

Renováveis

ENERGIAS COMPLEMENTARES

Ano 5 - Edição 60 / Março de 2022



Atitude.editorial

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA tipos de baterias e características

COLUNA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: Brasil atinge 10 GW de potência instalada em geração distribuída

COLUNA ENERGIA SOLAR: 2022 - Desafios da tributação e o crescimento da energia solar no Brasil

APOIO





FASCÍCULO ARMAZENAMIENTO DE ENERGIA

Por Markus Vlasits*



36



Capítulo II

TIPOS DE BATERIAS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Baterias fazem parte do nosso dia a dia e todos nós as usamos diariamente. Em automóveis com motor a combustão o arranque do motor é tipicamente feito utilizando como apoio uma bateria de chumbo-ácido. Os dispositivos eletrônicos, como laptops, tablets e celulares, usam baterias de íons de lítio.

Bateria de chumbo é uma tecnologia antiga, inventada no século XVIII e aperfeiçoada ao longo de muitos anos. Tratam-se de baterias muito estáveis, fáceis de serem produzidas, recicladas e não exigem cuidados específicos na sua operação. No entanto, elas têm uma limitação em seu perfil de uso e/ou aplicação. Para maximizar sua vida útil não é recomendado usar mais que 50% da sua capacidade nominal e, mesmo em condições de uso controladas, sua vida útil dificilmente supera os 1.000 ciclos (um ciclo é caracterizado por uma carga e descarga completas). Vale a pena observar que existem inovações tecnológicas interessantes, como por exemplo baterias de chumbo-carbono que mantém todas as vantagens desse tipo de bateria, mas oferecem uma vida útil mais longa e uma profundidade de descarga maior.

Baterias de íons de lítio, por outro lado, são uma invenção relativamente recente em comparação com as baterias de chumbo. Estes acumuladores oferecem um avanço substancial em relação à densidade energética, profundidade de descarga e vida útil.



Figura 1 - John Goodenough, Stanley Wittingham e Akira Yoshino, vencedores do Prêmio Nobel 2019 pelo desenvolvimento da bateria de íons de lítio. Fonte: BBC

Os principais elementos dessas baterias são um cátodo (polo positivo), contendo composições de óxidos metálicos a base de lítio, um eletrólito líquido, um separador e um ânodo (polo negativo), tipicamente com compostos contendo grafite.

O átomo de lítio possui apenas um único elétron em sua camada de valência e tem a tendência de perdê-lo com muita facilidade. Esta tendência chama-se potencial eletroquímico. Dentre todos os materiais, o lítio tem o maior potencial eletroquímico, o que o torna o elemento ideal para baterias.

Assim que há uma conexão externa entre o cátodo e ânodo da bateria, ocorre a seguinte reação: os elétrons do lítio, por conta deste potencial eletroquímico, separam-se dos seus respectivos átomos e percorrem o caminho mais fácil através do condutor elétrico, rumo ao cátodo da bateria. Desta forma é gerada uma corrente elétrica no momento de descarregamento. Ao mesmo tempo os átomos de lítio, 'abandonados' pelos elétrons, chamados íons, possuem carga positiva e sentem-se atraídos pela carga negativa do cátodo, assim, eles percorrem o caminho para o ânodo através do eletrólito. Para que esta reação possa acontecer de forma controlada e segura, o separador, que isola o cátodo do ânodo, permite apenas a passagem dos íons.

Chegando no cátodo, os íons de lítio encontram uma composição metálica capaz de integrá-los dentro de uma estrutura estável. Quando a maior parte dos íons migrou e a maior parte dos elétrons foi absorvida pela estrutura metálica, a corrente termina e a bateria está totalmente descarregada. Para carregá-la, precisamos aplicar uma tensão elétrica no sentido inverso, assim propulsionando os elétrons e os íons de lítio de volta para o ânodo. Quando este processo estiver concluído, a bateria é considerada carregada. Importante observar que dado o elevado potencial eletroquímico do lítio, o estado carregado da bateria representa um equilíbrio pouco estável, comparável a uma bola que foi deixada no topo de uma colina. Da mesma forma como a bola facilmente poderá voltar ao pé da colina, o elétron instável da camada de valência poderá se desprender do átomo de lítio e voltar para o cátodo, desde que haja um condutor elétrico interligando os dois pólos.

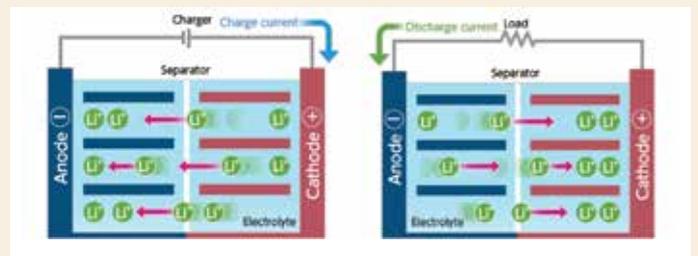


Figura 2 - Representação gráfica de ciclos de carga e descarga de uma bateria de íons de lítio. Gráfico: Toshiba

Existe hoje uma ampla gama de baterias de íons de lítio, tais como baterias de lítio ferro fosfato [LFP], baterias de lítio-manganês cobalto [NMC], e outras. Todas elas têm características diferentes, mas possuem em comum o princípio básico descrito acima.

Por muito impressionante que tenha sido o avanço das baterias de íons de lítio, elas ainda apresentam uma série de limitações, tanto para seu uso na mobilidade elétrica, como para aplicações estacionárias.

Em relação à mobilidade elétrica, uma das características que

Tipo	Composição	Competitividade em Custo	Vida útil	Densidade energética	Estabilidade térmica	Aplicações
LFP	Lítio-ferro-fosfato	Muito boa	★★	★	★★★	Soluções estacionárias
NMC	Lítio-manganês-cobalto	Boa	★	★★	★★	Mobilidade elétrica
NCA	Lítio-níquel-cobalto-alumínio	Boa	★	★★★	⊖	Mobilidade, aplicações industriais
LTO	Lítio-titanato	Regular	★★★	★	★★★	Aplicações especiais
GRF	Grafeno	Baixa	★★★	★★★	★★★	Aplicações especiais

Figura 3 - Comparação de características de diferentes tipos de baterias de íons de lítio. Gráfico: NewCharge / Greener em: Estudos Estratégico do Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil, 2021.

mais importam é a densidade energética. Atualmente, as baterias de íons de lítio, que apresentam uma melhor performance, alcançam densidades energéticas perto dos 300 Wh/kg. Em comparação, a densidade energética de gasolina é de mais de 12.000 Wh/kg. Ainda que se leve em consideração que um motor elétrico é muito mais eficiente que um motor a combustão, a diferença na densidade energética entre baterias e combustível fóssil ainda é alta. Em relação ao armazenamento estacionário, a principal preocupação está no custo da bateria e da sua vida útil. Ao longo dos últimos dez anos, foi possível reduzir o preço de venda de mais de USD 1.000/kWh de capacidade para valores próximos de USD 100/kWh. Mas, parece que vai ser difícil reduzir este valor de forma significativa, sem que aconteçam alterações fundamentais na tecnologia empregada. Para que o armazenamento realmente vire uma aplicação em massa e possa 'turbinar' o crescimento das energias renováveis, precisaríamos atingir valores no patamar de USD 20-50/kWh.

Vale a pena observar que, em muitos casos, o aumento da densidade energética e a redução de custo podem ser atingidos de forma sinérgica. Desde que o aumento de densidade seja maior que o aumento de custo de produção, ambos os objetivos podem ser atingidos de forma simultânea.

Nesse sentido, uma estratégia promissora é substituir o eletrólito líquido por material sólido. Estas baterias geralmente usam ânodos de lítio puro e cátodos de NCM (níquel-cobalto-manganês) ou enxofre-carbono. A primeira geração de baterias 'solid state' tem conseguido ultrapassar os 500 Wh/kg. Recentemente, pesquisadores japoneses apresentaram um protótipo com densidade energética superior a 900 Wh/kg e vida útil de aproximadamente 1.000 ciclos, isto, sem dúvida, é um grande avanço.

Um outro caminho, também promissor, consiste na substituição do ânodo de grafite por outros materiais que permitem um adensamento dos elétrons de lítio. Outro grupo de pesquisadores japoneses, desenvolveu ao longo dos últimos anos, uma bateria cujo cátodo é muito parecido àquele das baterias de NMC, mas cujo ânodo é feito de titânio e óxido de nióbio (TNO). Em princípio, essa

composição permite dobrar a densidade energética das baterias e, ao mesmo tempo, aumentar a tolerância para recargas ultrarrápidas. Neste contexto é bom lembrar que o Brasil é um dos principais produtores de nióbio em formato de matéria-prima.

Outra alternativa interessante é substituir o grafite por silício. Na visão dos proponentes desta tecnologia, o limite teórico de densidade energética das atuais baterias de lítio está na faixa de 700 Wh/kg. Segundo eles, o ânodo de silício permite alcançar valores até 1.500 Wh/kg, e ao mesmo tempo aumentar a vida útil da bateria. Do ponto de vista químico é importante observar que um ânodo de silício não 'acomoda' os íons de lítio através do processo de intercalação, como acontece nos ânodos de grafite, mas através de uma espécie de 'conversão' pela qual no momento de carregamento o lítio e o silício formam uma espécie de liga eletroquímica. Os vínculos naquela liga, em tese, são muito mais fortes do que aqueles formados por intercalação, o que significa que a bateria seria capaz de armazenar mais energia.

Os compostos de lítio usados em baterias geralmente são produzidos a partir de duas matérias-primas – carbonato de lítio [Li₂CO₃], ou hidróxido de lítio [LiOH]. Recentemente, ambos têm sofrido aumentos de preço muito significativos. No caso do carbonato de lítio, o preço médio por tonelada aumentou de USD 6,750 em janeiro de 2021 para mais de USD 38,000 em janeiro de 2022. Acredita-se que este aumento de preços seja temporário e que ele voltará a cair assim que a oferta de lítio consiga acompanhar esse crescimento de demanda. No entanto, não é possível prever quanto tempo tardará até que os preços do lítio voltem aos patamares observados antes de 2020. Como o gargalo aparenta ser na mineração e no processamento de matéria-prima, o aumento de oferta pode demorar algum tempo.

Diante deste cenário, o interesse em tecnologias 'pós-lítio' tem aumentado bastante ao longo dos últimos meses. Em princípio, nada impede a substituição do lítio no cátodo da bateria por outros metais. Existem vários candidatos, entre eles, o sódio, o zinco, o potássio, ou o magnésio, e todos eles são muito mais abundantes



Figura 4 - Evolução do preço de carbonato de lítio.
 Fonte: germanlithium.com

do que o lítio. No entanto, nenhum desses elementos possui seu potencial eletroquímico, o que reduz a performance dessas baterias alternativas. Para que esses tipos de baterias se tornem viáveis para uso comercial, vários desafios importantes ainda precisam ser superados.

Baterias de fluxo são uma alternativa tecnológica, que tem chamado a atenção recentemente de forma peculiar. Seu princípio funcional é totalmente distinto das tecnologias apresentadas até aqui. Ânodo e cátodo são compostos por elementos químicos dissolvidos em líquidos. A troca de íons entre os dois polos, responsável pela geração de corrente elétrica, ocorre através de uma membrana, enquanto ambos os líquidos circulam em seus respectivos containers. Estas baterias também são chamadas de 'redox-flow-batteries' porque a carga e a descarga da bateria ocorrem através de processos de redução (captação de elétrons) e oxidação (liberação de elétrons) dos elementos químicos contidos nos containers. Existem baterias de fluxo com distintas composições químicas: óxido de ferro, brometo de zinco, enxofre aquoso, entre outras. Todas elas apresentam algumas características muito interessantes – permitem durações de descarga muito longas, que não estão sujeitas à degradação e algumas delas, como por exemplo as baterias de óxido de ferro, não contém nenhum elemento tóxico. Além disso, não dependem de nenhum material potencialmente escasso, como o lítio ou o cobalto.

Principalmente nos Estados Unidos têm surgido outras opções tecnológicas, como baterias 'ar-zinco', 'ar-ferro' e 'ar-lítio'. Baterias de ar-zinco usam partículas de zinco dentro de um arranjo descrito como célula de combustível regenerativa. A principal vantagem é que o zinco, em princípio, é um elemento abundante e de fácil extração, diferente do lítio. Conseqüentemente, uma bateria de 'ar-zinco' poderia atingir um nível de custo substancialmente mais baixo do que baterias de lítio. No entanto, esta tecnologia ainda está em fase de validação e ainda não está comercialmente disponível.

O princípio funcional de baterias de 'ar-ferro' consiste na oxidação reversível de um composto de ferro. Durante o

descarregamento, o composto é transformado em óxido de ferro, mediante a absorção de oxigênio, e, no carregamento, o processo é revertido e o oxigênio é novamente liberado.

Baterias de 'ar-lítio' são feitas de ânodos de lítio metálico e um cátodo composto por material poroso. O foco desta não é - diretamente - a redução de custos, mas o aumento da densidade energética, pensando em aplicações automotivas e outras aplicações com restrições de espaço e peso.

Quais dessas tecnologias irão prevalecer e propulsionar o mercado de armazenamento no futuro? Parece plausível que futuramente tenhamos propostas tecnológicas diferenciadas, atendendo aos inúmeros segmentos do mercado. A mobilidade elétrica, conforme mencionado anteriormente, precisa de uma solução que ofereça uma elevada densidade energética e comporte ciclos de carga e descarga rápidos. A tecnologia mais adequada muito provavelmente será uma solução contendo lítio, seja uma bateria de íons de lítio com ânodo 'alternativo', seja uma bateria de estado sólido ou uma solução ar-lítio.

Para aplicações estacionárias, a situação é diferente. Neste segmento, o que mais interessa é minimizar o custo global de armazenamento ao longo da vida útil do equipamento. Em outras palavras, há que se perguntar: qual tecnologia permite armazenar energia pelo menor custo por ciclo, levando em consideração o custo inicial do equipamento, as despesas com manutenção, a degradação da bateria ao longo da sua vida útil e a eficiência global de conversão? Possivelmente, baterias de ar-ferro, ar-zinco ou baterias de fluxo poderão conquistar uma parcela relevante desse mercado. Mas elas terão que comprovar sua competitividade com baterias de íons de lítio maduros, principalmente lítio-ferro-fosfato, para os quais já existe uma cadeia produtiva de centenas de GWh. Adicionalmente, esses novos entrantes também enfrentarão baterias de 'segunda vida', ou seja, baterias automotivas que chegaram ao fim da sua vida útil em veículos elétricos, mas que ainda têm utilidade em aplicações estacionárias. É claro que esse reaproveitamento envolve vários desafios técnicos, mas, diante do grande número



40 **Figura 5 - Exemplo de projeto de P&D de bateria de segunda vida, localizado em Florianópolis (SC). Fonte: UFSC, NewCharge, entre outros.**

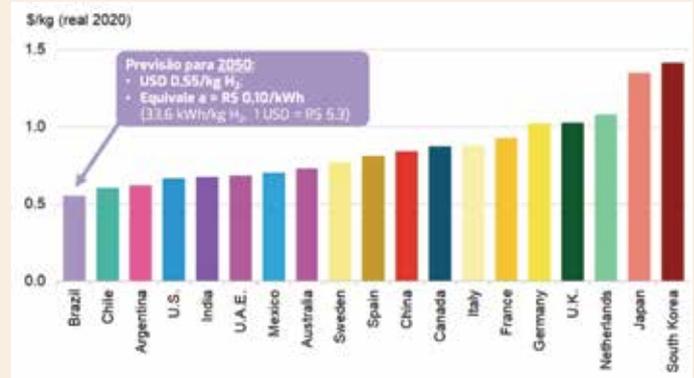


Figura 6 - Competividade do Brasil na produção de hidrogênio verde – previsão para 2050. Fonte: Bloomberg NEF

de baterias automotivas usadas que estarão disponíveis dentro de poucos anos, não deixa de ser uma opção interessante.

Não podemos encerrar este artigo sem falar de mais uma opção de armazenamento de energia – o hidrogênio. Este desempenha um papel fundamental em vários processos industriais, entre eles no refino de petróleo e na produção de amônia e de fertilizantes, e é produzido a partir do gás natural. Ao longo dos últimos anos houve um interesse crescente em hidrogênio para fins de armazenamento de energia, principalmente na forma do chamado 'hidrogênio verde'. Neste caso, o gás é produzido a partir da água através do processo de eletrólise, usando como insumo energético fontes renováveis, como solar fotovoltaica e eólica. A conversão do hidrogênio em energia elétrica pode ser feita de várias formas, sendo o uso de células de combustível o caminho mais promissor. Em comparação com as baterias, o hidrogênio oferece duas vantagens muito importantes – elevada densidade energética, o que o torna interessante para mobilidade elétrica e a possibilidade de armazenamento de longo prazo (semanas, meses), o que dificilmente pode ser feito com baterias. O principal desafio no uso de hidrogênio para fins de armazenamento está na baixa eficiência global do processo de conversão. Somando as perdas energéticas na eletrólise, na compressão, no armazenamento do gás e no reaproveitamento através de células de combustível, chega-se a uma eficiência total (round-trip efficiency) inferior a 30%. Isto significa muito menos do que a eficiência global de sistemas de armazenamento usando baterias, que costumam alcançar taxa de eficiência de 80%-90% para sistemas usando baterias de lítio e de 60%-80% para sistemas com baterias 'alternativas'.

Isto não significa que o hidrogênio, principalmente aquele produzido a partir de fontes renováveis (ou seja, o hidrogênio verde) não tenha uma perspectiva de crescimento relevante. Muito pelo contrário! Para alguns setores da mobilidade, como por exemplo transporte de cargas de longa distância ou aviação, o hidrogênio pode ser uma opção promissora para reduzir sua 'pegada de carbono'. O mesmo aplica-se a processos industriais que hoje fazem uso de hidrogênio 'cinza' produzido a partir do gás natural.

Para o Brasil, a cadeia de hidrogênio verde é relevante por vários motivos. Primeiro, porque o país, dentro do contexto internacional, dispõe de energia solar extremamente competitiva, o que o torna um player de peso em um futuro mercado global de hidrogênio verde. Segundo porque o Brasil até hoje importa a maior parte dos fertilizantes usados na sua agricultura.

Como podemos constatar, o futuro das tecnologias de armazenamento é complexo, cheio de incertezas, mas também repleto de oportunidades para avanços 'disruptivos' que podem tornar o armazenamento de energia e, principalmente, o armazenamento de energia elétrica por dispositivos eletroquímicos ainda mais competitivos. Nos artigos seguintes iremos explorar as diferentes aplicações de armazenamento com mais detalhes e avaliar o seu potencial para contribuir com a modernização do setor elétrico brasileiro.

**Markus Vlasits é fundador e diretor-sócio da NewCharge Projetos desde 2019. Foi diretor comercial e cofundador da Faro Energy e também diretor e, posteriormente, vice-presidente da Q-Cells SE na Alemanha, uma das principais produtoras de células e painéis fotovoltaicos. É conselheiro e coordenador do Grupo de Trabalho de Armazenamento da Associação Brasileira de Energia Solar (Absolar).*

