

AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO PARA MOBILIDADE ELÉTRICA SUSTENTÁVEL: UM FOCO NA DEGRADAÇÃO

Data de submissão: 12/03/2024

Data de aceite: 01/04/2024

Jordan Passinato Sausen

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/8776511917988173>

Bruno Knevitz Hammerschmitt

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/4865207592578956>

Marcelo Bruno Capeletti

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/1922799731958383>

Joelson Lopes da Paixão

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/8009856508464151>

Carlos Henrique Barriquello

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/4127396473202565>

Alzenira da Rosa Abaide

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica
Santa Maria – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Paulo Sérgio Sausen

Universidade Regional do Noroeste do
Estado do Rio Grande do Sul, Programa
de Pós-Graduação em Modelagem
Matemática Aplicada
Ijuí – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

RESUMO: O crescente impacto das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes preocupações ambientais têm impulsionado avanços significativos na tecnologia de baterias recarregáveis, especialmente em relação à mobilidade urbana sustentável. A exploração da característica bidirecional dos veículos

elétricos como recurso energético distribuído reflete uma tendência promissora em estratégias de gerenciamento energético que buscam lidar com a intermitência da geração renovável. No entanto, é importante enfrentar desafios como a degradação da bateria devido ao aumento de ciclos de carga e descarga. Este capítulo se propõe a descrever o cenário tecnológico atual das baterias de íons de lítio, explicar suas especificações, além de descrever os principais mecanismos de degradação no contexto da mobilidade urbana. Diante do cenário atual, torna-se imprescindível compreender profundamente o funcionamento, a degradação associada ao seu uso, bem como os desafios enfrentados pelos controladores que integram essa tecnologia no sistema elétrico de potência a partir de trocas bidirecionais de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Mobilidade elétrica sustentável; baterias de íons de lítio; degradação da bateria; V2G.

ADVANCES IN LITHIUM ION BATTERY TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE ELECTRIC MOBILITY: A FOCUS ON DEGRADATION

ABSTRACT: The increasing impact of greenhouse gas emissions and subsequent environmental concerns have spurred significant advancements in rechargeable battery technology, particularly concerning sustainable urban mobility. The utilization of bidirectional capabilities in electric vehicles as a distributed energy resource reflects a promising trend in energy management strategies to address the intermittency of renewable generation. However, challenges such as battery degradation due to increased charge and discharge cycles must be addressed. This article aims to elucidate the current technological landscape of lithium-ion batteries, delineate their specifications and outline the primary degradation mechanisms within the context of urban mobility. Given the current scenario, it becomes imperative to deeply comprehend their operation, degradation mechanisms, as well as the challenges faced by controllers integrating this technology into the grid with bidirectional energy exchanges.

KEYWORDS: Sustainable electric mobility, Lithium-ion batteries, Battery degradation, V2G.

INTRODUÇÃO

O crescente impacto das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes preocupações ambientais têm impulsionado avanços significativos na tecnologia de baterias recarregáveis, especialmente em relação à mobilidade urbana sustentável no contexto de redes elétricas inteligentes. A exploração da característica bidirecional dos Veículos Elétricos (VEs) e dos armazenadores estáticos para aproveitar recursos energéticos distribuídos reflete uma tendência promissora em estratégias de gerenciamento energético que buscam lidar com a intermitência da geração renovável. No entanto, a eficácia e a durabilidade dessas baterias estão intimamente ligadas à sua capacidade de manter o desempenho ao longo do tempo, enfrentando desafios significativos de degradação.

Este capítulo se propõe a descrever o cenário tecnológico atual das BIL, explicar seus princípios de funcionamento e especificações, além de analisar os principais mecanismos de degradação. A compreensão dos mecanismos subjacentes à degradação é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e para garantir a segurança e a confiabilidade das BIL em aplicações bidirecionais com o sistema elétrico de potência.

Ao longo deste capítulo, examinaremos os fatores externos e internos que contribuem para a degradação das BIL, destacando como variações na temperatura, taxa de carga/descarga e profundidade de descarga podem afetar diretamente sua vida útil e desempenho. Além disso, exploraremos as diferentes formas de degradação, desde a formação de camadas de interface sólida até a fratura dos eletrodos, e discutiremos os efeitos adversos desse processo, incluindo a diminuição da capacidade e potência, além de problemas de segurança.

Por fim, analisaremos a relação entre a profundidade de descarga (DoD) e a degradação das BIL, fornecendo insights sobre como diferentes níveis de DoD podem afetar sua estrutura e capacidade. Ao compreendermos melhor a complexidade da degradação em BIL, estaremos preparados para enfrentar os desafios associados ao uso dessa tecnologia em aplicações Veículo à Rede (*Vehicle-to-Grid* - V2G) e desenvolver soluções inovadoras para garantir seu desempenho e confiabilidade no contexto da mobilidade urbana sustentável das redes elétricas inteligentes.

BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO: CENÁRIO ATUAL

A tecnologia de baterias recarregáveis compostas por íons de lítio, concebida por um pesquisador da Exxon Mobil Corporation na década de 1970 e inicialmente comercializada pela Sony em 1991, representa uma inovação que revolucionou diversos setores, desde eletrônicos de consumo até VEs (BLOOMBERG NEF, 2019). Seu princípio básico de funcionamento envolve o transporte de íons de lítio através de um eletrólito, movendo-se entre um cátodo positivo e um ânodo negativo durante os processos de carregamento/descarregamento. Com o uso de materiais variados no cátodo, como cobalto, níquel e manganês, a capacidade de armazenamento e as aplicações das BIL foram significativamente ampliadas, abrangendo agora os VEs que se integram aos sistemas de potência em trocas bidirecionais de energia.

Por ser seu único meio de armazenamento energético, a bateria determina a autonomia do VE e devido ao custo, peso e volume elevados, se torna objeto de frequente estudo. O panorama composto por projetos de pesquisa e desenvolvimento em associação a produção em massa de baterias estão conduzindo à rápida redução de custos e aumento de densidade energética, indicando, portanto, constantes sinais de aperfeiçoamentos que confirmam a continuidade da tendência de estreitamento da lacuna de preço entre VEs e veículos de combustão interna (BAJOLLE; LAGADIC; LOUVET, 2022).

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia está elaborando um programa multisetorial para a região do Vale do Jequitinhonha, que se destaca mundialmente na produção de minério (MME, 2024). Essa ação marca a entrada do país no mercado global de lítio para baterias com o suporte ao projeto de uma das maiores produtoras mundiais de Lítio (BLOOMBERG LÍNEA, 2024).

Apesar do contínuo crescimento da demanda por BIL em VEs e sistemas de armazenamento de energia estacionários, a superprodução e a capacidade excessiva de baterias moldarão a dinâmica do mercado em 2024. Prevê-se uma queda nos preços dos pacotes de BIL devido à queda nos preços de matérias-primas, componentes e em função do aumento da capacidade de produção em toda a cadeia de valor da bateria, enquanto o crescimento da demanda ficou aquém das expectativas da indústria (BLOOMBERG NEF, 2023). A Figura 1 demonstra que, após um aumento sem precedentes em 2022, o preço dos pacotes de baterias caiu 14% em 2023, atingindo um recorde de US\$ 139/kWh.

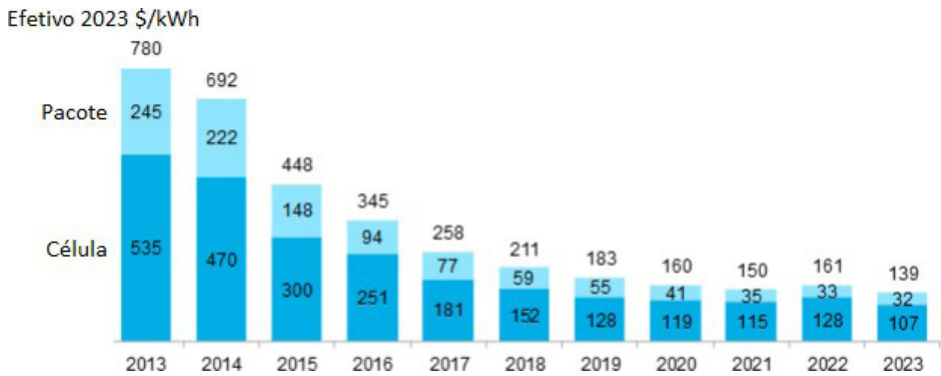


Figura 1 – Histórico de evolução de custo das BIL.

Fonte: (BLOOMBERG NEF, 2023).

Os VEs são equipados com um conjunto de BIL composto por módulos individuais, formados por células conectadas em série e paralelo. Devido às suas propriedades químicas, as BIL continuam a ser a escolha mais vantajosa para a mobilidade elétrica. Dentre as principais características, destacam-se longa vida útil, alta densidade energética e eficiência superior em comparação com outros tipos de baterias e, especialmente, a capacidade razoável de ciclo profundo na implementação do fornecimento de energia do V2G (YILMAZ; KREIN, 2013).

COMPREENDENDO AS ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Esta seção explica as especificações presentes nos datasheets usados para descrever células, módulos e pacotes de baterias (MIT, 2008). O estado de carga (*State of Charge* – SoC) é uma expressão da capacidade atual da bateria na forma de porcentagem em função de sua capacidade máxima. A estimativa do SoC sempre foi um desafio e sua acurácia não é a mesma em detrimento a quantidade de líquido combustível em um tanque do veículo a combustão. Geralmente o SoC é calculado usando a integral da corrente para determinar alterações na capacidade da bateria ao longo do tempo.

A profundidade de descarga (DoD) é a porcentagem de capacidade da bateria que foi descarregada, expressa na forma de porcentagem em função de sua capacidade máxima. Enquanto a tensão terminal da bateria é medida em seus terminais com carga conectada, variando de acordo com o SoC e a corrente de des/carregamento, a tensão de circuito aberto (*Open-Circuit Voltage* – OCV) é medida em seus terminais sem carga conectada, de modo que quanto maior o SoC, maior a OCV. Essas métricas são importantes para determinar as condições da bateria.

A tensão nominal refere-se a tensão de operação da bateria. A tensão de *cut-off* é a mínima tensão de operação permissível, a qual geralmente define o estado “vazio” da bateria (SoC = 0%). A capacidade nominal refere-se à capacidade de descarga total, expressa em Amperes-hora (Ah), a uma determinada taxa de descarga (*C-rate*¹) a partir de 100% de SoC até atingir a tensão de *cut-off* (MIT, 2008). A energia nominal refere-se à capacidade total, expressa em Watt-hora (Wh), disponível quando a bateria é descarregada a uma determinada taxa de descarga a partir de 100% de SoC até atingir a tensão de *cut-off*. A capacidade, dada em Ah ou Wh, relata diretamente o número de mols (átomos e moléculas) de Lítio que vão e voltam entre os eletrodos positivo e negativo durante os processos de des/carregamento.

O ciclo de vida é dado em função de uma DoD específica e determina o número de ciclos de carga/descarga que a bateria pode realizar antes de atingir um critério de desempenho específico. O ciclo de vida é estimado para condições específicas des/carga, uma vez que a vida operacional da bateria é afetada por diversos fatores, em especial, a profundidade dos ciclos (DoD). Tipicamente, o final da vida de uma bateria é definido quando a bateria degrada até o ponto onde apenas 70-80% da capacidade que a mesma detinha ao início da vida remanesce sob condições nominais de operação.

Os fabricantes de VEs devem contabilizar a perda de capacidade que ocorre com o passar do tempo, cuja solução do problema se dá por meio do sobredimensionamento da bateria (BATTERY UNIVERSITY, 2020). Conforme a bateria se degrada, a faixa de DoD deve se expandir para manter a mesma autonomia de quando nova, conforme ilustrado na Figura 2 a partir de três faixas de saúde da bateria (*State of Health* – SoH).

1. A taxa “C” é uma unidade de medida em que a bateria é carregada ou descarregada em relação a sua capacidade máxima. Usualmente medida em 1C, a capacidade significa que uma bateria de 1 kWh completamente carregada deve prover 1 kW durante 1 hora. A taxa 1C também significa uma carga completa em 1 hora, 2C carga completa em 30 minutos e assim por diante (MIT, 2018).

Geralmente a recarga das células das baterias ocorre em duas etapas, conforme demonstra a Figura 3. Enquanto a primeira etapa apresenta uma corrente constante e uma tensão com característica de crescimento exponencial, a segunda etapa compreende uma tensão constante e uma corrente com características semelhantes a uma função logarítmica.

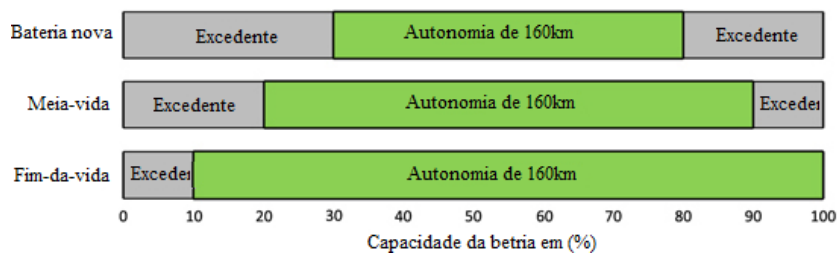


Figura 2 - Autonomia em função da performance da bateria.
 Fonte: (BATTERY UNIVERSITY, 2021).

O tempo total necessário para a recarga completa do veículo depende de diversos fatores, com destaque para o estado de carga (SoC) da bateria, taxa de recarga suportada e a capacidade de carga elétrica da bateria (PAPADOPOULOS et al., 2010). Quanto maior for a potência de carregamento menos tempo será requerido para a recarga completa, ao contrário da capacidade da bateria. Portanto, o período em que o veículo permanecerá conectado à rede para recarga é dependente das condições da bateria e características de carregamento.

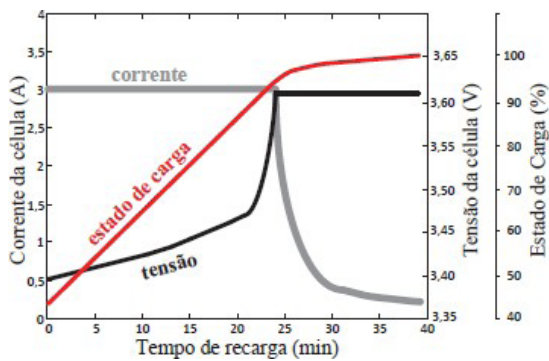


Figura 3 - Curva característica de carregamento de BIL.
 Fonte: RODRIGUES, et. al (2014).

É essencial reconhecer que um dos principais desafios associados à tecnologia bidirecional dos VEs é a minimização da degradação das baterias, visto que é bem estabelecido na literatura científica que as BIL enfrentam desafios de envelhecimento e degradação ao longo do tempo (UDDIN et al., 2017), principalmente quando submetida a vários ciclos de

carreamento/descarregamento frequentemente. Desse modo, a tarefa de compreender os mecanismos de envelhecimento e desgaste de baterias é particularmente complicada uma vez que a degradação se origina a partir de uma variedade de fatores interligados.

Tendo em vista que as baterias representam um dos componentes mais significativos e dispendiosos dos VEs, o custo associado à degradação tem um impacto direto nos benefícios econômicos da sua aplicação na mobilidade elétrica e como ferramenta de suporte a operação de sistemas elétricos de potência, cujos mecanismos serão explorados em detalhes.

MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO EM APLICAÇÕES BIDIRECIONAIS

Na literatura, existem diversos esquemas para utilizar as baterias de VEs ao invés, ou em adição, a baterias estacionárias para lidar com a intermitência da geração renovável em sistemas elétricos de potência (AMJAD et al., 2018). Dentre os desafios para adoção da operação bidirecional dos VEs estão a degradação da bateria causada pelos ciclos frequentes, custos adicionais para conversores bidirecionais, questões de medição e preocupações de interface, bem como proteção anti-ilhamento e outros itens de interconexão que devem ser contempladas para implementação efetiva de algoritmos de controle (LIU et al., 2023).

A bateria é um dispositivo que converte energia química em energia elétrica e vice versa. O princípio operativo de uma bateria de íons de lítio consiste de um cátodo (eletrodo positivo), um ânodo (eletrodo negativo) e um eletrólito como condutor. O cátodo é de óxido de metal enquanto o ânodo é de carbono poroso (SMITH et al., (2012). Durante a descarga, os íons fluem do ânodo ao cátodo através do eletrólito e separador. O processo de carregamento reverte essa direção e os íons fluem de cátodo ao ânodo (YUE et al., 2019).

Considerando as complexas reações eletroquímicas dos elétrons de lítio e a influência de muitos fatores externos nas reações internas, diferentes mecanismos de degradação e efeitos podem ocorrer. Para melhor compreender a degradação das BIL, quatro aspectos cruciais merecem destaque: fatores externos, fatores internos, formas de degradação e seus efeitos, conforme sumarizado na Figura 4.

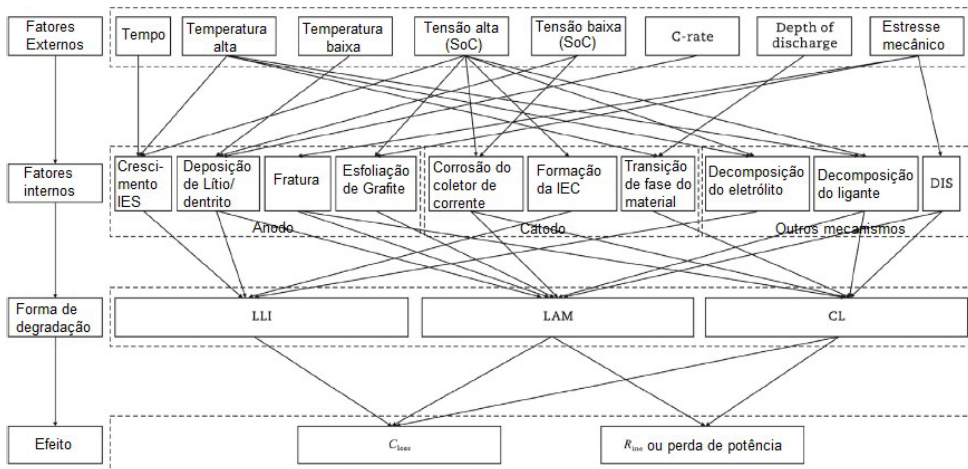


Figura 4 – Efeitos de diferentes fatores na degradação.

Fonte: Adaptado de (LIU et al., 2023).

Os fatores externos desempenham um papel significativo na degradação das BIL. Variações na temperatura ambiente, taxa de carga/descarga (*C-rate*), profundidade de descarga (DoD) e tempo de carregamento influenciam diretamente a vida útil da bateria (TIAN et al., 2020). Por exemplo, altas taxas de *C-rate* podem resultar em acumulação de dendritos de lítio na superfície do eletrodo, enquanto uma temperatura ambiente elevada acelera a degradação interna da bateria, aumentando a resistência interna e promovendo o espessamento da Interface de Eletrólito Sólido (IES), nome dado a acumulação de material no ânodo resultante da decomposição do eletrólito (WANG et al., 2018).

Internamente, a estrutura e composição das BIL são afetadas por vários processos mecânicos, térmicos e químicos que contribuem para sua degradação. A formação de IES, fraturas de eletrodos e formação de dendritos de lítio são alguns dos principais mecanismos de degradação interna (MATSUDA et al., 2019). A perda gradual de material ativo nos eletrodos, como resultado desses processos, contribui para a diminuição da capacidade e da resistência interna das baterias.

As formas de degradação das BIL são multifacetadas, envolvendo vários processos complexos. A degradação do ânodo ocorre principalmente devido à formação da camada de IES, fraturas de eletrodos e crescimento de dendritos de lítio (YANG et al., 2017a). Por outro lado, a degradação do cátodo é influenciada pela perda de material ativo, principalmente devido à corrosão causada por ácido fluorídrico e à formação de camadas de interface cátodo-eletrólito (CEI) (CHEN et al., 2007). Tanto o ânodo quanto o cátodo sofrem perdas de capacidade devido a mudanças na estrutura cristalina dos materiais, fraturas e outros processos internos.

Os efeitos da degradação das LIB são significativos e abrangentes. Além da diminuição da capacidade e da vida útil, a degradação das BIL pode levar a sérios problemas de segurança, como curtos-circuitos e explosões (VERBRUGGE et al., 2020). A capacidade de prever e mitigar esses efeitos é crucial para garantir o desempenho e a segurança contínuos das BIL em trocas bidirecionais de energia nas redes elétricas inteligentes.

As principais métricas convencionais predominantes para avaliar a degradação são o estado de carga (SoC) para o envelhecimento por calendário e a profundidade de descarga (DoD) para a degradação em função dos ciclos. Enquanto a primeira afeta a autonomia do VE, uma vez que reduz a capacidade de armazenamento, a segunda se traduz no aumento de resistência interna ou impedância da célula, a qual limita a capacidade de potência, reduzindo a eficiência do veículo.

ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DA DOD

A maioria dos estudos aponta que a capacidade de BIL decai com os ciclos de carregamento e a magnitude dessa perda é dependente do número de ciclos e da DoD submetida a bateria durante esses ciclos (LIU et al., 2023). Neste sentido, em conjunto com a frequência de ciclos, a métrica de análise de degradação predominante em função do ciclo é a DoD SMITH et al., (2017). Conforme a DoD é aumentada, principalmente em relação à descarga profunda (i.e., próximo a extremidade inferior do SoC), a degradação é intensificada. Entretanto, a influência da DoD na vida útil de uma bateria é complexa.

Uma compilação de estudos permite ilustrar a perda de capacidade em função do aumento de ciclos e os possíveis mecanismos internos em diferentes estágios de degradação em função da DoD na Figura 5. Em síntese, os efeitos de altas DoDs intensificam a expansão volumétrica e estressam os eletrodos da bateria, resultando em alterações severas de estrutura e volume que ocasionam perda de capacidade e potência.

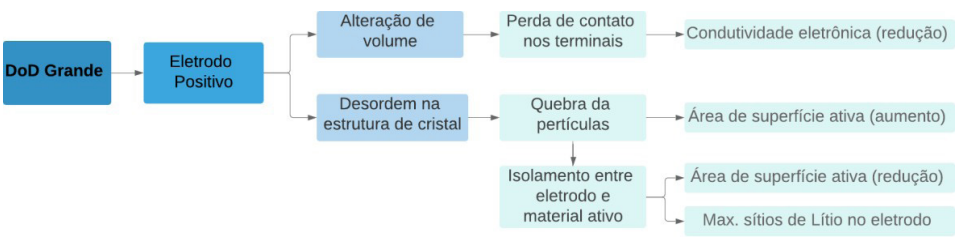


Figura 5 - Degradação de BIL em função da DoD.

Fonte: Adaptado de (UDDIN et al., 2016).

Cargas elétricas e térmicas também causam degradações eletroquímica e mecânica oriundas de alterações volumétricas do material ativo. Diante disto, para controlar a degradação é necessário um acompanhamento acurado do histórico dos fatores de estresse em função de um determinado ciclo de utilização da bateria, os quais são condicionados a utilização do veículo. Bem como de um sistema de controle adequado para o uso de baterias em sistemas elétricos de potência, que tendem a aumentar a DoD em função do uso V2G.

É difícil mensurar precisamente a degradação da bateria em serviços V2G devido ao processo complexo, o qual é baseado em uma série de fatores e ocorre preponderantemente devido a reações químicas secundárias durante o armazenamento e reações eletroquímicas secundárias durante os ciclos, se manifestando em diferentes formas (UDDIN et al., 2017). Enquanto a primeira diz respeito ao envelhecimento natural, por ação do tempo, a segunda se dá em função dos ciclos de carga e descarga.

DESAFIOS DO V2G

A taxa de degradação é fortemente dependente de condições operacionais da bateria. A partir de uma revisão de diferentes modelos de degradação disponíveis na literatura, ainda não há um consenso comum em relação ao potencial benefício econômico do V2G pois a avaliação particular de cada caso é condicionada a diferentes considerações e cada trabalho apresenta condições operativas diferentes para sustentar seus resultados (AHMADIAN et al., (2018).

O principal problema da associação de custos de degradação de bateria em esquemas de controle da recarga é a dificuldade em descrever as particularidades características dos diferentes tipos de bateria, uma vez que seus ciclos de vida variam amplamente de acordo com a composição química e processo de fabricação. Embora essas diferenças possam ser distinguidas por meio de parâmetros variáveis, dados experimentais devem ser conhecidos para determinar os parâmetros particulares de uma bateria específica. Os modelos de bateria são obtidos por meio do ajuste de curvas experimentais ou por meio da exploração da sua estrutura química, a qual também têm seus modelos derivados a partir de dados experimentais.

Usualmente dados relativos ao ciclo de vida de baterias são disponibilizados em termos de Contagem de Ciclos Factiveis (CCF) pelos fabricantes, os quais são relacionados ao estado de carga (SoC). Porém, o uso da bateria ocorre em diversos níveis de profundidade de descarga (DoD), logo, o uso desse tipo de dados é limitado a uma estimativa grosseira do ciclo de vida da bateria.

A otimização do controle inteligente pode garantir que a taxa de degradação adicional ao uso dos VEs em operações V2G seja minimizada ou até mesmo, em alguns casos, a vida útil da bateria pode ser estendida. Um exemplo é a manipulação do SoC do VE de tal forma que o ciclo ocorra na região de menor resistência interna, de forma a minimizar a degradação (UDDIN et al., (2017). Desse modo, algumas pesquisas visam aprimorar o ciclo de vida útil das baterias, motivados pela redução de custo por unidade de energia armazenada (ASEF et al., 2021).

CONCLUSÃO

O capítulo abordou de forma abrangente e detalhada o cenário atual das BIL, desde sua evolução tecnológica até os desafios enfrentados em aplicações bidirecionais, com foco na integração de VEs aos sistemas elétricos de potência. Foram discutidos diversos aspectos fundamentais para compreender seus princípios operativos e a degradação associada ao seu uso.

Variações na temperatura, taxa de carga/descarga, profundidade de descarga e tempo de carregamento foram identificados como fatores externos significativos que influenciam diretamente a vida útil das BIL. Internamente, os processos mecânicos, térmicos e químicos contribuem para a degradação das baterias.

Foram discutidos os principais mecanismos de degradação, tanto no ânodo quanto no cátodo, destacando a formação de IES, fraturas de eletrodos e crescimento de dendritos de lítio como processos internos críticos que levam à perda gradual de capacidade e aumento da resistência interna.

Além da diminuição da capacidade e da vida útil, que impactam diretamente na autonomia e potência dos VEs, bem como sua capacidade de fornecer energia em situações V2G, a degradação das BIL pode levar a sérios problemas de segurança, como curtos-circuitos e explosões.

Foi explorada a relação entre a DoD e a degradação das baterias, demonstrando como DoDs mais elevadas podem intensificar a degradação, afetando a estrutura e a capacidade das BIL. Diante do cenário atual, torna-se imprescindível compreender profundamente seu funcionamento, os estágios e mecanismos de degradação, bem como os desafios enfrentados pelos controladores que integram essa tecnologia no sistema elétrico de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS, e Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Instituições Brasileiras.

REFERÊNCIAS

AHMADIAN, A.; SEDGHI, M.; ELKAMEL, A.; FOWLER, M.; GOLKAR, M. A. **Plug-in electric vehicle batteries degradation modeling for smart grid studies: Review, assessment and conceptual framework**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 81, p. 2609-2624, 2018.

ASEF, P.; MILAN, M.; LAPHORN, A.; PADMANABAN, S. **Future Trends and Aging Analysis of Battery Energy Storage Systems for Electric Vehicles**. Sustainability, v. 13, p. 13779, 2021.

BAJOLLE, H.; LAGADIC, M.; LOUVET, N. **The future of lithium-ion batteries: Exploring expert conceptions, market trends, and price scenarios**. Energy Research & Social Science, v. 93, p. 102850, 2022.

BLOOMBERG LÍNEA. **Projeto em Minas Gerais marca entrada do Brasil no mercado global de lítio**, 2022. Disponível em: <<https://www.bloomberglinea.com.br/2022/06/22/projeto-em-minas-gerais-marca-entrada-do-brasil-no-mercado-global-de-litio/>>.

BLOOMBERG NEF. **Battery Reality: There's Nothing Better Than Lithium-Ion Coming Soon**. Nova Iorque, 2019. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-04-03/battery-reality-there-s-nothing-better-than-lithium-ion-coming-soon>>.

BLOOMBERG NEF. **Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh**. Nova Iorque, 2023. Disponível em: <<https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>>.

CHEN, Y.; WANG, C.; LIU, G.; et al. **Selection of conductive additives in Li-ion battery cathodes: a numerical study**. Journal of the Electrochemical Society, v. 154, p. A978, 2007.

MIT, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **Introduction to batteries**. Electric Vehicle Team, 2018.

MME, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano social para uso dos recursos do lítio brasileiro é prioridade para o Ministério de Minas e Energia**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/plano-social-para-uso-dos-recursos-do-litio-brasileiro-e-prioridade-para-o-ministerio-de-minas-e-energia>>.

PAPADOPOULOS, ET AL. **Predicting Electric Vehicle Impacts on Residential Distribution Networks with Distributed Generation**. 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010.

RODRIGUES, M. d. B.; et al. **Conexão de Veículos Elétricos à Rede de Energia Elétrica para Recarga de Baterias: Uma Visão Geral**. Eletrônica de Potência – SOBRAEP, v. 19, n° 2, p. 193-207, 2014.

SMITH, K. et al. **Comparison of plug-in hybrid electric vehicle battery life across geographies and drive cycles**. SAE Technical Papers, 2012.

TIAN, H.; QIN, P.; LI, K.; et al. **A review of the state of health for lithium-ion batteries: research status and suggestions**. Journal of Cleaner Production, v. 261, p. 120813, 2020.

UDDIN, K. et al. **On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal V2G facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system**. Energy, v. 133, p. 710–722, 2017.

UDDIN, K. et al. **Characterising lithium-ion battery degradation through the identification and tracking of electrochemical battery model parameters**. Batteries, v. 2, n. 2, 2016.

VERBRUGGE, M. W.; XIAO, X.; BAKER, D. R. **Experimental and theoretical examination of low-current overcharge at lithiated-graphite porous electrodes**. Journal of The Electrochemical Society, v. 167, p. 080523, 2020.

WANG, P.; WANG, L.; WANG, S.; et al. **Influence of temperature on discharge capacity of 18650 ternary lithium batteries**. Technology Mark, v. 25, p. 10e14, 2018.

YANG, H.; ZHANG, S.; QIU, J.; QIU, D.; LAI, M.; DONG, Z. **CVaR-constrained optimal bidding of electric vehicle aggregators in day-ahead and real-time markets**. IEEE Trans. Ind. Inf., v. 13, p. 2555-2565, 2017.

YILNAZ, M.; KREIN, P. T. **Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 28, p. 5673–5689, 2013.

YONGTAO LIU, CHUANPAN LIU, YONGJIE LIU, FEIRAN SUN, JIE QIAO, TING XU. **Review on degradation mechanism and health state estimation methods of lithium-ion batteries**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), v. 10, p. 578-610, 2023.

YUE, M. et al. **Review on health-conscious energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Degradation models and strategies**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 44, p. 6844–6861, 2019.