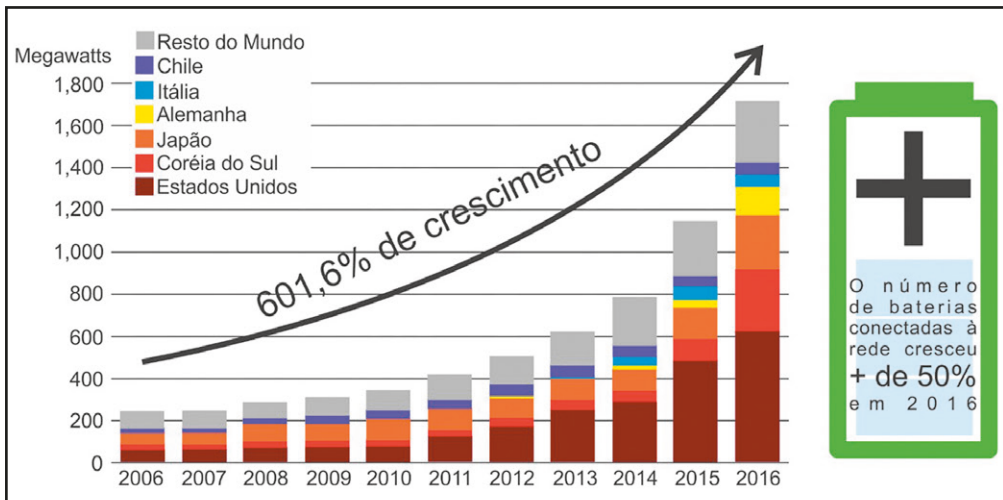


INTRODUÇÃO AO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A energia pode ser armazenada de diversas formas, tais como ar comprimido, bombeamento de água, baterias eletroquímicas, hidrogênio ou ainda gás natural, diesel, gasolina, entre outros combustíveis. O foco principal apresentado aqui é sobre sistemas de armazenamento baseados em baterias eletroquímicas. Sistemas de armazenamento de energia em baterias foram decisivos na evolução recente da sociedade, como exemplos disso, podem ser citados: relógios, brinquedos, máquinas fotográficas, rádios, computadores e ferramentas.

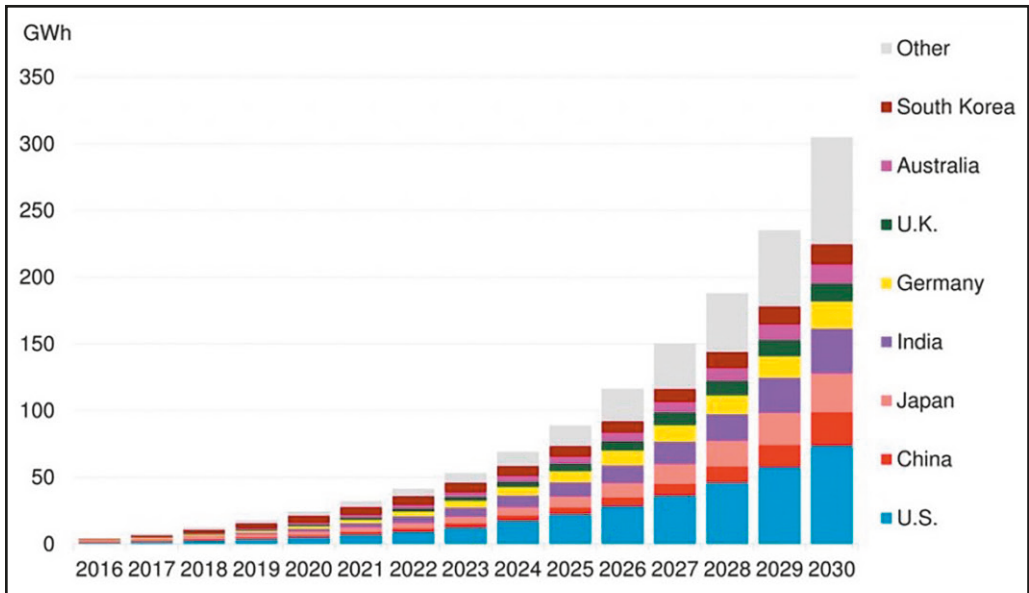
Figura 1.1 Potência instalada em sistemas de armazenamento conectados à rede elétrica por país, entre 2006 e 2016, sem considerar usinas reversíveis (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2018)



A potência instalada de sistemas de armazenamento de energia tem aumentado ano a ano. Na Figura 1.1 é possível verificar que o crescimento entre 2006 e 2016 foi de mais de 600 %, chegando a 1,7 GW instalados em 2016, desconsiderando sistemas baseados em usinas reversíveis (do inglês, *non-pumped hydro*). O crescimento é também expressivo observando-se apenas os dois últimos anos do gráfico, de 2015 para 2016, onde houve crescimento de 49,8 %, aumentando a potência instalada de 1,1 GW para 1,7 GW. É possível ainda notar que Estados Unidos, Coreia do Sul e Japão representam mais de 60 % da potência instalada em sistemas de armazenamento no mundo até 2016.

Na Figura 1.2 é possível verificar que se espera um crescimento acentuado do uso de baterias, saindo da faixa de poucos megawatt-hora em 2016 para mais de 300 gigawatt-hora em 2030. Esta figura considera a projeção da capacidade de armazenamento total das baterias ao invés da potência instalada, como ilustrado na figura anterior. Verifica-se que China e Índia, que não estavam no gráfico de potência instalada, devem entrar no mercado, agressivamente, alcançando grande potencial de armazenamento até 2030. Os Estados Unidos devem se manter como o país com maior capacidade de armazenamento neste mesmo período, principalmente por conta do grande número de indústrias fabricantes no país, dentre as quais se destaca a Tesla.

Figura 1.2 Projeção de capacidade de armazenamento de energia por país até 2030 de baterias de lítio (BloombergNEF, 2017)



1.1 CUSTOS DE FABRICAÇÃO E PREÇOS DE COMERCIALIZAÇÃO

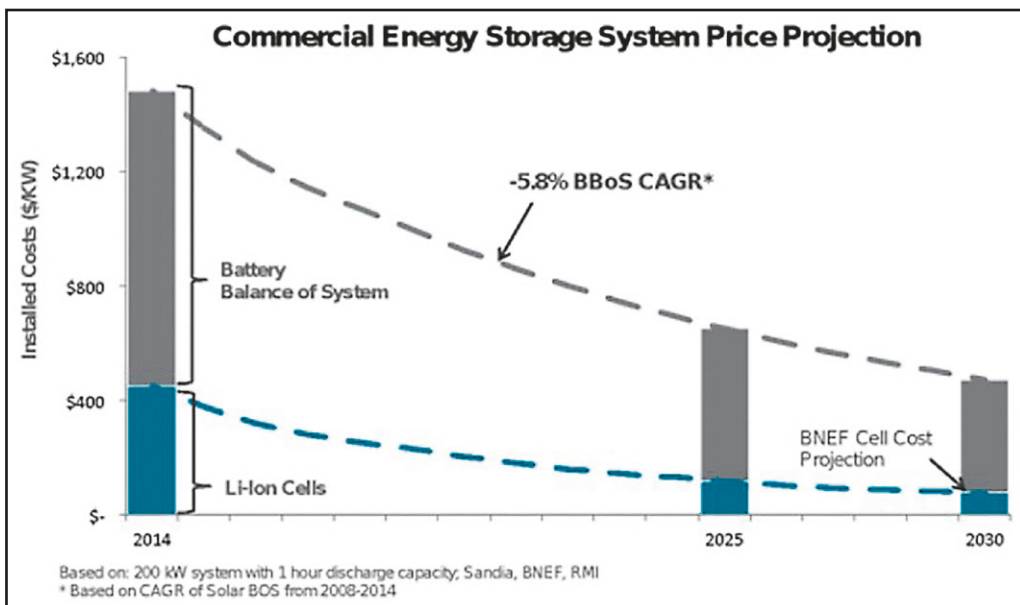
Nos últimos anos, as baterias eletroquímicas ganharam escalabilidade devido à redução do custo e ao aumento das densidades de potência e de energia (Zu & Li, 2011). Além disso, 10 novas *gigafactories* foram anunciadas em 2017, acelerando a corrida pela redução dos custos de fabricação.

A previsão desses custos é alvo frequente de estudos, passados e presentes, dado seu potencial impacto de negócio. A Figura 1.3 apresenta dois componentes principais do preço dos sistemas de baterias:

- O conjunto de células propriamente ditas, que constituem a bateria;
- Os serviços e instalações necessários para integrar a bateria na rede do sistema elétrico de potência, denominado pela sigla BOS (do inglês *Balance of System*), que inclui todos os outros custos, inclusive do sistema de gerenciamento das baterias, da eletrônica de potência e de seus controles necessários para transformar a corrente contínua, descarregada ou carregada pelas células, em corrente alternada, adequada à conexão com a rede elétrica.

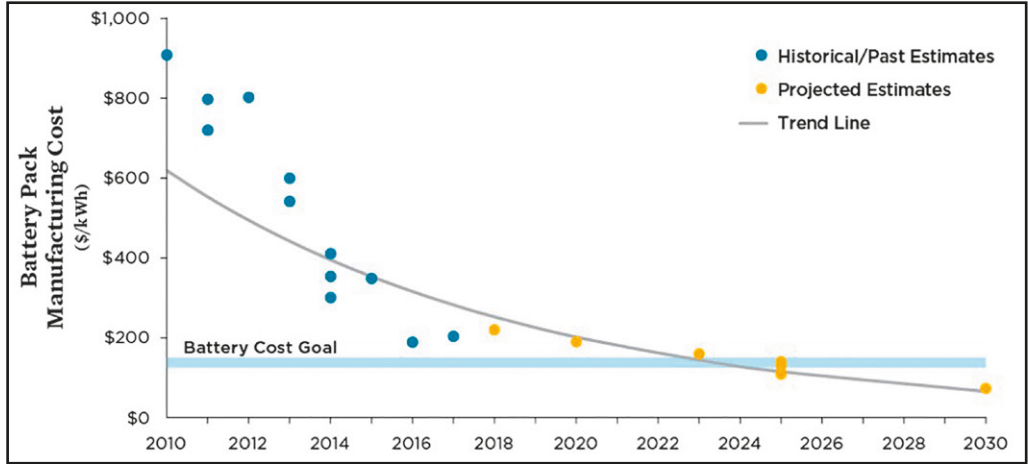
Desta forma, a comparação do preço exclusivamente de baterias de lítio, tanto para utilização em veículos elétricos como para armazenamento conectado na rede elétrica, pode ser feita de forma direta. Estas aplicações podem utilizar o mesmo tipo de baterias, sendo que o desenvolvimento de seus mercados contribui na redução do preço, reciprocamente.

Figura 1.3 Composição do preço de sistemas de armazenamento em baterias de lítio e sua previsão até 2030



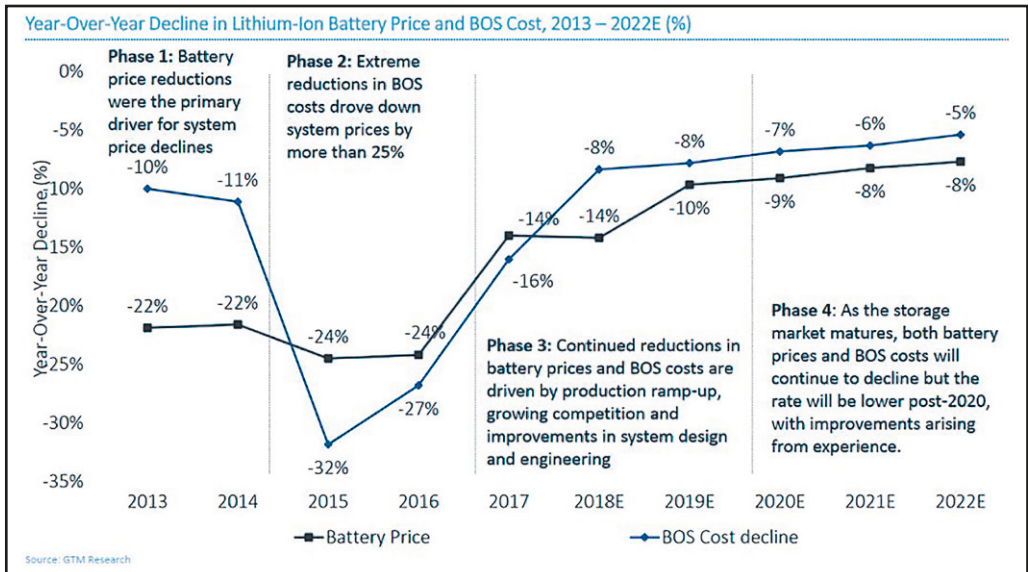
Na Figura 1.4 é apresentada a redução do custo de manufatura das baterias utilizadas em veículos elétricos até 2017 e uma projeção para sua continuidade até 2030. É possível verificar nessa figura que em 2024 a meta de redução de custos de fabricação seja alcançada. Essa meta foi baseada em múltiplos estudos, tanto da academia quanto de estimativas de fabricantes de veículos elétricos, e representa o custo no qual os veículos elétricos se tornam competitivos (Union of Concerned Scientists, 2018).

Figura 1.4 Evolução dos custos de manufatura de baterias de lítio utilizadas em veículos elétricos (do inglês *battery pack*)



Na Figura 1.5 é ilustrada a queda de preços de baterias de lítio e os custos de fabricação até 2017, incluindo a projeção de redução até 2022. Verifica-se que há redução do custo anualmente em todo o período, com quedas significativas em 2015 e 2016.

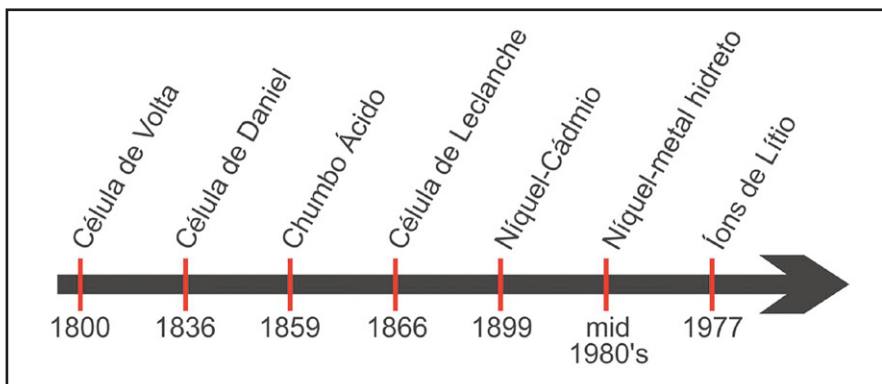
Figura 1.5 Redução de custo da bateria e do sistema de equilíbrio (BOS) por ano até 2017 e projeção da redução para o período entre 2018 e 2022



1.2 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS

As baterias se classificam, fundamentalmente, em células primárias e secundárias. As primárias não são recarregáveis enquanto as secundárias permitem recarga. A Figura 1.6 ilustra, na linha do tempo, a evolução desses dois tipos de baterias.

Figura 1.6 Linha do tempo das principais tecnologias de baterias (Whittingham, 2012)



A literatura especializada acredita que a primeira bateria foi inventada no tempo do Império Arsácida da Pérsia e ficou conhecida como Bateria de Bagdá. Contudo, a pilha de Volta é considerada a primeira bateria inventada na idade contemporânea, alternando discos de zinco e cobre separados por cartões que utilizam uma solução de salmoura como eletrólito.

A célula de Volta evoluiu para a célula de Daniel, que possuía dois eletrólitos, que por sua vez evoluiu para a célula de Leclanche, que utiliza zinco como ânodo e carbono como cátodo.

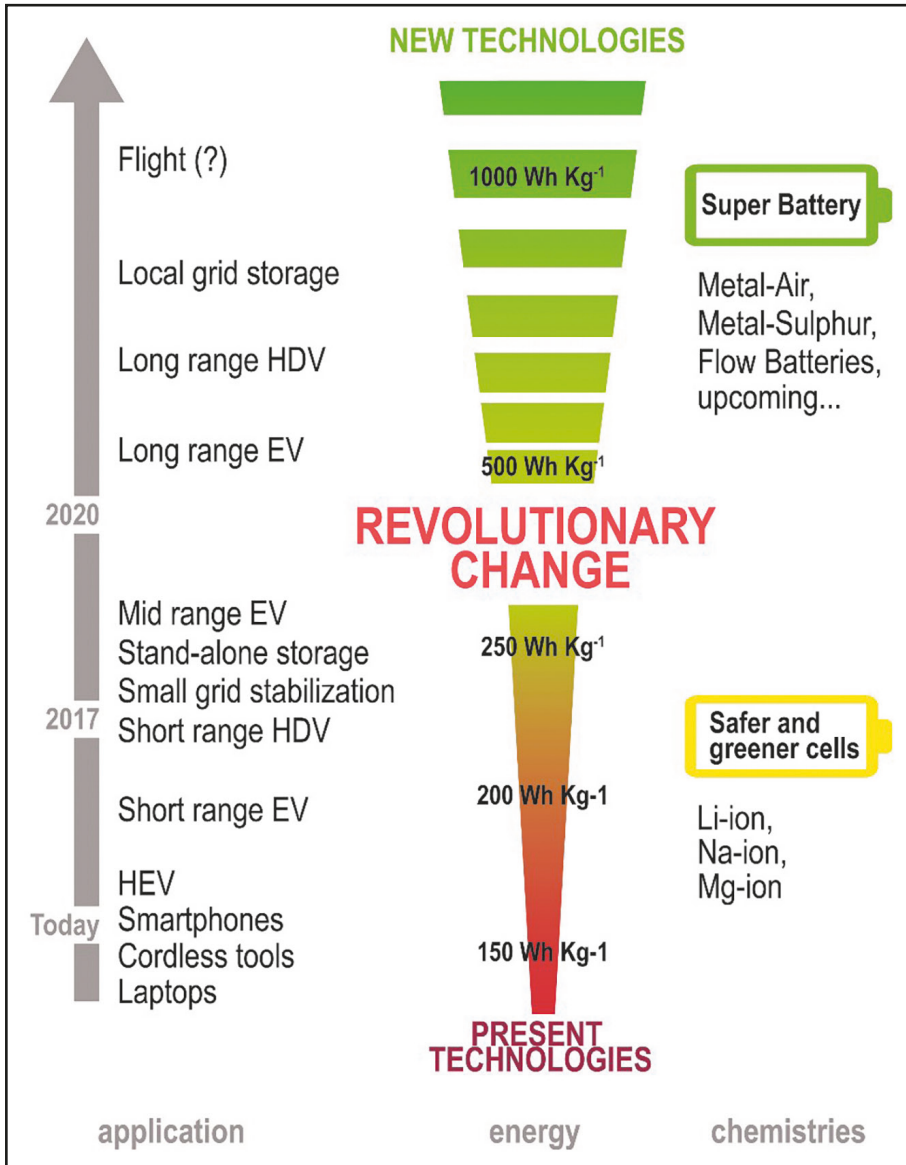
Por outro lado, entre as células secundárias, destaca-se a descoberta das baterias de chumbo-ácido, níquel cádmio, níquel-metal hidreto e íons de lítio, nos respectivos anos indicados na figura.

Dentre os sistemas de armazenamento de energia em geral, os que apresentaram maior evolução na última década foram as baterias, com crescimento considerável em eficiência, densidade de potência e energia.

Na Figura 1.7 são apresentadas as aplicações para distintas densidades de energia, entendida como Wh/kg, mostrando que há uma tendência esperada de aumento na densidade de energia a partir do ano de 2020, com a possibilidade de haver baterias que ofereçam maior autonomia para automóveis de passeio e

veículos pesados. Evidentemente, para essas novas aplicações serem atendidas são necessárias inovações e a descoberta de tecnologias disruptivas.

Figura 1.7 Evolução tecnológica das baterias em termos de energia específica e respectivas aplicações (Helmholtz Institute Ulm Electrochemical Energy Storage, 2015)



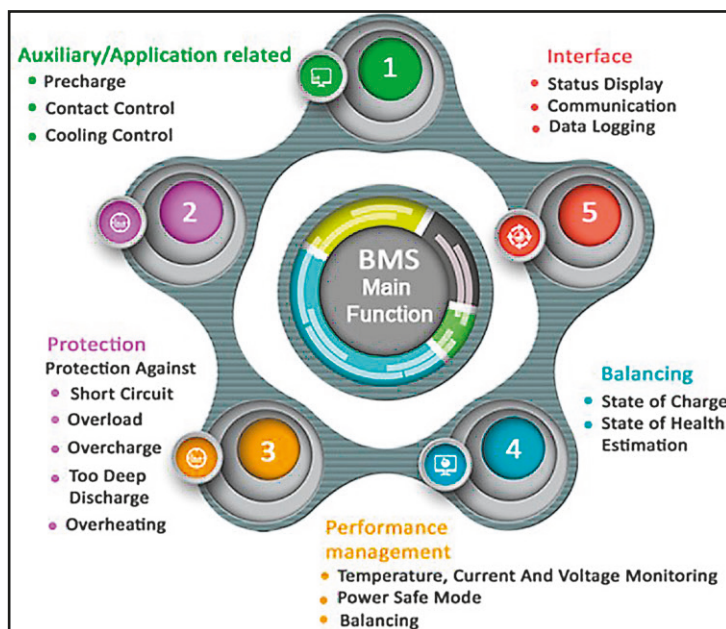
1.3 SISTEMAS MODERNOS DE ARMAZENAMENTO

A utilização de técnicas de controle e monitoramento mais eficientes, tratadas nesta seção, proporcionam maior flexibilidade na operação de sistemas de armazenamento com baterias e é a principal diferença entre os sistemas convencionais e os sistemas modernos.

A aplicação de sistemas de controle e monitoramento deve considerar o tipo de célula, uma vez que células com tecnologias antigas não operam em faixas amplas de estado de carga ou apresentam densidade de potência e de energia muito baixas.

A Figura 1.8 ilustra um sistema de gerenciamento de bateria, comumente chamado de BMS (do inglês *Battery Management System*), que controla e monitora vários parâmetros, entre os quais estão o estado de carga, a estimação do estado de “saúde” da bateria, a temperatura, a corrente, a tensão, a proteção contra curto-circuito, o excesso de carga, as descargas profundas e o superaquecimento.

Figura 1.8 Sistema de gerenciamento da bateria (Lithium Ion Battery, 2017)

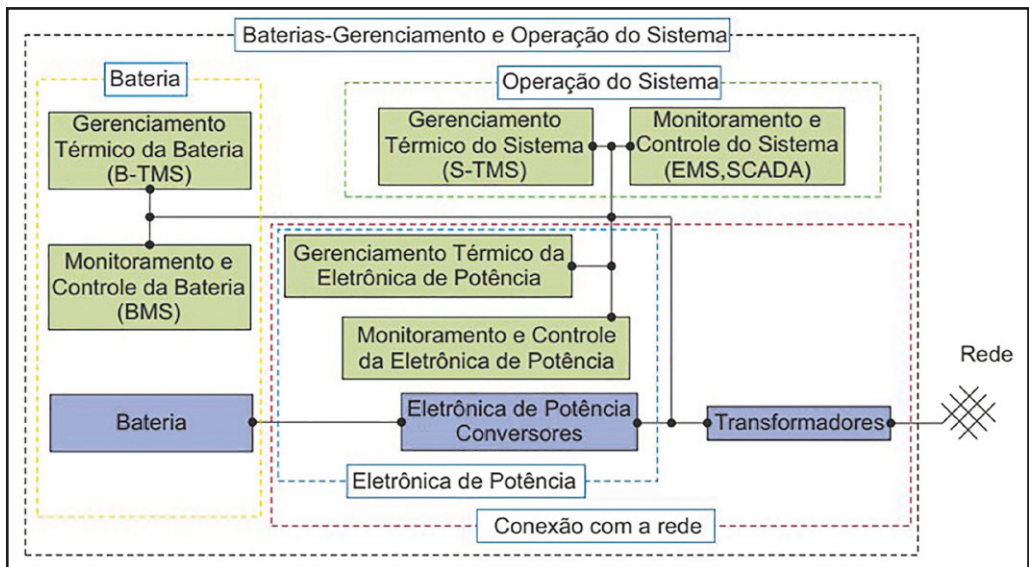


A operação dos sistemas de armazenamento em torno da condição ideal de carga e de temperatura, para cada tecnologia, são determinantes na preservação de sua vida útil. A estrutura de um sistema de gerenciamento e de operação

das baterias é exemplificado na Figura 1.9, onde observa-se diferentes sistemas térmicos específicos para a bateria, para a eletrônica e para o sistema de monitoramento e controle.

Nesse exemplo, os componentes da bateria (BMS e B-TMS) são responsáveis pela adequação da operação da bateria à solicitação da rede elétrica (carga ou descarga, frequência e tensão), sendo alimentados por um sinal de controle originado pelo monitoramento do sistema (como um SCADA) e demandando a atuação da eletrônica de potência.

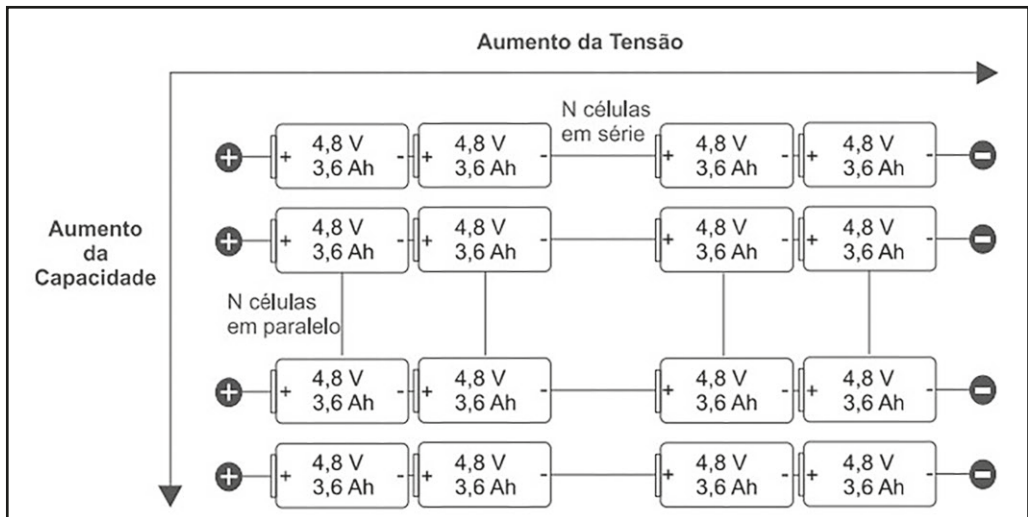
Figura 1.9 Gerenciamento e operação do sistema de armazenamento através de baterias



O controle de temperatura pode ser bastante sofisticado, especialmente em sistemas com refrigeração dedicada às baterias, como o ilustrado na Figura 1.10. Neste caso, os dados da temperatura das células e do refrigerante da bateria são sinais, que confrontados com a temperatura de referência, resultam no sinal de comando à B-TMS para o devido ajuste na temperatura de operação da bateria ao valor adequado.

Nas baterias eletroquímicas a energia é limitada pelas células, que apresentam uma tensão nominal e uma capacidade nominal. O arranjo dessas células em paralelo e série determinam respectivamente, a capacidade e a tensão que terá a bateria, como ilustrado na Figura 1.11. O cálculo da energia leva em consideração a tensão média de descarga e a capacidade de cada célula. Essa combinação série-paralelo não é padrão, sendo definida em função do objetivo de cada aplicação. Em baterias de fluxo a capacidade é definida de acordo com o volume do tanque (Weber, y otros, 2011).

Figura 1.11 Associação das células em uma bateria



- Potência e Energia Nominal

Potência e Energia são parâmetros particularmente importantes nos sistemas de armazenamento, porquanto, sua relação determina o período de carga/descarga do sistema. Os parâmetros que os determinam dependem da tecnologia utilizada, por exemplo: nas baterias eletroquímicas, esses valores são função do arranjo das células (série e paralelo) e da densidade de potência e energia, enquanto que nas baterias de fluxo a energia resulta do volume do tanque de eletrólito e a potência está relacionada com a área de superfície dos eletrodos (Weber, y otros, 2011).

- Taxa de carga e descarga (*C-rates*)

As taxas de carga e descarga, do inglês *C-rate*, são caracterizadas pela relação entre a potência e a capacidade da bateria, refletindo sua velocidade de carga e descarga. A taxa máxima varia entre as tecnologias e pode alcançar valores acima de 4, sem aumentar a degradação das baterias, com o auxílio de sistemas de resfriamento.

Em uma bateria eletroquímica ideal, as células devem despachar a mesma corrente, fazendo com que os ciclos de carga e descarga, bem como a degradação, sejam iguais para todas as células.

Por exemplo, uma bateria com 30 células de 3 Ah e 4 V, em um arranjo de 6 células em paralelo e 5 em série, tem 360 Wh de energia. Essa bateria, despachando a uma potência de 360 W em 1 hora teria *C-rate* igual a 1. Se operasse com *C-rate* igual a 2, a potência da bateria seria de 720 W e a duração de 30 minutos. Evidentemente, a duração depende das condições de degradação da bateria e da temperatura de operação. Por outro lado, os *C-rates* também podem ser menores que 1, significando tempos maiores de descarga e taxas menores de potência. No caso de um *C-rate* igual a 0,5 a bateria operaria durante 2 horas com potência de 180 W.

O *C-rate* é obtido pela expressão:

$$C - rate = \frac{Potência(W)}{Energia (Wh)} \quad (2)$$

- Potência

A energia de uma bateria é determinada pela composição das energias associadas a cada uma de suas células, enquanto que a potência varia de acordo com cada *C-rate* utilizado. Para operações de regulação de frequência, por exemplo, é mais comum que as baterias atuem com valores de *C-rate* mais altos, injetando altos valores de potência em curtos períodos.

- Estado de Carga e Estado de Saúde

O estado de saúde da bateria se fundamenta, principalmente, em três valores: a capacidade, isto é, a habilidade de armazenar energia, a resistência interna que indica a capacidade de fornecer corrente ao sistema e a autodescarga, que reflete a integridade mecânica da bateria.

O estado de carga corresponde à quantidade de energia armazenada no sistema de armazenamento, esse parâmetro é expresso em valor porcentual e pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$\text{Estado de carga} = \frac{\text{Quantidade de carga da bateria}}{\text{Capacidade total da bateria}} \quad (3)$$

- Tempo de Resposta

O Tempo de Resposta de uma bateria é o intervalo que transcorre desde o acionamento da bateria até o momento de início de descarga. Redes elétricas hospitalares são exemplos de redes que requerem tempo de resposta rápidos. O tempo de resposta dos sistemas de armazenamento em atuação nos sistemas de potência pode alcançar alguns milissegundos (Alvarez, 2018).

- Custo

O custo de uma bateria, propriamente dita, é expresso pelas parcelas correspondentes à sua estrutura de armazenamento de energia. Os custos dos sistema de conversão DC/AC e de gerenciamento da operação da bateria, bem como o custo correspondente à sua instalação são usualmente denominados BOS (*Balance of System*), que envolvem, além da mão de obra, os materiais para construir o ambiente onde está instalada (por exemplo containers), as instalações elétricas para conexão com a rede externa, a estrutura mecânica e de refrigeração, bem como os demais acessórios de acesso e de segurança, entre outros.

- Facilidade de Manutenção

A facilidade de manutenção é um parâmetro que mede o custo de manutenção. Um exemplo de estratégia para otimizar a manutenção é a instalação de *packs* de células de baterias eletroquímicas em containers.

- Efeito Memória

O efeito memória consiste no fato da bateria perder gradativamente a capacidade de recarga após seguidas descargas parciais. Isso se deve à redução da tensão na qual a bateria opera, sendo um parâmetro muito conhecido para usuários de baterias de níquel-cadmio e níquel-metal hidreto (Sasaki, Ukyo, & Novák, 2013).

Embora seja amplamente divulgado que baterias de íons de lítio não possuem efeito memória (Nishi, 2001; Pistoia, 2005; Vincent & Scrosati, 1997) e (Sasaki, Ukyo, & Novák, 2013), há demonstrações que em ciclos de carga e descarga sem intervalo de tempo entre os ciclos, as baterias de podem apresentar efeito memória.

- Autodescarga

A autodescarga é o processo de descarga de uma bateria sem que esteja sendo utilizada. Diferente do efeito memória, a autodescarga é uma característica presente em todas as baterias. Esse parâmetro está associado mais às suas características eletroquímicas do que ao processo de manufatura. A autodescarga é permanente e não pode ser revertida. Dentre as baterias secundárias, as baterias de chumbo-ácido são as que apresentam a mais baixa taxa de autodescarga (Battery University, 2018).

1.5 EFICIÊNCIA ROUND-TRIP

A eficiência round-trip é a relação entre a energia carregada depois de uma descarga, com mesma duração e tensão, indicando a perda de energia em um ciclo de descarga/carga. O ensaio para determinar a eficiência round-trip é realizado conforme a norma IEC 61427-2, que consiste em descarregar a bateria por 480 minutos com potência constante, a partir da condição de plena carga. Em seguida, inicia-se o carregamento por 480 minutos com a mesma potência constante utilizada na descarga. O estado de carga final, obviamente, será menor do que a carga completa da bateria. A energia que o BMS consome deve ser considerada.

A eficiência round-trip quantifica a energia perdida em um “round-trip” entre o momento em que o sistema de armazenamento de energia é carregado e descarregado. A maioria dos sistemas de armazenamento de energia que usam baterias de fluxo tem eficiência round-trip de 75 % ou mais, o que significa que, se carregar a bateria, por exemplo, com 100 kWh, poderá descarregar 75 kWh de eletricidade da bateria (Renewable Energy World, 2015).

$$\text{Eficiência Round - trip} = \frac{Wh_{D_i}}{Wh_{C_i}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

representa a energia descarregada ou entregue pelo sistema de armazenamento e corresponde à energia armazenada. Cabe ressaltar que o valor da eficiência round-trip nunca será 100 % porque sempre existiram perdas (RICHARD, 2018).

Pode-se levantar uma série de curvas de tensão e corrente para diferentes relações entre descarga e carga, levando em consideração os valores nominais especificados pelos fabricantes.

1.6 ENVELHECIMENTO

O envelhecimento da bateria acontece devido a alterações químicas e físicas que nela ocorrem. O envelhecimento é função da tecnologia e geralmente é motivado pela sua idade e pela forma de operação (ciclos de carga/descarga) (Maheshwari, 2018). A degradação é percebida usualmente pela perda da capacidade de descarga da bateria, em termos de potência e de energia, causada pelo aumento da impedância interna das células (Uddin, Perera, Widanage, Somerville, & Marco, 2016) where highly demanding cycles of operation and varying environmental conditions lead to non-trivial interactions of ageing stress factors. This work presents the framework for an ageing diagnostic tool based on identifying and then tracking the evolution of model parameters of a fundamental electrochemistry-based battery model from non-invasive voltage/current cycling tests. In addition to understanding the underlying mechanisms for degradation, the optimisation algorithm developed in this work allows for rapid parametrisation of the pseudo-two dimensional (P2D).

Há publicações com a descrição de ensaios de laboratório para avaliar o envelhecimento, embora esses possam não representar as condições reais de operação da bateria, destacando-se:

- No artigo (Suri & Onori, 2016) é descrito um modelo que leva em conta temperatura, taxa de corrente e estado de carga para determinar o envelhecimento da bateria.
- Em (Xu, Oudalov, Ulbig, Andersson, & Kirschen, 2018) e em (Käbitz, y otros, 2013; Purewal, y otros, 2014; Li, Danilov, Gao, Yang, & Notten, 2016) é descrito um modelo de degradação das baterias de íons de lítio, onde a degradação por tempo é analisada, separadamente, da degradação por ciclos. A degradação por tempo é determinada em função do nível de carga médio e da temperatura das células em um tempo medido, enquanto a degradação por ciclos é determinada em função do nível e da profundidade de descarga, bem como da temperatura média da célula, medidos durante um ciclo. A degradação total de tempo e de ciclo, é determinada pela soma das respectivas degradações, para ambos os casos.

1.7 NOVOS DESAFIOS

Os desafios que a indústria ligada aos sistemas de armazenamento de energia conseguiu superar nos últimos 10 anos foram muitos, porém diversas empresas não conseguiram sobreviver antes de verem as perspectivas de mercado melhorarem.

Segundo Yet-Ming Chiang (Paiste, 2016), 75 % das baterias utilizadas nas redes elétricas são de íons de lítio e têm vida longa, porém é importante considerar outras tecnologias de armazenamento como sistemas de ar-comprimido e baterias de fluxo baseadas em enxofre e água. Esta última, segundo Chiang, poderia alcançar custo menor do que cinquenta centavos de dólar por kilowatt-hora.

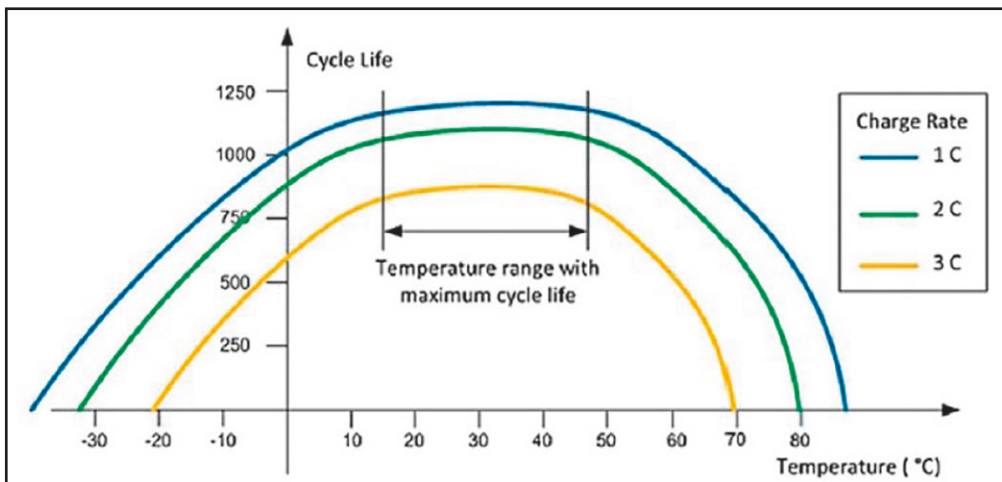
Em (Hannan M. , Lipu, Hussain, & Mohamed, 2017) são descritos alguns desafios que devem ser superados para que as baterias de íons de lítio possam ser instaladas em veículos elétricos, como:

- Melhores métodos para a estimação do estado de carga
- A estimação do estado de carga da bateria é crucial para aplicações onde é importante decidir o momento de carga ou descarga, como no caso de veículos elétricos em que o motorista deve ter a certeza da autonomia até o próximo posto. As vantagens e as desvantagens de vários métodos de estimação do estado de carga (SOC, do inglês *State of Charge*) da bateria são abordados em (Hannan M. , Lipu, Hussain, & Mohamed, 2017).
- Precisão no controle do balanço da carga/descarga das células
- Durante o processo de carga, há possibilidade de ocorrência de diferentes comportamentos das reações eletroquímicas nas células das baterias, devido a diferenças de manufatura, de temperatura ou de outros fatores, o que pode originar sobrecargas em algumas células enquanto outras ainda não tenham se carregado. Essa sobrecarga pode danificar ou mesmo destruir algumas células prematuramente. Analogamente, isso pode ocorrer durante o processo de descarga, em células que são mais frequentemente sobredescarregadas em relação a outras, tendo seu ciclo de vida reduzido devido à alta corrente. Além disso, sobrecargas e sobredescargas podem ocorrer na mesma célula fazendo com que sua capacidade e ciclo de vida sejam reduzidos.
- Redução do envelhecimento das células

- A degradação da resistência interna e da capacitância são os dois principais fatores que levam ao envelhecimento da bateria. Enquanto a degradação da resistência interna é facilmente monitorável, a degradação da capacitância é difícil de se medir até que uma mudança na performance da bateria ocorra. Os desafios que se colocam, atualmente, são alterações nas estruturas dos materiais utilizados no cátodo, visto que foi constatado que o envelhecimento é função desses materiais (Danzer, Liebau, & Maglia, 2015).
- Aumento da faixa de temperatura de operação

A temperatura de operação da bateria tem uma alta influência no seu ciclo de vida. Na Figura 1.12 é ilustrada a variação do ciclo de vida para diferentes taxas de carga numa faixa de temperatura entre -30 °C e 80 °C, onde se observa que as baterias apresentam ciclos de vida maiores quando a temperatura varia entre 25 °C e 40 °C, para todas as taxas de carga. A figura mostra também a influência que tem a taxa de carga no desgaste da bateria. O desafio é ampliar a faixa de temperatura onde o ciclo de vida é maior.

Figura 1.12 Ciclo de vida da bateria vs. temperatura para taxas de carga diferentes



- Redução das perdas de autodescarga

A redução da perda de carga espontânea é um fator muito importante para a maior eficiência. A autodescarga é dependente de vários fatores, tais como: temperatura ambiente, número de ciclos e tempo de armazenamento.

