

Desafios e Soluções na Manutenção de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias: Um Estudo de Caso na ISA CTEEP

Daniel R. Pinto*. Vitor T. Arioli*. Maria de Fátima N. C. Rosolem*. Thiago Chiachio do Nascimento*. Luiz Antônio Soares*. Raul Fernando Beck*
Caio C.V.F.A da Silva**

*Área de Soluções em Energia, CPQD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, Brasil (e-mail: danielp@cpqd.com.br, varioli@cpqd.com.br, mfatima@cpqd.com.br, thiagoc@cpqd.com.br, lasoares@cpqd.com.br, raul@cpqd.com.br).

**Manutenções Especiais, ISA CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista, Brasil (e-mail: casilva@isactEEP.com.br)

Abstract: The integration of energy storage into the electrical grid is essential for dealing with the intermittent nature of renewable sources and increasing system reliability. However, Battery Energy Storage Systems face critical challenges related to safety and reliability during their operation and maintenance. Thus, this study investigates failure analyses and preventive maintenance strategies for BESSs, based on global incidents and a case study at ISA CTEEP, one of the largest electricity transmission groups in Latin America. The importance of internal battery temperature management and early detection of thermal events is emphasized, as well as the ongoing need to enhance safety and regulations. Additionally, the use of internal impedance monitoring is proposed as a promising technique for predictive maintenance of these systems. Finally, this work also addresses challenges such as data scarcity and lack of standardization in accident reporting, highlighting the need for comprehensive guidelines to promote the safety and reliability of these systems in the electrical infrastructure. The research aims to contribute to advancing understanding and practices related to these systems, driving their sustainable and secure adoption.

Resumo: A integração do armazenamento de energia na rede elétrica é essencial para lidar com a natureza intermitente das fontes renováveis e aumentar a confiabilidade do sistema. No entanto, os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias enfrentam desafios críticos relacionados à segurança e à confiabilidade durante sua operação e manutenção. Assim, este estudo investiga análises de falhas e estratégias de manutenção preventiva para BESSs, com base em incidentes globais e em um estudo de caso na ISA CTEEP, um dos maiores grupos de transmissão de energia elétrica da América Latina. Destaca-se a importância da gestão da temperatura interna da bateria e da detecção precoce de eventos térmicos, assim como a necessidade contínua de aprimorar a segurança e os regulamentos. Propõe-se ainda o uso do monitoramento da impedância interna como uma técnica promissora para manutenção preditiva desses sistemas. Por fim, este trabalho também aborda desafios como a escassez de dados e a falta de padronização na notificação de acidentes, destacando a necessidade de diretrizes abrangentes para promover a segurança e a confiabilidade desses sistemas na infraestrutura elétrica. A pesquisa busca contribuir para o avanço da compreensão e das práticas relacionadas a esses sistemas, impulsionando sua adoção sustentável e segura.

Keywords: Battery Energy Storage System; Lithium-ion batteries; Operational safety; Preventive maintenance; Reliability of systems; Operation and maintenance.

Palavras-chaves: Baterias de Lítio-íon; Fiabilidade de Sistemas; Manutenção Preventiva; Operação e Manutenção; Segurança Operacional; Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias.

1. INTRODUÇÃO

A crescente adoção de fontes de energia renováveis e distribuídas, aliada às mudanças nos perfis de demanda, está impulsionando uma rápida evolução nas redes elétricas (Fioravanti et al. 2020). Essas transformações têm exercido uma carga significativa sobre as infraestruturas de transmissão e distribuição de energia, tornando evidente a necessidade de adaptações para garantir a confiabilidade do

sistema (Fioravanti et al. 2020; Hou, 2022). As empresas de energia estão cada vez mais reconhecendo que a integração do armazenamento de energia na infraestrutura da rede elétrica desempenha um papel crucial na gestão da intermitência e na melhoria da confiabilidade do sistema, incluindo a prestação de serviços auxiliares e o aumento da capacidade de fornecimento de energia. A queda nos custos das Baterias de Lítio-íon (*Lithium-ion Batteries* - LiBs) tornou os sistemas de Armazenamento de Energia em

Baterias (*Battery Energy Storage Systems* - BESSs) uma solução atraente para atender à crescente demanda por energia. Os BESSs têm como vantagens a flexibilidade, escalabilidade e facilidade de implementação em vários cenários e localizações geográficas (Fioravanti et al. 2020).

No entanto, a ampla adoção de BESSs também trouxe desafios críticos, especialmente relacionados à segurança e à confiabilidade (Fioravanti et al. 2020). À medida que aumenta o número de instalações BESS, integradores de sistemas, empresas de serviços públicos, agências governamentais e organizações profissionais têm feito esforços consideráveis no desenvolvimento de padrões de segurança e melhores práticas de engenharia para projeto e comissionamento. No entanto, alguns incidentes recentes de segurança em campo, incluindo a destruição total de alguns BESSs, foram encontrados riscos desconhecidos, alguns dos quais ameaçam a integridade dos trabalhadores e das equipes de resposta a emergências.

Apesar dos esforços da indústria de armazenamento de energia para melhorar a segurança e a confiabilidade dos sistemas nos níveis de célula e módulo de bateria, os riscos que podem se manifestar durante as Operações e Manutenção (O&M), principalmente devido às limitações das práticas atuais, tem sido negligenciados, como falhas de componentes sem testes iniciais adequados em fábrica, regras de comissionamento inadequadas, erros do operador durante a operação ou manutenção do sistema, entre outros (Pham et al. 2020; Sandelic et al. 2019; Liu et al. 2017). Além disso, apesar da existência de normas e diretrizes abrangentes, nenhum desses documentos fornece orientações específicas sobre a manutenção de um BESS como um todo, considerando todos os seus componentes e especificidades operacionais. A indústria atual concentra-se na revisão de projetos, conformidade de fabricação e comissionamento, mas existem lacunas na manutenção contínua e na detecção de falhas em longo prazo. O monitoramento pós-instalação é vital para uma manutenção eficaz, mas enfrenta desafios de falta de padronização do sistema e integração de dados (Fioravanti et al. 2020).

Contribuindo para aumentar a confiabilidade na operação desses sistemas conectados às redes elétricas, recentemente, a ISA CTEEP, 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. 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. Inspirada neste projeto, a presente pesquisa, no âmbito do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PROPDI) da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), referência PD-00068-0063/2023, tem como objetivo propor recomendações para

especificação, instalação, comissionamento, O&M e aspectos de fim de vida útil de um BESS. O principal objetivo é mitigar ou eliminar eficazmente os riscos de segurança associados ao BESS.

Portanto, este artigo tem como objetivo fornecer uma investigação abrangente sobre análise de falhas e estratégias de manutenção preventiva para BESS, com foco nas lições aprendidas com incidentes globais e no estudo de caso pioneiro da ISA CTEEP. O objetivo principal é oferecer *insights* para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção e mitigação de riscos, visando aumentar a confiabilidade e a segurança dos BESSs. Este artigo abordará temas como análise de modos de falha e efeitos no BESS, acidentes graves e suas causas, estratégias de manutenção preventiva baseadas em experiências reais da instalação da ISA CTEEP e uso de medições de impedância para manutenção preditiva.

2. ANÁLISE DE MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS EM BESS

Assegurar a confiabilidade do BESS é crucial para sua interação estável com a rede elétrica, sendo principalmente afetada pela corrente de recarga/descarga e pela temperatura ambiente, o que ao longo do tempo pode aumentar a taxa de falhas do sistema (Fioravanti et al. 2020). Para mitigar esses riscos, a indústria já desenvolveu e utiliza diversos processos estabelecidos para o desenvolvimento de projetos dessa magnitude e complexidade, incluindo várias abordagens probabilísticas de avaliação de risco. O objetivo é identificar com precisão os modos de falha e seus efeitos antecipadamente, muitos dos quais baseados em dados históricos, onde o mecanismo de uma falha passada é identificado para melhorar projetos e prevenir falhas semelhantes no futuro. Entre esses processos, destaca-se a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA), um procedimento sistemático que, ainda na fase de projeto do sistema, analisa cada componente, calculando a probabilidade de falha e seus impactos com base em dados históricos (Fioravanti et al. 2020).

Nesse sentido, um estudo do *Electric Power Research Institute* (EPRI) adaptado para a segurança do BESS apresentou uma lista de levantamentos e cálculos FMEA típicos para os principais elementos componentes deste sistema, conforme mostrado na Tabela 1, fornecendo informações que podem apoiar a determinação de um plano de manutenção preditiva. Para os valores de probabilidade e gravidade/impacto, foi utilizado um sistema de pontuação de 1 a 10, onde 10 corresponde a um evento mais provável ou grave. Fica evidente neste FMEA que o maior risco de falhas está associado aos componentes localizados no lado da Corrente Contínua (c.c.) do sistema, mais especificamente as LiBs. Esta conclusão é reforçada por vários estudos de pesquisa (Pham et al. 2020; Sandelic et al. 2019; Liu et al. 2017), enfatizando a importância da análise de confiabilidade dos módulos de bateria. Contudo, mesmo componentes com menor risco requerem revisões periódicas, destacando a necessidade de uma estratégia de manutenção abrangente.

Tabela 1. FMEA preliminar com foco em segurança para um BESS. Adaptado de (Fioravanti et al. 2020; EPRI, 2021).

Sistema ou Componente	Modo de falha	Efeito do perigo	Consequências	Prevenção	Deteção	Probabilidade	Impacto	Valor para Risco
BMS	Não funciona de forma segura dentro da faixa operacional	Incêndio ou perda de função	Incidente de segurança	Testes no BMS	Sensor de temperatura independente	3	10	30
Célula de bateria	- Fuga térmica - Curtos-circuitos	Fogo		Teste de abuso	Alarme de incêndio		9	27
Módulos de Bateria	- Propagação - Emissões (inflamáveis, tóxicas ou explosivas)					10	20	
Sistema contra incêndio	Falha na liberação do agente extintor	Incapacidade e de conter um incêndio	Maior risco de danos severos e perda de segurança	Manutenção do sistema contra incêndio	Testes do sistema de liberação	2	9	18
EMS	Danos na bateria devido a mau operação do BMS	Incêndio ou perda de funcionalidade	Incidente de segurança	Fusíveis, proteção do inversor	Falha do EMS no comportamento do BMS		7	14
Inversor	Inversor não detecta/reage ao excesso de temperatura em transistores	Perda de funcionalidade	Redução da potência de saída	Confiança no fornecedor	Falha do EMS devido ao aumento da temperatura ou falha do inversor	3	4	12
PC	Falha na regulação da potência	Perda de funcionalidade	Redução na capacidade de controle de energia	Redundância e testes periódicos no PCS	Monitoramento contínuo do desempenho do PCS	2	6	
SPDA	Falha na dissipação de raios	Danos causados por raios	Danos à estrutura e aos componentes elétricos	Instalação de sistemas de aterramento eficazes	Monitoramento contínuo da integridade do SPDA	1	8	8

Porém, ao focar nas LiBs, seu uso em sistemas de armazenamento de energia apresenta uma série de desafios e preocupações de segurança devido à energia química e elétrica armazenada nesses elementos (NFPA, 2019; SAE, 2023). Os perigos potenciais decorrentes dessas fontes de energia são diversos e podem se manifestar de diversas formas, desde vazamentos térmicos até curtos-circuitos internos ou externos, propagação térmica e emissões inflamáveis, tóxicas ou explosivas, conforme listado na tabela supracitada. Assim, a mitigação dos riscos associados aos LiBs no BESS requer uma abordagem multifacetada, combinando medidas de contenção, detecção precoce, controle de temperatura e manutenção proativa.

A gestão da propagação térmica envolve uma série de estratégias destinadas a minimizar o risco de superaquecimento e propagação de incêndio dentro dos sistemas de bateria. Essas estratégias incluem implementação de técnicas de contenção física, como barreiras ou invólucros resistentes a incêndios, que ajudam a conter quaisquer eventos potenciais de termo explosão. Além disso, manter um espaçamento adequado entre as células da bateria reduz a probabilidade de transferência de calor entre células adjacentes, reduzindo assim o risco de propagação e

explosão. Além disso, projetos específicos de bateria incorporam recursos adaptados para controlar a propagação térmica, como barreiras térmicas ou materiais com dissipação de calor aprimorada (NFPA, 2019; SAE, 2023).

As emissões inflamáveis, tóxicas ou explosivas são outra preocupação crítica, exigindo medidas como contenção física, detecção precoce, gerenciamento de emissões e sistemas de supressão de incêndio (NFPA, 2019; SAE, 2023). Além disso, a manutenção preventiva e preditiva desempenha um papel importante na identificação precoce de potenciais problemas, reduzindo assim o risco de eventos adversos, como vazamento térmico (EPRI, 2021). É fundamental enfatizar que o gerenciamento térmico adequado é essencial para garantir a segurança dos LiBs. Manter a temperatura dentro de uma faixa operacional específica evita efeitos adversos à segurança, como incêndios ou explosões (Conzen et al. 2023). Portanto, sistemas de refrigeração confiáveis e eficazes são indispensáveis para manter as baterias dentro desta faixa de temperatura ideal (Conzen et al. 2023).

Ademais, ao analisar os componentes essenciais de um BESS, destaca-se a importância de mapear e compreender potenciais falhas e vulnerabilidades que o sistema pode

enfrentar durante a operação. Isso permite identificar os maiores riscos, como aqueles associados aos componentes de corrente contínua, e também a necessidade de revisões periódicas de todos os componentes, mesmo aqueles com menor risco. Uma estratégia de manutenção abrangente prolonga o ciclo de vida do sistema e mitiga riscos.

3. ACIDENTES EM BESS: PRINCIPAIS CAUSAS E LIÇÕES APRENDIDAS

A análise dos acidentes no BESS é importante para identificar as principais causas e extrair lições que possam aprimorar a segurança operacional desses sistemas. No entanto, apesar de consultar diversas fontes bibliográficas para compilar informações detalhadas sobre esses eventos, incluindo bases de dados científicas como ScienceDirect e IEEE Xplore, relatórios técnicos de entidades relevantes e notícias relacionadas ao tema, e extrair insights valiosos, destaca-se as dificuldades encontradas durante esse processo. Em muitos casos, os relatórios fornecem detalhes limitados sobre as causas e as medidas de mitigação adotadas. Além disso, há falta de padronização no conteúdo e baixa disponibilidade de dados confiáveis (NFPA, 2019), os quais podem ser atribuídas à relutância das empresas em divulgar informações completas devido aos potenciais impactos negativos na reputação e aos riscos legais associados.

Apesar desses desafios, a análise dos acidentes identificou algumas tendências importantes. Dados coletados de diversas fontes revelam que a Coreia do Sul lidera no número de acidentes em BESS, seguida pelos Estados Unidos e pela China, com 33, 18 e 7 acidentes registrados, respectivamente. Outros países, como França e Austrália, também relataram números consideráveis, cada um relatando 3 acidentes (Back, 2021; Lai et al. 2022; Zalosh et al. 2021). Esses números significativos de ocorrências refletem os esforços pioneiros desses países na instalação do BESS em condições reais de operação, destacando a necessidade de uma abordagem global à gestão da segurança do BESS, considerando a distribuição geográfica dessas instalações.

A maioria dos acidentes ocorreu durante a operação normal do sistema, enfatizando a importância de medidas preventivas durante esta fase (NFPA, 2019). Também foi observada uma maior incidência de acidentes nos primeiros anos de operação do BESS, indicando possível falta de experiência da equipe de operação e manutenção ou defeitos de fabricação (NFPA, 2019). A falta de informação sobre o estado do BESS no momento do acidente, p.ex., se ocorreu durante a recarga ou descarga da bateria, também representa um desafio para a análise detalhada desses eventos.

Quanto às aplicações do BESS, a maioria dos sistemas era utilizada em conjunto com geração de energia renovável, principalmente para suavizar as intermitências desse tipo de geração (NFPA, 2019). A capacidade e potência dos sistemas afetados pelos acidentes variaram muito, evidenciando a necessidade de melhorar os procedimentos de operação e segurança, independentemente do tamanho e aplicação do BESS (NFPA, 2019). A tecnologia das baterias mostra um dado importante, sendo que maioria dos eventos ocorreu com

LiBs, enfatizando a importância de medidas específicas para mitigar os riscos associados a essa tecnologia (NFPA, 2019).

Um incidente ocorrido em Surprise, Arizona, EUA, na APS *McMicken Substation* em abril de 2019, resultou de uma célula defeituosa em um BESS com capacidade de 2 MWh / 2 MW. O processo de fuga térmica resultou, eventualmente, em uma explosão que feriu nove pessoas. O sistema de supressão de incêndio, embora ativado, não conseguiu conter a situação, destacando a necessidade de sistemas mais eficazes para lidar com a fuga térmica (DNV.GL, 2020).

Na instalação *Victorian Big Battery* em Geelong, Victoria, Austrália, uma falha no sistema de refrigeração resultou em um incêndio durante a fase de comissionamento, danificando duas unidades BESS. Melhorias subsequentes foram implementadas, incluindo inspeção aprimorada do fluido de resfriamento e transmissão mais rápida de dados operacionais aos operadores (E.S.R. Group, 2022).

Em Pequim, China, na Jimei Estação de "recarga utilizando armazenamento de energia fotovoltaica" de Dahongmen, um incêndio iniciado durante os testes iniciais resultou em uma reação em cadeia devido à falta de um sistema adequado de supressão de incêndio. Para evitar acidentes semelhantes, as recomendações incluíram o reforço da gestão operacional e a melhoria das instalações e dos sistemas de segurança (China Electric Power Technology, 2021).

Na instalação de armazenamento de energia de *Moss Landing*, na Califórnia, EUA, uma falha no sistema de refrigeração resultou em vazamento de água e curtos-circuitos. Após o incidente, o sistema foi reparado e testado para garantir a ausência de vazamentos e recalibrar os níveis de detecção do sensor (Vistra Energy, 2022).

Na Coreia do Sul, um aumento significativo nos acidentes do BESS levou à formação de um comitê para investigar as causas. A análise revelou falhas de segurança e controle de incêndio, destacando a importância da integração adequada entre os sistemas de gestão de energia para prevenir futuros acidentes (NEXCERIS, 2019).

Por fim, o incidente envolvendo o *Megapack* da Tesla na Austrália, considerado uma referência significativa para o setor de BESS, resultou de um vazamento de líquido do sistema de refrigeração, causando um arco elétrico nos módulos de bateria. As principais lições aprendidas enfatizam a importância crítica da segurança do BESS, a necessidade de supervisão e monitoramento adequados durante o comissionamento, melhorias nos dispositivos de proteção contra falhas elétricas e ajustes no projeto térmico para evitar a propagação do fogo. A resposta a emergências também foi melhorada, enfatizando a importância do planejamento antecipado, da coordenação com especialistas e da interação comunitária. Essas lições contribuem para o desenvolvimento de práticas mais seguras em sistemas de armazenamento de energia de baterias (Cleantechica, 2022).

Estes incidentes individuais destacam a necessidade contínua de melhorar as práticas e regulamentos de segurança no BESS. Ao aprender com estes eventos, a indústria pode

desenvolver protocolos mais robustos para garantir a segurança e confiabilidade destes sistemas.

4. LIB: SUPRESSÃO DE INCÊNDIO E INCIDENTES

A supressão de incêndios em locais com LiBs instaladas ou armazenadas tem como objetivo manter um ambiente controlado até que os socorristas possam intervir. Ao considerar a proteção contra incêndios em instalações de LiB, é crucial identificar tecnologias relevantes, levando em conta fatores como tipo de bateria, volume e composição química. Dada a propensão aumentada das LiBs para o descontrole térmico em altas temperaturas, a refrigeração adequada é vital ao escolher a metodologia de supressão. A refrigeração inadequada pode permitir que as reações térmicas continuem e a propagação do fogo mesmo após a extinção aparente. Portanto, as estratégias de supressão devem considerar as circunstâncias do incêndio, o ambiente circundante e o impacto da refrigeração.

A água é um agente de resfriamento eficiente para controlar LiBs em descontrole térmico, prevenindo a propagação para baterias vizinhas e permanece amplamente recomendada para incêndios de LiB devido à disponibilidade e propriedades de resfriamento. As abordagens baseadas em água incluem jato de água, pulverização ou névoa de água, água com surfactantes, neblina de água, dilúvio e submersão. Os extintores de espuma funcionam separando o vapor/ar e a fonte de incêndio, enquanto os extintores de pó interrompem quimicamente as reações de incêndio, embora não forneçam resfriamento significativo e possam causar problemas respiratórios. Gases comprimidos deslocam o oxigênio, inibindo a combustão, mas não fornecem resfriamento significativo. Os extintores à base de halon suprimem quimicamente o fogo, mas não previnem a reignição e devem ser evitados devido ao seu impacto ambiental (SAE, 2023).

As falhas das LiBs podem apresentar sinais visíveis, como vapor, fumaça e calor, ou não mostrar evidências visíveis de falha, tornando essencial a integração de ferramentas de monitoramento e detecção, com tecnologias que incluem liberação de gases inflamáveis, gases perigosos e monóxido de carbono (CO). Sensores de CO são vitais para detectar esse gás incolor e sem odor, enquanto sensores de hidrogênio e fluoreto de hidrogênio (HF) monitoram gases liberados durante a ventilação das células. Além disso, sensores térmicos, como sistemas de imagem térmica, identificam variações na energia radiante, permitindo a detecção rápida de mudanças de temperatura em dispositivos eletrônicos. Essas tecnologias fornecem avisos precoces e são cruciais para a prevenção eficaz e resposta a incidentes relacionados à LiB (SAE, 2023).

5. UTILIZAÇÃO DE MEDIÇÕES DE IMPEDÂNCIA DE MÓDULOS DE BATERIA PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA NO BESS

Para aperfeiçoar a operação do BESS, uma abordagem recomendada envolve a combinação de manutenção preventiva e preditiva. A manutenção preventiva, amplamente utilizada em diversos sistemas, inclui verificações programadas, inspeções, ajustes e substituições

de componentes em intervalos, independentemente do estado do equipamento. A manutenção preditiva baseia-se no monitoramento contínuo para antecipar falhas potenciais, identificando problemas por meio de indicadores, sinais de degradação ou mudanças operacionais. Apesar da aplicação bem-sucedida em outros setores, a adoção de análises preditivas para BESSs encontra desafios comerciais e técnicos. A indústria de armazenamento de energia prioriza a engenharia em detrimento à análise de dados, limitando os investimentos em sensores e processamento de dados. Apesar dos desafios, várias abordagens podem construir um plano de manutenção preditiva para BESS, como Avaliação de Risco Probabilístico (*Probabilistic Risk Assessment* - PRA), avaliando probabilidades de eventos, e FMEA. A Análise de Processo Teórico do Sistema (*Systems-Theoretic Process Analysis* - STPA) concentra-se em aspectos sistêmicos, identificando vulnerabilidades desde o projeto até a operação. Essas metodologias visam compreender potenciais falhas do BESS, guiar ações preventivas e estabelecer metodologias de partes interessadas para melhoria contínua.

Nesse sentido, a presente pesquisa introduz uma proposta inovadora para análise preditiva de BESS por meio de medidas de impedância interna, devido às especificidades do BESS da ISA CTEEP, já em operação, e à natureza inovadora dessa abordagem em tais aplicações. É importante destacar que o BESS da ISA CTEEP possui células de química de Lítio-Ferro-Fosfato (LFP). As medidas de impedância surgem como uma técnica promissora para manutenção preditiva em BESS, fornecendo informações valiosas sobre seu estado interno, indicando mudanças estruturais que podem levar a falhas. O monitoramento contínuo da impedância permite a detecção precoce de sinais de degradação ou falhas iminentes, possibilitando intervenções proativas para evitar falhas catastróficas. A medida ôhmica mostrou-se útil para baterias chumbo-ácidas, e estudos recentes exploram sua aplicação em células de lítio-íon, mostrando resultados promissores. No entanto, existe uma lacuna na pesquisa, pois os estudos se concentram em células individuais, não em módulos. O projeto inova ao buscar uma metodologia para medir a impedância interna diretamente em módulos (conjunto de células que podem ser conectadas em série e/ou paralelo), devido à impossibilidade de realizar medições diretamente nas células do BESS.

Um plano para medir a impedância dos módulos de bateria que compõem o BESS foi estabelecido, utilizando o instrumento Hioki BT3564, o qual permite medição em uma faixa de tensão de 2 a 1.000 V. As medições foram realizadas em vários racks, cada um composto por oito módulos de bateria. A Fig. 1 mostra todas as medições de impedância realizadas em racks diferentes. Os valores foram agrupados por módulo (1 a 8) para facilitar a comparação entre racks. As medições foram conduzidas com os racks em diferentes estados de carga (SoC - *State-of-Charge*).

Conforme ilustrado na Fig. 1, identificou-se que todos os módulos numerados como 5 em cada *rack* apresentam uma impedância interna mais alta do que os demais. Apesar da pequena diferença no valor absoluto da impedância, observa-se que os módulos 5 apresentam um valor mais

elevado, em torno de 3,5%, em relação aos outros módulos, inclusive para diferentes SoC. Vale ressaltar que o Módulo 5 está localizado no topo do rack, onde uma temperatura mais alta foi registrada, conforme ilustrado na Fig. 2. Embora todos os racks estejam operando dentro da faixa de temperatura recomendada pelo fabricante do BESS, sabe-se que a temperatura é um dos fatores que aceleram a degradação das baterias de íons de lítio. Portanto, esse valor de impedância mais elevado para o Módulo 5 poderia indicar possivelmente um nível mais alto de degradação, o que requer investigação adicional ao longo do tempo. Isso poderia impactar diretamente a perda de capacidade e outras degradações, como aquelas nos materiais catódicos e na camada de Interface Sólido-Eletrólito (*Solid Electrolyte Interface* - SEI). Por outro lado, na comparação entre módulos, os níveis de impedância foram encontrados

próximos, o que é positivo para o sistema, sugerindo que os módulos e racks têm níveis de degradação similares. A Fig. 2 ilustra os resultados obtidos a partir da medição da temperatura na parte inferior e superior do rack.

Observa-se que, entre os racks apresentados, o rack 141 exibe uma maior redução na impedância nos módulos 1 e 2, que registram reduções entre 1,5% e 2%. No entanto, os outros módulos deste rack têm uma redução inferior a 0,6%. Quanto aos outros racks, as medições em 100% e 60% do SoC da bateria revelam uma redução de impedância entre os módulos de 0,40% e 0,65%. É perceptível que a variação no SoC é diretamente proporcional à redução na impedância interna; no entanto, essa variação é muito pequena e não tem um impacto significativo na aplicação geral.

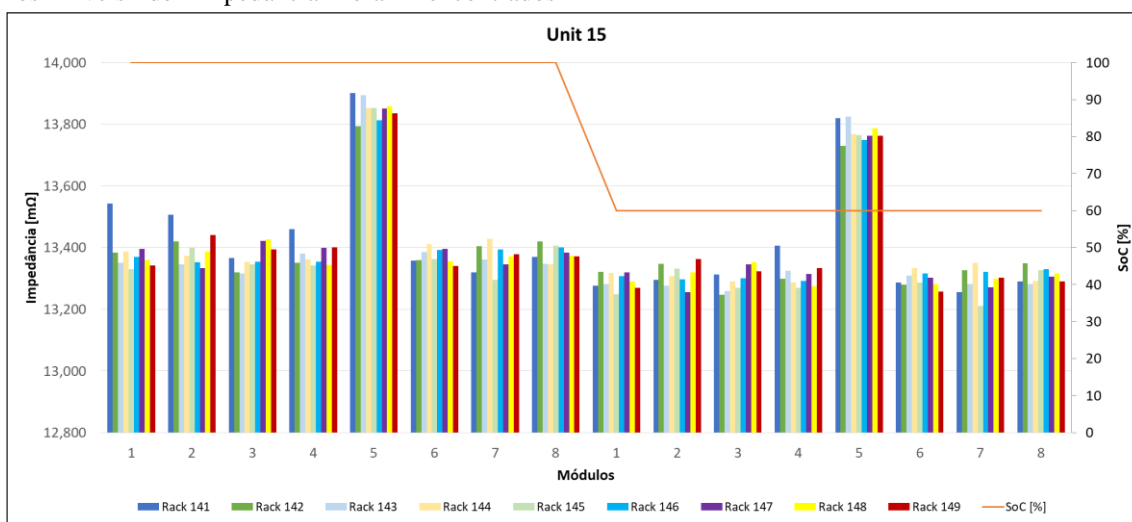


Fig 1. Medição de impedância de módulos BESS. Elaboração própria.

O plano de manutenção preditiva considera a implementação de medições em uma amostra representativa de módulos, abrangendo diferentes partes do BESS operacional. Dependendo dos resultados e das condições identificadas, a quantidade de módulos para medição pode ser ajustada, priorizando áreas críticas ou aquelas com histórico de problemas. A seleção de módulos para medição foi baseada em critérios como idade, histórico operacional e localização no sistema, ou em módulos que apresentaram valores discrepantes monitorados, concentrando-se em áreas mais propensas a problemas. As medições serão realizadas semestralmente, sujeitas a ajustes conforme os resultados.

Junto com essas medições, o plano preditivo também considera uma análise combinada com o monitoramento do estado do sistema de resfriamento dos módulos de bateria e avaliação de dados instantâneos e históricos de parâmetros disponíveis no EMS (*Energy Management System*), como capacidade fornecida durante ciclos completos de carga/descarga, quantidade de ciclos, Estado de Saúde (*State of Health* - SoH), degradação ao longo do período, temperaturas durante a operação com uso de energia para o corte de pico e operação de rotina, e a avaliação e tratamento de alarmes de sobretensão, subtensão e sobreaquecimento nos

níveis de célula e módulo, que podem indicar operação incorreta do sistema.

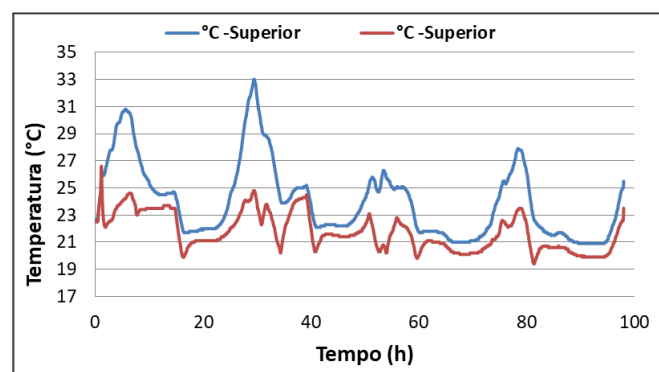


Fig 2. Registro de temperatura na parte inferior e superior no interior do rack. Elaboração própria.

6. MANUTENÇÃO PREVENTIVA EM BESS: INSIGHTS DA INSTALAÇÃO DA ISA CTEEP

A eficiência operacional e a confiabilidade dos BESS dependem significativamente de uma manutenção preventiva cuidadosa e regular. Na instalação da ISA CTEEP, foi desenvolvido um plano abrangente de manutenção preventiva

para garantir a operação segura e eficiente de vários componentes essenciais do sistema.

O plano de manutenção para os *racks* de baterias concentra-se em aspectos elétricos, mecânicos e de HVAC. Medir e armazenar a tensão e temperatura das células é uma prática essencial, assim como testar regularmente as conexões e terminações (Lavoie, 2019). Inspeção mecânica, verificação de ventilação e monitoramento da temperatura ambiente são etapas cruciais para prevenir problemas e garantir o desempenho ótimo do sistema. O sistema de supressão de incêndio adotado pela CTEEP requer procedimentos específicos de manutenção trimestrais e anuais para garantir sua eficácia e segurança (Stat-X, 2010). O *Combiner Box* tem o papel de integração e distribuição seguras de energia. Portanto, tem manutenção semestral e anual para garantir seu desempenho consistente e seguro (Lavoie, 2019). Verificar a integridade das conexões elétricas, inspecionar a estrutura quanto à corrosão e garantir a operação dos sistemas de segurança são etapas essenciais.

O Sistema de Conversão de Energia (*Power Conversion System - PCS*) requer manutenção preventiva regular para proteger o equipamento contra adversidades e garantir sua confiabilidade (Lavoie, 2019). Os procedimentos incluem inspeção, limpeza, ajustes, testes e reparos, visando detectar e corrigir problemas antes que afetem o desempenho do sistema. O Centro de Controle faz a gestão e supervisão das operações do sistema. Portanto, são realizadas manutenções semestrais e anuais para garantir seu pleno funcionamento (Lavoie, 2019). A execução cuidadosa desses procedimentos ajuda a prevenir falhas e danos, maximizando a eficiência e a disponibilidade do BESS como um todo. Por fim, o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) requer inspeções e testes regulares (com uma frequência anual) para garantir sua eficácia e segurança (Lavoie, 2019; Stat-X, 2010). Documentação técnica detalhada e testes antes da temporada de chuvas são essenciais para garantir a proteção da estrutura e dos ocupantes contra descargas atmosféricas.

Com o BESS em plena operação, diversos itens críticos são meticulosamente verificados. Testes de alarme, botões de emergência, LEDs nos *racks* e pressão do resfriador demonstraram conformidade com os padrões estabelecidos, destacando a robustez e a confiabilidade operacional.

O monitoramento contínuo do desempenho do BESS, em colaboração com a equipe da ISA CTEEP, visa não apenas identificar problemas, mas também reconhecer melhores práticas e oportunidades de melhoria. Esse registro detalhado de observações durante as inspeções fornece *insights* valiosos para otimizar as práticas de manutenção, contribuindo para o desenvolvimento de um Plano de Manutenção robusto e eficiente.

7. CONCLUSÕES

O presente artigo abordou de forma abrangente diversos aspectos relacionados à manutenção de BESS, destacando a importância de estratégias preventivas e preditivas para garantir a confiabilidade operacional e a segurança desses sistemas em constante evolução. A análise de FMEA revelou

a necessidade de uma abordagem multifacetada para mitigar os riscos associados aos BESSs, especialmente no que diz respeito às LiBs, destacando a importância da gestão térmica adequada e da detecção precoce de eventos térmicos. A análise de acidentes identificou tendências importantes e destacou a necessidade contínua de aprimoramento das práticas de segurança e regulamentações em BESS, enquanto a discussão sobre tecnologias de supressão de incêndios enfatizou a importância do resfriamento adequado e da detecção precoce de gases inflamáveis. Além disso, a implementação de técnicas de monitoramento de impedância interna em BESSs promete inovar a manutenção preditiva, permitindo a detecção precoce de falhas. O desenvolvimento contínuo de normas e padrões, em conjunto com a implementação de tecnologias inovadoras de monitoramento, é essencial para garantir a operação segura e eficiente dos sistemas de armazenamento de energia.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à ISA CTEEP pelo apoio no estudo e à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), por meio do seu Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PDI), por financiar este projeto. Sem essas instituições, este trabalho não seria possível. Agradecemos por tornar realidade os estudos que contribuíram para o avanço do conhecimento e práticas relacionadas ao armazenamento de energia e segurança operacional.

REFERÊNCIAS

- Back, D.S. (2021). A Study on The Safety Measures Against Fire Through An ESS Fire Analysis. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(6), 457-463.
- China Electric Power Technology. (2021). Accident analysis of Beijing Jimei Dahongmen 25 MWh DC solarstorage-charging integrated station project [Technical Report]. Institute of energy storage and novel electric technology.
- Cleantechnica. (2022). Here's what Tesla learned from last year's Megapack fire in Australia. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2022/05/13/heres-what-tesa-learned-from-last-years-megapack-fire-in-australia/>.
- Conzen, J., Lakshmipathy, S., Kapahi, A., Kraft, S., & DiDomizio, M. (2023). Lithium ion battery energy storage systems (BESS) hazards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 81, 104932. [doi: 10.1016/j.jlp.2022.104932].
- DNV.GL. (2020). McMicken Battery Energy Storage System Event Technical Analysis and Recommendations [Technical Report]. Arizona Public Service. [Online]. Available: <https://coaching.typepad.com/files/mcmicken.pdf>.
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2021). Battery Energy Storage Systems Explosion Hazards.

- E.S.R. Group. (2022). Victorian Big Battery Fire: July 30, 2021 [Technical Report]. Fisher Engineering. [Technical Report]. Vistra Corp. [Online]. Available: <https://vistra.app.box.com/s/1aezfypko93vz5jm9nn9tckphtjkgzvb>.
- Fioravanti, R., Kumar, K., Nakata, S., Chalamala, B., & Preger, Y. (2020). Predictive-maintenance practices: For operational safety of battery energy storage systems. *IEEE Power and Energy Magazine*, 18(6), 86–97. [doi: 10.1109/mpe.2020.3014542].
- Hou, N. (2022). Condition Based Reliability Evaluation and Maintenance Strategy for Battery Energy Storage System. KTH, School of Electrical Engineering and Computer Science (EECS).
- Lai, X., Yao, J., Jin, C., Feng, X., Wang, H., Xu, C., & Zheng, Y. (2022). A Review of Lithium-Ion Battery Failure Hazards: Test Standards, Accident Analysis, and Safety Suggestions. *Batteries*, 8(11), 248.
- Lavoie, B. (2019). FINAL REPORT | Demonstrating the Benefits of Long-Duration, Low-Cost Flow Battery Storage in a Renewable Microgrid | ESTCP Project EW19-5312.
- Liu, M., Li, W., Wang, C., Polis, M. P., Wang, L. Y., & Li, J. (2017). Reliability evaluation of large-scale battery energy storage systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(6), 2733-2743. [doi: 10.1109/TSG.2016.2536688].
- National Fire Protection Association (NFPA). (2019). NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems. (<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/nfpa-69-standard-development/69>).
- NEXCERIS. (2019). South Korea identifies Top 4 causes that led to ESS fires. [Online]. Available: <https://nexceris.com/2019/06/14/south-korea-identifies-top-4-causes-that-led-to-ess-fires/>.
- Pham, T. T., Kuo, T.-C., & Bui, D. M. (2020). Reliability evaluation of an aggregate battery energy storage system in microgrids under dynamic operation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105786. [doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105786].
- Sandelic, M., Sangwongwanich, A., & Blaabjerg, F. (2019). Reliability evaluation of PV systems with integrated battery energy storage systems: DC-coupled and AC-coupled configurations. *Electronics*, 8(9), 1059. [doi: 10.3390/electronics8091059].
- Society of Automotive Engineers (SAE). (2023). SAE J3235 – Best Practices for Storage of Lithium-Ion Batteries.
- Stat-X (2010). Stat-X Fire Suppression System – Design, Installation, Operation, and Maintenance Manual.
- Vistra Energy. (2022). Findings and Corrective Actions Sept. 4, 2021, Incident Moss Landing Energy Storage Facility