EVENTO ON-LINE

ConBRepro

XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

02 a 04 de dezembro de 2026

Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

Estudo de Falhas em Sistemas BESS: Contribuições à Segurança de Processo e à Gestão de Ativos

Helton Luiz Santana Oliveira

Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil

Marcelo Contente Arese

Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil

Diogo de Azevedo Leão

Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil

Gilson Brito Alves Lima

Universidade Federal Fluminense (UFF), Brasil

Resumo: A expansão dos sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) amplia a flexibilidade das redes elétricas e exige uma gestão integrada de segurança, confiabilidade e desempenho dos ativos. Este artigo analisa como a aplicação da análise de modos e efeitos de falha (FMEA) pode apoiar a Segurança de Processo e a Gestão de Ativos em instalações com BESS. A pesquisa qualitativa, bibliográfica e documental examinou normas técnicas, literatura especializada e lições de incidentes, organizando funções, modos de falha, causas, efeitos, barreiras e ações para dez grupos de subsistemas e interfaces. Como resultado, apresenta-se uma matriz que relaciona falhas em células, circuitos elétricos, automação, gerenciamento térmico, detecção, ventilação e proteção contra incêndio com medidas de prevenção e mitigação. A análise evidencia a importância de avaliar conjuntamente fuga térmica, falhas elétricas, indisponibilidade de barreiras e fatores operacionais. A matriz oferece uma base rastreável para revisão de projeto, comissionamento, inspeção, manutenção, gestão de mudanças e preparação para emergências. Sua integração às decisões ao longo do ciclo de vida contribui para orientar o tratamento de riscos e a realização de valor dos ativos, em consonância com a ISO 55001:2024.

Palavras-chave: Sistemas de armazenamento de energia em baterias, Análise de modos de falha, Segurança de processo, Gestão de ativos, Confiabilidade.

Abstract: The expansion of battery energy storage systems (BESS) increases power grid flexibility and calls for integrated management of safety, reliability, and asset performance. This article examines how failure modes and effects analysis (FMEA) can support process safety and asset management in BESS installations. The qualitative bibliographic and documentary study examined technical standards, specialized literature, and lessons from incidents, organizing functions, failure modes, causes, effects, barriers, and actions across ten groups of subsystems and interfaces. The resulting matrix links failures in cells, electrical circuits, automation, thermal management, detection, ventilation, and fire protection to preventive and mitigating measures. The analysis highlights the need to assess thermal runaway, electrical faults, unavailable barriers, and operational factors together. The matrix provides a traceable basis for design review, commissioning, inspection, maintenance, management of change, and emergency preparedness. Integrating these findings into life-cycle decisions can guide risk treatment and the realization of value from assets, consistent with ISO 55001:2024.

Keywords: Battery energy storage systems, Failure modes and effects analysis, Process safety, Asset management, Reliability.

1. Introdução

A expansão da geração fotovoltaica e eólica aumenta a demanda por flexibilidade, regulação de frequência, controle de tensão e deslocamento temporal da energia. Os sistemas de armazenamento de energia em baterias (battery energy storage systems, BESS) respondem rapidamente a essas necessidades, mas combinam células eletroquímicas, conversão de potência, automação, climatização, proteção contra incêndio e interfaces com a rede. A falha de um componente pode produzir efeitos além do seu subsistema, inclusive perda da função de armazenamento, danos materiais e consequências para pessoas e ambiente (Conzen et al., 2023; Moa; Go, 2023).

A fuga térmica e a liberação de gases inflamáveis e tóxicos demandam atenção particular. Curtos-circuitos, sobrecarga, danos mecânicos, gestão térmica deficiente e condições externas podem iniciar ou agravar um evento. Registros de incêndios em instalações de grande porte demonstram a importância de estudar a propagação entre módulos, a integridade de invólucros, a detecção, a ventilação, as ações automáticas e a resposta de emergência. O mero cumprimento isolado de especificações de componentes não substitui uma análise das interfaces do sistema completo.

O problema investigado é como organizar, de maneira rastreável, os modos de falha de BESS para apoiar decisões preventivas de engenharia e gestão de ativos. O objetivo consiste em desenvolver uma síntese qualitativa de FMEA por subsistema, contemplando funções, causas, efeitos, controles e ações, e discutir em que medida ela pode informar decisões ao longo do ciclo de vida sob a perspectiva da ISO 55001:2024. A pesquisa não atribui criticidade numérica a um projeto que não foi especificado. Após esta introdução, apresentam-se os fundamentos, o método, os resultados, a discussão e as conclusões.

2. Fundamentos técnicos e normativos

2.1. Arquitetura e perigos dos BESS

A arquitetura básica de um BESS compreende células conectadas em módulos e conjuntos de baterias, sistemas de gerenciamento (BMS), conversores de potência (PCS), proteção elétrica, climatização ou resfriamento, supervisão, comunicações, invólucros e sistemas de proteção contra incêndio. A energia armazenada é transferida à rede ou à carga por uma cadeia de conversão e controle. A segurança da instalação depende da coordenação entre componentes, limites operacionais, ensaios, comissionamento e manutenção (Conzen et al., 2023; Pinto et al., 2024).

A escolha da tecnologia eletroquímica altera densidade energética, degradação, resposta térmica, custo e requisitos de infraestrutura. As químicas de íons de lítio, incluindo fosfato de ferro-lítio (LFP) e níquel-manganês-cobalto (NMC), são relevantes em aplicações estacionárias; baterias de fluxo, chumbo-ácido, níquel-cádmio e outras soluções atendem a requisitos específicos. Maior estabilidade térmica relativa de uma química não elimina o risco sistêmico: propagação, gases, incêndio e explosão também dependem do arranjo físico, do estado de carga, da ventilação e da eficácia dos controles. Comparações de tecnologias devem considerar o serviço requerido, o ciclo de vida, a disponibilidade e os riscos, além do investimento inicial (Abdelkareem, 2022; Moa; Go, 2023).

A cadeia causal de um acidente pode atravessar várias fronteiras. Uma falha interna de célula pode levar a aquecimento, liberação de gases e propagação. Uma falha de sensor ou do BMS pode impedir a identificação de uma condição perigosa; a indisponibilidade de ventilação pode permitir acúmulo de gases; uma estratégia de supressão inadequada pode não impedir a propagação. Eventos externos, como ingresso de água, surtos elétricos, incêndios vizinhos e perda de alimentação, precisam ser considerados junto com fatores

humanos. A análise sistêmica evita tratar cada subsistema como barreira independente sem verificar as causas comuns.

2.2. FMEA, FMECA e gestão de ativos

A FMEA parte da função requerida, identifica formas pelas quais ela pode falhar e examina causas, mecanismos, efeitos locais e finais, métodos de detecção, controles existentes e ações recomendadas. A FMECA acrescenta uma avaliação formal de criticidade, quantitativa ou semiquantitativa, segundo critérios explicitados para o contexto. A IEC 60812:2018 descreve como planejar, executar, documentar e manter a análise, incluindo a variante FMECA (IEC, 2018). A antiga edição IEC 60812:2006 e a BS 5760-5:1991 constam da base histórica utilizada no manuscrito original (BSI, 1991; IEC, 2006).

A decomposição funcional deve incluir interfaces entre componentes e eventos em mais de uma escala: célula, módulo, rack, contêiner e instalação. Uma FMEA bem documentada registra suposições, fronteiras, configuração, modo de operação e responsável pelas ações. Sua atualização é necessária após modificações, incidentes, substituição de componentes e mudanças em limites de operação. O número de prioridade de risco obtido por multiplicação de escalas ordinais não foi empregado neste estudo; sem frequências, severidades e critérios de detecção específicos, um valor desse tipo conferiria precisão aparente à avaliação.

A ISO 55001:2024 estabelece requisitos para um sistema de gestão de ativos orientado à realização de valor e ao tratamento de riscos e oportunidades (ISO, 2024). A FMEA pode alimentar decisões de aquisição, projeto, inspeção, manutenção, substituição, mudança e descomissionamento. A compatibilidade conceitual entre uma técnica de análise e a norma não demonstra, por si só, conformidade de uma organização com a ISO 55001. Tal conclusão exigiria avaliação do sistema de gestão efetivamente implantado.

2.3. Barreiras, ensaios e limites de interpretação

A proteção de BESS deve ser tratada como combinação de prevenção, detecção, controle e resposta. Controles do processo eletroquímico procuram evitar condições de sobrecarga, descarga excessiva ou aquecimento. Sensores e lógicas de supervisão permitem reconhecer desvios; dispositivos de isolamento e desligamento buscam limitar sua evolução; segregação, ventilação e recursos de resposta procuram reduzir consequências. A presença de uma barreira no projeto não garante sua disponibilidade: alimentação elétrica, manutenção, calibração, atualização de software e causas comuns podem comprometer várias funções simultaneamente. A FMEA deve registrar tanto a função principal quanto os estados degradados e o modo pelo qual a falha da barreira seria detectada.

A aplicação de normas e ensaios exige distinguir o objeto de cada documento. A certificação de baterias para aplicações estacionárias e o ensaio de propagação em cenário definido não substituem a análise de instalação, que considera arranjo, afastamentos, acesso, detecção, ventilação e resposta. Da mesma forma, um resultado de ensaio não pode ser extrapolado automaticamente para outra química, configuração, estado de carga ou geometria de contêiner. Na elaboração do projeto, devem ser examinadas as premissas de aplicabilidade e as condições de validade de cada relatório técnico (UL Standards & Engagement, 2022, 2026; NFPA, 2026).

Os efeitos de falha merecem ser registrados em níveis distintos. O efeito local pode ser a perda de uma célula ou de um sensor. No nível do módulo ou do *rack*, pode ocorrer propagação ou perda de controle. No nível da instalação, surgem indisponibilidade do serviço, incêndio, exposição de equipes, emissões e interrupção da interface com a rede. Essa distinção ajuda a evitar recomendações genéricas: uma inspeção de conexão elétrica reduz um mecanismo diferente daquele tratado por um sistema de ventilação de

emergência. Também torna visíveis os modos de falha que atravessam subsistemas e exigem análise complementar.

3. Método

A pesquisa adotou abordagem qualitativa, bibliográfica e documental. Foram examinados referenciais de análise de falhas e de gestão de ativos, estudos sobre riscos em BESS, documentos de segurança de instalações e relatos públicos de incidentes. Os referenciais centrais são a IEC 60812:2018, a ISO 55001:2024, a ISO 14224:2016, a NFPA 855 e documentos UL relativos a baterias e propagação de fuga térmica. A ISO 14224 foi utilizada como referência para disciplina de coleta e classificação de dados de confiabilidade; sua aplicação a BESS requer adaptação à taxonomia dos respectivos equipamentos (ISO, 2016).

Na primeira etapa, definiu-se a função de cada grupo de componentes. Na segunda, identificaram-se modos de falha, mecanismos causais e efeitos sobre pessoas, meio ambiente, ativos e continuidade do serviço. Na terceira, registraram-se barreiras preventivas, recursos de detecção e ações mitigadoras. Por fim, as informações foram organizadas no Quadro 1 e interpretadas em relação ao planejamento do ciclo de vida. A lista não pretende ser exaustiva e deverá ser revisada por equipe multidisciplinar para uma configuração real, com diagramas, especificações, procedimentos e histórico de falhas.

A pesquisa não dispõe de arquitetura detalhada, dados de falha por componente, probabilidade de cenários, inventário de energia de uma instalação de referência ou eficácia medida de barreiras. Portanto, apresenta uma FMEA ilustrativa e não calcula criticidades numéricas. Um estudo FMECA específico exigiria critérios documentados para frequência e severidade, dados técnicos e operacionais aplicáveis, análise de dependências e validação das recomendações por responsáveis de engenharia e operação.

3.1. Critérios para uma aplicação específica

Uma aplicação operacional da FMEA começaria com a definição do serviço que o BESS deve prestar, potência, capacidade, autonomia, química, arquitetura, localização e limites de operação. O responsável técnico definiria as fronteiras entre baterias, PCS, transformadores, rede, serviços auxiliares e instalações vizinhas. Diagramas elétricos, lógicas do BMS, lista de alarmes, documentação de ensaios e requisitos de manutenção permitiriam rastrear cada hipótese de falha. A equipe deveria incluir competências de eletroquímica, elétrica, automação, incêndio, operação e manutenção, além de considerar a interface com o atendimento a emergências.

Para cada função, a equipe registraria: requisito funcional; modo de falha observável; causas e mecanismos; efeitos locais e finais; método de detecção; barreiras existentes; condição de operação em que o modo é possível; ações recomendadas; responsável e evidência de encerramento. Uma alteração de firmware, um novo módulo, a mudança de estratégia de resfriamento ou uma modificação no layout exigiriam revisar as linhas afetadas. Registros de falha e quase acidente deveriam retroalimentar a análise, juntamente com resultados de inspeção e testes de barreiras. A identificação de um modo não significa que sua ocorrência seja provável: a probabilidade depende da configuração, qualidade, exposição e histórico técnico.

Uma avaliação de criticidade posterior precisaria definir consequências em dimensões comparáveis, sem reduzir indevidamente perdas humanas e ambientais a efeitos financeiros. Taxas de falha, probabilidade de propagação, indisponibilidade de barreiras, tempo de detecção e duração da exposição deveriam ser avaliados com dados adequados. Quando esses dados faltarem, a incerteza deve ser declarada; decisões sobre cenários de alta consequência não devem ser adiadas por ausência de uma pontuação aparentemente

precisa. A FMECA teria, assim, regras de priorização próprias e verificáveis para a instalação.

4. Resultados

4.1. Modos de falha e medidas de tratamento

O Quadro 1 consolida os grupos de falhas identificados. Os controles são exemplos de elementos a verificar no projeto ou na operação, não uma afirmação de que determinada instalação os possui. Em todos os grupos devem ser avaliados os estados de operação normal, manutenção, comissionamento, parada, partida e emergência.

Quadro 1 – Síntese de modos de falha e ações por subsistema de BESS

Subsistema	Modo de falha	Causas e efeitos	Prevenção e detecção	Mitigação
Células e módulos	Curto interno, sobrecarga, fuga térmica	Defeito, dano, resfriamento insuficiente; gases, incêndio e propagação	Limites operacionais; BMS; monitoramento; ensaios e segregação	Isolar módulo, desligar e acionar resposta emergencial
Circuitos e PCS	Arco, sobrecorrente, conexão aquecida	Isolamento, torque ou proteção inadequados; choque, fogo, indisponibilidade	Coordenação de proteção; inspeção, termografia e testes	Desligamento rápido e compartimentação
BMS e automação	Leitura ou lógica incorreta; falha de atuação	Sensor, software, parametrização; condição perigosa não detectada	Validação, testes FAT/SAT, redundância e gestão de versões	Estado seguro, alarmes e intertravamentos
Gerenciamento térmico	Perda de refrigeração; fluxo obstruído	Bomba, ventilador, filtro ou energia; degradação e aquecimento	Monitoramento térmico, manutenção e redundância justificada	Parada por temperatura e isolamento
Detecção e ventilação	Detecção indisponível; falha de exaustão	Sensor ou alimentação falhos; acúmulo de gases	Testes integrados; inspeção e verificação de disponibilidade	Isolamento, ventilação de emergência e evacuação
Proteção contra incêndio	Falha de atuação ou propagação não contida	Projeto, manutenção ou cobertura insuficiente	Ensaios aplicáveis; inspeção e planos de resposta	Conter propagação e coordenar equipes externas
Invólucro e estrutura	Ingresso de água; vedação ou integridade perdida	Corrosão, intempéries, drenagem; curto e dano estrutural	Materiais, vedações, inspeção e controle de umidade	Isolamento, drenagem e substituição
Supervisão e comunicação	Perda de dados, rede ou alarmes	Comunicação, sincronização ou cibersegurança; resposta tardia	Segregação, redundância e monitoramento	Operação degradada controlada e controle local
Operação e manutenção	Ajuste indevido; procedimento incompleto	Competência, autorização ou gestão de mudanças; acidente	Treinamento, bloqueio e revisão de procedimentos	Intertravamentos e resposta estruturada
Envelhecimento e eventos externos	Capacidade degradada; surto ou inundação	Ciclagem, temperatura, intempéries; perda de desempenho	SOH, regime operacional, inspeção e análise do sítio	Reduzir exposição e substituir componentes

Fonte: Autores com base em IEC (2018), Conzen et al. (2023) e Moa e Go (2023).

Nas células e módulos, a fuga térmica constitui cenário de elevada consequência potencial. Curtos internos, defeitos de fabricação, sobrecarga, danos físicos e resfriamento

inadequado podem iniciar aquecimento autossustentado. Entre os efeitos possíveis estão queimaduras, exposição a gases, perda de módulos, danos ao invólucro e propagação para equipamentos próximos. Verificações de projeto incluem limites de tensão, corrente, temperatura, estado de carga e profundidade de descarga, além de detecção precoce, segregação e ensaios relevantes. A resposta requer critérios claros de isolamento, desligamento e atuação externa; medidas de supressão precisam ser avaliadas para a tecnologia e a configuração em questão (Conzen et al., 2023; UL Standards & Engagement, 2022, 2026).

Nos circuitos de potência, falhas de isolamento, arco elétrico, sobrecorrente, contatos defeituosos e aterramento inadequado podem gerar lesões, incêndio, danos a inversores e transformadores e indisponibilidade. Especificação, torque, coordenação de proteção, termografia, ensaios e inspeções devem ser adequados à criticidade. As proteções devem ser testadas em condições representativas e suas indisponibilidades tratadas formalmente. As falhas do BMS, do PCS ou dos sistemas supervisórios incluem medições incorretas, lógica inadequada, perda de comunicação, parametrização errada e degradação de firmware. Estratégias de redundância e estado seguro exigem validação de interfaces e ensaios de fábrica e de campo.

A climatização e o resfriamento precisam manter as células dentro dos limites previstos para toda a faixa operacional. Perda de alimentação, falha de bombas ou ventiladores, filtros obstruídos e sensores defeituosos podem acelerar degradação ou reduzir a margem até um evento térmico. A ventilação de segurança deve ser considerada em conjunto com a detecção e a possível geração de gases. Sistemas de detecção, supressão e alívio não são intercambiáveis: cada barreira tem função específica, condições de atuação e limitações. A NFPA 855 trata da segurança de instalação de sistemas estacionários, e os ensaios UL 9540A fornecem evidências relevantes para avaliar propagação sob condições definidas (NFPA, 2026; UL Standards & Engagement, 2026).

Invólucros e estruturas devem resistir às condições ambientais previstas. Corrosão, perda de vedação, ingresso de água e deformação podem desencadear curtos, perda de isolamento ou indisponibilidade de sistemas auxiliares. Inspeção de drenagem, estanqueidade e interfaces físicas complementa o controle de umidade. Fatores humanos incluem ajustes indevidos, manutenção incompleta, procedimentos ambíguos e resposta inadequada a alarmes. Treinamento, autorização de trabalho, bloqueio de energia, revisão de mudanças e exercícios de emergência são medidas associadas. O envelhecimento eletroquímico, indicado por perda de capacidade e aumento de resistência interna, requer acompanhamento de estado de saúde, temperatura e regime de operação.

4.2. Evidências documentais de eventos

O PDF examinado reúne ocorrências internacionais entre 2017 e 2025, com relatos de perdas de contêineres, propagação, evacuação, confinamento comunitário e preocupação com gases e resíduos. Eventos em instalações de Nova York, Califórnia, França, Austrália e Coreia do Sul mostram a variedade de contextos. Relatos sobre Elkhorn e Moss Landing destacam, respectivamente, questões ligadas à integridade física e à resposta a incêndios em instalações de grande porte (Grant; Hough; Petrakis, 2023; WECC, 2025). Um incidente não identifica automaticamente um modo de falha iniciador; quando as investigações públicas não estabelecem a causa, não se deve atribuí-la apenas com base no desfecho observado.

No episódio de Moss Landing, em janeiro de 2025, houve incêndio em instalação de grande capacidade, com evacuação e monitoramento ambiental posteriores. Na instalação Gateway, em maio de 2024, a resposta prolongada e a possibilidade de reignição ilustraram a importância de planejar acesso, monitoramento e coordenação com autoridades. Na Coreia do Sul, a sequência de incêndios em sistemas de armazenamento estimulou

revisões de proteção elétrica, instalação e operação. A comparação desses episódios não permite inferir taxas de acidente entre químicas, pois faltam denominadores de exposição, configurações equivalentes e dados uniformes de causa.

A contribuição documental desses casos para a FMEA consiste em testar se o estudo contempla ingresso de água, falhas de interfaces elétricas, perda de detecção, propagação, gases, resposta operacional, restrições de acesso e consequências ambientais. Cada lição deve ser traduzida em pergunta verificável e, quando pertinente, em ação com responsável, prazo e evidência de conclusão. Esse procedimento é mais defensável do que transformar um conjunto heterogêneo de notícias e relatórios em ranking estatístico de modos de falha.

4.3. Interface com manutenção e resposta a emergências

Uma recomendação resultante da FMEA precisa transformar-se em rotina executável. Para a manutenção, isso inclui definir a periodicidade de inspeções, testes funcionais de alarmes e desligamentos, verificação de torque e aquecimento de conexões, acompanhamento de tendência de temperatura e estado de saúde, conservação de filtros e equipamentos térmicos e inspeção de drenagem e vedação. Critérios de aceitação e de retirada de serviço são necessários para que resultados anormais provoquem uma decisão consistente. A periodicidade não deve ser copiada de outra instalação sem avaliar regime de operação, ambiente e consequências da falha.

A preparação para emergências deve considerar que gases podem preceder fogo visível, que reignições podem ocorrer e que o acesso ao interior de um contêiner pode ser inseguro. Planos devem definir como reconhecer alarmes, isolar energia, estabelecer perímetros, comunicar autoridades, monitorar atmosferas e decidir sobre evacuação e retorno seguro. Exercícios envolvendo operador, manutenção e serviços externos permitem identificar atrasos de comunicação e incompatibilidades entre procedimentos. O plano deve contemplar ainda o manejo de água de combate, resíduos e equipamentos danificados conforme os cenários aplicáveis, sem pressupor que uma única estratégia de supressão resolverá qualquer tipo de evento.

Do ponto de vista de gestão de ativos, cada ação pode ser vinculada a um objetivo: preservar segurança, manter a disponibilidade, reduzir perdas ao longo do ciclo de vida ou cumprir obrigação técnica. A decisão entre redundância, inspeção mais frequente, modernização e substituição exige comparar desempenho esperado, custo e risco. Quando a decisão altera limites de operação ou arquitetura de barreiras, o procedimento de gestão de mudanças deve atualizar a FMEA, os documentos, a capacitação e os testes. Essa ligação entre análise e implementação evita que a matriz se torne apenas um registro sem efeito sobre as operações.

5. Discussão

A FMEA facilita a comunicação entre engenharia eletroquímica, elétrica, automação, segurança, manutenção e operação. A estrutura função–falha–efeito–controle permite associar cada recomendação a uma decisão do ciclo de vida: especificar componentes na aquisição, testar barreiras no comissionamento, definir limites operacionais, programar inspeções, gerenciar mudanças e planejar substituições. Quando o registro é mantido atualizado e integrado aos dados de desempenho, torna-se insumo para políticas de manutenção e aprendizagem organizacional (IEC, 2018; ISO, 2024).

A técnica, isoladamente, não representa adequadamente todas as sequências dependentes ou falhas de causa comum. Para cenários envolvendo múltiplas barreiras, propagação térmica, acumulação de gases e consequências fora do contêiner, podem ser necessárias análises complementares, como árvore de falhas, árvore de eventos, modelagem de consequências e avaliação de barreiras. A seleção dessas técnicas deve partir da pergunta decisória e da qualidade dos dados disponíveis. A FMEA fornece a

organização inicial dos modos potenciais e ajuda a identificar quais cenários justificam aprofundamento.

Há diferença entre o potencial de aplicação e um benefício empiricamente demonstrado. Este estudo não mediu aumento de disponibilidade, redução de incêndios ou retorno econômico após intervenção. Sua contribuição é uma estrutura de análise e um conjunto de prioridades técnicas a verificar em instalações concretas. Para avançar de FMEA qualitativa a FMECA, a equipe deverá estabelecer escalas e critérios transparentes, reunir dados de falha e exposição por tecnologia e arquitetura e explicitar incertezas. Eventos raros de consequências graves requerem tratamento próprio, sem depender exclusivamente da multiplicação de notas ordinais.

5.1. Alcance analítico e necessidades de validação

A matriz apresentada identifica classes de vulnerabilidade, mas não substitui a verificação de engenharia. Um contêiner com resfriamento líquido e outro com ventilação forçada terão mecanismos de falha, instrumentos e respostas diferentes. O mesmo vale para instalações em clima quente e úmido, ambientes salinos ou áreas sujeitas a inundação. A química, o fabricante, o estado de carga, a quantidade de energia, o arranjo de racks e a distância entre unidades modificam a propagação possível. Por isso, nenhuma linha do Quadro 1 deve ser assumida como descrição completa de uma instalação sem inspeção e documentação específica.

A disponibilidade de dados é outra limitação. Relatos públicos privilegiam acidentes com maior repercussão e frequentemente omitem o número de equipamentos expostos, o tempo de operação, a configuração detalhada e o mecanismo iniciador confirmado. Utilizá-los para calcular uma frequência por tecnologia produziria comparações enviesadas. Dados de manutenção e eventos internos são mais adequados para estimar desempenho, desde que exista uma taxonomia consistente de equipamentos, modos de falha, tempos e ações corretivas. Mesmo assim, mudanças de projeto e de regime operacional devem ser consideradas antes de transferir estimativas de uma frota para outra (ISO, 2016).

Também é necessário distinguir a segurança da bateria da segurança do sistema. O ensaio de um módulo aborda condições determinadas, enquanto o desempenho de uma instalação depende das interfaces elétricas, mecânicas e de automação, da energia disponível, de barreiras passivas e ativas e da atuação humana. Uma estratégia que reduz a propagação entre módulos pode não eliminar o acúmulo de gases no invólucro. Uma proteção elétrica eficaz contra sobrecorrente pode não detectar uma falha interna de célula. Portanto, a avaliação deve verificar a função e a independência de cada barreira e identificar dependências de energia, sensor, lógica e comunicação.

A pesquisa futura pode empregar um estudo de caso com arquitetura definida e dados autorizados de operação. A equipe poderá registrar modos e efeitos no nível do componente, estimar parâmetros e incertezas, testar cenários de falhas simultâneas e comparar alternativas de manutenção e projeto. Indicadores de desempenho de barreiras e simulações de emergência permitiriam avaliar se as ações recomendadas foram implementadas e produziram os efeitos esperados. Só então seria possível passar da contribuição conceitual apresentada neste artigo para conclusões empíricas sobre disponibilidade, redução de risco e realização de valor.

6. Conclusões

O estudo examinou os principais modos de falha dos sistemas de armazenamento de energia em baterias e sua relação com a segurança de processo, a confiabilidade e a gestão de ativos. Para organizar essa análise, foram reunidos referenciais normativos, literatura técnica e lições extraídas de incidentes, resultando em uma matriz qualitativa que associa subsistemas, falhas potenciais, causas, efeitos, controles e ações de tratamento.

A contribuição central é tornar explícitas as interfaces entre células, circuitos de potência, automação, gerenciamento térmico, detecção, ventilação, proteção contra incêndio, estruturas e atuação humana. A matriz permite identificar onde uma falha local pode evoluir para consequências sistêmicas e oferece uma base rastreável para revisão de projeto, especificação de barreiras, comissionamento, inspeções, manutenção e preparação para emergências. Também favorece a revisão da análise após mudanças e incidentes, conectando o aprendizado técnico às decisões sobre desempenho, risco e valor ao longo do ciclo de vida dos ativos, em consonância com a ISO 55001:2024.

Os cenários que demandam atenção integrada incluem fuga térmica, falhas elétricas, perda de controle térmico, indisponibilidade de detecção e ventilação, falhas de automação, ingresso de água e erros operacionais. A avaliação conjunta desses modos orienta a seleção de análises complementares quando houver propagação, dependência entre barreiras ou consequências externas à instalação. Assim, a FMEA proposta constitui um ponto de partida aplicável para equipes multidisciplinares estruturarem estudos específicos de BESS e priorizarem verificações técnicas.

Por se tratar de uma análise bibliográfica e documental, a matriz requer adaptação à arquitetura e aos dados de cada instalação antes de sustentar uma FMECA com criticidade quantificada. Sua aplicação em estudos de caso poderá testar as ações recomendadas e mensurar seus efeitos sobre segurança, disponibilidade e desempenho.

Referências

ABDELKAREEM, M. A. Battery energy storage systems and SWOT (strengths, weaknesses, opportunities, and threats) analysis of batteries in power transmission. Energy, v. 254, art. 123987, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123987.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5760-5:1991: Reliability of systems, equipment and components: Guide to failure modes, effects and criticality analysis. London: BSI, 1991.

CONZEN, J.; LAKSHMIPATHY, S.; KAPAHI, A.; KRAFT, S.; DIDOMIZIO, M. Lithium-ion battery energy storage systems (BESS) hazards. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 81, art. 104932, 2023. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104932.

GRANT, C.; HOUGH, G.; PETRAKIS, N. Elkhorn Battery Energy Storage System fire of September 20, 2022: public report of technical findings. Delaware, OH: Energy Safety Response Group, 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60812:2006: Analysis techniques for system reliability: Procedure for failure mode and effects analysis. Geneva: IEC, 2006.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60812:2018: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: IEC, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14224:2016: Petroleum, petrochemical and natural gas industries: Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Geneva: ISO, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 55001:2024: Asset management: Asset management system: Requirements. Geneva: ISO, 2024.

MOA, E. H. Y.; GO, Y. I. Large-scale energy storage system: safety and risk assessment. Sustainable Energy Research, v. 10, art. 13, 2023. DOI: 10.1186/s40807-023-00082-z.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 855:2026: Standard for the installation of stationary energy storage systems. Quincy, MA: NFPA, 2026.

PINTO, D. R. et al. Desafios e soluções na manutenção de sistemas de armazenamento de energia em baterias: um estudo de caso na ISA CTEEP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2024. Anais [...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Automática, 2024.

UL STANDARDS & ENGAGEMENT. ANSI/CAN/UL 1973:2022: Batteries for use in stationary, vehicle auxiliary power and light electric rail applications. Northbrook, IL: UL Standards & Engagement, 2022.

UL STANDARDS & ENGAGEMENT. ANSI/CAN/UL 9540A:2026: Test method for evaluating thermal runaway fire propagation in battery energy storage systems. Northbrook, IL: UL Standards & Engagement, 2026.

WESTERN ELECTRICITY COORDINATING COUNCIL. Moss Landing BESS fire report: operations analysis. Salt Lake City: WECC, 2025.