



**WHITE PAPER DA VERTIV**

# Principais Considerações para Avaliar Baterias de Íon-Lítio para Aplicações Estacionárias

As baterias de chumbo-ácido têm sido por muito tempo a escolha para as fontes de alimentação de energia ininterrupta (UPS) que garantem a disponibilidade dos data centers, equipamentos de comunicação e processos industriais.

Embora elas proporcionem a potência e a confiabilidade exigida por essas aplicações, quando respaldadas por práticas adequadas de monitoramento e manutenção, elas tradicionalmente têm sido consideradas o elo fraco na cadeia de energia crítica. Elas tendem a ser pesadas, demandar muita manutenção e precisam ser substituídas frequentemente.

Agora, as baterias de íon-lítio surgiram como uma alternativa viável e um número crescente de usuários está avaliando esta tecnologia para aplicações de UPS em ambientes de missão crítica. Como uma das principais fornecedoras de sistemas de infraestrutura crítica, a Vertiv trabalhou com diversos clientes que estavam considerando usar baterias de íon-lítio para endereçar as principais questões que eles enfrentam quando decidindo se irão, ou não, seguir com essa tecnologia.

Um resumo dessas informações é apresentado no documento complementar [\*Perguntas Frequentes sobre o uso de Bateria de Íon-Lítio em Aplicações de UPS\*](#).

## Expectativa de Vida Útil para uma Bateria de Íon-Lítio em uma Aplicação Estacionária

Um dos principais atrativos para mudar para baterias de íon-lítio é a vida útil da bateria ser diversas vezes maior que as de chumbo-ácido. Porém, com a limitação de dados operacionais em aplicações de UPS que hoje existe, é natural que os potenciais usuários questionem quanto tempo as baterias de íon-lítio irão realmente durar.

Para tratar essa questão, é necessário primeiramente compreender como as baterias de íon-lítio degradam sob condições normais. Elas têm duas formas bastante independentes de degradação: a vida útil em anos e a vida útil em ciclos.

A vida útil em anos descreve como a capacidade diminuirá e como a resistência aumentará ao longo dos anos. Para a vida útil em anos, a temperatura de operação da bateria é o fator mais importante para determinar quanto tempo ela irá durar. O calor pode acelerar a degradação e temperaturas amenas minimizam a degradação.

Quanto à vida útil em ciclos, o termo em si é fácil de ser entendido, mas projetar a vida útil em ciclos de uma bateria de íon-lítio não é tão fácil quanto parece. Isso ocorre porque diferentes características do ciclo determinam o quão prejudicial aquele ciclo é para a bateria.

Um teste básico no mercado de íon-lítio é fazer a completa descarga da bateria em uma hora e, então, a recarga completa em uma hora, sob temperatura ambiente (25°C / 77°F). Para designs de células de alta qualidade, esse é um teste fácil que resultará em milhares de ciclos antes que a célula atinja 80% de sua capacidade original. Entretanto, a vida útil em ciclos é geralmente bastante sensível às intensidades de carga e descarga e outros fatores. Um resumo dos principais fatores que influenciam a vida útil em ciclos é mostrado na Figura 1.

Parâmetro do Ciclo	Influência na Vida Útil por Ciclos	Descrição
Taxa de Carga/Descarga	Significativa	A carga ou descarga da bateria a taxas maiores das que as recomendadas diminuirá sua vida útil em ciclos consideravelmente
Profundidade da Descarga	Moderada	A descarga parcial de uma bateria antes da recarga é menos prejudicial que a descarga completa
Temperatura	Moderada	Embora uma bateria mais aquecida tenha menos resistência e menores taxas de autoaquecimento, temperaturas de operação mais amenas são, em geral, melhores para a vida útil. Diversas baterias de íon-lítio são também sensíveis à carga com temperaturas baixas (geralmente abaixo de zero), mas isso geralmente não é uma preocupação para as aplicações de data center
Janela do Estado de Carga (SOC)	Pequena	Quando usando uma bateria à profundidade parcial de descarga, fazer sua ciclagem próximo a estar completamente cheia (SOC de 100%) ou completamente vazia (SOC de 0%) é mais prejudicial do que especificar uma janela de operação com estados de carga parciais

Figura 1. Resumo dos principais fatores que influenciam a vida útil em ciclos das baterias de íon-lítio

Em aplicações de data centers, a vida útil em anos é geralmente o motivo pelo qual a ciclagem das baterias não é frequente. A exceção seria quando as baterias do UPS estão sendo usadas para dar suporte ao gerenciamento da energia do site ou fornecendo serviços de rede elétrica para a rede de distribuição de energia elétrica local. Essas aplicações estão fora do escopo desse artigo. Em casos de uso convencionais, as baterias ficam inativas a maior parte de sua vida operacional.

Para avaliar a vida útil em anos, os fabricantes de células geralmente armazenam as baterias a diferentes temperaturas por grandes períodos de tempo e verificam periodicamente a capacidade restante. Fazer um gráfico com esses dados proporciona uma relação entre tempo, temperatura e capacidade restante. Após terem sido coletados dados suficientes, é possível adequar os dados a uma equação geralmente aceita para a vida útil em anos, a qual foi comprovada por décadas de experiência no campo das baterias de íon-lítio. Um exemplo de gráfico da vida útil em anos de uma bateria de íon-lítio é mostrado na Figura 2.

### Capacidade Restante da Íon-Lítio

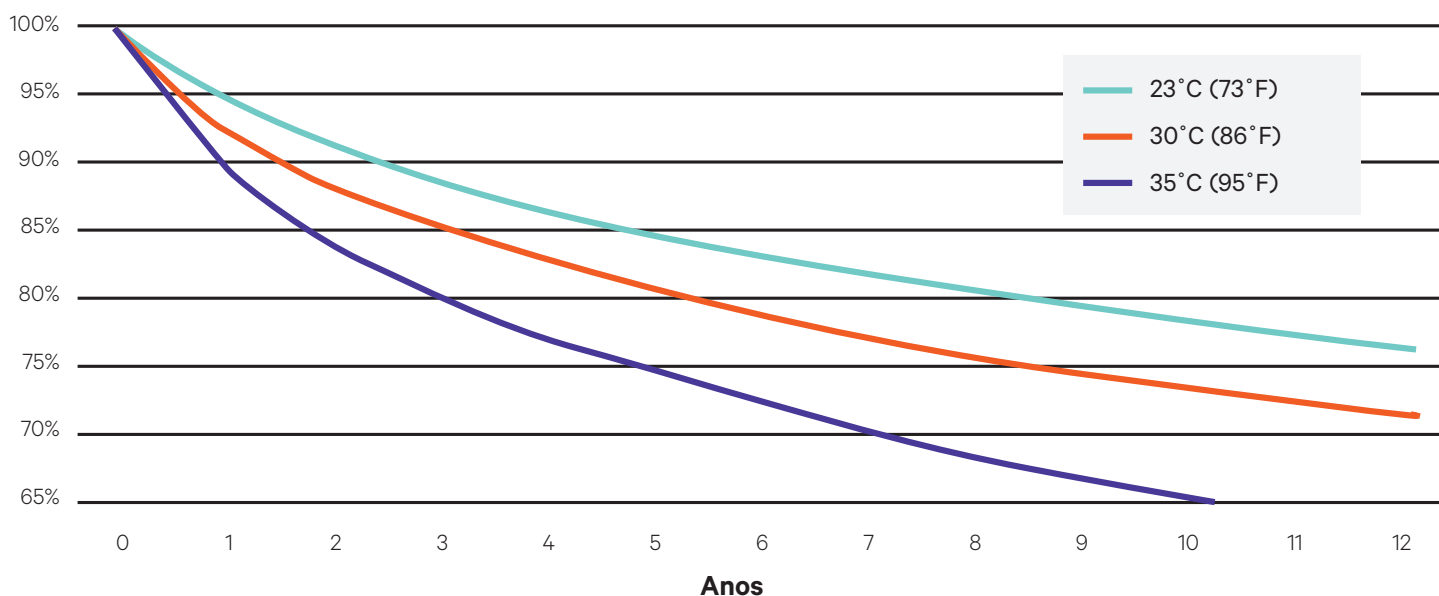


Figura 2. Gráfico da vida útil em anos de uma bateria de íon-lítio

A Figura 2 mostra que 80% da capacidade inicial permanece após aproximadamente dez anos a temperaturas de 23°C (73°F) para a bateria de íon-lítio em particular testada. O que é importante é que capacidade de 80% não é um marco significativo na vida útil de uma bateria de íon-lítio porque a taxa de degradação anual está desacelerando ao redor de 80% e continuará a degradar de forma previsível. A próxima seção cobrirá como a capacidade restante e a resistência da bateria influem na autonomia em uma aplicação específica.

### Projetando as Autonomias Futuras para Baterias de Íon-Lítio

Uma das perguntas mais comuns que os potenciais usuários de baterias de íon-lítio têm refere-se ao impacto da idade da bateria sobre as autonomias previstas. Essa preocupação é refletida em uma pergunta comum: *Uma bateria de lítio é suscetível a falhas surpresa mais tarde, como as baterias de chumbo-ácido?*

Para lidar com essa questão, é importante considerar a discussão anterior sobre a degradação das baterias de íon-lítio, bem como o design dos eletrodos em cada célula do sistema de baterias. Uma célula de bateria de íon-lítio pode ser adequada pelo fabricante para diferentes objetivos de desempenho e uma das principais escolhas é entre o quão rapidamente a bateria pode receber carga ou descarga e quanta energia ela segura. Os extremos dessas escolhas estão resumidos na Figura 3.

Métrica de Desempenho	Célula otimizada para densidade de energia	Célula otimizada para potência
Densidade de energia	A tecnologia atual de íon-lítio pode produzir densidades de energia da célula tão altas quando 600 Wh/litro, o que permite um footprint muito pequeno, mas essas baterias não podem fazer a descarga de sua energia muito rapidamente.	Células otimizadas para o desempenho de potência faz concessões à densidade de energia. Em casos extremos, a densidade de energia dessas células pode ser apenas a metade das alternativas de alta energia.
Capacidade da taxa de carga/descarga	Uma célula otimizada para densidade de energia pode levar uma hora ou mais para a descarga completa em sua taxa mais rápida sustentável.	Células otimizadas para potência podem atingir a descarga completa em poucos minutos sem avariar a bateria.
Resistência elétrica	A resistência interna dessas baterias é consideravelmente menor do que a das baterias de chumbo-ácido, mas alta se comparada com uma bateria de íon-lítio otimizada para potência. Se receberem carga ou descarga à sua taxa máxima, mais calor será gerado.	Os parâmetros de design do eletrodo que leva à capacidade de alta potência também produzem uma resistência muito baixa da célula e, portanto, essas baterias geram menos calor, mesmo durante a ciclagem rápida.
Custo relativo	Essas células têm a fabricação mais barata e são geralmente produzidas em volumes mais altos. Relatório de mercado alardeando os preços menores da bateria em termos de \$/kWh geralmente referem-se a esse tipo de bateria.	Os eletrodos em células de alta potência têm a fabricação mais difícil e geradores de custo adicionais no design. Baterias de alta potência são normalmente muito mais caras para a mesma capacidade (medida em kWh).

**Figura 3.** Escolhas envolvidas na otimização de células de íon-lítio para potência e densidade.

Para uma aplicação de UPS, o objetivo principal do design para o fabricante da bateria é proporcionar a autonomia necessária ao menor custo possível. Como resultado, a maioria das soluções de UPS no mercado atualmente tendem a usar células que sejam mais otimizadas para densidade de energia e custos, e geralmente não usam células que sejam inerentemente mais capazes de descargas rápidas. Isso significa também que as células de íon-lítio escolhidas não têm a menor resistência interna possível e tendem a passar por aumentos de temperatura consideráveis quando sofrem descarga em menos de 10 minutos.

Ao analisar as autonomies para uma bateria de íon-lítio em uma aplicação em UPS, é importante compreender as características das células sendo usadas, pois a parada da descarga pode ser causada por a bateria ter atingido a tensão mínima, a bateria ter atingido a temperatura máxima ou a energia da bateria estar acabando devido às suas limitações de capacidade. Em diversos casos, a condição que leva ao encerramento da descarga é diferente também para diferentes cargas.

Prever autonomies para dez anos no futuro acrescenta ainda outro nível de dificuldade. Ao contrário da crença popular, a capacidade restante na bateria conforme ela envelhece não é o que limita sua autonomia, particularmente com altas quantidades de carga. Além de perder capacidade, as baterias de íon-lítio também passam por aumentos em sua resistência interna durante a vida útil e isso leva a maiores quedas de tensão e mais autoaquecimento do que quando eram novas. Como resultado, o fabricante da bateria deve saber não apenas como a capacidade diminui, mas também como a resistência aumenta de acordo com o histórico operacional da bateria e a quantidade de anos em serviço.

Embora a análise de autonomies para as baterias de íon-lítio possa ser complexa para ser realizada, os usuários geralmente não correm o risco de que a bateria possa subitamente proporcionar a metade da autonomia que eles esperavam, ou que foram prometidas pelas especificações. De acordo com as práticas recomendadas pelo IEEE para baterias VRLA (1188), baterias de chumbo-ácido precisam ser substituídas quando atingem 80% de sua capacidade original. Isso porque a capacidade restante cai rapidamente após este ponto. Esse ponto de falha não ocorre com a tecnologia de íon-lítio, a qual tende a esvaecer gradual e previsivelmente.

## Segurança das Baterias de Íon-Lítio

Baterias de íon-lítio têm algumas condições sabidas que podem levá-las a inflamar ou liberar gases e a pressão interna ficar muito alta. Conhecer essas condições de risco e controlá-las é o objetivo do sistema de gerenciamento de baterias (BMS).

Para qualquer produto em que a segurança é relevante, as boas práticas de integração do sistema começam com o entendimento da probabilidade e da gravidade de cada possível forma de falha. No caso das baterias de íon-lítio, as condições de abuso que têm mais risco são em geral a sobrecarga, o sobreaquecimento e os curtos-circuitos das células das baterias. Cada uma dessas condições pode fazer com que o eletrólito em uma bateria de íon-lítio se decomponha em gases, ou, em casos extremos, pegue fogo.

Embora alguns fabricantes de baterias façam afirmações sobre a segurança de suas baterias com base na química usada no cátodo ou no ânodo, as falhas em baterias de íon-lítio quase sempre começam no eletrólito e praticamente todas as células que estão atualmente disponíveis para a comercialização usam um eletrólito inflamável. Isso não quer dizer que a química do cátodo e do ânodo não influenciam a segurança da bateria. Essas escolhas de materiais podem conduzir a diferenças significativas na intensidade de uma falha, mas seria errado sugerir que qualquer célula de íon-lítio seja imune aos riscos de condições abusivas de operação.

Para caracterizar a resposta de qualquer design de célula a condições abusivas de operação, a indústria de íon-lítio desenvolveu uma série de testes para avaliar os riscos à segurança. O mais conhecido deles é o teste de penetração do prego. O objetivo de um teste do prego não é avaliar os efeitos dos danos físicos a uma célula. O prego é inserido por todos os eletrodos pois isso causa um curto-circuito imediato por toda a célula. A descarga de energia resultante é extremamente rápida e leva o prego a ficar tão quente que incendiará o eletrólito em uma célula com design precário.

Outros testes são usados para estudar os efeitos de outras formas de falhas e quando todos os testes de abuso realizados ao nível da célula estiverem completos, o integrador do sistema poderá determinar os limites operacionais que garantam a operação segura do sistema.

O principal propósito do BMS é implementar controles que mantenham a bateria dentro de sua faixa de operação segura. Isso envolve a medição contínua das tensões das células, temperaturas do sistema e corrente da bateria, além de outros parâmetros.

Quando o BMS percebe que a bateria está se aproximando de um de seus limites de operação, um aviso é comunicado para o dispositivo de alimentação de energia conectado, como um UPS. Se o UPS não reagir adequadamente para manter a bateria dentro de seus limites operacionais admissíveis, o BMS poderá desconectar a bateria da carga ou do carregador para manter a segurança. A funcionalidade e a eficácia do próprio BMS também são verificadas através dos testes necessários para alcançar a certificação UL ou CE do sistema de baterias.

Como o BMS tem um papel tão importante na segurança de um sistema de baterias de íon-lítio, a redundância dentro do próprio BMS é uma consideração importante a ser feita no design. Por exemplo, vários designs de BMS têm um circuito de hardware que operará a desconexão da bateria se houver uma anomalia de software no processador do BMS. Os principais valores dos sensores são geralmente mensurados de várias formas e comparados, para confirmar que as medições sejam confiáveis. Por fim, os requisitos da UL1973 para o uso de baterias de íon-lítio em aplicações de UPS exigem uma análise de segurança funcional do design do BMS. Análise de segurança funcional é uma forma sistemática de garantir que um sistema de controle se comporta como pretendido e esses princípios têm sido usados pela indústria de aviação por mais de 20 anos. Embora esses métodos para garantia de segurança sejam relativamente novos para equipamentos de data centers, não há dúvida que designs de BMS certificados sejam construídos sobre fundamentos muito sólidos de confiabilidade.

Alguns dos limiares operacionais no BMS consideram também outras coisas além da segurança. Em aplicações de UPS, o limite térmico da bateria é um bom exemplo. Em geral, o BMS em aplicações de data center tem um limite de temperatura que é bem abaixo do nível necessário para garantir a segurança porque considerações sobre a vida humana também foram levadas em conta na determinação daquele limiar. Portanto, um caso do BMS desconectar a bateria não significa necessariamente que a segurança estava comprometida.

## **O Impacto de Códigos de Segurança Contra Incêndios na Implementação de Baterias de Íon-Lítio**

Em algumas partes do mundo, mudanças nos códigos de segurança contra incêndios colocaram mais atenção à segurança de baterias. Em particular, a Associação Nacional de Proteção contra Incêndios (NFPA) nos Estados Unidos tem conduzido novos regulamentos que estão sendo adotados gradualmente em várias jurisdições. Embora essas iniciativas devam ser aplaudidas por sua intenção de garantir a segurança ao tirar soluções menos robustas do mercado, as versões iniciais não foram isentas de problemas.

Os novos padrões sobre incêndios da NFPA parecem ser baseados na presunção que o fogo causado por baterias de íon-lítio é inevitável e mostram pouco conhecimento das formas que os fabricantes de baterias têm para tornar as baterias de íon-lítio mais resilientes a condições operacionais abusivas.

Para exemplificar o quadro, considere o desenvolvimento das baterias de íon-lítio no mercado automotivo, o qual foi um dos precursores na adoção da tecnologia. Há mais de uma década, a indústria automotiva definiu uma série de testes de segurança para as baterias de íon-lítio e estabeleceu um critério claro de aprovação/reprovação. Quando os testes foram estabelecidos, vários designs de bateria tiveram dificuldade para ser aprovados, mas a existência de requisitos estáveis levou a que, no final, todos os fabricantes de baterias estivessem em conformidade ou abandonassem o mercado.

Hoje, aplicações de baterias estacionárias aproveitam os avanços em segurança já liderados pela indústria automotiva. Ao mesmo tempo, é preciso reconhecer que ainda há designs de baterias de íon-lítio no mercado que não passariam em testes de segurança mais rigorosos.

Os maiores desafios que os atualizados códigos de segurança contra incêndios apresentam, principalmente nos EUA, são que alguns dos testes exigem que os fabricantes de baterias façam, de qualquer jeito, com que as baterias peguem fogo, independentemente do quão extremas sejam as condições para provocá-lo. Na maioria dos casos, é muito difícil iniciar um fogo sem antes desabilitar o BMS.

Seria razoável esperar que células com maior tolerância a abusos ou sistemas com melhores funcionalidades no BMS fossem reconhecidas por seu melhor desempenho em relação à segurança, mas os testes de fogo para aplicações estacionárias não consideram a probabilidade de uma bateria pegar fogo em uma aplicação real. Eles apenas exigem que o fogo seja iniciado de qualquer jeito e então que seja observado o quanto esse fogo se espalha. Se um fabricante não consegue demonstrar através de um teste de fogo em larga escala UL9540A que o design de seu sistema evita que o fogo se alastre, cada gabinete de bateria precisa ser instalado com 0,91 cm (um pé) de espaço livre em todos os lados, o que efetivamente anula os benefícios de um menor footprint daquele produto de íon-lítio em específico em relação às baterias de chumbo-ácido.

Embora esses requisitos dos códigos contra incêndios ainda estejam amadurecendo, é tecnicamente viável desenvolver sistemas com as atuais células de íon-lítio que evitem que o fogo se propague para fora do gabinete da bateria e essas soluções serão recompensadas com as vantagens de footprint comparadas com outras que precisem ter os 0,91cm de espaço livre. Com o tempo, os regulamentos devem se estabilizar e as soluções com melhor desempenho provavelmente ganharão participação de mercado.

## Monitoramento das Baterias de Íon-Lítio

O BMS em um sistema de baterias de íon-lítio monitora continuamente inúmeros parâmetros da operação para garantir a segurança. Como todos estes dados operacionais já estão armazenados na memória do BMS, é relativamente simples para o fabricante do BMS disponibilizar esses dados para sistemas externos através de uma conexão ModBus IP ou outro protocolo similar para aquisição de dados. Essa é uma das principais vantagens das baterias de íon-lítio em relação aos sistemas de chumbo-ácido onde qualquer sistema de monitoramento precisa ter seus sensores instalados.

Quando decidindo quais parâmetros da bateria serão monitorados externamente, deve-se tomar cuidado para não gravar tudo o que o BMS disponibiliza porque insights valiosos podem ficar perdidos em quantidades exageradas de dados.

Use o exemplo das tensões das células da bateria. Em sistemas de baterias de maior tensão, há normalmente mais de 100 grupos de células que têm a tensão medida pelo BMS, mas os valores individuais são muito menos importantes que a consistência entre todos estes valores. Em alguns casos, o BMS também proporciona as tensões máximas e mínimas das células em todo o sistema, e é a diferença entre estes dois extremos que pode dar uma melhor indicação das condições da bateria.

Não há padrões atuais regendo quais dados do BMS estão disponíveis para um sistema externo de monitoramento, então, é impossível definir uma estratégia de monitoramento que funcione para todos os casos. Em geral, dados de temperatura são relevantes, e os dados coletados durante uma carga ou descarga são muito mais valiosos para avaliar as condições da bateria do que os dados de operação quando o sistema está inativo.

Além disso, alguns modelos de BMS fornecem uma variável das condições (SOH, em inglês state-of-health) que é uma avaliação geral feita pelo sistema de controle do ponto de sua vida útil em que a bateria se encontra. Entretanto, não confie muito no valor de SOH sem saber como ele é calculado, pois diferentes soluções de BMS no mercado têm diferenças substanciais na sofisticação do algoritmo usado para computar este valor.

Por fim, a melhor maneira de monitorar um sistema de baterias de íon-lítio em um data center depende de quão bem integrado o BMS está com o controlador do UPS. Há vantagens operacionais no maior compartilhamento de dados entre esses dois controladores e, nos casos onde é alcançada uma integração mais estreita, pode ser possível monitorar os principais dados da bateria através da interface de monitoramento do UPS.

## Instalação, Manutenção e Descarte

Alguns sistemas de baterias de íon-lítio podem ser transportados quase totalmente montados enquanto outros precisam ser montados no site. Comprar um sistema empacotado pode economizar nos custos e no tempo de instalação.

Os módulos de baterias em si devem ser entregues testados na fábrica, mas podem não estar todos com o mesmo estado de carga quando entregues. A melhor prática é dar tempo ao BMS para balancear a tensão de todas as células antes de começar os testes funcionais. Além disso, assegure-se que as baterias estejam instaladas em uma temperatura ambiente estável por tempo suficiente para serem termicamente consistentes conforme medidas pelo BMS antes de fazer um ciclo de testes de carga ou descarga.

Em geral, a frequência de manutenção é menor para baterias de íon-lítio do que em baterias de chumbo-ácido porque os recursos de monitoramento remoto do BMS permitem a manutenção e substituição com base nas condições. A degradação também é mais previsível, então, o risco de uma queda súbita na capacidade é minimizado.

Além disso, os terminais em um módulo de bateria de íon-lítio não estão sujeitos a distorção como é o caso com os terminais das baterias de chumbo-ácido, então, o reaperto das conexões não é uma necessidade constante. O integrador das baterias de íon-lítio que você escolher deve fornecer protocolos específicos de manutenção com base no design do sistema.

As baterias de íon-lítio são recicláveis e o custo de reciclagem é atualmente devido, em grande parte, pelo processo de desmontagem necessário para extrair as células da construção como um todo. O processo de reciclagem está se tornando progressivamente mais eficaz na extração de materiais valiosos de uma bateria de íon-lítio, melhorando a potencial rentabilidade de reciclar. Isso pode levar a uma redução do custo nos próximos anos.

Embora seja impossível prever os custos futuros, a indústria de reciclagem do íon-lítio estará mais madura quando a atual geração das baterias de íon-lítio alcançar o final de sua vida útil e continuar aproveitando a escala e a experiência da indústria automotiva.

## Mudando para as Baterias de Íon-Lítio

As baterias de íon-lítio alcançaram um estágio de maturidade onde podem ser consideradas como uma substituição viável para as baterias de chumbo-ácido em aplicações de UPS. Apesar da falta de dados de operação disponíveis, os testes de vida útil em anos indicam que as baterias de íon-lítio podem entregar uma vida útil significativamente maior que as de chumbo-ácido sem ter o risco grande de falhar quando a capacidade estiver abaixo de 80%. Além de assegurar a segurança, os sistemas de gerenciamento de baterias de íon-lítio podem ajudar a maximizar a vida útil da bateria e minimizar os downtimes ao permitir o monitoramento contínuo que dá suporte à manutenção com base nas condições da bateria. Um integrador experiente pode ajudá-lo a avaliar o custo total de propriedade das baterias de íon-lítio em uma aplicação em particular em comparação com o das baterias de chumbo-ácido.

