

**SISTEMAS DE ARMAZENAGEM DE ENERGIA ELÉTRICA EM BATERIAS DE ÍONS DE LÍCIO****Índice**

	<b>Página</b>
<b>1.0 ESCOPO</b> .....	<b>3</b>
1.1 Mudanças .....	3
1.2 Riscos .....	3
1.2.1 Fuga térmica.....	3
1.2.2 Incêndio por falhas elétricas .....	4
<b>2.0 RECOMENDAÇÕES PARA PREVENÇÃO DE PERDAS</b> .....	<b>4</b>
2.1 Equipamentos certificados pela FM Approvals .....	4
2.2 Seleção de um sistema de armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio.....	4
2.3 Construção e localização .....	4
2.3.1 Localização.....	4
2.3.2 Compartimentos e contêineres externos para sistemas LIB-ESS.....	5
2.3.3 Edificação ou compartimento exclusivo para sistema LIB-ESS com mais de 46,5 m <sup>2</sup> (500 ft <sup>2</sup> )...	6
2.3.4 Salas isoladas para sistemas LIB-ESS.....	6
2.3.5 Distâncias de separação para racks internos de sistemas LIB-ESS.....	7
2.4 Proteção.....	7
2.5 Equipamentos e processos.....	8
2.5.1 Proteção do sistema elétrico.....	8
2.5.2 Proteção de equipamentos .....	8
2.5.3 Funções de segurança do sistema de gerenciamento da bateria.....	8
2.5.4 Equipamentos de conversão potência .....	10
2.5.5 Circulação de ar/ventilação mecânica .....	10
2.6 Operação e manutenção.....	11
2.6.1 Operação .....	11
2.6.2 Manutenção de equipamentos.....	11
2.7 Treinamento.....	12
2.8 Fatores humanos .....	12
2.8.1 Organização e limpeza geral .....	12
2.8.2 Plano de preparação para incidentes e de resposta a emergências .....	12
2.9 Utilidades .....	13
<b>3.0 AJUDA PARA RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>13</b>
3.1 Construção e localização .....	13
3.1.1 Separação espacial entre compartimentos externos .....	13
3.2 Proteção contra incêndio e distâncias de separação mínimas para instalações internas.....	13
3.3 Sistemas de proteção por agente gasoso.....	14
3.4 Elétrica .....	14
3.4.1 Envelhecimento de baterias e sistemas LIB-ESS .....	14
3.4.2 Dispositivos de intervenção rápida .....	14
<b>4.0 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>15</b>
4.1 FM.....	15
4.2 Outras .....	15
<b>ANEXO A – GLOSSÁRIO DE TERMOS</b> .....	<b>15</b>



<b>ANEXO B – HISTÓRICO DE REVISÕES DO DOCUMENTO .....</b>	<b>18</b>
<b>ANEXO C – INFORMAÇÕES DE REFERÊNCIA .....</b>	<b>18</b>
C.1 Introdução .....	18
C.2 Componentes do sistema LIB-ESS .....	19
C.2.1 Células .....	19
C.2.2 Módulos.....	21
C.2.3 Racks .....	22
C.2.4 Sistemas .....	23
C.3 Aplicações de sistemas LIB-ESS .....	24
C.3.1 Serviços de energia elétrica em massa.....	25
C.3.2 Serviços auxiliares .....	25
C.3.3 Serviços de transmissão e distribuição .....	25
C.3.4 Serviços de energia elétrica para consumidores.....	25
C.4 Modos de falha.....	25
C.4.1 Sobretensão.....	26
C.4.2 Subtensão/sobredescarga .....	26
C.4.3 Baixa temperatura .....	26
C.4.4 Alta temperatura.....	26
C.4.5 Fuga térmica .....	26
C.4.6 Fadiga mecânica .....	27
C.4.7 Vida útil e função do sistema de gerenciamento da bateria .....	27
C.5 Tecnologias de proteção contra incêndio .....	27

## Lista de figuras

Fig. 2.3.1. Localizações para sistemas LIB-ESS, classificadas por preferência .....	5
Fig. 2.4.2.1. Barreiras térmicas para reduzir a área com risco de incêndio .....	8
Fig. 2.5.3.1. Níveis de gerenciamento do sistema LIB-ESS.....	9
Fig. C.2.1.1. Forma de célula cilíndrica.....	20
Fig. C.2.1.2. Forma de célula prismática.....	21
Fig. C.2.1.3. Forma da célula em bolsa .....	21
Fig. C.2.2(A). Configuração de módulo.....	22
Fig. C.2.2(B). Módulo fechado típico.....	22
Fig. C.2.3 Configuração de rack típica com vários módulos .....	23
Fig. C.2.4(A). Compartimento externo com vários racks.....	24
Fig. C.2.4(B). Diagrama de arquitetura de um sistema LIB-ESS .....	24

## 1.0 ESCOPO

Esta norma técnica apresenta recomendações de prevenção de perdas para projeto, operação, proteção, inspeção, manutenção e testes de sistemas de armazenagem de energia elétrica (ESS) estacionários em baterias de íons de lítio (LIB) com mais de 20 kWh. Ela também apresenta recomendações para a localização de sistemas de armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio (LIB-ESS) portáteis (temporários).

Os sistemas de armazenagem de energia elétrica podem ser localizados em compartimentos externos, edificações exclusivas ou salas isoladas dentro de edificações. Esses sistemas podem incluir alguns ou todos os seguintes componentes: baterias, carregadores de baterias, sistemas de gerenciamento de baterias, compartimentos de gerenciamento térmico e outros compartimentos associados e sistemas auxiliares.

Esta norma técnica não abrange os seguintes tipos de armazenagem de energia elétrica:

- A. Mecânica: armazenagem hidrelétrica bombeada; armazenagem de energia elétrica por ar comprimido; armazenagem de energia elétrica por volante de inércia.
- B. Eletroquímica: baterias de fluxo; sulfato de sódio.
- C. Química: hidrogênio; gás natural sintético.
- D. Sistemas de armazenagem elétrica: capacitores de dupla camada; armazenagem de energia magnética supercondutora.
- E. Sistemas de armazenagem térmica.
- F. Aplicações de micromobilidade (bicicletas elétricas, patinetes, cadeiras de rodas etc.).
- G. Unidades de reserva com baterias de íons de lítio para sistemas de energia elétrica distribuída instaladas em racks de servidores de salas de equipamentos de processamento de dados.

Esta norma técnica não abrange baterias que não sejam de íons de lítio, seus carregadores associados e os respectivos sistemas relacionados a energia elétrica de reserva em sistemas de nobreak ou energia elétrica de CC para proteção de disjuntores etc. Informações relacionadas a baterias que não sejam de íons de lítio utilizadas em sistemas de energia elétrica de reserva podem ser encontradas nas seguintes Normas Técnicas: 5-23, *Design and Protection for Emergency and Standby Power Systems*; 5-19, *Switchgear and Circuit Breakers*; 5-28, *DC Battery Systems*; e 5-32, *Data Centers and Related Facilities*.

## 1.1 Mudanças

**Abril de 2025.** Revisão intermediária. As mudanças incluem a adição da detecção de liberação de gases certificada pela FM Approvals e o esclarecimento das recomendações de proteção contra incêndio para sistemas de armazenagem de energia elétrica em baterias (BESS) em contêineres externos.

## 1.2 Riscos

### 1.2.1 Fuga térmica

A fuga térmica ocorre quando a reação química dentro de uma célula de íons de lítio produz mais calor do que pode ser dissipado pelo sistema de resfriamento associado. O aumento do calor causa a degradação do eletrólito líquido ignífero. Se o processo não for interrompido, a célula falha. A fuga térmica começa com a operação anormal da célula, que pode ser atribuída a três causas conhecidas: (1) abuso elétrico, (2) abuso térmico ou (3) danos físicos.

O **abuso elétrico** de uma célula de íons de lítio inclui sobrecarga ou sobredescarga, ou seja, a adição ou remoção de energia elétrica da célula a uma taxa que excede a capacidade de projeto. O abuso elétrico é reconhecido como o modo de falha mais comum nas células de íons de lítio. Esse é o único modo que pode ser interrompido pela funcionalidade avançada do sistema de gerenciamento da bateria. Quando uma falha iminente da célula resulta de abuso elétrico, o isolamento elétrico pode interromper o processo, evitando a fuga térmica. Alguns sistemas de gerenciamento de baterias incorporam ou podem interagir com sensores que detectam elevações de temperatura nas células ou monitoram os gases associados nos primeiros estágios da degradação do eletrólito.

O isolamento elétrico não mitiga as outras duas causas de falha de células: o abuso térmico e os danos físicos.

O **abuso térmico** pode ser resultado de fatores ambientais, como variações de temperaturas altas e baixas. A maioria das células de íons de lítio tem um intervalo bem definido de temperatura operacional aceitável e requer climatização constante para se manter dentro desses limites. Falhas identificadas como abuso térmico foram atribuídas a (1) mau funcionamento ou projeto inadequado de controles ambientais e (2) exposição a incêndios originados em sistemas de resfriamento e equipamentos elétricos auxiliares. Quando o abuso térmico causa a falha de uma célula, é provável que várias células sejam impactadas simultaneamente, e a progressão para a fuga térmica é inevitável.

Os **danos físicos** geralmente estão associados a defeitos de fabricação, mas também podem ser causados por manuseio incorreto durante o transporte ou a instalação. Os danos físicos podem resultar em trincas ou fraturas nos ânodos ou no separador e em curto-circuito interno da célula. Uma vez que as células armazenam sua própria energia, o isolamento elétrico não é capaz de impedir a progressão para a fuga térmica. Durante a fuga térmica, o eletrólito ignífero se degrada em gases inflamáveis (incluindo hidrogênio e vários hidrocarbonetos) e em uma quantidade significativa de dióxido de carbono. A quantidade de gases produzida por célula varia de acordo com a química e a capacidade elétrica da célula. Laboratórios de pesquisa independentes relataram quantidades de gases de 70 L (2,5 ft<sup>3</sup>) e 200 L (7,1 ft<sup>3</sup>) liberadas por célula.

### 1.2.2 Incêndio por falhas elétricas

Assim como ocorre em outros sistemas elétricos, os incêndios por falhas elétricas são uma preocupação e podem causar danos patrimoniais. Em casos graves, eles podem iniciar um evento de fuga térmica devido ao sobreaquecimento localizado.

Ao contrário das baterias de lítio, as baterias de íons de lítio não são reativas à água.

## 2.0 RECOMENDAÇÕES PARA PREVENÇÃO DE PERDAS

### 2.1 Equipamentos certificados pela FM Approvals

2.1.1 Utilize equipamentos, materiais e serviços certificados pela FM Approvals sempre que forem aplicáveis e estiverem disponíveis. Para obter uma lista de produtos e serviços certificados pela FM Approvals, consulte o *Approval Guide*, um recurso on-line da FM Approvals.

### 2.2 Seleção de um sistema de armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio

2.2.1 Verifique com o fabricante ou integrador se o projeto do sistema de armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio (LIB-ESS), incluindo o tipo de célula, o sistema de gerenciamento da bateria etc., é apropriado para a aplicação.

2.2.2 Estabeleça um procedimento de gerenciamento de mudanças para assegurar que as baterias ou os componentes do sistema de gerenciamento da bateria sejam compatíveis com os requisitos do sistema modificados ou que as substituições sejam apropriadas, de acordo com os requisitos do sistema existente.

2.2.3 Não utilize componentes no sistema LIB-ESS que sejam reconicionados ou usados, incluindo células e módulos.

### 2.3 Construção e localização

#### 2.3.1 Localização

2.3.1.1 Posicione sistemas de armazenagem de energia elétrica de acordo com uma das opções a seguir, listadas aqui na ordem de preferência:

A. Em um compartimento externo e distante de edificações ou equipamentos críticos, de acordo com a Seção 2.3.2 (Figura 2.3.1, localização 1).

B. Em uma edificação exclusiva que contenha apenas o sistema LIB-ESS e os equipamentos de suporte associados, de acordo com a Seção 2.3.3 (Figura 2.3.1, localização 2).

C. Em uma sala isolada externa exclusiva que seja acessível para operações de combate manual ao fogo e construída de acordo com a Seção 2.3.4 (Figura 2.3.1, localização 3).

D. Em uma sala isolada interna, de canto e exclusiva, com pelo menos duas paredes externas, que seja acessível para combate manual ao fogo e construída de acordo com a Seção 2.3.4 (Figura 2.3.1, localização 4).

E. Em uma sala isolada interna exclusiva com pelo menos uma parede externa que seja acessível para combate manual ao fogo e construída de acordo com a Seção 2.3.4 (Figura 2.3.1, localização 5).

### 2.3.2 Compartimentos e contêineres externos para sistemas LIB-ESS

2.3.2.1 Seleccione ou construa compartimentos e contêineres para sistemas LIB-ESS utilizando apenas materiais incombustíveis.

A distância de separação se baseia na presença de portas localizadas em apenas um dos lados do compartimento e na ausência de respiros ou de aberturas não protegidas em qualquer um dos outros lados. Ela também se baseia na presença de sistemas ativos (ar condicionado ou resfriamento por líquido) que mantenham as temperaturas das células ou dos módulos no compartimento ou contêiner em questão.

2.3.2.2 Para sistemas LIB-ESS em contêineres compostos por células de fosfato de ferro-lítio (LFP), providencie separação por corredores com pelo menos 1,5 m (5 ft) de largura nos lados que contenham painéis de acesso, portas ou respiros de deflagração.

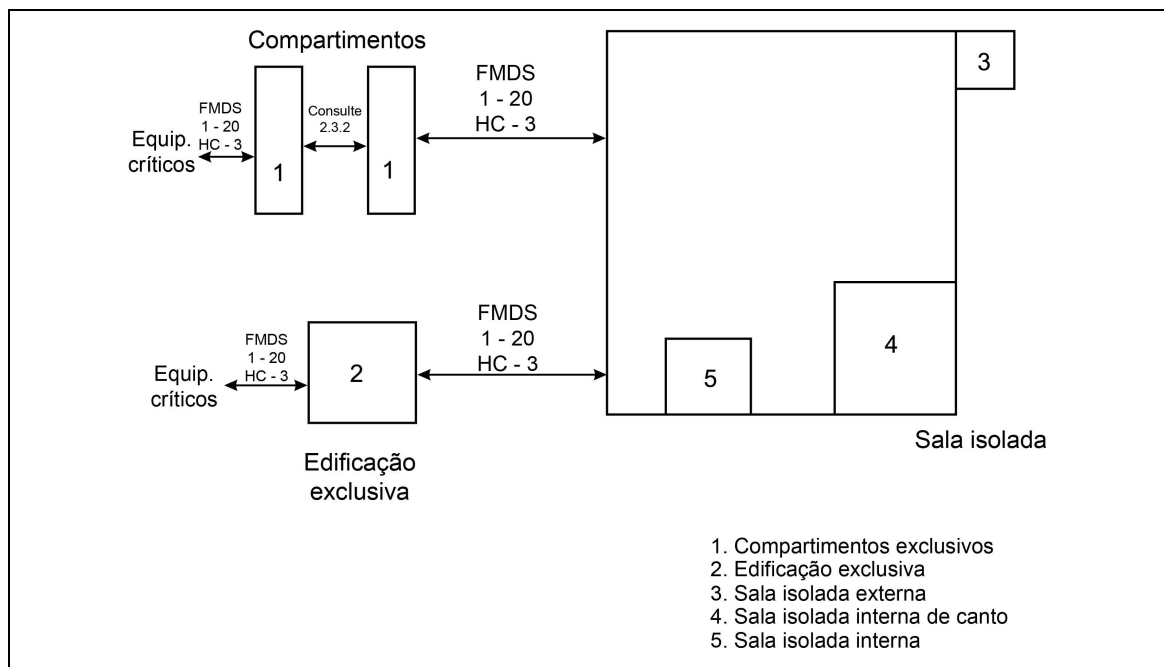


Fig. 2.3.1. Localizações para sistemas LIB-ESS, classificadas por preferência

2.3.2.3 Para sistemas LIB-ESS em contêineres compostos por células de óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC) nos quais a construção das paredes seja desconhecida ou tenha uma classificação nominal ASTM E119 inferior a uma hora, providencie separação por corredores com pelo menos 4,0 m (13 ft) de largura nos lados que contenham painéis de acesso, portas ou respiros de deflagração. Para sistemas LIB-ESS NMC em contêineres nos quais a construção das paredes seja documentada como tendo uma classificação nominal de pelo menos uma hora de acordo com a norma ASTM E119, a separação por corredores com pelo menos 2,4 m (8 ft) de largura é aceitável.

2.3.2.4 Providencie separação entre paredes sólidas sem aberturas com base em testes no nível da instalação que demonstrem que uma fuga térmica não pode se propagar entre os contêineres. Quando não houver um relatório de teste de incêndio disponível ou se o teste não tiver resultado em um incêndio na unidade de origem, providencie separação conforme indicado na Seção 2.3.2.2 ou 2.3.2.3, conforme apropriado.

2.3.2.4.1 Se houver passagens presentes, a separação deve ser estendida ou as passagens devem ser protegidas ou providas de material corta-fogo certificado pela FM Approvals.

2.3.2.4.2 Quando houver alívios de explosão ou outras passagens, assegure que sejam configurados e direcionados para longe de equipamentos e edificações adjacentes.

Em caso de incêndio, esses compartimentos podem ter respiros ou passagens que podem permitir o escape de gás quente e produtos de combustão do compartimento, expondo os equipamentos ou edificações adjacentes. As passagens podem incluir conduítes elétricos, portas, unidades de ar condicionado etc.

2.3.2.5 Providencie uma separação espacial mínima entre os compartimentos de sistemas LIB-ESS e as edificações adjacentes ou os equipamentos e utilidades críticos da unidade de acordo com a Norma Técnica 1-20, *Protection Against Exterior Fire Exposure*, utilizando a categoria de risco 3 para a ocupação da edificação que cria a exposição.

### **2.3.3 Edificação ou compartimento exclusivo para sistema LIB-ESS com mais de 46,5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>)**

Trate qualquer contêiner ou compartimento pré-fabricado com mais de 46,5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>) como uma edificação.

2.3.3.1 Construa uma edificação exclusiva para sistema LIB-ESS usando materiais incombustíveis.

2.3.3.2 Providencie uma separação espacial mínima entre edificações exclusivas para sistemas LIB-ESS e outras edificações ou equipamentos e utilidades críticos da unidade de acordo com a Norma Técnica 1-20, utilizando a categoria de risco 3 para a ocupação da edificação que cria a exposição.

2.3.3.3 Providencie construção limitadora de danos.

2.3.3.3.1 Projete a construção limitadora de danos de acordo com a Norma Técnica 1-44, *Damage-Limiting Construction*, utilizando propano como o gás representativo.

2.3.3.4 Instale o sistema LIB-ESS com uma distância de separação mínima, de acordo com a Seção 2.3.5.

2.3.3.5 Providencie uma taxa de circulação de ar de pelo menos 0,3 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> (1 cfm/ft<sup>2</sup>) da área do piso (consulte a Seção 2.5.5).

2.3.3.6 Projete sistemas de ar condicionado para manter as temperaturas dentro dos limites de operação em caso de falha de um único componente.

2.3.3.6.1 Configure o sistema de ar condicionado para fazer soar um alarme em local com presença constante de pessoal ou onde haja pessoal de operações específico se alguma parte do sistema falhar.

### **2.3.4 Salas isoladas para sistemas LIB-ESS**

2.3.4.1 Para racks múltiplos instalados em fileira única ou dupla, instale barreiras corta-fogo sólidas incombustíveis entre racks adjacentes.

2.3.4.2 A sala, os pisos, as paredes e o teto devem ter resistência nominal de no mínimo duas horas ao fogo, de acordo com a Norma Técnica 1-21.

A. Providencie portas corta-fogo certificadas pela FM Approvals com a mesma classificação nominal da sala.

B. Providencie barreiras corta-fogo certificada pela FM Approvals para todas as passagens no piso, no teto e nas paredes.

2.3.4.3 Instale o sistema LIB-ESS com uma separação mínima, de acordo com a Seção 2.3.5.

2.3.4.4 Providencie uma taxa de circulação de ar na sala isolada do sistema LIB-ESS de pelo menos 0,3 m<sup>3</sup>/min/m<sup>2</sup> (1 cfm/ft<sup>2</sup>) da área do piso. (Consulte a Seção 2.5.5.)

2.3.4.5 Providencie construção limitadora de danos.

2.3.4.5.1 Projete a construção limitadora de danos de acordo com a Norma Técnica 1-44, *Damage-Limiting Construction*, utilizando propano como o gás representativo.

### 2.3.5 Distâncias de separação para racks internos de sistemas LIB-ESS

2.3.5.1 Providencie uma separação de no mínimo 1,8 m (6 ft) entre a face acessível de um rack de sistema LIB-ESS e materiais incombustíveis, elementos de construção incombustíveis e as faces acessíveis de racks de sistemas LIB-ESS adjacentes.

A face acessível é o lado que tem uma porta ou um respiro ou que pode ser aberta e permitir o escape do fogo do rack de origem.

2.3.5.2 Providencie uma separação de no mínimo 2,7 m (9 ft) entre as faces acessíveis de racks de sistemas LIB-ESS e materiais combustíveis e elementos de construção combustíveis.

2.3.5.3 A separação entre lados não acessíveis de racks adjacentes deve ser determinada por um teste de incêndio no nível da instalação que demonstre que uma fuga térmica não pode se propagar entre os racks. Quando não houver um relatório de teste disponível ou se o teste não tiver resultado em um incêndio no rack de origem, considere que uma fuga térmica se propagará entre os racks. Consulte a Seção 2.4 para ver a duração esperada do incêndio.

## 2.4 Proteção

Esta seção não se aplica a sistemas LIB-ESS externos em contêineres. Ela se aplica a edificações ou compartimentos exclusivos para sistemas LIB-ESS com mais de 46,5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>) e a sistemas LIB-ESS em salas isoladas e racks internos.

2.4.1 Providencie proteção por sprinklers automáticos projetada para 12 mm/min (0,3 gpm/ft<sup>2</sup>) sobre a área da sala, com uma demanda de hidrantes adicional de 946 L/min (250 gal/min).

Testes realizados em um sistema LIB-ESS de 125 kWh utilizando baterias de óxido de lítio-níquel/óxido de lítio-manganês (LNO/LMO) demonstraram que o crescimento do incêndio eventualmente excedeu a área de projeto de 2500 ft<sup>2</sup>. Portanto, o projeto de sprinklers deve ser elaborado para a área da sala. O vídeo do teste de sprinklers pode ser encontrado no canal da FM no YouTube: <https://www.youtube.com/fmglobal>.

2.4.2 Assegure que o suprimento de água seja capaz de atender aos requisitos de demanda de água dos sprinklers e hidrantes pela duração do incêndio (consulte a Seção 3.2). A duração prevista depende do número de racks em uma única área de incêndio. A área de incêndio é composta por uma ou mais fileiras de racks cuja separação mínima não esteja de acordo com a Seção 2.3.5. A duração deve ser estimada como 45 minutos vezes o número de racks de sistemas LIB-ESS adjacentes.

O projeto da sala deve considerar drenagem ou outro tipo de mitigação da descarga de água. Consulte a Norma Técnica 1-24, *Protection Against Liquid Damage*, para mais informações.

2.4.2.1 Quando a demanda de sprinklers exigir uma duração do suprimento de água maior do que a disponível, providencie o seguinte:

A. Instale divisórias incombustíveis do piso ao teto com passagens protegidas por vedações corta-fogo certificadas pela FM Approvals entre racks adjacentes perpendiculares à porta ou abertura do rack para evitar a propagação do fogo. Assegure que as divisórias se estendam pelo menos 0,3 m (12 in) além da face do rack. Consulte a Figura 2.4.2.1. Determine a distância horizontal entre barreiras térmicas com base na quantidade de racks que podem ser protegidos pelo suprimento de água disponível.

B. Instale uma divisória metálica sólida na parte posterior (não do corredor) de cada rack para evitar a transferência de calor para os racks adjacentes da fileira seguinte. Quando o projeto do rack incorporar uma parte posterior metálica sólida (sem aberturas de ventilação), não serão necessárias divisórias adicionais. (Consulte a Figura 2.4.2.1.)

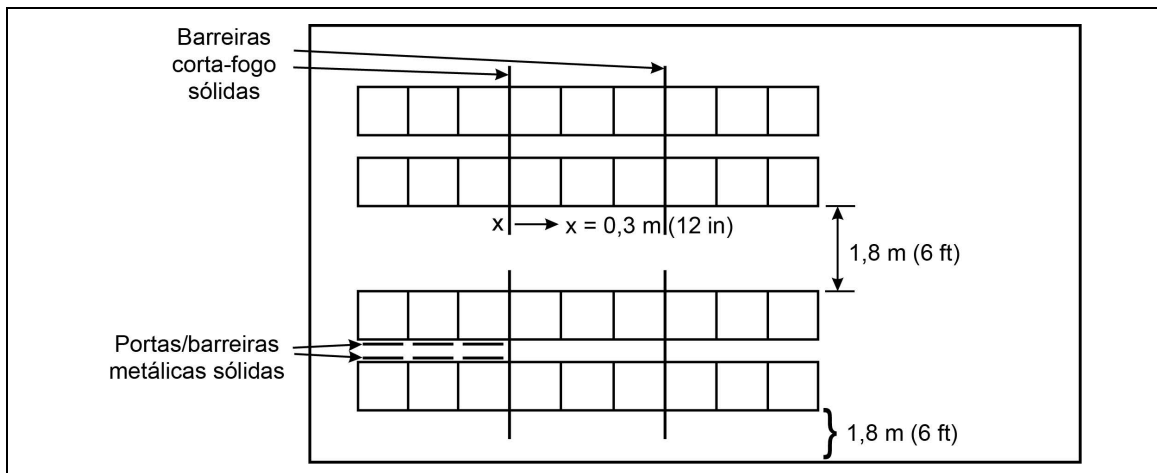


Fig. 2.4.2.1. Barreiras térmicas para reduzir a área com risco de incêndio

2.4.3 Providencie um sistema de detecção de fumaça dentro do compartimento, da sala isolada ou da área do sistema LIB-ESS que seja projetado e instalado de acordo com a Norma Técnica 5-48, *Automatic Fire Detection*.

## 2.5 Equipamentos e processos

### 2.5.1 Proteção do sistema elétrico

2.5.1.1 Faça um estudo de curto-circuito e coordenação da proteção do sistema para assegurar a adequação da classificação nominal dos disjuntores existentes e dos ajustes de seus relés quando o sistema de armazenagem de energia elétrica adicionar potência ao sistema elétrico existente em uma instalação. Para informações adicionais sobre estudos de curto-circuito e coordenação da proteção, consulte a Norma Técnica 5-20, *Electrical Testing*.

### 2.5.2 Proteção de equipamentos

2.5.2.1 Providencie uma chave seccionadora para cada rack, para uso durante manutenção ou em caso de eventos anormais.

2.5.2.2 Providencie um método manual, remoto e local de seccionamento para o sistema LIB-ESS. Uma chave seccionadora remota deve ficar em uma área acessível que seja monitorada 24 horas por dia, 7 dias por semana. Uma chave seccionadora local deve ser instalada adjacente ao espaço do sistema LIB-ESS.

2.5.2.3 Providencie monitoramento de temperatura com alarme de temperatura alta para a sala, a edificação ou o compartimento do sistema LIB-ESS. Direcione os alarmes para um local com presença constante de pessoal ou onde haja pessoal de operações específico.

### 2.5.2.4 Rack de sistema LIB-ESS

2.5.2.4.1 Providencie proteção contra falta à terra de corrente contínua (CC) para sistemas de baterias aterrados. Para sistemas não aterrados, providencie monitoramento de falta à terra de CC com função de alarme. Direcione o alarme para um local com presença constante de pessoal ou onde haja pessoal de operações específico.

2.5.2.4.2 Providencie proteção contra sobrecorrente para sobrecarga e curto-circuitos.

2.5.2.4.3 Providencie proteção contra sobretensão e subtensão para sobrecarga e sobredescarga.

### 2.5.3 Funções de segurança do sistema de gerenciamento da bateria

2.5.3.1 Providencie as seguintes funções de segurança para sistemas de gerenciamento de baterias:

A. Desligamento por alta temperatura da célula (nível de célula): Essa função isola o módulo ou o rack de baterias ao detectar células com temperaturas acima dos limites. Um projeto comum é conectar os módulos em série por fiação em um rack. Portanto, a menor unidade que pode ser isolada é, geralmente, o rack. Quando o projeto permitir, o isolamento de um módulo é aceitável.

B. Desligamento por fuga térmica (nível de célula): Essa função desliga todo o sistema quando é detectada uma condição de fuga térmica em uma célula. Em cenários que envolvam fuga térmica, essa função é a primeira a ser ativada quando essa condição é detectada.

C. Falha de desligamento da chave do rack (nível de rack): Essa função identifica qualquer falha de desligamento da chave do conjunto quando um comando de desligamento é iniciado. A chave do rack também é conhecida como “chave do conjunto”. Trata-se de uma chave que desconecta um único rack em resposta a uma condição anormal. A chave do rack é mostrada separadamente do nível “mestre” da Figura 2.5.3.1 para maior clareza. Geralmente, ela é incorporada ao sistema de gerenciamento da bateria.

D. Falha de desligamento do inversor/carregador (nível supervisorio): Essa função inicia um comando de desligamento para um disjuntor a montante a fim de isolar o sistema LIB-ESS se o inversor/carregador não responder a um comando de desligamento. O sistema de controle “supervisorio” controla todo o sistema, inclusive a combinação de racks, os sistemas de suporte ambiental e o status de carga e descarga. O nível supervisorio deve isolar o sistema LIB-ESS se o inversor/carregador não desligar mediante um sinal apropriado ou se a comunicação entre o inversor/carregador e o controle supervisorio for interrompida.

Consulte a Figura 2.5.3.1 para uma explicação dos níveis de gerenciamento.

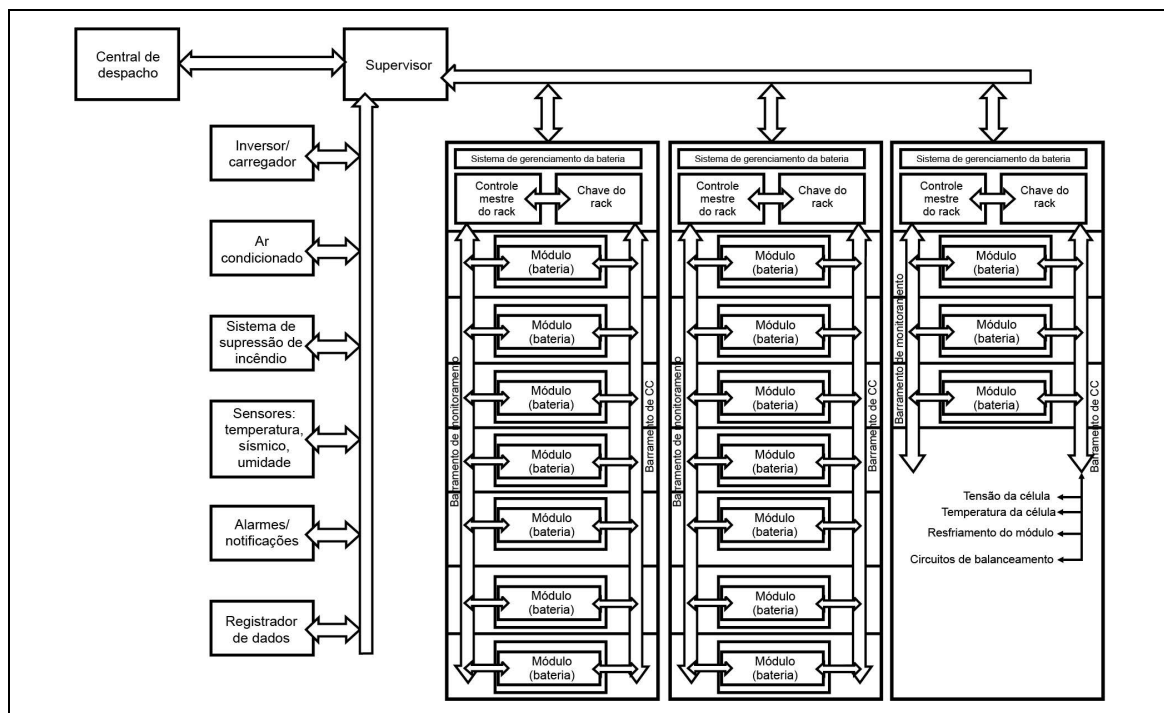


Fig. 2.5.3.1. Níveis de gerenciamento do sistema LIB-ESS

### 2.5.3.2 Monitoramento on-line de condições

2.5.3.2.1 Providencie sistemas de monitoramento on-line de condições que monitorem a temperatura da sala de baterias e os parâmetros a seguir, no mínimo, no nível de módulo e/ou célula das baterias:

- Tensão e corrente de carga e descarga.
- Temperatura.
- Resistência ôhmica interna.
- Capacidade.

- Estado de carga.
- Estado de integridade.
- Registro de alarmes ou falhas.

2.5.3.2 Providencie sistemas de monitoramento on-line de condições com os seguintes recursos:

- A. Capacidade de transmitir dados para um local com presença constante de pessoal ou onde haja pessoal de operações específico.
- B. Capacidade de gerar alarmes em caso de detecção de condições anormais.
- C. Capacidade de analisar os parâmetros monitorados e gerar um resumo das condições da bateria.
- D. Segurança para evitar mudanças não autorizadas de limites de parâmetros críticos, como tensão, temperatura e corrente, que são essenciais para manter a operação confiável de baterias de íons de lítio.
- E. Capacidade de autodiagnóstico.

### **2.5.3.3 Prevenção de fuga térmica com intervenção rápida**

2.5.3.3.1 Incorpore um sistema de intervenção rápida para fazer o isolamento elétrico automático do sistema LIB-ESS usando uma das seguintes abordagens:

1. Temperatura alta da célula: O fabricante da célula deve indicar a temperatura limite que indica uma condição de abuso com base no estado de carga de 100%. A maioria das células dentro de um módulo deve ser monitorada constantemente.
2. Detecção de liberação de gases: Providencie detectores de gás **certificados pela FM Approvals** e capazes de identificar os compostos orgânicos voláteis associados ao evento de liberação de gases que precede a fuga térmica.

### **2.5.4 Equipamentos de conversão potência**

2.5.4.1 Providencie proteção contra sobrecorrente para sobrecarga e curto-circuitos no lado de corrente alternada (CA).

2.5.4.2 Providencie protetores de surto no lado de CA para proteção contra tensão transitória de “picos de tensão”. Para informações adicionais sobre proteção contra sobretensão transitória, consulte a Norma Técnica 5-11.

2.5.4.3 Providencie proteção elétrica para transformadores de acordo com a Norma Técnica 5-4, *Transformers*, ou com a Norma Técnica 5-20, *Electrical Testing*, conforme aplicável.

### **2.5.5 Circulação de ar/ventilação mecânica**

2.5.5.1 Posicione o sistema de circulação/ventilação para fazer a sucção no teto ou perto dele.

2.5.5.2 Instale um detector de hidrogênio certificado pela FM Approvals que faça soar um alarme se o nível de hidrogênio exceder 10% do limite inferior de explosividade (LEL), isole eletricamente o sistema LIB-ESS e inicie a exaustão de emergência, de acordo com a Seção 2.5.5.3.

2.5.5.3 Instale um sistema de exaustão de emergência que aumente a taxa de exaustão para  $0,75 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$  ( $2,5 \text{ cfm}/\text{ft}^2$ ) da área do piso em caso de detecção de hidrogênio a 10% do limite inferior de explosividade (LEL) e que faça a exaustão de todo o ar diretamente para a área externa.

2.5.5.3.1 Direcione o sistema de exaustão de emergência através de um sistema de sopradores, ventiladores e dutos que terminem em uma área externa, distante de entradas de ar, portas de acesso e outras aberturas.

2.5.5.3.2 Construa a rede de dutos com materiais incombustíveis.

2.5.5.3.3 Providencie entradas de ar de reposição nas paredes externas, em local distante de saídas de exaustão, para evitar o transporte de gases de exaustão.

2.5.5.4 Configure os controles do sistema de circulação/ventilação para fazerem soar um alarme em local com presença constante de pessoal ou onde haja pessoal de operações específico.

## 2.6 Operação e manutenção

### 2.6.1 Operação

2.6.1.1 Instale, opere e faça manutenção de baterias e sistemas de gerenciamento de baterias de acordo com as recomendações do fabricante.

2.6.1.2 Como parte do comissionamento, verifique a operação adequada de todos os dispositivos de monitoramento e proteção.

A. Inspeccione minuciosamente o sistema de baterias para verificar se há indícios de sobreaquecimento, vibração anormal, ruído anormal ou mau funcionamento. Isso deve ser feito todos os dias, durante pelo menos uma semana de operação normal.

B. Faça inspeções termográficas e verifique os parâmetros de operação e monitoramento das baterias para determinar se houve algum dano durante o transporte e a instalação.

### 2.6.2 Manutenção de equipamentos

#### 2.6.2.1 Geral

2.6.2.1.1 Faça inspeção, testes e manutenção do sistema elétrico dos sistemas LIB-ESS de acordo com a Norma Técnica 5-20, *Electrical Testing. Estabeleça e implemente um programa de inspeção, testes e manutenção de sistemas LIB-ESS*. Consulte a Norma Técnica 9-0, *Integridade de Ativos*, para orientações sobre a elaboração de um programa de integridade de ativos.

#### 2.6.2.2 Sistema de gerenciamento da bateria

2.6.2.2.1 O programa de inspeção, testes e manutenção para o sistema de gerenciamento da bateria deve incluir pelo menos o seguinte:

A. Autoteste periódico do sistema para assegurar que todos os sistemas críticos estejam disponíveis e operacionais.

B. Manutenção periódica da chave do conjunto. Isso pode envolver ligar e desligar a chave para assegurar sua integridade mecânica e o aperto das conexões de cabos, aplicando o torque de acordo com as especificações.

C. Manutenção do sistema de ar condicionado. Isso pode incluir a troca dos filtros de ar em intervalos periódicos. Esses intervalos podem variar de acordo com a localização da unidade. Locais com excesso de pó podem exigir trocas mais frequentes de filtros de ar. Outros itens de manutenção de sistemas de ar condicionado podem incluir verificação do líquido de arrefecimento, do compressor/núcleo de aquecimento e dos dutos e cabos.

D. Verificação periódica de módulos de baterias sobressalentes para assegurar que sejam mantidos carregados.

E. Monitoramento periódico de valores de estado de integridade, ou seja, a porcentagem de capacidade restante (com base na capacidade de projeto) nos conjuntos de baterias.

2.6.2.3 Estabeleça um programa de substituição de baterias envelhecidas. Revise regularmente o programa de substituição de baterias e inclua, pelo menos, os seguintes componentes:

A. A expectativa de vida de projeto do fabricante das baterias do sistema LIB-ESS. Esse será um número, em anos, durante o qual é esperado que o sistema funcione adequadamente. Após esse ponto, as baterias devem ser substituídas. Isso estabelece o cronograma de substituição.

B. Monitoramento periódico do estado de integridade do sistema LIB-ESS, ou seja, a porcentagem de capacidade restante com base na capacidade de projeto. Essas informações devem estar disponíveis no sistema de gerenciamento da bateria, que monitora continuamente o estado de integridade. O mau funcionamento ou falhas inesperadas de componentes e a operação fora dos parâmetros de projeto podem acelerar o envelhecimento das baterias em comparação com a operação dentro dos limites de projeto. O sistema de gerenciamento da bateria pode monitorar esses problemas inesperados e ajustar o estado de integridade do sistema.

C. Revisão periódica do programa de substituição, assegurando que haja um método para ajustar o cronograma de substituição. O plano deve permitir o ajuste do cronograma de substituição se o feedback do sistema de gerenciamento da bateria mostrar que o estado de integridade indica envelhecimento acelerado. Os seguintes fatores justificam uma substituição antecipada:

1. Mudanças significativas ou tendências nos dados de monitoramento de condições que indiquem problemas em evolução no sistema de baterias.
2. Recomendações do fabricante sobre problemas de projeto que exigem substituição.
3. Experiência operacional e histórico de falhas que indiquem que a bateria deve ser substituída.
4. Exposição a condições operacionais severas.

D. Um método de gerenciamento de mudanças. Ele deve considerar grandes mudanças que afetem a expectativa de vida útil e o cronograma de substituição do sistema LIB-ESS. As mudanças podem incluir substituição do sistema de gerenciamento da bateria, modificação do sistema de gerenciamento térmico e mudanças em modos de aplicação ou operação (por exemplo, modificação do sistema de gerenciamento da bateria para operar com base em um modo de arbitragem em vez de na capacidade de suprimento de energia elétrica).

## **2.7 Treinamento**

2.7.1 Tenha pessoal de operação treinado pelo fornecedor ou fabricante dos equipamentos do sistema LIB-ESS.

2.7.2 Forneça outros treinamentos de acordo com a Norma Técnica 10-8, *Operators*.

## **2.8 Fatores humanos**

### **2.8.1 Organização e limpeza geral**

2.8.1.1 Não armazene materiais combustíveis em compartimentos, edificações ou salas isoladas de sistemas LIB-ESS.

### **2.8.2 Plano de preparação para incidentes e de resposta a emergências**

2.8.2.1 Elabore um plano de resposta a emergências para abordar os riscos de incêndio associados a sistemas de armazenagem de energia elétrica. Consulte a Norma Técnica 10-1, *Plano de Preparação para Incidentes e de Resposta a Emergências*, para orientações gerais sobre como estabelecer e manter um plano de resposta a emergências.

2.8.2.2 Elabore um plano de preparação para incidentes em colaboração com o corpo de bombeiros de acordo com a Norma Técnica 10-1, *Plano de Preparação para Incidentes e de Resposta a Emergências*. Organize e prepare o plano com procedimentos documentados para agilizar a entrada segura e a resposta a emergências relacionadas a incêndios na área do sistema LIB-ESS, incluindo o seguinte:

- Chave seccionadora manual.
- Rotas de acesso.
- Métodos manuais de proteção contra incêndio.
- Exaustão manual de fumaça (se instalada).
- Ficha de dados de segurança para células de baterias.

2.8.2.3 Elabore um plano de recuperação pós-incidente que aborde o potencial de reignição do sistema LIB-ESS, bem como a remoção e o descarte de equipamentos danificados.

2.8.2.3.1 Deve ser feita vigilância contra incêndio até que todos os equipamentos do sistema LIB-ESS potencialmente danificados que contenham baterias de íons de lítio sejam removidos da área após um evento de incêndio. O suprimento de água deve ser reabastecido o mais rápido possível.

Sabe-se que os incêndios envolvendo baterias de íons de lítio podem ter reignição. As baterias de íons de lítio envolvidas em incêndios ou expostas a eles devem ser resfriadas adequadamente para evitar reignição.

2.8.2.3.2 Identifique os equipamentos necessários para remover e substituir com segurança os equipamentos danificados e a infraestrutura de suporte para facilitar a remoção imediata. O plano deve incluir prestadores de serviços ou fornecedores de equipamentos necessários para a infraestrutura de recuperação. O fabricante ou integrador deve fornecer orientações para descomissionamento, remoção de equipamentos danificados e descarte apropriado de acordo com os regulamentos locais.

## 2.9 Utilidades

2.9.1 Em ambientes extremos, providencie um suprimento de energia elétrica de emergência para os sistemas de ar condicionado. Um ambiente extremo é aquele que pode permitir que as temperaturas no nível das células aumentem ou diminuam para além da faixa máxima de temperatura operacional de -20°C (-4,0°F) a 50°C (120°F), apesar do controle do sistema de gerenciamento da bateria.

2.9.2 Assegure que compartimentos de sistemas LIB-ESS com componentes em comum com o sistema de ar condicionado, como uma unidade de condensação (torre de resfriamento), sejam projetados para desligar o sistema LIB-ESS em caso de falha de componentes.

## 3.0 AJUDA PARA RECOMENDAÇÕES

### 3.1 Construção e localização

#### 3.1.1 Separação espacial entre compartimentos externos

Por ser construído em aço ou outro tipo de metal, o compartimento conduz calor e o irradia para fora. Um incêndio incontrolável dentro de um dos compartimentos pode causar uma quantidade substancial de radiação e condução através das laterais metálicas do compartimento e provocar uma fuga térmica em compartimentos adjacentes, caso eles não estejam separados pela distância recomendada. Há opções alternativas à separação espacial que minimizam o potencial de propagação de incêndio até a chegada do corpo de bombeiros.

#### 3.2 Proteção contra incêndio e distâncias de separação mínimas para instalações internas

Eventos de fuga térmica criam uma grande quantidade de calor. O calor, somado aos componentes de construção feitos de plástico, pode levar a um incêndio de grandes proporções. Embora a proteção contra incêndio possa não ser prática em instalações externas, ela é o melhor método de resfriamento para incêndios envolvendo um sistema LIB-ESS.

Foram feitas pesquisas limitadas em sistemas LIB-ESS para avaliar as características de propagação de incêndios e os esquemas de proteção. O relatório *Development of Sprinkler Protection Guidance for Lithium Ion Based Energy Storage Systems*, publicado em junho de 2019 no site da FM, é a base para recomendações sobre proteção contra incêndio e distâncias de separação de materiais incombustíveis e combustíveis. No entanto, é preciso reconhecer que o escopo das pesquisas foi limitado e que o efeito do projeto dos racks, dos materiais de construção, das especificações e da composição química das baterias e de outras características de projeto não é bem compreendido. Devido a essas questões, não parece ser possível extrapolar os resultados obtidos com os sistemas de fosfato de ferro-lítio (LFP) e óxido de lítio-níquel/óxido de lítio-manganês (LNO/LMO) testados para outros sistemas LIB-ESS. As recomendações da Norma Técnica 5-33 representam o estado atual do conhecimento. A norma técnica será atualizada quando houver informações adicionais disponíveis.

Além disso, a National Fire Protection Association (NFPA) publicou recentemente a primeira norma de proteção contra incêndio para sistemas LIB-ESS, a NFPA 855, *Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems*.

Link para o relatório *Development of Sprinkler Protection Guidance for Lithium Ion Based Energy Storage Systems*: <https://www.fm.com/resources/more-resources/research-technical-reports>

O relatório documenta operações de sprinklers durante testes de incêndio em grande escala. A dimensão do incêndio e o pico de taxa de liberação de calor variaram entre as químicas testadas. O pior cenário foi o da química LNO/LMO, que resultou no acionamento de todos os sprinklers na área de teste. As medidas de temperatura de gases no teto na área ao redor indicaram que mais sprinklers teriam sido acionados fora da área de projeto típica de 230 m<sup>2</sup> (2500 ft<sup>2</sup>). Portanto, a norma técnica reflete uma abordagem conservadora, que considera que todos os sprinklers na sala do sistema LIB-ESS serão abertos.

### **3.3 Sistemas de proteção por agente gasoso**

Geralmente, os sistemas de proteção por agente gasoso não são recomendados para aplicações em sistemas LIB-ESS pelos seguintes motivos:

A. Eficácia em relação ao risco. Até 2019, não havia evidências de que a proteção por agente gasoso fosse eficaz para extinguir ou controlar incêndios envolvendo sistemas de armazenagem de energia elétrica. Os sistemas de proteção por agente gasoso podem inertizar ou interromper a reação química do incêndio, mas apenas durante o tempo de retenção. O tempo de retenção é, geralmente, de dez minutos, o que não é suficiente para extinguir completamente um incêndio em um sistema LIB-ESS ou para impedir que a fuga térmica se propague para módulos ou racks adjacentes.

B. Resfriamento. A pesquisa da FM demonstra que o resfriamento do ambiente é um fator crítico para a proteção da estrutura ou da ocupação ao redor porque, no momento, não há como extinguir um incêndio em um sistema LIB-ESS utilizando sprinklers. Os sistemas de proteção por agente gasoso não proporcionam o resfriamento do sistema LIB-ESS nem da ocupação ao redor.

C. Descarga limitada. A pesquisa da FM demonstra que incêndios em sistemas LIB-ESS podem ter reignição horas depois de o evento inicial ter sido considerado extinto. Como os sistemas de proteção por agente gasoso só podem ser descarregados uma vez, a reignição subsequente ocorreria em uma ocupação desprotegida.

### **3.4 Elétrica**

#### **3.4.1 Envelhecimento de baterias e sistemas LIB-ESS**

O envelhecimento de baterias de íons de lítio depende de vários fatores, como número de ciclos de carga/descarga, nível de descarga, taxa de carga/descarga, estado de carga, tempo de uso e temperatura operacional. A capacidade de uma bateria de íons de lítio se degradará aproximadamente em 50% a 80%, dependendo do projeto e da margem de dimensionamento, quando a bateria estiver próxima do fim da vida útil. Além disso, o valor de resistência interna de uma bateria envelhecida aumenta substancialmente, de duas a três vezes o valor inicial, a uma taxa fixa de ampères-hora no nível da célula, resultando em maior probabilidade de fuga térmica.

A prática da indústria é que o sistema de gerenciamento da bateria meça o estado de integridade por projeto para monitorar a condição das baterias devido ao envelhecimento. O estado de integridade se baseia na capacidade real em relação à capacidade nominal inicial da bateria como ponto mínimo. Ele também pode levar em consideração a resistência interna, a produção total de energia, o número de ciclos etc. O sistema de gerenciamento da bateria gera um indicador (alarme) para a substituição com base nas informações sobre o estado de integridade. Na ausência de critérios de substituição estabelecidos, consulte o fabricante para obter orientações.

#### **3.4.2 Dispositivos de intervenção rápida**

A intervenção rápida é uma estratégia para impedir que as células entrem em fuga térmica com o uso de dispositivos de detecção rápida e seu intertravamento com o sistema de gerenciamento da bateria para isolar eletricamente o sistema LIB-ESS caso seja detectada uma condição insegura. Atualmente, há duas tecnologias comuns de detecção rápida disponíveis: monitoramento de temperatura da célula e detecção de liberação de gases. A intervenção rápida só é bem-sucedida quando a fuga térmica é causada por abuso elétrico. A fuga térmica também pode ser causada por abuso térmico, como quando a temperatura de um compartimento excede a faixa de temperatura operacional das células, ou por danos físicos devido a manuseio incorreto ou defeito de fabricação. O isolamento elétrico não impedirá a fuga térmica se a falha da célula for causada por abuso térmico ou danos físicos.

##### **3.4.2.1 Monitoramento de temperatura das células**

Todas as células de baterias de íons de lítio têm uma temperatura na qual a fuga térmica é inevitável. Alguns fabricantes incluem, dentro dos módulos, vários sensores capazes de monitorar a temperatura externa de várias células. O sistema de gerenciamento da bateria é programado para isolar automaticamente o sistema LIB-ESS ou o rack se a temperatura de uma ou mais células exceder um ponto de ajuste significativamente inferior ao limite para fuga térmica. Se essa estratégia for utilizada, o monitoramento da maioria das células de um módulo para assegurar a detecção imediata é crítico. Se um módulo for provido de apenas alguns

sensores, uma célula pode entrar em fuga térmica sem que isso seja detectado e criar uma condição de abuso térmico para as células adjacentes antes que o sistema de gerenciamento da bateria possa reagir.

#### 3.4.2.2 Detecção de liberação de gases

Os equipamentos de detecção de liberação de gases detectam compostos orgânicos voláteis associados à degradação do eletrólito durante o estágio inicial da falha da célula. Antes que uma célula entre em fuga térmica, os compostos orgânicos voláteis produzidos pela degradação da célula são liberados em quantidades mínimas. Isso ocorre a uma temperatura muito mais baixa do que o limite para fuga térmica. Equipamentos dessa categoria podem ser instalados em um rack individual ou em uma sala ou um compartimento/contêiner de sistema LIB-ESS. Geralmente, um ou mais detectores de gás calibrados para compostos orgânicos voláteis resultantes de liberação de gases são instalados no sistema LIB-ESS ou perto dele, com pelo menos um detector de referência localizado em uma área aberta. O painel de controle do equipamento de detecção rápida compara os níveis ambientais da célula de referência com os níveis detectados no sistema LIB-ESS para evitar desligamentos indevidos.

## 4.0 REFERÊNCIAS

### 4.1 FM

Norma Técnica 1-20, *Protection Against Exterior Fire Exposure*

Norma Técnica 1-21, *Fire Resistance of Building Assemblies*

Norma Técnica 4-5, *Portable Extinguishers*

Norma Técnica 5-4, *Transformers*

Norma Técnica 5-19, *Switchgear and Circuit Breakers*

Norma Técnica 5-20, *Electrical Testing*

Norma Técnica 5-23, *Design and Protection for Emergency and Standby Power Systems*

Norma Técnica 5-32, *Data Centers and Related Facilities*

Norma Técnica 5-48, *Automatic Fire Detection*

Norma Técnica 9-0, *Integridade de Ativos*

Norma Técnica 10-1, *Plano de Preparação para Incidentes e de Resposta a Emergências*

Norma Técnica 10-8, *Operators*

### 4.2 Outras

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *Guide for the Ventilation and Thermal Management of Batteries for Stationary Applications*. IEEE 1635-2012.

## ANEXO A – GLOSSÁRIO DE TERMOS

**Acompanhamento/rampeamento de carga para energia renovável:** O acompanhamento de carga é caracterizado por uma potência de saída que, normalmente, muda com uma frequência de alguns minutos. A saída difere em resposta à mudança no equilíbrio entre o fornecimento e a carga de energia elétrica em uma região ou área específica. O sistema LIB-ESS é utilizado para suprir (descarregar) ou absorver (carregar) potência para compensar as variações de carga ou de geração de energia renovável.

**Alívio de congestão:** A congestão ocorre quando a energia elétrica de custo mais baixo disponível não pode ser fornecida a todas ou a algumas cargas porque as instalações de transmissão/distribuição não são adequadas para fornecer essa energia. A armazenagem de energia elétrica pode ser utilizada para evitar custos e encargos relacionados à congestão, principalmente se os custos se tornarem altos devido à congestão significativa do sistema de transmissão. O sistema de armazenagem de energia elétrica (EES) pode ser carregado quando não há congestão e descarregado quando há.

**Arbitragem:** Consulte “Deslocamento temporal de energia elétrica”.

**Capacidade de suprimento de energia elétrica:** Dependendo das circunstâncias de um determinado sistema de suprimento de energia elétrica, a armazenagem de energia pode ser utilizada para adiar e/ou reduzir a necessidade de adquirir mais capacidade de geração em usinas centralizadas e/ou de contratar capacidade no mercado atacadista de energia elétrica. Nessa aplicação, o sistema de EES supre parte do pico de capacidade quando a demanda é alta, aliviando o gerador ao limitar o pico de capacidade necessário.

**Capacidade:** Energia elétrica específica em ampères-hora (Ah). “Ah” é a corrente de descarga que uma bateria pode fornecer ao longo do tempo e é uma medida da carga armazenada na bateria. Também pode ser medida em quilowatts-hora (kWh) ou megawatts-hora (MWh).

**Célula:** O menor componente eletroquímico capaz de armazenar energia elétrica.

**Compartimento de sistema LIB-ESS:** Um compartimento de sistema LIB-ESS é uma estrutura fechada de sistema LIB-ESS com menos de 46,5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>), geralmente um contêiner de transporte ISO ou uma estrutura pré-fabricada de tamanho similar que pode ou não ser ocupável. Os sistemas de compartimentos LIB-ESS geralmente são fornecidos em um skid, com todo o equipamento do sistema LIB-ESS instalado pelo fabricante.

**Confiabilidade energética:** A aplicação de armazenagem de energia em vários regimes de operação para melhorar a confiabilidade geral dos sistemas de energia elétrica. Por exemplo, o sistema LIB-ESS pode equilibrar pequenas seções da rede elétrica para alcançar uma boa proporção entre geração e carga. Os dispositivos de armazenagem podem fornecer a regulagem de frequência para manter o equilíbrio entre a carga da rede e a energia elétrica gerada. O resultado final é um suprimento de energia elétrica mais confiável para instalações industriais.

**Contêiner de sistema LIB-ESS:** Um contêiner de sistema LIB-ESS é uma estrutura fechada de sistema LIB-ESS com menos de 46,5 m<sup>2</sup> (500 ft<sup>2</sup>) que é acessada a partir de portinholas ou portas na parte externa e não é ocupável.

**Deslocamento temporal de energia elétrica de varejo:** Consulte “Deslocamento temporal de energia elétrica”.

**Deslocamento temporal de energia elétrica:** O deslocamento temporal de energia elétrica envolve a compra de energia elétrica de menor custo, disponível em períodos nos quais os preços ou os custos marginais do sistema são baixos, para carregar o sistema de armazenagem, de modo que a energia possa ser utilizada ou vendida posteriormente, quando os preços ou custos estiverem altos. Se a diferença nos preços da energia elétrica for o principal fator e a energia for armazenada para compensar (por exemplo) os padrões diurnos de consumo de energia, essa aplicação é comumente chamada de “arbitragem”.

**Estado de carga:** A quantidade de energia elétrica em tempo real armazenada em um sistema, em comparação com a capacidade nominal. Uma função da tensão. O estado de carga pode ser expresso como um valor percentual. Isso significaria que uma bateria totalmente carregada teria 100% de estado de carga, e uma bateria totalmente descarregada teria 0% de estado de carga.

**Estado de integridade:** Um valor quantitativo (expresso em porcentagem) que descreve a condição atual da bateria, em comparação à sua condição quando nova. O estado de integridade é avaliado pelo sistema de gerenciamento da bateria, que monitora variáveis operacionais como tensão, corrente, temperatura e resistência interna. Como o desempenho de uma bateria se degrada com o tempo, o valor do estado de integridade começa em 100% para uma bateria nova e diminui com o tempo. Essa indicação é crítica para avaliação e monitoramento.

**Gerenciamento de cobrança por demanda:** As cobranças por demanda se baseiam na média mais alta de consumo registrada pelo medidor em um intervalo de 15 minutos dentro de um determinado mês. Se uma instalação tiver a tendência de consumir muita energia em curtos períodos, as cobranças por demanda constituirão uma parte maior da conta de serviços públicos. O gerenciamento de cobrança por demanda (semelhante ao deslocamento temporal de energia elétrica) envolve a implementação de armazenagem de energia elétrica para reduzir o pico de demanda e os custos.

**LFP:** Química da bateria de fosfato de ferro-lítio.

**Módulo:** Uma combinação de células conectadas em série e em paralelo. Os módulos também podem ser fornecidos com uma versão menor do sistema de gerenciamento da bateria para controlar as células e fazer a comunicação com esse sistema.

**NMC:** Química da bateria de óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto.

**Partida no escuro:** Os sistemas de armazenagem fornecem uma reserva ativa de energia e potência dentro da rede elétrica e podem ser utilizados para energizar linhas de transmissão e distribuição e fornecer energia auxiliar para recolocar usinas em operação após uma falha catastrófica da rede. O sistema LIB-ESS pode ser utilizado para energizar linhas de transmissão e distribuição, fornecer energia de partida para um ou mais geradores a diesel e/ou usinas (maiores) e fornecer uma frequência de referência.

**Postergação de investimento:** A postergação de investimento envolve adiar e, em alguns casos, evitar totalmente os investimentos em melhorias do sistema de utilidades fazendo uso de armazenagem em quantidades relativamente baixas. Considere um sistema de transmissão com pico de carga elétrica que esteja se aproximando de sua capacidade de suporte de carga (classificação nominal de projeto). Em alguns casos, a instalação de uma pequena quantidade de armazenagem de energia elétrica a jusante do nó de transmissão quase sobrecarregado pode adiar a necessidade de melhorias por alguns anos.

**Qualidade da energia:** A qualidade da energia é uma medida do nível de perturbações de tensão e/ou frequência. As flutuações de demanda em um curto espaço de tempo (de alguns minutos a frações de segundo) podem causar problemas de qualidade da energia na rede elétrica. Os sistemas LIB-ESS podem responder a essas flutuações de curto espaço de tempo para atenuar o efeito das perturbações e fornecer uma energia de qualidade mais alta.

**Rack:** Um rack (às vezes chamado de “conjunto” ou “string”) consiste em vários módulos normalmente conectados em série para desenvolver uma alta tensão de CC, que alimenta o inversor/carregador. O rack também é composto por componentes de comutação (disjuntor, isolador e contator) para seu isolamento durante uma contingência.

**Regulagem de tensão:** A operação estável da rede elétrica exige que os operadores mantenham a tensão dentro de limites especificados. Isso requer o controle da potência reativa na rede. Observe que nenhuma (ou pouca) potência real é necessária em um sistema de EES em operação em uma aplicação de regulagem de tensão/VAr. Portanto, os ciclos por ano não são apropriados para essa aplicação, e o tamanho do sistema de armazenagem é indicado em potência reativa (MVar) em vez de MW.

**Reservas suplementares:** A operação de uma rede elétrica requer capacidade de reserva que possa ser acionada quando parte dos recursos normais de suprimento de energia elétrica ficar indisponível inesperadamente. As reservas de energia elétrica armazenada são geralmente unidades de energia elétrica de reserva carregadas que devem estar disponíveis para descarga quando necessário, a fim de garantir a estabilidade da rede elétrica. Outras reservas normalmente se enquadram nas categorias de reserva girante e não girante:

**Reserva girante:** A quantidade de capacidade adicional que está em operação no momento. Por exemplo, se um local com uma saída máxima de gerador de vapor de 500 MW estiver operando a 250 MW, há 250 MW de reserva girante.

**Reserva não girante:** A quantidade de capacidade adicional que não está em operação no momento e que precisaria ser ativada para fornecer potência de saída. Essa é a soma da energia elétrica de reserva potencial que pode ser ativada e colocada na rede elétrica. Isso não deve ser confundido com a capacidade desenergizada e em manutenção ou que, por algum motivo, não possa ser ativada para adicionar energia à rede elétrica.

**Resposta à frequência para regulagem:** A operação de resposta à frequência exige que o sistema LIB-ESS reaja às necessidades do sistema em períodos ainda mais curtos (de segundos a menos de um minuto) quando ocorre uma perda repentina de uma unidade de geração ou linha de transmissão ou uma energização repentina de uma grande carga. Os principais motivos para incluir a regulagem no sistema de energia elétrica são manter a frequência da rede e atender às normas Real Power Balancing Control Performance (BAL001) e Disturbance Control Performance (BAL002) do North American Electric Reliability Council.

**Sistema de armazenagem de energia elétrica (ESS):** Qualquer sistema por meio do qual a energia elétrica possa ser armazenada e reutilizada, quando necessário.

**Sistema de gerenciamento da bateria:** O sistema supervisor que assegura a funcionalidade básica do conjunto de baterias, mantendo condições de operação seguras e atuando adequadamente em contingências. Uma das principais funções desse sistema é manter as células em operação dentro de seus parâmetros operacionais de projeto, para evitar a fuga térmica.

## ANEXO B – HISTÓRICO DE REVISÕES DO DOCUMENTO

Neste anexo estão registradas as mudanças feitas neste documento em cada uma de suas publicações. Note que os números das seções se referem especificamente àqueles da versão publicada na data indicada (ou seja, os números das seções nem sempre são os mesmos entre as diferentes versões).

**Abril de 2025.** Revisão intermediária. As mudanças incluem a adição da detecção de liberação de gases certificada pela FM Approvals e o esclarecimento das recomendações de proteção contra incêndio para sistemas de armazenagem de energia elétrica em baterias (BESS) em contêineres externos.

**Janeiro de 2024.** Revisão intermediária. Foram feitas pequenas mudanças editoriais.

**Julho de 2023.** Revisão intermediária. As principais mudanças são as seguintes:

- A. Alteração do título para “*Lithium-Ion Battery Energy Storage Systems*”.
- B. Revisão das recomendações de distância de separação para sistemas LIB-ESS internos e externos.
- C. Adição de recomendação para prevenção de fuga térmica com intervenção rápida.
- D. Adição de recomendação para exaustão de emergência.
- E. Expansão da recomendação sobre planejamento pós-incidente para identificar os equipamentos necessários para remoção e substituição imediatas de equipamentos danificados.
- F. Adição de material de apoio para dispositivos de intervenção rápida.

**Julho de 2020.** Revisão intermediária. Foram feitas as seguintes mudanças:

- A. O escopo foi atualizado para esclarecimento.
- B. A Figura 2.3.1 foi corrigida para consistência com a Seção 2.3.2.1.

**Abril de 2020.** Revisão intermediária. Foram feitas as seguintes mudanças substanciais no documento:

- A. Adição de recomendações para a seleção de componentes de sistemas de armazenagem de energia elétrica.
- B. Atualização das recomendações de localização para refletir a tecnologia atual.
- C. Adição de recomendações para a construção de edificações exclusivas.
- D. Adição de recomendações para ventilação mecânica.
- E. Adição de recomendações para distância de separação entre racks.
- F. Adição de recomendação para a duração do suprimento de água.
- G. Adição de recomendações para funções de segurança do sistema de gerenciamento de baterias.
- H. Adição de recomendações para monitoramento on-line de condições.
- I. Adição de recomendação para vigilância contra incêndio pós-incidente.
- J. Expansão do material de apoio relacionado ao Centro de Pesquisa da FM sobre proteção por sprinklers e distância de separação.

**Janeiro de 2017.** Esta é a primeira edição deste documento.

## ANEXO C – INFORMAÇÕES DE REFERÊNCIA

### C.1 Introdução

A armazenagem de energia elétrica já existe há muitos anos, em cinco formas predominantes: eletroquímica, mecânica, térmica, elétrica e química. Esta norma técnica aborda apenas a armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio, que é do tipo eletroquímico.

Os sistemas de armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio são relativamente novos, mas estão se tornando rapidamente o tipo mais comum de armazenagem eletromecânica de energia elétrica. Esses sistemas oferecem um método de armazenagem de energia elétrica que pode ser utilizado para suplementar a geração convencional de energia (por exemplo, por carvão e combustíveis fósseis), reduzir os picos de demanda de energia e dar suporte a redes de energia elétrica de alta tensão e também de energia verde, como a eólica e a solar, que dependem de fontes naturais e, portanto, não podem produzir energia o tempo todo.

Os sistemas de armazenagem de energia elétrica em baterias de íons de lítio (LIB-ESS) têm vários tipos, tamanhos, aplicações e localizações. O uso da tecnologia está em constante expansão, tornando-se mais disponível para uma variedade de aplicações de armazenagem de energia elétrica, desde pequenos sistemas de suporte para residências até sistemas de rede elétrica de grande porte. Os sistemas LIB-ESS têm uma série de componentes básicos. As células, ou baterias, formam a base desses sistemas. Várias células conectadas entre si formam um módulo, e vários módulos conectados formam um rack ou string. Vários racks ou strings formam um sistema de armazenagem de energia elétrica.

O projeto do sistema LIB-ESS depende da tensão, da amperagem e dos requisitos de potência do usuário e também da aplicação, da vida útil e dos custos do sistema. Os sistemas LIB-ESS são projetados, fabricados e montados por fabricantes ou integradores. Os fabricantes de sistemas LIB-ESS fabricam e montam todos os componentes das células em compartimentos, criando um pacote completo. Os integradores normalmente adquirem baterias e outros componentes, fabricam determinadas peças e projetam e montam o sistema para seus clientes. Seja qual for o caso, os fabricantes de equipamentos e os integradores utilizam um sistema de gerenciamento da bateria para controlar a operação e a segurança do sistema LIB-ESS, o que é fundamental para evitar operações anormais. O projeto e a operação do sistema de gerenciamento da bateria são exclusivos do fabricante ou do integrador e, no momento, a modificação desses projetos é limitada. O projeto pode incluir componentes de hardware e software. É fundamental compreender todas as funções de operação e segurança do sistema LIB-ESS, conforme descrito neste documento.

Normalmente, os sistemas LIB-ESS são instalados dentro de uma edificação, mas podem ser posicionados em áreas externas, dentro de compartimentos. As instalações externas variam e dependem principalmente do tamanho do sistema. Sistemas pequenos podem ser instalados em compartimentos com classificação NEMA, ao passo que os sistemas maiores são instalados em contêineres metálicos, como os de transporte. Os sistemas LIB-ESS muito grandes podem ser instalados em edificações independentes.

Quando instalados dentro de edificações, os sistemas LIB-ESS são normalmente colocados em gabinetes elétricos dentro de um espaço comum ou em uma sala designada. Todos os sistemas de suporte para o sistema LIB-ESS são supridos pelos sistemas de suporte da edificação ou projetados especificamente para a sala, dependendo das necessidades do sistema LIB-ESS. Quando instalados fora de edificações, eles são providos de sistemas de gerenciamento térmico (ou seja, ar condicionado) projetados para o compartimento em questão. Outros sistemas de apoio são encontrados nos dois tipos de instalação: suporte elétrico (por exemplo, inversores/conversores, sistemas elétricos de CA, incluindo chaves seccionadoras, monitores de tensão e amperagem, monitores de carga etc.) e proteção contra incêndio.

## C.2 Componentes do sistema LIB-ESS

Para ajudar na compreensão de como esses sistemas são construídos, segue uma descrição dos componentes, desde o nível das células até o nível do sistema.

### C.2.1 Células

As células de íons de lítio são construídas de forma semelhante a outras células de bateria, consistindo em um ânodo, um cátodo, eletrólito, isoladores, terminais, alívio de pressão e um recipiente que é, às vezes, chamado de “invólucro” ou “lata”.

Cada célula consiste em um cátodo e um ânodo separados por uma fina camada dielétrica chamada “separador”. Uma célula de íons de lítio usa o movimento dos íons de lítio entre os eletrodos positivo e negativo para armazenar energia elétrica. O lítio nunca existe na forma metálica, portanto, a instabilidade inerente do lítio-metal é atenuada. Uma célula de íons de lítio típica gera entre 3,6 V e 4,2 V. Além disso, a camada secundária de interfase de eletrólito sólido, que se forma nas superfícies do ânodo, é uma camada ionicamente condutora e eletronicamente isolante. Essa camada facilita o funcionamento da tecnologia de íons de lítio. A falha da interfase de eletrólito sólido leva à geração de calor e à fuga térmica.

As células de íons de lítio incluem uma ampla variedade de químicas relacionadas à composição química do ânodo e do cátodo e que afetam o desempenho e o custo. Para a composição do cátodo, químicas de óxido de lítio-níquel-mangânese-cobalto (NCM) e óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA) são conhecidas por ser muito estáveis e, ao mesmo tempo, fornecer alta densidade de energia elétrica. Para a composição do ânodo, a química mais popular é o carbono parcialmente grafiteado. O titanato de lítio (LTO) geralmente é utilizado em aplicações de alta segurança porque requer uma estabilidade maior. No entanto, as células de titanato de lítio têm valores de densidade de energia elétrica aproximadamente 30% mais baixos, em comparação com outras composições.

O termo “célula” é frequentemente intercambiável com “bateria” quando se trata de aplicações em formato pequeno. Por exemplo, uma célula cilíndrica com um terminal superior positivo e um terminal inferior negativo é usada em muitas aplicações e é chamada de “bateria”. Na verdade, as células têm várias formas. As três formas mais comuns são a célula cilíndrica, a célula prismática e célula em bolsa.

### C.2.1.1 Células cilíndricas

Esse é o estilo de embalagem mais amplamente usado para baterias, e proporciona boa estabilidade mecânica. A maioria das células cilíndricas apresenta um mecanismo de alívio de pressão, e o projeto mais simples usa uma membrana de vedação que se rompe sob alta pressão. Algumas células de íons de lítio conectam a válvula de alívio de pressão a um fusível elétrico que abre permanentemente a célula quando há um aumento de pressão inseguro. Consulte a Figura C.2.1.1.

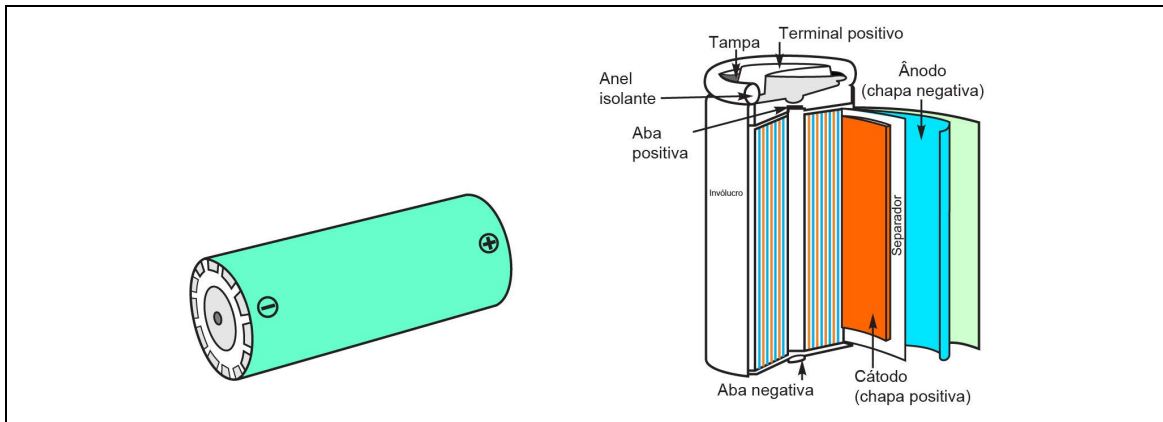


Fig. C.2.1.1. Forma de célula cilíndrica

### C.2.1.2 Células prismáticas

As células prismáticas fornecem um invólucro firme para a célula eletroquímica em seu interior. Essas células são encontradas em tablets e laptops e variam de 800 mAh a 4.000 mAh. Não existe um formato universal, e cada fabricante usa seu próprio projeto. As células prismáticas também estão disponíveis em formatos grandes. Embaladas em compartimentos de alumínio soldado, elas fornecem capacidades de 20 Ah a 50 Ah e são usadas principalmente em aplicações de sistemas LIB-ESS. Consulte a Figura C.2.1.2.

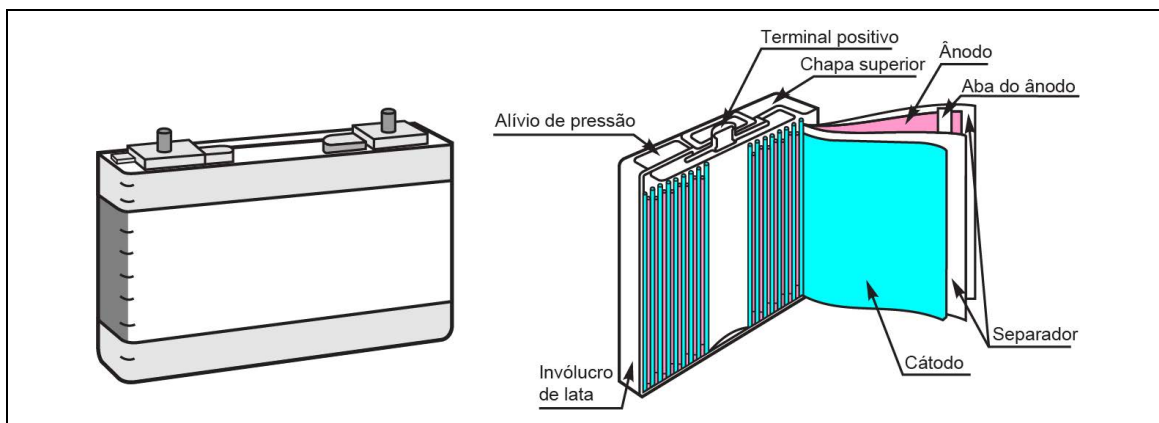


Fig. C.2.1.2. Forma de célula prismática

### C.2.1.3 Células em bolsa

Uma célula em bolsa usa uma arquitetura laminada em uma bolsa. A célula em bolsa utiliza o espaço de maneira mais eficiente. Ela é leve e econômica, mas a exposição à umidade e a altas temperaturas pode reduzir sua vida útil. Não existe uma célula em bolsa padronizada, e cada fabricante usa seu próprio projeto. A célula em bolsa é usada para aplicações semelhantes às da célula prismática. Consulte a Figura C.2.1.3.

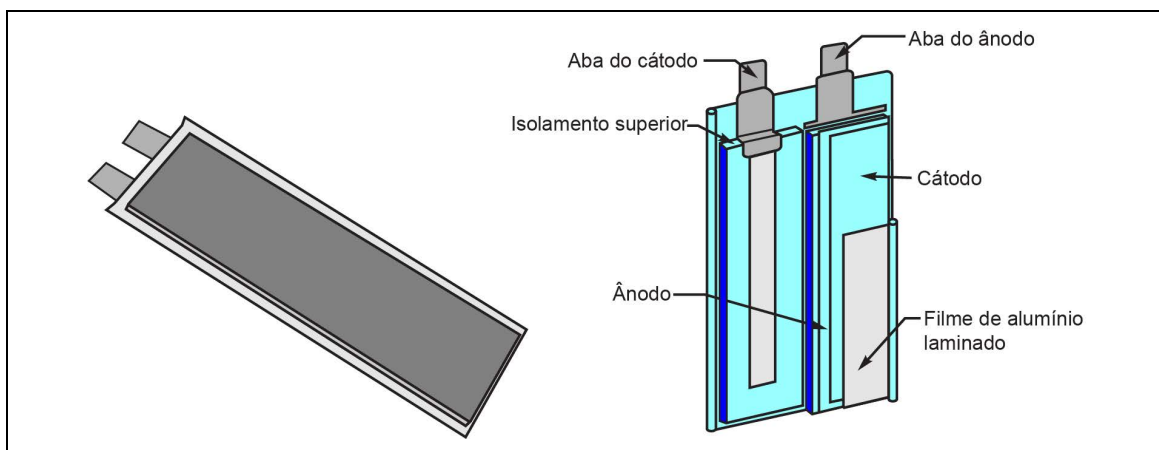


Fig. C.2.1.3. Forma da célula em bolsa

### C.2.2 Módulos

A próxima ordem de estrutura é o módulo, ou conjunto de íons de lítio. Trata-se de um conjunto de várias células, eletricamente configuradas em série, em paralelo ou em uma combinação de ambos, para atender à amperagem e à tensão de saída necessárias para a instalação. Consulte as Figuras C.2.2(A) e (B).

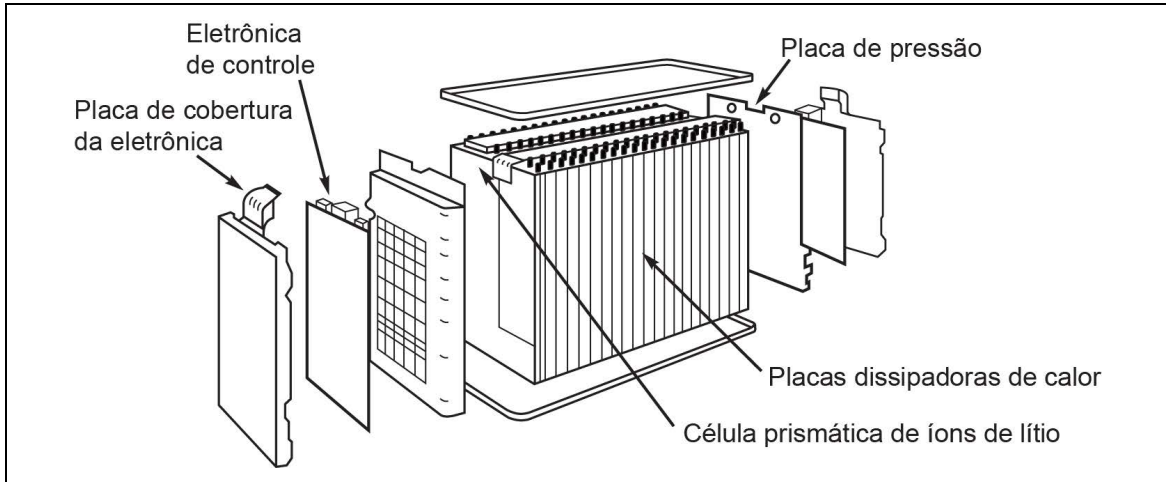


Fig. C.2.2(A). Configuração de módulo

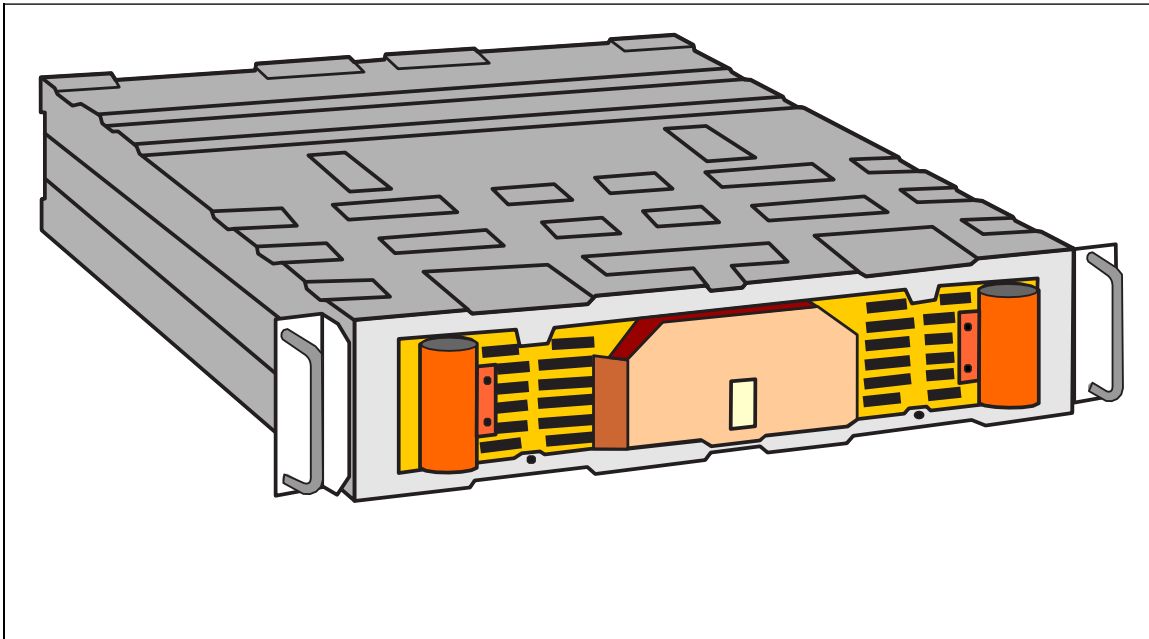


Fig. C.2.2(B). Módulo fechado típico

### C.2.3 Racks

Um rack consiste em vários módulos normalmente conectados em série para desenvolver uma alta tensão de CC, que alimenta o inversor/carregador. O rack também é composto por componentes de comutação (disjuntor, isolador e contator) para seu isolamento durante uma contingência. Consulte a Figura C.2.3.

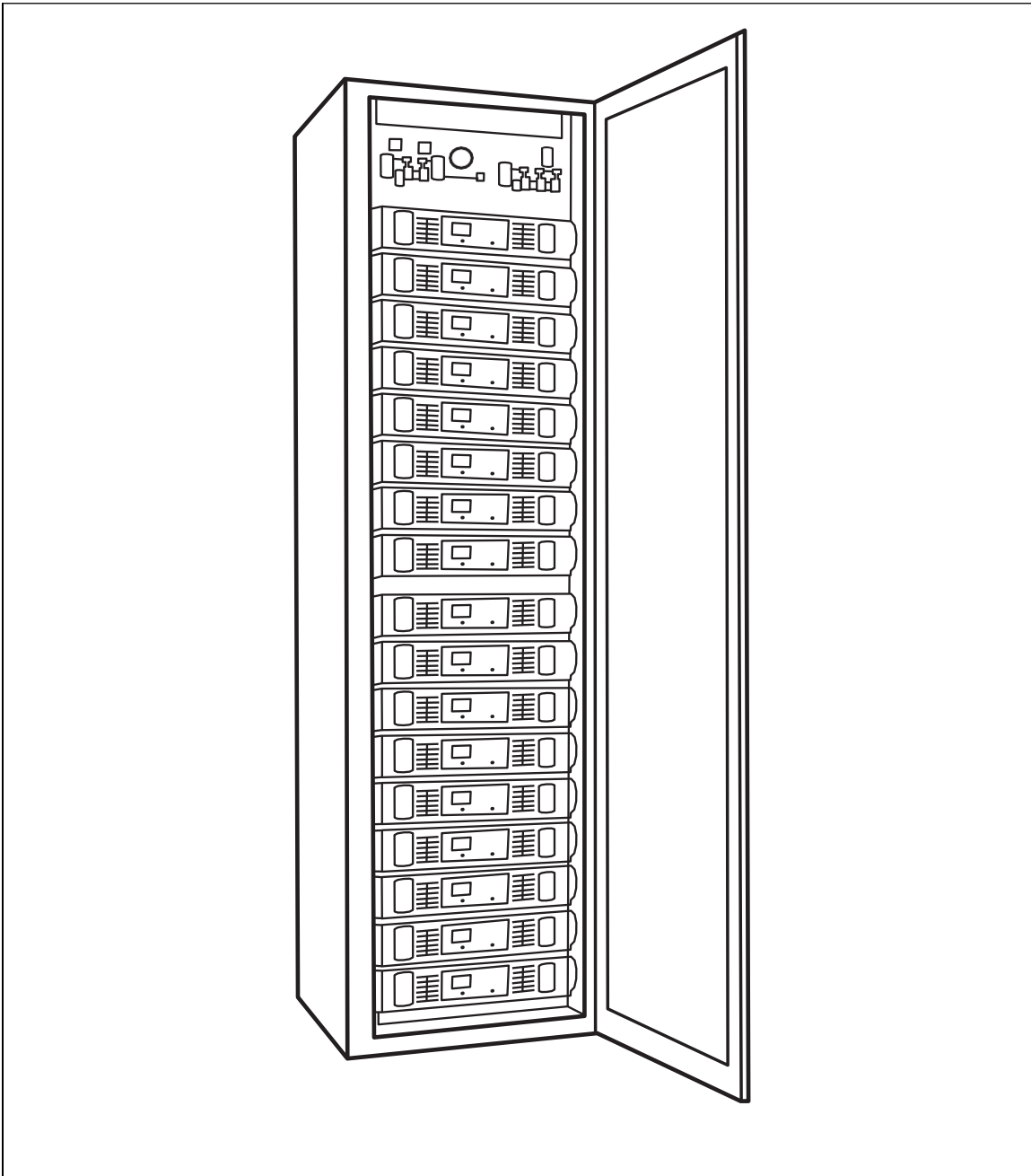


Fig. C.2.3 Configuração de rack típica com vários módulos

#### C.2.4 Sistemas

Um sistema LIB-ESS de grande capacidade consiste em vários racks conectados em paralelo que alimentam o inversor/carregador. O sistema LIB-ESS também inclui o sistema de gerenciamento da bateria, que controla a funcionalidade básica das baterias, as condições de operação seguras e a resposta a contingências. Um sistema LIB-ESS também inclui sistemas auxiliares, como ar condicionado e proteção contra incêndio. Consulte a Figura C.2.4(A).

A Figura C.2.4(B) mostra os componentes típicos de um sistema LIB-ESS. A maioria desses componentes será padrão em todos os sistemas, independentemente do tamanho ou das aplicações. .

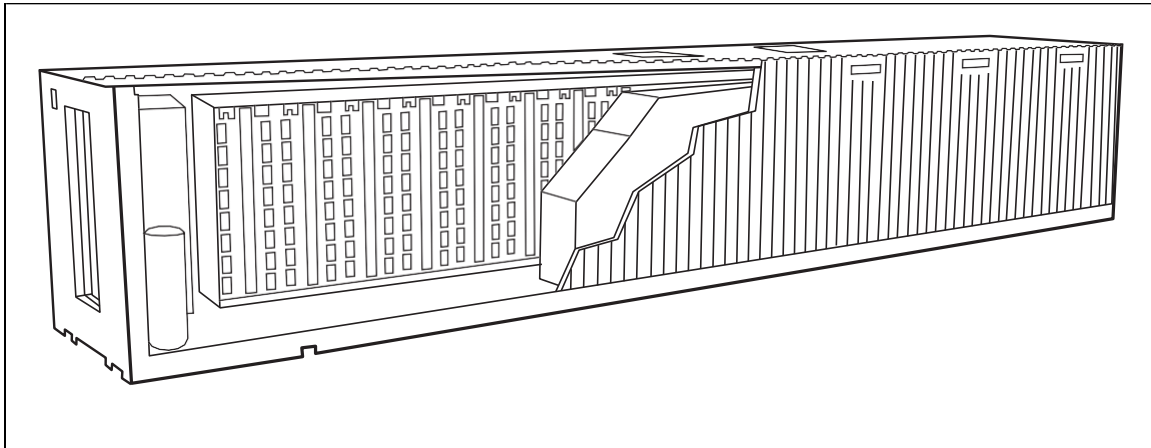


Fig. C.2.4(A). Compartimento externo com vários racks

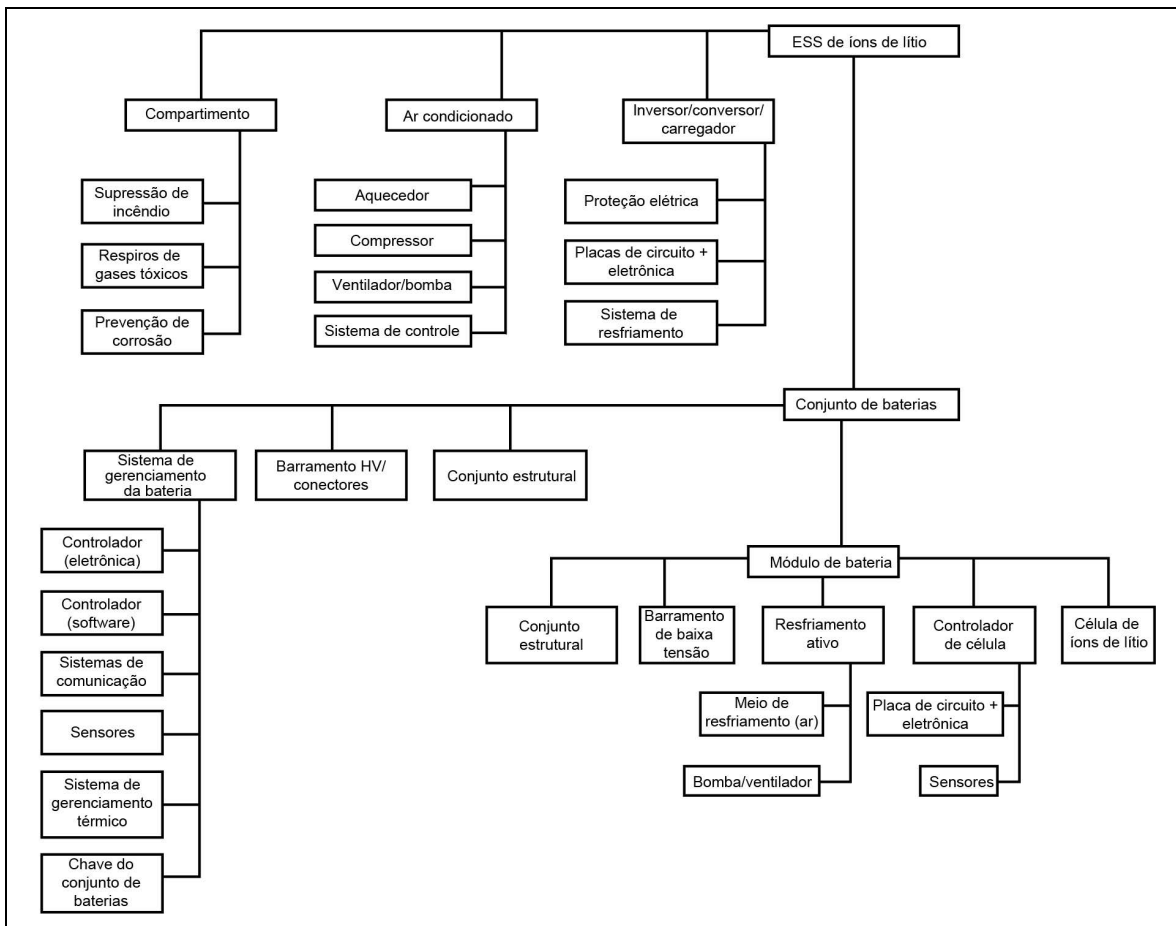


Fig. C.2.4(B). Diagrama de arquitetura de um sistema LIB-ESS

### C.3 Aplicações de sistemas LIB-ESS

As aplicações de sistemas LIB-ESS incluem energia elétrica em massa, transmissão, distribuição (antes do medidor) e cliente comercial ou industrial (após o medidor).

### C.3.1 Serviços de energia elétrica em massa

A armazenagem de energia elétrica em massa é utilizada para armazenar quantidades relativamente grandes de energia a fim de disponibilizá-la (em geral, localmente) em um momento mais conveniente. As aplicações incluem:

- Deslocamento temporal de energia elétrica (arbitragem).
- Capacidade de suprimento de energia elétrica.

### C.3.2 Serviços auxiliares

Os sistemas utilizados como serviços auxiliares destinam-se a facilitar e dar suporte à capacidade da rede elétrica de fornecer um fluxo contínuo de eletricidade e equilibrar a oferta e a demanda. O suprimento de energia de partida após um blecaute total também é considerado um serviço auxiliar. As aplicações incluem:

- Regulagem/resposta à frequência.
- Reservas girantes, não girantes e suplementares.
- Regulagem de tensão.
- Partida no escuro.
- Acompanhamento/rampeamento de carga para energia renovável.

### C.3.3 Serviços de transmissão e distribuição

A armazenagem de energia elétrica estrategicamente posicionada e utilizada em serviços de infraestrutura de transmissão ou distribuição pode atuar como uma reserva de energia, adiando melhorias na rede elétrica. As aplicações incluem:

- Postergação de investimento.
- Alívio de congestão.
- Regulagem de tensão.

### C.3.4 Serviços de energia elétrica para consumidores

Armazenagem de energia elétrica utilizada no gerenciamento de energia para consumidores e fornecer serviços a clientes. Esses serviços podem ser melhoria da qualidade da energia, aumento da confiabilidade e/ou geração de lucros adicionais para o cliente. As aplicações incluem:

- Qualidade da energia.
- Confiabilidade energética.
- Deslocamento temporal de energia elétrica de varejo.
- Gerenciamento de cobrança por demanda.

## C.4 Modos de falha

O desempenho das células de íons de lítio depende da temperatura e da tensão operacional. Há uma janela operacional de integridade segura na qual essas células podem funcionar. Essa janela é uma função de tensão e temperatura da célula. A célula deve operar entre 0°C (32°F) e 100°C (212°F), mantendo uma tensão de 2 V a 4 V. Caso ocorra uma falha e a temperatura da célula fique abaixo de 0°C (32°F), haverá deposição de lítio durante o ciclo de carga, o que levará a um curto-circuito. A operação acima de 100°C (212°F) pode levar à degradação da camada térmica da interfase de eletrólito sólido. Isso, associado à operação acima de 6 V, pode levar ao vazamento do eletrólito e à subsequente ignição do vapor. Na operação em temperaturas extremas (acima de 200°C [392°F]), o material ativo do cátodo se romperá, causando ainda mais danos. Na operação abaixo de 2 V, o cobre se dissolverá, levando a um curto-circuito. Na operação acima de 4 V e entre 0°C (32°F) e 100°C (212°F), haverá deposição de lítio durante a carga, o que levará ao sobreaquecimento.

Esta seção descreve os modos de falha de células de íons de lítio. Esses modos de falha podem ser divididos em quatro categorias amplas, dependendo da variável crítica que desencadeia a falha: tensão, temperatura, fadiga mecânica e ciclos de carga/envelhecimento.

#### C.4.1 Sobretenção

Se a tensão de carga aumentar além da tensão superior recomendada para a célula, poderá haver fluxo excessivo de corrente, o que causará dois problemas:

1. Deposição de lítio (crescimento de dendritos): Os íons de lítio acumulam-se na superfície do ânodo, onde são depositados na forma de lítio-metal. Isso é conhecido como deposição de lítio. A consequência é uma perda irreversível de capacidade e, como a deposição ocorre na forma dendrítica, pode resultar em um curto-circuito entre os eletrodos. A quantidade de lítio disponível não é suficiente para apresentar um risco de reatividade à água. Portanto, a deposição de lítio não é normalmente considerada uma preocupação para as baterias de íons de lítio, ao passo que o crescimento de dendritos é considerado um risco de curto-circuito.
2. Sobreaquecimento: A corrente excessiva também causa um aumento no aquecimento Joule da célula, acompanhado por um aumento de temperatura.

#### C.4.2 Subtensão/sobredescarga

Permitir que a tensão da célula fique abaixo de aproximadamente 2 V por meio de sobredescarga ou armazenagem por um período prolongado resulta na degradação progressiva dos materiais do eletrodo.

- Ânodos: Em baixa tensão, o coletor de corrente de cobre do ânodo se dissolve no eletrólito. À medida que a tensão aumenta (por meio de carga), os íons de cobre que estão dispersos no eletrólito são precipitados na forma de cobre metálico onde quer que estejam, e não necessariamente de volta à folha do coletor de corrente. Essa é uma condição perigosa e pode acabar causando um curto-circuito entre os eletrodos.
- Cátodos: Manter as células em tensões abaixo de 2 V por períodos prolongados resulta na degradação gradual do cátodo ao longo de muitos ciclos de carga, com a liberação de oxigênio pelos cátodos de óxido de lítio-cobalto e óxido de lítio-manganês e uma consequente perda permanente de capacidade. Nas células de fosfato de ferro-lítio, isso pode ocorrer depois de alguns ciclos de carga.

#### C.4.3 Baixa temperatura

O efeito da redução da temperatura operacional é a redução da taxa de transformação dos produtos químicos ativos na célula. Isso causa a redução da capacidade de condução de corrente da célula, tanto para carga quanto para descarga. Em outras palavras, a capacidade de condução de corrente é reduzida. A taxa de reação reduzida desacelera e restringe a movimentação dos íons de lítio. Como os eletrodos não conseguem acomodar o fluxo de corrente, o resultado é a redução da potência e a deposição de lítio do ânodo com perda irreversível de capacidade.

#### C.4.4 Alta temperatura

A operação em altas temperaturas pode resultar na destruição da célula. O efeito Arrhenius ajuda a aumentar a saída de energia elétrica da célula aumentando a taxa de reação, mas correntes mais altas causam um aumento da dissipação de calor  $I^2R$  e temperaturas ainda mais altas. Esse feedback positivo de temperatura pode resultar em fuga térmica, a menos que o calor seja removido mais rapidamente do que é gerado.

#### C.4.5 Fuga térmica

Vários estágios estão envolvidos na progressão da fuga térmica, e cada um deles é capaz de causar mais danos que o estágio anterior.

A. Degradação da camada de interfase de eletrólito sólido. Isso pode ser causado por sobreaquecimento ou impacto mecânico ou pode começar em uma temperatura relativamente baixa, de 80|SNC. Quando essa camada é rompida, o eletrólito reage com o ânodo de carbono e leva à degradação eletrolítica e à degradação catódica. Essas reações são exotérmicas e elevam ainda mais a temperatura.

B. Degradação do eletrólito. O calor da reação do ânodo causa a degradação dos solventes orgânicos utilizados no eletrólito, liberando gases hidrocarbonetos inflamáveis (etano, metano e outros), mas não oxigênio. A geração de gás devido à degradação do eletrólito causa o acúmulo de pressão dentro da célula. O alívio de pressão nas células é projetado para liberar o gás e aliviar a pressão interna.

C. Derretimento do separador. Em temperaturas elevadas, o separador de polímero derrete, gerando curtos-circuitos entre os eletrodos.

D. Degradação do cátodo. O calor da degradação do eletrólito causa a degradação do material do cátodo de óxido metálico, liberando oxigênio, o que permite a queima do eletrólito e também dos gases dentro da célula.

Deve-se observar que foram feitos vários estudos para avaliar a prevenção da fuga térmica por meio do gerenciamento térmico adequado. Isso é fundamental, pois forma a base das medidas de mitigação contra a propagação da fuga térmica.

#### **C.4.6 Fadiga mecânica**

Os eletrodos das células de lítio se expandem e contraem durante a carga e a descarga. As tensões cíclicas nos eletrodos podem, eventualmente, levar a trincas nas partículas que compõem o eletrodo, resultando no aumento da impedância interna à medida que a célula envelhece. Na pior das hipóteses, a camada de interfase de eletrólito sólido pode se romper, levando ao sobreaquecimento e à falha imediata da célula. Alternativamente, uma falta à terra interna devido a uma falha do isolamento entre os eletrodos e o invólucro também pode causar a falha da célula.

Da mesma forma, a degradação lenta do eletrólito a cada ciclo de aquecimento pode levar à liberação de pequenas quantidades de gases, resultando na dilatação da célula e, por fim, na ruptura de seu invólucro.

O vazamento do invólucro pode levar à entrada de oxigênio e umidade, causando a decomposição do eletrólito. Normalmente, falhas em vedações e soldas podem causar falhas em invólucros.

Outros modos de falha mecânica são queda, perfuração, penetração de pregos, impacto e operação insegura.

#### **C.4.7 Vida útil e função do sistema de gerenciamento da bateria**

Conforme discutido anteriormente, as variações fora da janela operacional de integridade recomendada podem causar perda irreversível da capacidade das células e eventos potencialmente inseguros caso não sejam gerenciadas adequadamente. O efeito cumulativo dessas variações pode afetar a vida útil das células ou, na pior das hipóteses, causar falhas repentinas. Uma das principais funções do sistema de gerenciamento da bateria é manter as células dentro da janela operacional de integridade. Geralmente, isso é feito com o uso de dispositivos de segurança e o controle das condições de operação e do ambiente.

### **C.5 Tecnologias de proteção contra incêndio**

Até o momento, não há dados de testes publicamente disponíveis que confirmem a eficácia de qualquer tipo de proteção contra incêndio ativa para sistemas de armazenagem de energia elétrica, e não há sistemas de proteção contra incêndio certificados pela FM Approvals para essa aplicação. A capacidade da proteção contra incêndio ativa de interromper ou evitar reações de fuga térmica em baterias de íons de lítio ainda não está comprovada. Ao mesmo tempo, alguns fabricantes já fornecem sistemas de proteção ativa como componentes integrados a sistemas LIB-ESS.