como este. Assim, o estudo busca estabelecer essas métricas e determinar a melhor dinâmica para a execução das atividades preditivas.

Para alcançar esses objetivos, o projeto realiza medições de impedância interna tanto em campo, no BESS de Registro-SP, quanto em amostras em laboratório, em ambientes controlados. Essa abordagem tem como finalidade encontrar as melhores recomendações para a manutenção de sistemas BESS em operação, otimizando sua confiabilidade e eficiência.

Além disso, o programa estabelece critérios rigorosos para a seleção dos módulos e a periodicidade das medições, ajustando a frequência conforme a análise dos resultados. Paralelamente, o EMS monitora diversos parâmetros operacionais, como a capacidade fornecida durante ciclos completos de carga e descarga, o número de ciclos, o Estado de Saúde (*State of Health* - SoH) e as taxas de degradação. Esses indicadores são fundamentais para prever o envelhecimento do sistema e gerenciar sua manutenção.

Assim, esse programa de manutenção preditiva visa aumentar a vida útil do BESS, minimizar custos operacionais e prevenir falhas inesperadas, assegurando a continuidade do fornecimento de energia.

2.2 A Metodologia de Análise Preditiva por Medições de Impedância Interna

A impedância interna de uma bateria é um parâmetro complexo que representa a combinação de resistências ôhmicas, capacitivas e indutivas dentro da célula. A Figura 2-a ilustra a representação dos componentes ôhmicos internos de uma célula, destacando como a resistência ôhmica e a capacitância contribuem para o comportamento elétrico da bateria. As medições de impedância interna, especialmente quando realizadas com corrente alternada (c.a.), fornecem informações detalhadas sobre o SoH da bateria, revelando degradações estruturais que podem indicar falhas iminentes.

Ao aplicar uma c.a. de diferentes frequências na célula, é possível medir a variação da tensão e determinar a impedância resultante. Esse processo permite identificar distintas contribuições de resistência, capacitância e indutância, como mostrado na Figura 2-b, que ilustra a determinação da impedância interna e o típico deslocamento de fase entre tensão e corrente.

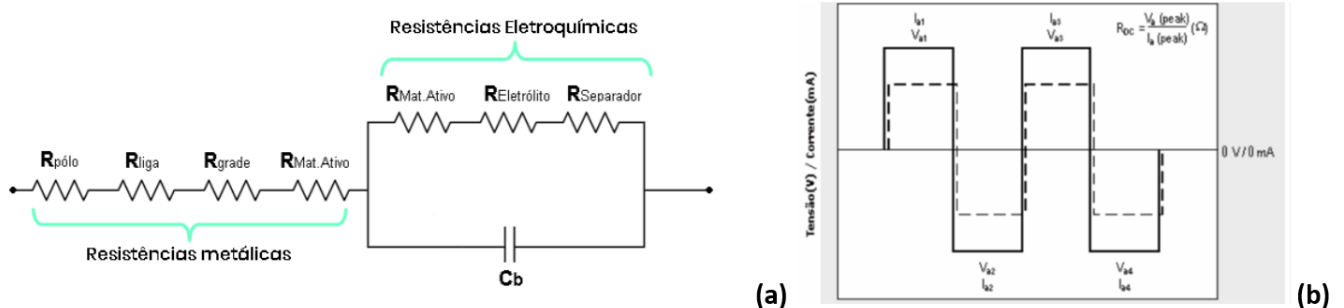


Figura 2. (a) Representação dos componentes ôhmicos internos de uma célula (Elaboração própria)
(b) Determinação da impedância interna (Extraído de [11])

Para implementar essa técnica, utilizou-se o instrumento Hioki Battery HiTESTER BT3564, um dispositivo de alta precisão operando a 1 kHz, com acurácia de $\pm 0,2$ Hz e precisão de leitura de tensão e impedância de $\pm 0,5\%$, capaz de medir tensões de 2 a 1.000 V, adequado às características dos módulos de alta tensão

do BESS. Este equipamento foi escolhido por ser o único dispositivo comercial disponível no mercado nacional apto a realizar medições em módulos de lítio-íon de alta tensão, sem a necessidade de recarregar e descarregar as baterias durante o processo de medição.

As medições foram realizadas em diversos *racks*, cada um composto por oito módulos de bateria, em diferentes SoCs. Os resultados foram agrupados por módulo para facilitar a análise comparativa entre os *racks*. A validação da metodologia será complementada por estudos laboratoriais, que investigarão a correlação entre as medições de impedância e os testes de capacidade dos módulos.

2.3 Análise de Medições de Impedância

Neste sentido, apresentam-se na sequência as medições de impedância interna realizadas tanto em *units* e *racks* reais em operação no BESS de Registro-SP, quanto em amostras de baterias submetidas a ensaios laboratoriais. Esses ensaios têm o objetivo de reproduzir as condições reais de uso das baterias, mas em um ambiente controlado que permite uma análise mais detalhada e a aceleração do envelhecimento para fins de estudo. A combinação dessas abordagens fornece uma visão abrangente da condição das baterias, permitindo identificar sinais de degradação que possam antecipar falhas e otimizar a manutenção preventiva, refinando a metodologia proposta.

2.3.1 Medições de Impedância em Campo no BESS de Registro

As medições de impedância interna no BESS de Registro-SP começaram em outubro de 2023 durante a manutenção preventiva e passaram a ser repetidas semestralmente nas mesmas unidades para monitoramento contínuo, utilizando o dispositivo Hioki supracitado.

Foram coletados dados de cinco unidades específicas (7, 8, 15, 17 e 18), cada uma composta por nove *racks*, contendo oito módulos de bateria cada. A escolha dessas unidades e *racks* foi orientada tanto por indicações dos operadores do BESS, que observaram valores anômalos no EMS, quanto por necessidades de manutenção preventiva identificadas nesses *racks*, aproveitando a oportunidade para realizar as medições de impedância.

Analisando primeiramente os dados mais recentes, referentes às medições ocorridas durante as atividades de manutenção em outubro de 2024, sabe-se que os níveis de SoC dos racks durante as medições variaram entre 36,6% e 58,1%. No projeto, realizaram-se estudos sobre a influência do SoC nas medições de impedância interna, conforme apresentado na próxima subseção, revelando variações aproximadamente nulas, sem impacto significativo e irrelevantes para as medições de impedância realizadas.

Os dados coletados foram organizados por *unit* e *rack*, facilitando a análise comparativa. Diagramas de barras foram gerados para algumas *units* a fim de ilustrar as impedâncias de cada módulo e *rack*, conforme apresentado na Figura 3.

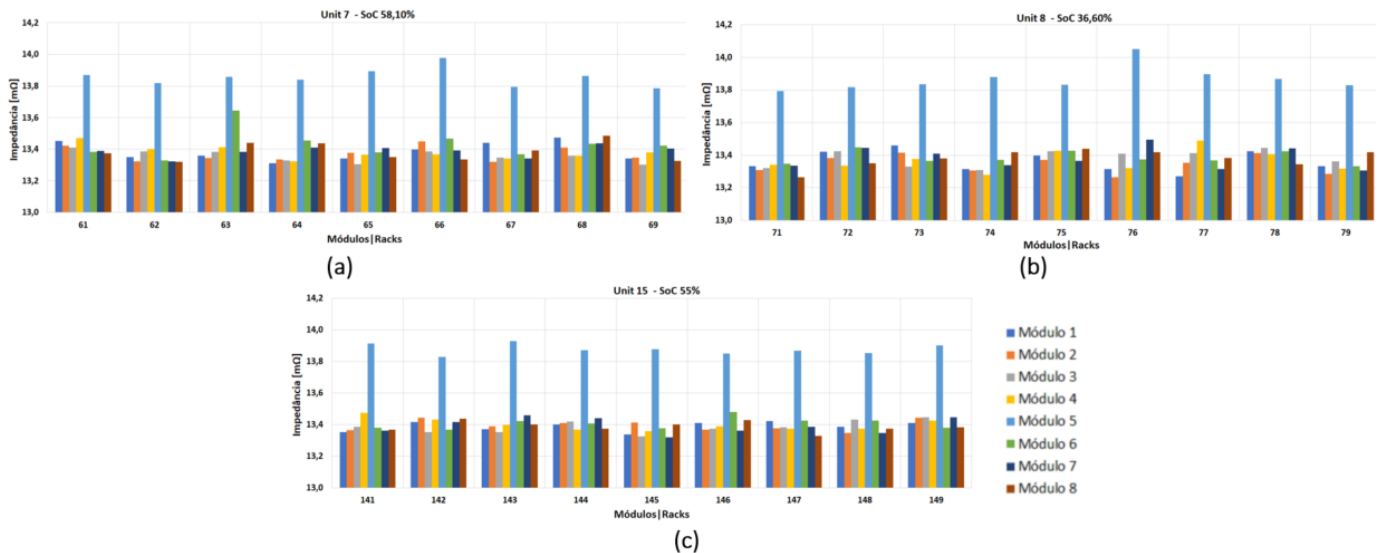


Figura 3. Gráficos de Impedância interna dos racks e módulos contemplados pelas (a) unit 7, (b) unit 8 e (c) unit 15 medidos em out-2024. Elaboração Própria.

Observou-se que, consistentemente, o módulo número 5 de cada rack apresentou os maiores valores de impedância interna, variando de 13,75 mΩ a 14,05 mΩ. Este padrão indica uma degradação mais acentuada desses módulos, sugerindo a necessidade de atenção especial para manutenção.

A análise de casos específicos revelou, por exemplo, que na Figura 3-a (unit 7), o módulo 6 do rack 63 registrou uma impedância de 13,65 mΩ. Similarmente, na Figura 3-c (unit 17), os módulos 8 do rack 162 e 6 do rack 169 mostraram valores de 13,536 mΩ e 13,638 mΩ, respectivamente. Na Figura 3-d (unit 18), os módulos 3 do rack 171 e 6 dos racks 175 e 176 apresentaram impedâncias de 13,621 mΩ, 13,511 mΩ e 13,501 mΩ, respectivamente.

A dispersão de impedâncias entre os módulos foi analisada detalhadamente, especialmente comparando-os com o módulo 5, que mostrou a maior discrepância. Os altos valores de impedância no módulo 5, com uma média entre 3,50% e 4,14% superior aos demais, sinalizam potenciais problemas que podem comprometer a capacidade operacional, aumentar a temperatura interna, reduzir a eficiência e encurtar a vida útil do sistema.

Uma possível causa para a discrepância acentuada neste módulo, repetitiva em todos os racks aferidos, pode estar ligada à posição que o módulo 5 está instalado dentro dos racks. Conforme ilustrado na Figura 4, ele está na posição mais alta dos racks, sendo mais exposto a influências externas de temperatura provenientes da parte superior, como a insolação. Embora todos os racks estejam operando dentro da faixa de temperatura recomendada pelo fabricante do BESS, a temperatura é um dos fatores que aceleram a degradação das LiBs. Portanto, o valor de impedância mais elevado para o módulo 5 pode indicar um nível mais alto de degradação, requerendo investigação adicional ao longo do tempo. Isso poderia impactar diretamente a perda de capacidade e outras formas de degradação, como aquelas nos materiais catódicos e na camada de Interface Sólido-Eletrólito (*Solid Electrolyte Interface* - SEI).

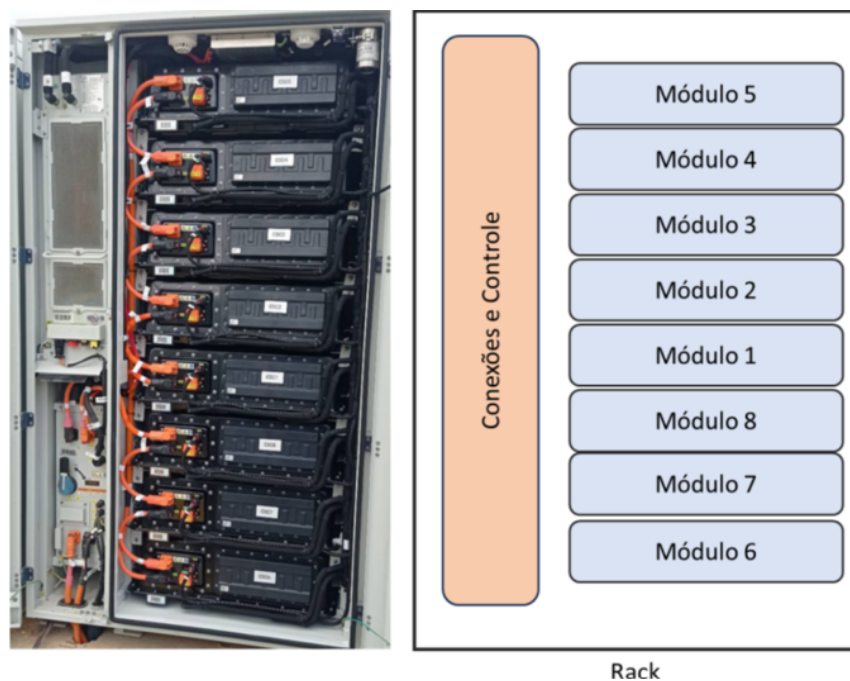


Figura 4. Configuração dos módulos no interior dos racks. Elaboração Própria.

Ademais, os dados comparativos de outubro de 2023 e outubro de 2024 (gráficos apresentados na Figura 5) mostraram aumentos esperados nos valores de impedância, indicando a degradação progressiva dos módulos, porém dentro do esperado para sistemas desse porte e especificação, segundo fabricante. Essa análise é essencial para prever falhas e planejar intervenções de manutenção que garantam a continuidade e eficiência do BESS. A Figura 5 apresenta as variações da impedância.

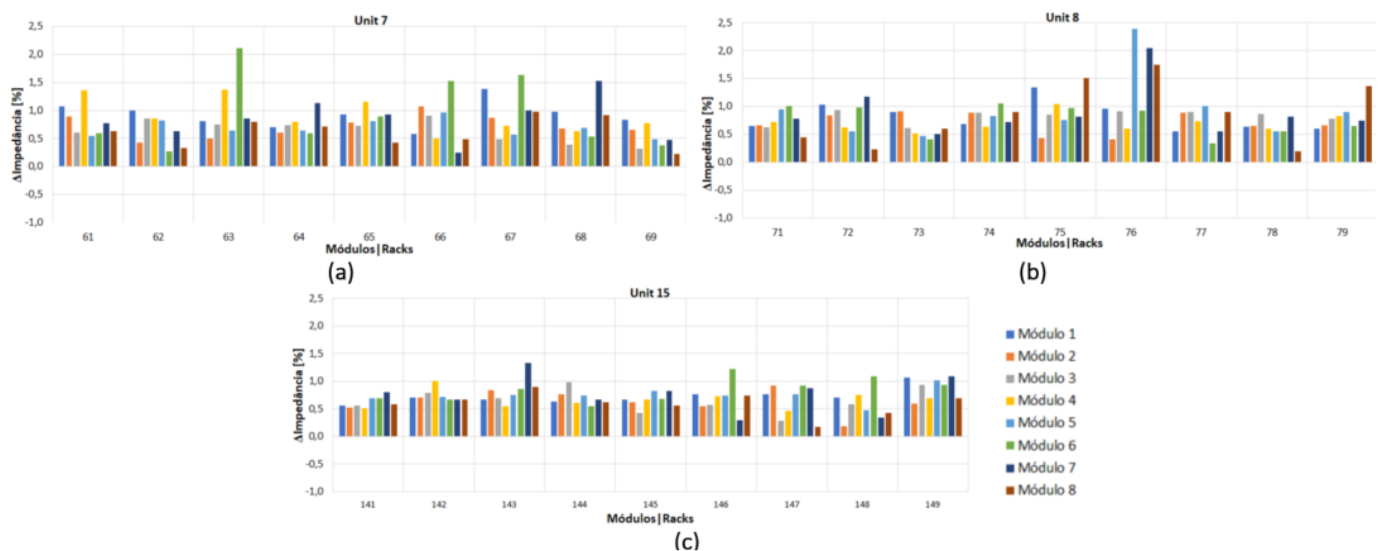


Figura 5. Gráficos das variações percentuais das impedâncias mensuradas em out-2023 e out-2024 para cada rack e módulo da (a) unit 7, (b) unit 8 e (c) unit 15. Elaboração Própria.

2.3.2 Análise com Ensaios Laboratoriais em Amostras Similares as do BESS em Campo

Para replicar as condições operacionais observadas no sistema de campo, um módulo extra do BESS foi ensaiado e depois desmontado e submetido a outros ensaios em laboratório em nível de célula, garantindo assim a comparabilidade dos resultados.

As medições iniciais de impedância interna foram realizadas no módulo extra, varrendo uma sequência de diferentes níveis de SoC: 100%, 90%, 80%, 60%, 40%, 20%, e 0%. Os resultados estão organizados na Tabela 1, concluindo-se que as variações de impedância são praticamente nulas e não sofrem influência do SoC, confirmando os resultados apresentados na subseção anterior.

Tabela 1. Resultados do Ensaio Laboratorial de Avaliação de Impedância 1kHz no Módulo Extra do BESS para diferentes SoCs. Elaboração Própria.

<u>SoC (%)</u>	<u>RI (mΩ)</u>
100	13,33
90	13,28
80	13,26
60	13,22
40	13,23
20	13,21
0	13,26
Média	13,25

Após essa e outras medições, o módulo foi desmontado e o procedimento similar foi realizado com 6 amostras de células individuais totalmente recarregadas, ou seja, com 100% de SoC, e também descarregadas até 60% SoC, simulando as condições médias de operação observadas em campo. Em ambos os SoCs, a impedância interna é aferida. Após isso, as amostras passam por outros ensaios de ciclagem em diferentes condições: i) Ciclos com 100% de Profundidade de Descarga (*Depth of Discharge* - DoD) no regime de 0,5C; ii) Ciclos com 100% de DoD no regime maior que 1C; iii) Ciclos com baixa corrente em estado parcial de SoC (entre 40% e 60% do SoC) – operação sugerida pelo fabricante no BESS de Registro/SP; iv) Ciclos com 100% de DoD no regime de 0,5C a 35°C. Após isso, as medições de impedância interna são repetidas a cada 500 ciclos.

Como os ensaios laboratoriais ainda estão em andamento, não há análise conclusiva sobre tais dados. Contudo, uma análise crítica parcial revela que, embora as medições em laboratório apresentem uma menor variação na impedância interna em diferentes SoCs, há uma estabilização inicial da resistência interna que é consistente com as observações de campo. Essa estabilização sugere que o envelhecimento forçado em laboratório pode replicar eficazmente as condições operacionais do BESS, oferecendo *insights* valiosos sobre o comportamento a longo prazo das baterias.

A comparação entre os resultados de campo e de laboratório evidencia a influência das condições ambientais e operacionais sobre a impedância das baterias. Enquanto as medições em campo são sujeitas a flutuações devido a fatores externos, como variações de temperatura e ciclos de carga irregulares, os testes laboratoriais fornecem um panorama mais controlado e uniforme. Essa complementaridade entre os dados de campo e de laboratório permite uma avaliação mais abrangente e robusta do desempenho das baterias, essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção preditiva e gestão de ciclo de vida no BESS de Registro-SP.

2.4 Análise de Dados de Operação Real em Campo no BESS de Registro-SP

Durante a manutenção preventiva realizada em outubro de 2024, também foram coletadas medições detalhadas para avaliar o desempenho e a condição dos sistemas de armazenamento de energia no BESS de Registro-SP. Essas medições incluíram dados operacionais que proporcionam uma visão abrangente da eficiência, degradação e possíveis falhas dos sistemas em campo, essenciais para a manutenção preditiva e a otimização do ciclo de vida das baterias, e algumas dessas medições são analisadas a seguir.

2.4.1 Avaliação do SoH dos Racks e Units

O SoH das unidades de armazenamento é uma métrica crucial que avalia a degradação da capacidade e do desempenho da bateria em relação ao seu estado inicial. Um SoH elevado indica que a bateria está próxima de sua condição original, enquanto valores mais baixos refletem uma perda significativa de capacidade e eficiência. Esse indicador é vital para prever quando será necessária a substituição ou a manutenção das baterias.

De acordo com o fabricante, células novas com SoH de 100% têm uma vida útil estimada de 15 anos, ou 10.000 ciclos completos de recarga e descarga, operando a 25°C e com taxa de 1C/1C, até atingirem 80% de SoH. Isso representa uma degradação aproximada de 0,11% ao mês.

A análise dos dados de SoH registrados na plataforma EMS para dezembro de 2022 (entrada em operação do BESS), julho e outubro de 2024 (Tabela 2), revelou uma degradação uniforme nos racks de uma mesma unidade, com variação de até 0,30%, e uma variação de até 0,42% entre unidades distintas. A degradação média acumulada variou entre 1,98% e 2,50% após 22 meses, correspondendo a um desgaste mensal de 0,09% a 0,114%, conforme ilustrado na Tabela 3.

Tabela 2. Nível de SoH das units 7, 8, 15, 17 e 18, e seus racks correspondentes, nos meses de dezembro de 2022, julho e outubro de 2024. Elaboração Própria.

State of Health (SoH) [%]															
Rack	Unit 7			Unit 8			Unit 15			Unit 17			Unit 18		
	dez/22	jul/24	out/24	dez/22	jul/24	out/24	dez/22	jul/24	out/24	dez/22	jul/24	out/24	dez/22	jul/24	out/24
1	99,98	97,80	97,50	99,98	98,10	97,90	100,00	98,00	97,80	100,00	97,80	97,60	100,00	98,10	97,90
2	99,98	97,80	97,50	99,98	98,10	98,00	100,00	98,10	97,90	100,00	97,80	97,60	100,00	98,20	98,00
3	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	97,90	100,00	98,10	97,90	100,00	97,80	97,50	100,00	98,00	97,80
4	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	97,90	100,00	98,30	98,10	100,00	97,80	97,50	100,00	98,10	97,90
5	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	98,00	100,00	98,10	97,90	100,00	97,90	97,60	100,00	98,00	97,80
6	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	97,80	100,00	98,10	97,90	100,00	97,90	97,60	100,00	98,00	97,80
7	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	98,00	100,00	98,10	98,00	100,00	97,80	97,50	100,00	98,00	97,80
8	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	97,90	100,00	98,10	97,90	100,00	97,80	97,50	100,00	97,90	97,70
9	99,98	97,80	97,60	99,98	98,10	98,00	100,00	98,10	97,90	100,00	97,80	97,50	100,00	97,90	97,90
Unit	99,98	97,80	97,50	99,98	98,10	97,90	100,00	98,10	97,90	100,00	97,80	97,50	100,00	98,00	97,80

Tabela 3. Diferença no nível de SoH entre dezembro de 2022 e outubro de 2024. Elaboração Própria.

ΔSoH					
Racks	Unit 7	Unit 8	Unit 15	Unit 17	Unit 18
1	2,48	2,08	2,20	2,40	2,10
2	2,48	1,98	2,10	2,40	2,00
3	2,38	2,08	2,10	2,50	2,20
4	2,38	2,08	1,90	2,50	2,10
5	2,38	1,98	2,10	2,40	2,20
6	2,38	2,18	2,10	2,40	2,20
7	2,38	1,98	2,00	2,50	2,20
8	2,38	2,08	2,10	2,50	2,30
9	2,38	1,98	2,10	2,50	2,10
UNIT	2,48	2,08	2,10	2,50	2,20

Essas pequenas variações na impedância dos módulos, devido ao baixo envelhecimento das baterias, não impactam significativamente sua operação ou degradação. No entanto, é fundamental realizar medições em intervalos maiores e com maior frequência para construir uma base de dados robusta. Essa base permitirá uma determinação precisa do perfil de degradação e do comportamento da impedância interna das baterias de LFP em aplicações de BESS.

2.4.2 Análise dos Dados de Temperatura e Umidade em *Racks* do BESS

Para a coleta de dados, foram instalados cinco dispositivos de medição de temperatura e umidade, modelo Data Logger Elitech RC-4HC. Esses aparelhos registraram leituras em intervalos de 10 minutos, de julho a outubro de 2024, nos *racks* 181 e 191 das *units* 19 e 20, respectivamente, todos localizados próximos ao módulo 5 (devido as discrepâncias detectadas e apresentadas anteriormente na subseção 2.3.1), com precisão de medição de temperatura de até $\pm 0,5^\circ\text{C}/\pm 0,9^\circ\text{C}$. Além disso, um sensor adicional foi posicionado ao lado dos inversores das *units* 19 e 20 para monitoramento dos parâmetros ambientais. A Figura 6 ilustra a disposição dos sensores de temperatura e umidade Elitech RC-4HC em dois dos locais mencionados. Adicionalmente, foram analisados os dados de temperatura média, média máxima e mínima obtidas via plataforma Fractal EMS para o mesmo período e intervalo de amostragem, com uma faixa de operação de -40°C a 85°C e acurácia de $\pm 2^\circ\text{C}$.

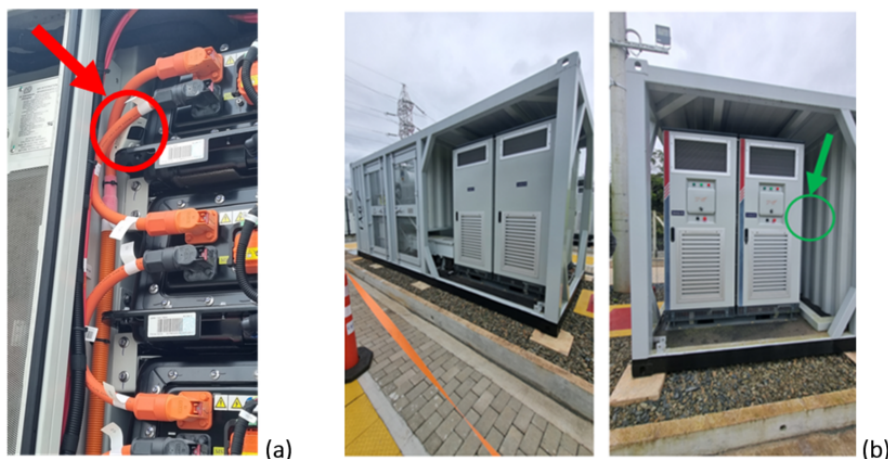


Figura 6. Fotos da instalação dos sensores próximos ao módulo 5 dos racks: (a) sensor do rack 181 e (b) sensor ambiental ao lado dos inversores do PCS 10. Elaboração Própria.

A Figura 7 apresenta as variações de temperatura e umidade registradas pelo sensor no rack 181 durante o período analisado. A temperatura média foi de 21,7°C, com máximas de 34°C e mínimas de 14,7°C, enquanto a umidade média foi de 68,2%, variando de 50,5% a 73,7%. Entre julho e outubro de 2024, as temperaturas média, máxima e mínima aumentaram 0,5%, 19,30% e 8,11%, respectivamente, em comparação ao intervalo de abril a julho de 2024. A Tabela 4 resume os dados, destacando variações significativas observadas.

No caso do rack 191, a temperatura média foi de 22,2°C, com máximas de 35,5°C e mínimas de 14,7°C, e a umidade média foi de 81,4%, variando entre 48,6% e 88,6%. Entre julho e outubro de 2024, as temperaturas média e máxima aumentaram 4,8% e 28,16%, enquanto a temperatura mínima caiu cerca de 8,7%. No caso dos demais racks, observou-se variações de temperatura e umidade bastante semelhantes, contudo foram os racks 181 e 191 apresentaram as maiores variações nesses parâmetros, possivelmente devido à localização destes em relação aos demais, talvez de forma a aumentar suas exposições a fatores ambientais.

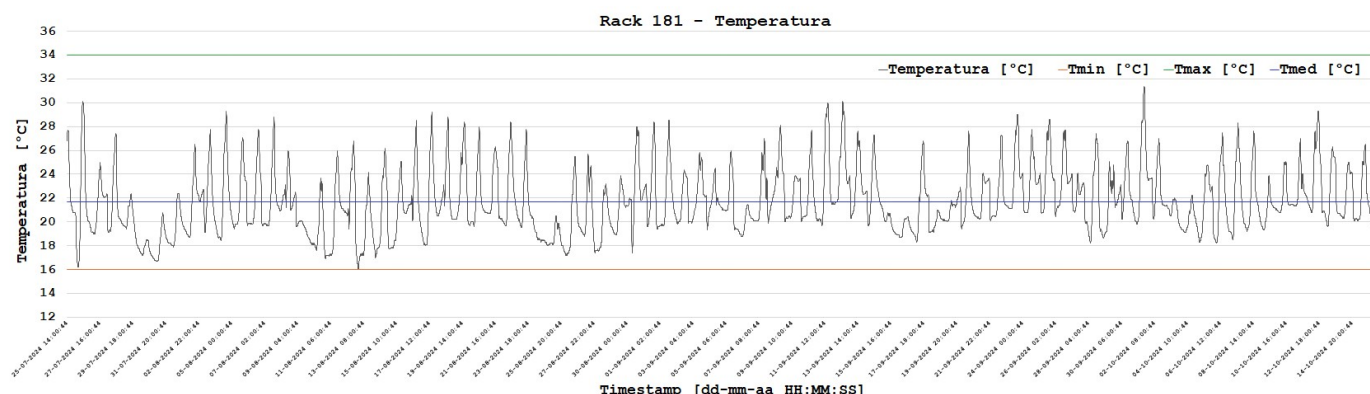


Figura 7. Gráfico da temperatura média instantânea, média geral, máxima e mínima do sensor 1 (rack 181), no período de julho a outubro de 2024. Elaboração Própria.

Tabela 4. Diferença percentual dos dados de temperatura do *rack* 181, obtidos pelo EMS, em comparação com as medições do termo-higrômetro RC-4HC, para o período de julho a outubro de 2024. Elaboração Própria.

RACK	181				
	RC-4HC - OUT/24 [°C]	RC-4HC - JUL/24 [°C]	EMS [°C]	ΔT_1 [%]	ΔT_2 [%]
T_{min} [°C]	16,00	14,80	18,00	8,11%	12,50%
T_{max} [°C]	34,00	28,50	25,00	19,30%	-26,47%
T_{med} [°C]	21,70	21,60	20,00	0,47%	-7,83%
U_{min} [%]	50,50	48,30	-	4,55%	-
U_{max} [%]	73,70	79,50	-	-7,30%	-
U_{med} [%]	68,20	66,76	-	2,15%	-

3. Conclusão

Através deste estudo, concluiu-se que a manutenção preditiva baseada em medições de impedância interna é uma abordagem promissora para a gestão de BESS de grande escala. As análises comparativas entre medições em campo e em laboratório evidenciaram a capacidade dessa técnica em prever falhas e degradação das baterias, permitindo intervenções mais precisas. A implementação de estratégias de manutenção preditiva pode melhorar significativamente a eficiência operacional e a longevidade dos sistemas BESS, contribuindo para a estabilidade e confiabilidade da rede elétrica de transmissão.

4. Referências bibliográficas

[1] Fioravanti, R. "Predictive-Maintenance Practices".

[2] Condition Based Reliability Evaluation and Maintanance Strategy for BESS.

[3] T. T. Pham, T.-C. Kuo, and D. M. Bui, "Reliability evaluation of an aggregate battery energy storage system in microgrids under dynamic operation," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 118, p. 105786, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105786>.

[4] M. Sandelic, A. Sangwongwanich, and F. Blaabjerg, "Reliability evaluation of pv systems with integrated battery energy storage systems: Dc-coupled and ac-coupled configurations," Electronics, vol. 8, no. 9, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3390/electronics8091059>.

- [5] M. Liu, W. Li, C. Wang, M. P. Polis, L. Y. Wang, and J. Li, "Reliability evaluation of large scale battery energy storage systems," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2733–2743, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1109/TSG.2016.2536688>.
- [6] R. Randazzo, "Cause of APS battery explosion that injured 9 first responders detailed in new report." [Online]. Disponível em: <https://www.azcentral.com/story/money/business/energy/2020/07/27/aps-battery-explosion-surprise-new-report-findings/5523361002/>. Acessado em: 15-jan-2025.
- [7] Fisher Engineering and Energy Safety Response Group, "Victorian Big Battery Fire: July 30, 2021", 2022.
- [8] LIMA, D. F. et al. Aprimorando a segurança em sistemas de armazenamento de energia com baterias: Análise de acidentes e medidas de mitigação. Anais do 9º Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD 2024), p. -----, 30 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.53316/cbgd2024.005>.
- [9] VISTRA, "Findings and Corrective Actions Sept. 4, 2021, Incident Moss Landing Energy Storage Facility", 2022.
- [10] S. Alvarez, "Tesla Megapack battery in Victoria catches fire while testing, no injuries reported." [Online]. Disponível em: <https://www.teslarati.com/tesla-megapack-battery-fire-victoriadetails/>. Acessado em: 15-jan-2025.
- [11] STA Eletrônica. Sistemas e Tecnologia Aplicada. "Como é medida a resistência interna da bateria?". Disponível em: www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/testes-de-baterias/como-e-medida-a-resistencia-interna-da-bateria. Acessado em 14-jan-2024.