

**Antonio Faria Neto**

*Universidade Estadual Paulista*  
antfarianeto@gmail.com

**Francisco Antonio Lotufo**

*Universidade Estadual Paulista*  
falotufo@feg.unesp.br

**Leonardo Mesquita**

*Universidade Estadual Paulista*  
mesquita@feg.unesp.br

**Antonio de Pádua da Cunha  
Coelho**

*Universidade de Taubaté*  
paduapatentes@yahoo.com.br

# INTRODUÇÃO AO ARMAZENAMENTO ELETROQUÍMICO DE ENERGIA: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA

---

## RESUMO

Pode-se afirmar com segurança que as baterias, tanto as células primárias, como as células secundárias são a forma mais popular de armazenamento de energia e sua aplicação vem aumentando de forma significativa ao longo das últimas décadas, estando ainda longe de alcançar o seu ápice. Apesar da crescente aplicação das baterias e do montante dos negócios envolvidos nesta área os cursos de engenharia elétrica ainda não oferecem cursos voltados para a aplicação de baterias. O objetivo deste artigo é apresentar uma resenha envolvendo os principais conceitos que abrangem o tema sem a profundidade requerida por um físico, químico ou engenheiro de materiais, mas que sejam suficientes para que o Engenheiro Eletricista seja capaz de acompanhar as principais novidades tecnológicas na área; especificar corretamente uma bateria para uma dada aplicação e entender e vislumbrar novas aplicações para esses dispositivos.

**Palavras-chave:** Armazenamento de energia, células primárias, células secundárias, Baterias.

---

### Correspondência/Contato

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ  
Departamento de Engenharia Mecânica

Rua Daniel Danelli, s/n, Jd. Morumbi  
Taubaté - SP  
CEP 12060-440  
Fone (12) 3625-4193

### Editores responsáveis

Prof. Dr. Evandro Luis Nohara  
evandro@unitau.br

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do P. Nunes  
luiz.nunes@unitau.com.br

Profa. Dra. Valesca Alves Correa  
valesca.correa@unitau.com.br

## 1 INTRODUÇÃO

Uma vez que a eletricidade não pode ser armazenada diretamente, exceto em capacitores ou bobinas supercondutoras, é necessário utilizar uma forma indireta de armazenamento. É possível converter a energia elétrica em energia potencial, em energia cinética, em energia térmica ou em energia química. Uma forma de armazenamento de energia química é o hidrogênio, gerado por eletrólise, o qual pode ser armazenado e subsequentemente reconvertido em eletricidade numa célula combustível. Tais dispositivos, como as baterias, são dispositivos de conversão de energia. Contudo, estes dispositivos não estão no escopo deste trabalho.

Pode-se afirmar que as baterias são uma forma conveniente de armazenar energia elétrica, uma vez que podem ser fabricadas em diversos tamanhos, podem ser associadas formando bancos de baterias de diversas capacidades, são capazes de suprir potência elétrica imediatamente, são portáteis e permitem uma diversa gama de aplicações. As baterias podem ser classificadas em duas grandes categorias, a saber, baterias primárias, as quais podem ser utilizadas em uma única descarga; baterias secundárias, que podem ser recarregadas e reutilizadas. O ciclo de carga/descarga pode ser repetido até que a capacidade de armazenamento se deteriore e fique abaixo de um nível mínimo considerado razoável.

O uso de baterias aumentou significativamente ao longo do último século, atualmente, baterias primárias ou secundárias são empregadas em um grande número de eletrodomésticos. Ao mesmo tempo o desenvolvimento da ciência dos materiais e da tecnologia proporcionou projetos e construções mais avançados de baterias com elevado desempenho.

Mas as baterias recarregáveis não ficaram restritas a aplicações domésticas, elas se desenvolveram em tamanho e capacidade para atender outras necessidades, como por exemplo, as baterias de chumbo-ácido utilizadas para dar partida em motores à combustão. Com os veículos se tornando cada vez mais sofisticados, o número de motores e de outros dispositivos elétricos aumentou, fazendo com que a demanda sobre a bateria também aumentasse. Tal aumento chegou ao ponto de serem necessárias duas baterias, uma para dar partida no motor à combustão e outra para atender aos demais dispositivos elétricos.

Houve também uma proliferação na demanda por baterias de maior porte. Uma de suas aplicações reside nos equipamentos de suprimento ininterrupto de potência. Tal equipamento requer um banco de baterias a fim de que, no caso de uma falta elétrica, a energia elétrica continue sendo suprida até que um gerador entre em operação e seja capaz de suprir toda a demanda por energia. Outras aplicações de porte semelhante são encontradas em sistemas de geração de energia eólica e fotovoltaica, etc.

Embora muitas dessas aplicações utilizem as já estabelecidas baterias recarregáveis de chumbo-ácido ou níquel-cromo, baterias utilizando novas químicas têm sido colocadas no mercado.

Outro fato marcante é que a faixa de capacidade das baterias aumentou significativamente. Esta escala de tamanho vai desde as células botão (0,1 Wh) até as baterias aplicadas ao nivelamento de carga (10 MWh).

Apesar da crescente aplicação das baterias e do montante dos negócios envolvidos nesta área os cursos de engenharia elétrica ainda não oferecem cursos voltados para a aplicação de baterias. O objetivo deste artigo é apresentar os principais conceitos que envolvem o tema sem a profundidade requerida por um físico, químico ou engenheiro de materiais, mas que sejam suficientes para que o Engenheiro Eletricista seja capaz de acompanhar as principais novidades tecnológicas na área; especificar corretamente uma bateria para uma dada aplicação e entender e vislumbrar novas aplicações para esses dispositivos.

Este trabalho não traz nenhuma novidade, mas visa apresentar didaticamente o tema, em língua portuguesa, tratando-se de uma resenha de Dell e Rand (2001).

## 2 CONCEITOS E TERMINOLOGIAS BÁSICOS

Uma célula eletroquímica é um dispositivo para geração de eletricidade. Ela consiste de um eletrodo positivo e um eletrodo negativo, separado por um eletrólito que é capaz de conduzir íons entre os dois eletrodos, mas que é em si um isolante para o fluxo de elétrons. Se o eletrólito fosse um condutor para os elétrons ele se comportaria como um curto-circuito interno, provocando a auto-descarga da bateria. A maioria dos eletrólitos são soluções ácidas, alcalinas ou salinas. Outros condutores iônicos que têm sido empregados como eletrólitos são soluções de sais orgânicos, polímeros, cerâmicas e sais fundidos.

Quando duas ou mais células são associadas eletricamente, em série, em paralelo, ou ainda em série-paralelo, o arranjo final resultante é denominado de bateria. A rigor o termo bateria só deveria ser empregado para arranjos com várias células. Contudo, no cotidiano é comum chamar-se dispositivos constituídos de uma única célula de bateria, principalmente em se tratando de células primárias.

Quando diversas baterias são associadas entre si para aumentar os requisitos de potência e energia, o arranjo resultante é denominado de banco de baterias.

### 3 REAÇÕES QUÍMICAS NA CÉLULA ELETROQUÍMICA

Os componentes essenciais de uma célula eletroquímica são: os eletrodos; um separador e um *container* para abrigar todo o conjunto. Os eletrodos positivo e negativo devem estar o mais próximo possível um do outro a fim de minimizar a resistência interna da célula, que, tipicamente, é da ordem de miliohms ( $m\Omega$ ). Mesmo para eletrólitos de alta condutividade, esta baixa resistência só é possível quando a separação entre os eletrodos é da ordem de 1 mm. Para manter uma distância tão pequena entre os eletrodos, estes são separados por meio de um material isolante fino e poroso, denominado separador, cujo papel é prevenir o contato elétrico entre os eletrodos. Os poros do separador são preenchidos com o eletrólito de modo que a corrente iônica flua através desses poros.

Cada eletrodo é composto de duas partes, uma delas chamada de material ativo (ou massa ativa), que é onde efetivamente ocorre a reação química; e a outra é a parte metálica sobre a qual a massa ativa é montada e que é responsável pela condução da corrente elétrica para o meio externo e que é chamada de coletor de corrente, conforme ilustrado na Fig. 1.

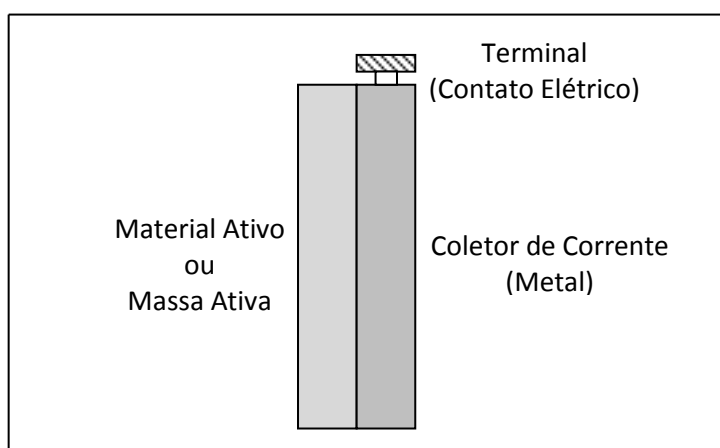


Figura 1. Perfil de um eletrodo de uma célula eletroquímica

As reações químicas que geram eletricidade ocorrem nos dois eletrodos. Cada eletrodo é responsável por metade da reação da célula. A corrente elétrica produzida externamente à bateria é devida à diferença de potencial dos eletrodos. Durante a descarga, ocorre uma reação de oxidação (ou reação anódica), no eletrodo negativo, com a liberação de elétrons, que fluem para o meio exterior através da carga no sentido do eletrodo positivo, onde ocorre uma reação complementar denominada de reação de redução, com a absorção de elétrons.

A reação no eletrodo negativo pode ser representada pela equação (1):



No eletrodo positivo a reação pode ser representada pela equação (2):



Onde  $M$  é um metal;  $X$  é um agente oxidante, um óxido metálico em alto estado de valência e  $e^{-}$  representa um elétron.

Quando a célula eletrolítica opera em descarga ela é chamada de célula galvânica, e quando esta sendo carregada ela é chamada de célula de eletrólise. A Fig. 2 ilustra uma célula eletrolítica sendo carregada e descarregada, bem como a movimentação das cargas elétricas envolvidas.

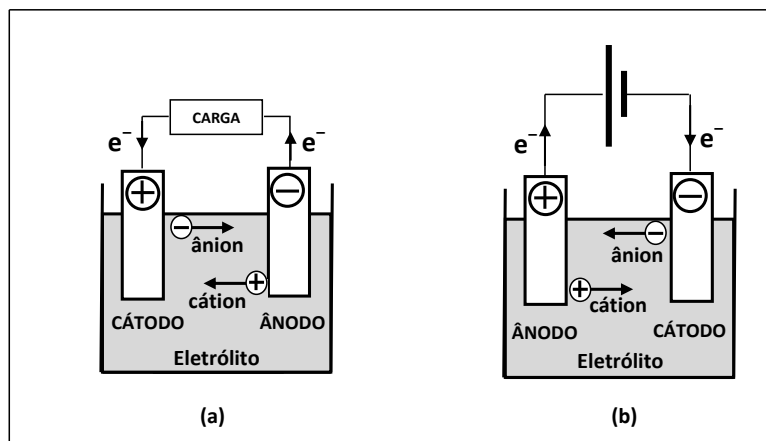


Figura 2. (a) Célula eletrolítica (galvânica) durante a descarga. (b) Célula eletrolítica (eletrolise) durante a carga.

Os metais típicos utilizados como material ativo para o eletrodo negativo são o zinco (Zn), o cádmio (Cd), o chumbo (Pb) e o lítio. A massa ativa tipicamente utilizada no eletrodo positivo pode ser um óxido como, por exemplo, o óxido de manganês (MnO<sub>2</sub>), o óxido de níquel ou o óxido de chumbo (PbO<sub>2</sub>), todos em alto estado de valência; sulfetos ou haletos metálicos. As diferentes combinações desses materiais dão origem aos diferentes tipos de materiais, e esse conjunto é comumente referido como química das células. É importante mencionar que sendo a condutividade eletrônica da massa ativa do eletrodo positivo baixa, é comum misturar esse material com uma substância condutiva tal como o grafite.

Quanto ao eletrólito, pode-se reafirmar que sua única função é conduzir os íons de um eletrodo a outro, não sendo comum tomar parte nas reações químicas de qualquer um dos eletrodos. Uma exceção é a bateria chumbo-ácido.

A tensão de uma célula é a diferença de potencial entre os eletrodos, ou seja, a diferença entre os potenciais de cada uma das massas ativas. É importante observar que não se pode determinar o potencial absoluto de qualquer eletrodo, uma vez que qualquer método prático de medida de diferença de potencial dependeria de um segundo eletrodo. Portanto, o potencial de todos os eletrodos é determinado em relação a um eletrodo padrão (hidrogênio) em condições padrões.

A diferença entre os eletrodos de potencial positivo e negativo resulta numa d.d.p. denominada de tensão reversível ( $V_r$ ) ou tensão de circuito aberto da célula. Sob condições padrões, esta é a tensão padrão da célula ( $V_o$ ).

#### 4 CARGA E DESCARGA DA CÉLULA

A tensão de uma bateria medida sob carga é menor do que aquela medida em circuito aberto. Isso ocorre devido à impedância interna da bateria, que é formada por:

Perdas por polarização nos eletrodos;

Perdas ôhmicas ocorridas nos eletrodos, tanto no coletor de corrente como na massa ativa, e no eletrólito.

A medida de quanto o potencial de um eletrodo se afasta de seu potencial de equilíbrio é denominada de sobrepotencial do eletrodo ( $\eta$ ). Este sobrepotencial é composto por duas partes:

Sobrepotencial de ativação - causado por limitações cinéticas do processo de transferência de carga no eletrodo; é uma propriedade intrínseca do material do eletrodo imerso no eletrólito, isto é, trata-se de um fenômeno de interface.

Sobrepotencial de concentração - resulta da depleção dos reagentes nas vizinhanças do eletrodo devido à difusão lenta da solução; é uma propriedade que depende da espessura e porosidade do eletrodo, bem como dos processos de transporte no eletrólito.

Juntos, esses dois sobrepotenciais resultam em uma queda de tensão nos eletrodos, a qual é denominada perda por polarização, e o eletrodo é dito polarizado.

As perdas por polarização ocorrem em ambos os eletrodos e são responsáveis pela diminuição da tensão da célula durante a descarga ( $V_d$ ) e por um aumento da tensão da célula durante a carga ( $V_c$ ), conforme ilustram (3) e (4).

$$V_d = V_r - \eta_+ - \eta_- - IR \quad (3)$$

$$V_c = V_r + \eta_+ + \eta_- + IR \tag{4}$$

Onde  $\eta_+$  e  $\eta_-$  são os sobrepotenciais dos eletrodos positivo e negativo, respectivamente.

A Fig. 3 ilustra a representação esquemática das Equações (3) e (4).

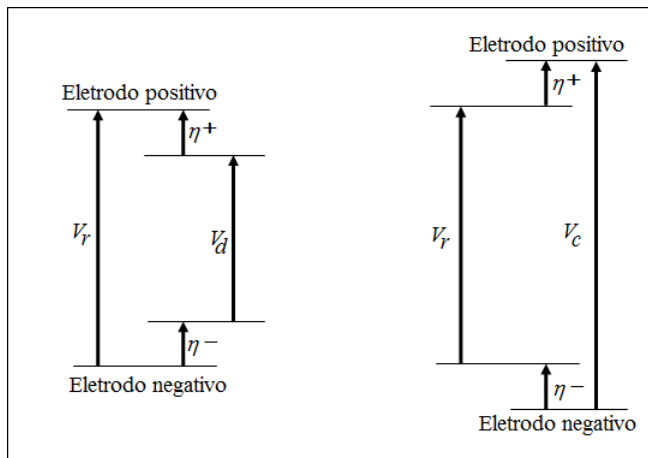


Figura 3. Representação esquemática das equações (3) e (4).

Para baixos sobrepotenciais, a relação entre  $\eta$  e a corrente  $I$  é aproximada pela Lei de Ohm, de modo que (3) e (4) podem ser reescritas como:

$$V_d = V_r - IR' \tag{5}$$

$$V_c = V_r + IR' \tag{6}$$

onde  $R'$  é a soma das resistências internas da célula e as resistências dos sobrepotenciais de ativação e concentração em ambos os eletrodos.

A Fig. 4 apresenta algumas curvas experimentais para a carga e descarga de uma pequena célula de sódio-cloreto metálico. Observa-se de imediato na Fig. 4, que a tensão nos terminais da célula é inferior à tensão reversível de 2,35V, e que a tensão durante a carga da bateria se eleva acima desse valor. O desvio da tensão  $V_r$  é a influência combinada da resistência interna e das perdas de polarização. À medida que a corrente de carga/descarga aumenta, esse desvio torna-se cada vez maior.

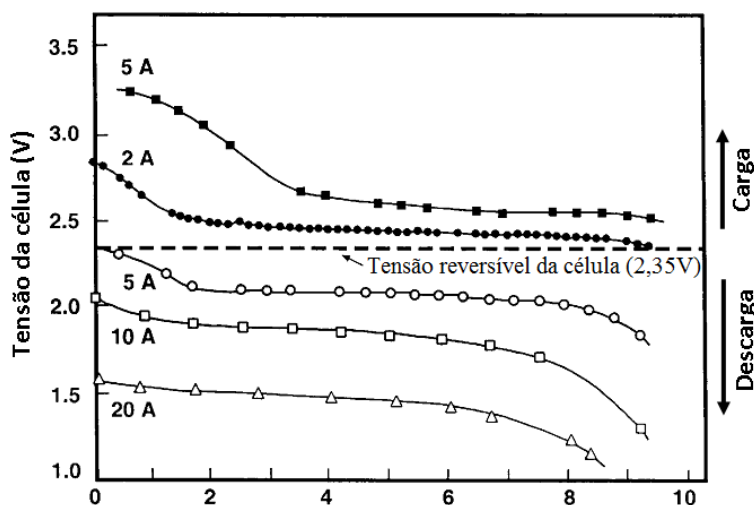


Figura 4. Curvas experimentais para a carga e descarga para uma célula de sódio-cloreto metálico de 7,7Ah (os símbolos abertos representam descarga; símbolos fechados representam carga).

Observa-se também na Fig. 4, que à medida que a célula/bateria se descarrega, a tensão em seus terminais vai diminuindo até atingir um valor denominado tensão de corte, que é a tensão abaixo da qual se pode considerar a célula/bateria descarregada. O perfil da tensão durante a descarga de uma célula/bateria não é o mesmo para todos os tipos de células/baterias. Algumas delas têm uma curva de descarga bastante plana, particularmente para baixas correntes de descarga, com uma queda abrupta da tensão quando o fim da descarga se aproxima. Esse é o caso, por exemplo, da célula de sódio apresentada na Fig. 4. Nesses casos é relativamente simples definir o ponto final da descarga. Para muitas outras baterias, a tensão de descarga declina progressivamente e o ponto final de descarga é definido arbitrariamente, como ocorre com as baterias de chumbo-ácido, conforme ilustrado na Fig. 5.

## 5 CAPACIDADE DE UMA CÉLULA/BATERIA

Se uma célula/bateria for descarregada a uma corrente constante, a sua capacidade de armazenamento é o produto da corrente pelo número de horas (Ah), para o qual a célula/bateria pode ser descarregada até que a tensão em seus terminais atinja a tensão de corte. Se a corrente não for constante, a capacidade de armazenamento é a integral da corrente ao longo do tempo de descarga. No sistema internacional de unidades 1Ah é igual a 3600 C.

É importante salientar que a capacidade de armazenamento depende de vários fatores, entre eles a temperatura ambiente, o histórico de cargas/descargas da célula e da taxa de descarga, ou seja, quanto maior a taxa de descarga empregada menor a capacidade de armazenamento.

Para ilustrar a influência da taxa de descarga na capacidade da bateria, considere a Fig. 5 que mostra uma família de curvas de descarga de uma bateria de chumbo-ácido com capacidade nominal de 100Ah quando descarregada em 5h. Cada uma das curvas apresenta a corrente a que a bateria foi descarregada e o tempo de descarga, isto é, o tempo decorrido até que a tensão no terminal da bateria alcance o valor de corte previamente definido.

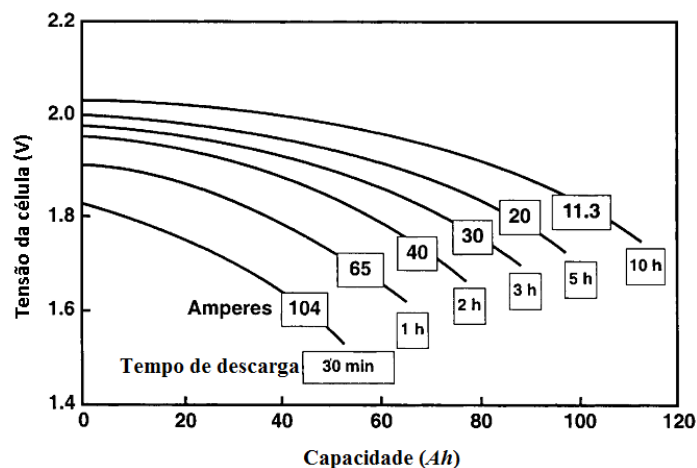


Figura 5. Curvas de descarga para uma bateria chumbo-ácido de 100Ah a uma taxa de descarga de 5h.

Pode ser visto na Fig. 5 que a capacidade fornecida pela bateria para uma descarga em um intervalo de tempo de 30 minutos, para uma tensão de corte de 1,7V, é de aproximadamente 30Ah, ou seja, é menor do que aquela apresentada para a descarga ocorrida durante 5h. De forma análoga, pode-se observar que quando o tempo de descarga é de 10h, a capacidade de armazenamento alcança um valor cerca de 20% maior do que o nominal. A Fig. 6 ilustra a leitura desses valores.

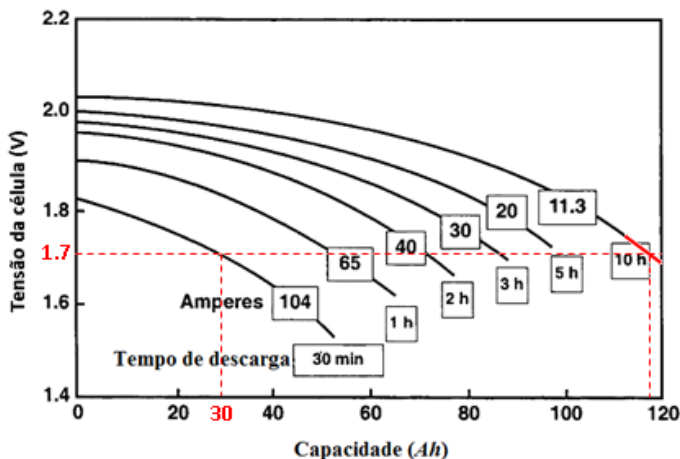


Figura 6. Capacidade de uma bateria chumbo-ácido de 100Ah a taxas de descarga de 30 min e 10h.

Também é importante notar nas Figs. 5 e 6 que a tensão de operação da célula diminui acentuadamente quanto mais elevada for a taxa de descarga. Isso ocorre por causa do fenômeno de polarização, já discutido anteriormente.

Os fabricantes especificam a capacidade nominal de uma célula, ou bateria, sob algumas condições de descarga, como a duração da descarga, em geral 5h; a temperatura em que ocorre a descarga (25 °C) e a tensão de corte, ou seja, a tensão abaixo da qual a bateria é considerada descarregada. Em geral, os fabricantes informam a capacidade de uma bateria da forma C/t, onde C significa a capacidade da bateria em Ah e t é o tempo de descarga da bateria. Assim, C/5 é a capacidade da bateria para um tempo de descarga de 5h, enquanto que 2C significa a capacidade para um tempo de descarga de 30 min. Um refinamento é expressar a taxa de descarga como C<sub>x</sub>/t, onde x é o tempo de descarga para o qual a capacidade foi definida. Por exemplo, C<sub>5</sub>/5 é a taxa de descarga de uma bateria cuja capacidade medida em 5h é C<sub>5</sub>. Assim, a taxa C<sub>5</sub>/5 é 20A para uma bateria de capacidade nominal de 100Ah para um tempo de descarga de 5h. A descarga da mesma bateria a uma corrente constante de 50A, poderia ser representada por C<sub>5</sub>/2.

O montante de carga retirada da bateria comparada com o montante total disponível para a mesma taxa de descarga é chamado de profundidade de descarga (em inglês *depth-of-charge* – DoD), geralmente expresso em porcentagem. Outro conceito importante é o de estado de carga da bateria (em inglês *state-of-charge* – SoC), que é uma fração da capacidade total da bateria, expressa em porcentagem, é a carga ainda disponível para descarga. O estado de carga e a profundidade de descarga estão relacionados conforme a equação (7).

$$SoC\% = (100 - DoD\%) \tag{7}$$

Outro termo que é bastante empregado, sobretudo quando se fala de eletrodos é a densidade de corrente, que é a corrente por unidade de área do eletrodo, geralmente expressa em mA/cm<sup>2</sup> ou mA cm<sup>-2</sup>.

Para baterias de pequeno porte, utilizadas em aparelhos eletroportáteis, é usual medir sua capacidade em horas de uso como uma função de uma carga resistiva. Por exemplo, a Fig. 7 ilustra as curvas de descarga para uma célula primária alcalina de manganês tamanho AA, em função da carga resistiva aplicada a ela para uma tensão de corte de 0,8V a uma temperatura de 21°C. A vida útil varia de 140h para uma carga de 62Ω até 8h para uma carga de 3,9Ω.

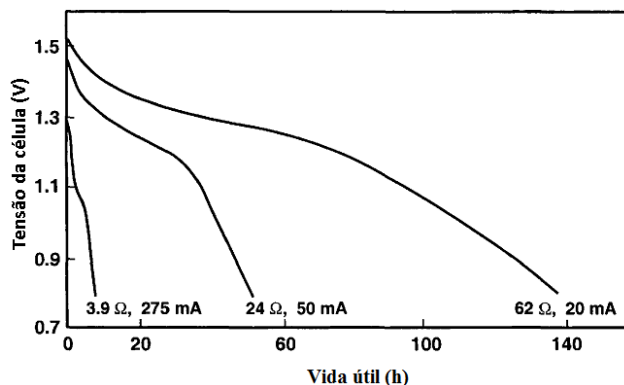


Figura 7. Curvas de descarga para uma célula primária alcalina-manganês, tamanho AA

## 6 ENERGIA E POTÊNCIA ESPECÍFICAS E DENSIDADES DE ENERGIA E POTÊNCIA

Os conceitos de energia específica e densidade de energia são importantes quando se deseja comparar baterias, sobretudo quando o volume e o peso da bateria se tornam características importantes para a aplicação em questão.

A energia específica, também denominada densidade gravimétrica de energia, é definida como energia armazenada por unidade de massa, expressa em  $\text{Whkg}^{-1}$ . Já a densidade de energia ou densidade volumétrica de energia é definida como a energia armazenada por unidade de volume, expressa em  $\text{Whl}^{-1}$ , ou  $\text{Whdm}^{-3}$ .

Outro termo importante é a energia específica teórica de uma bateria. Este parâmetro é calculado para a célula reversível, o número de elétrons transferidos na reação da célula e a massa dos materiais ativos. Não leva em consideração a massa dos componentes inertes da bateria, tais como o *container* das células, os coletores de corrente, os barramentos, os separadores e o eletrólito. A energia específica prática de uma bateria é, normalmente, de 4 a 5 vezes menor do que a energia específica teórica. A utilidade da energia específica teórica é permitir a comparação de células com diferentes químicas antes de se construir a bateria.

De forma análoga à energia, é possível definir potência específica ( $\text{Wkg}^{-1}$ ) e densidade de potência ( $\text{Whl}^{-1}$ , ou  $\text{Whdm}^{-3}$ ). Dependendo da aplicação, os requisitos podem ser para o suprimento contínuo de potência, picos de potência por um curto período de tempo (1 a 10 min), ou pulsos de potência com duração máxima de 1s. A potência de saída de uma bateria não é determinada apenas por sua química, mas também por seu projeto e construção, tanto que é possível construir, com a mesma química, células das mais variadas potências de saída.

Infelizmente, há uma solução de compromisso entre potência de saída e energia armazenada. Quanto maior for a potência disponível, menor será a energia armazenada. A razão fundamental para isso é que alta potência de saída requer uma célula com baixa resistência interna e baixa polarização de eletrodo. Isto por sua vez requer eletrodos finos com grandes superfícies e acondicionados bem próximos uns dos outros. Isso implica em que os coletores de corrente dos eletrodos, os separadores, etc. se constituam em uma grande fração da massa e do volume da célula, enquanto o material ativo representa uma fração menor. Assim, a energia específica e a densidade de energia de uma célula de alta potência são menores do que aquelas para uma célula convencional de mesma química. A título de exemplo, a Tab. 1 apresenta uma comparação entre dois tipos de baterias de níquel-cádmio utilizadas para tração.

**Tabela 1. Energias e potências de pico específicas para uma bateria de Ni-Cd para tração**

Parâmetro	Célula Padrão	Célula de Alta Potência
Capacidade nominal (Ah)	100	56
Energia específica ( $\text{Wh kg}^{-1}$ )	55	35
Potência de pico específica ( $\text{W kg}^{-1}$ )*	120	220

\*medida a DoD de 80%.

Observando a Tab. 1 vê-se que a bateria de alta potência tem uma potência de pico 83% maior do que o modelo tradicional, à custa de uma perda 36% na energia armazenada.

A título de ilustração uma bateria de alta potência estaria voltada a aplicações em veículos elétricos híbridos, onde um pequeno motor a combustão interna fornece autonomia ao veículo enquanto que a bateria alimenta um reforço na potência de tração por curtos períodos de tempo, por exemplo, durante ultrapassagens ou subidas. A versão padrão da bateria se aplica aos veículos elétricos tradicionais onde se requer da bateria tanto autonomia, quanto potência.

Na prática a máxima potência contínua fornecida por uma bateria é limitada por questões térmicas, especialmente em se tratando de bancos de bateria onde as baterias são dispostas muito próximas umas das outras, fato que faz com que as perdas por efeito Joule aumentem ainda mais a temperatura ambiente, criando a necessidade de aumentar a dissipação de calor, que em alguns bancos é feita pela circulação forçada de ar, ou até mesmo pela circulação de líquido refrigerante.

Para a descarga de potência pulsada, os efeitos térmicos não são tão significativos, de modo que altas potências podem ser fornecidas durante curtos intervalos de tempo. Algumas das modernas células de íons de lítio apresentam uma excepcional capacidade de fornecer um pulso de potência. Por exemplo, uma célula de 6,5Ah, quando totalmente carregada, é capaz de fornecer pulsos de potência da ordem de  $1,5\text{kWkg}^{-1}$  ( $3\text{kWdm}^{-3}$ ).



## 7 TEMPERATURA DE OPERAÇÃO DA BATERIA

Outro ponto bastante importante que deve ser considerado para a utilização das baterias é a faixa de temperatura dentro da qual elas irão operar. A maioria das baterias opera satisfatoriamente entre 15 e 30°C. À medida que a temperatura de operação se afasta desta faixa seu desempenho se deteriora, especialmente para baixas temperaturas. Para ilustrar esta característica a Fig. 7 apresenta a variação da energia específica de três células primárias, todas com eletrodo negativo de zinco, em função da temperatura ambiente.

Em cada um dos três tipos de bateria, a energia máxima é alcançada por volta dos 40°C. À medida que a temperatura se afasta deste ponto de máximo há uma degradação acentuada no desempenho das baterias, sobretudo para temperaturas baixas, o que se mostrou mais crítico para as células de zinco-óxido de mercúrio e zinco-carbono, que se tornam praticamente inúteis para temperaturas abaixo de 0°C.

A Fig. 8 ilustra o desempenho de uma célula de lítio-dióxido de manganês com eletrólito orgânico capaz de operar até em temperaturas da ordem de -40°C.

Muitas baterias, particularmente aquelas com eletrólito aquoso, sofrem uma autodescarga lenta quando armazenadas, obviamente em circuito aberto. A taxa em que isso ocorre depende de fatores como a química da bateria, sua construção e especialmente da temperatura de armazenamento. Normalmente a taxa de auto descarga aumenta à medida que a temperatura aumenta.

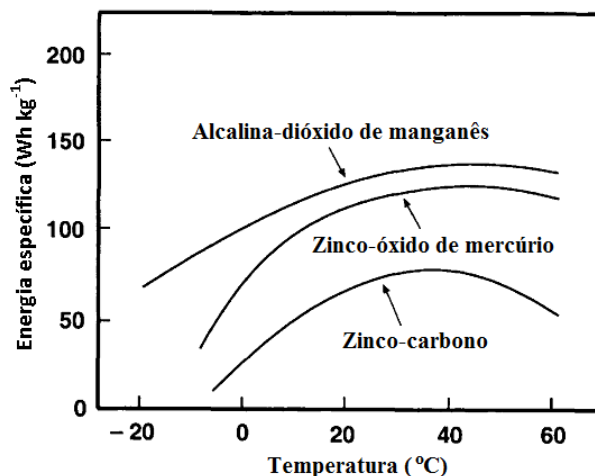


Figura 7. Energia específica de diferentes células primárias em função da temperatura.

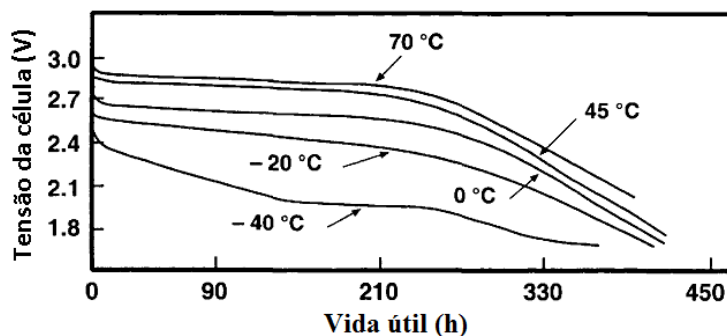


Figura 8. Curvas de descarga para uma célula de lítio-dióxido de manganês

## 8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E TAXA DE RECARGA

Ao se descarregar uma bateria secundária, o montante de eletricidade recuperado é sempre menor do que aquele utilizado para carregar a bateria. A eficiência elétrica ou eficiência energética do ciclo carga/descarga pode ser definida como a razão entre a energia retirada da bateria e a energia utilizada para carregar a bateria. As perdas elétricas associadas com o ciclo de carga/descarga são compostas por duas partes:

- Eficiência coulombica. Esta perda está associada à corrente desperdiçada nas reações químicas, que não estão diretamente relacionadas com a produção de energia, tais como decomposição do eletrólito dando origem a formação de gases; corrosão dos componentes da bateria; etc.
- Eficiência voltaica. Conforme mostrado na Fig. 3 a tensão requerida para o carregamento da bateria é sempre maior do que a tensão de descarga, e a diferença entre elas, é a medida da ineficiência de todo o processo. Essa ineficiência está relacionada com a resistência interna da célula e com as perdas devido à polarização dos eletrodos. Quanto maior for a corrente durante a carga ou a descarga maior será o desvio da tensão terminal em relação à tensão reversível da célula, isto é, a tensão de circuito aberto.

O produto da eficiência coulombica pela eficiência voltaica fornece a eficiência global da bateria para uma dada condição de operação. A eficiência global da bateria não depende, somente, das taxas de carga e descarga e da temperatura, mas também das particularidades dos semiciclos de carga e descarga, uma vez que as perdas não se mantêm constantes durante todo o processo. Por exemplo, durante o processo de carga, quando a bateria se aproxima de sua carga máxima, aumenta o volume de gás liberado pela reação, diminuindo, desta forma, a eficiência coulombica. Ao mesmo tempo, o efeito de polarização dos eletrodos aumenta, levando a uma redução na eficiência voltaica. Quando a bateria está operando em regime de sobrecarga, há somente a decomposição do eletrólito o que leva a eficiência coulombica a zero. De maneira análoga, quando a bateria está operando em regime de sobredescarga destacam-se reações outras que não aquelas responsáveis pela produção de energia, de modo que a eficiência global da bateria também diminui drasticamente.

Para baterias operando em torno de suas condições nominais a eficiência coulombica gira em torno de 90% e a eficiência global gira em torno de 50 a 75%, de conformidade com as taxas de carga e descarga empregadas.

Outra consideração importante é o tempo gasto para recarregar uma bateria. As taxas de recarga recomendadas pela maioria dos fabricantes são substancialmente menores do que as taxas de descarga comumente empregadas. Contudo, muitas vezes deseja-se uma recarga rápida. Embora, para diversos tipos de baterias, seja possível um tempo menor de recarga, sem a ocorrência de danos, tal prática não é compatível com uma política de alta eficiência, embora a perda de eficiência possa ser mitigada se a bateria for carregada rapidamente até 80% de sua capacidade nominal e os outros 20% restantes forem carregados no regime normal.

## 9 VIDA ÚTIL DE UMA BATERIA

A vida útil de uma célula primária é normalmente definida pelo ponto final da tensão na parte mais íngreme da curva de descarga. Uma vez descarregada além desse ponto a célula é descarregada.

As células secundárias exibem uma perda gradual de desempenho, até que já não seja mais possível a sua utilização. Sendo assim, a vida operacional de uma bateria pode ser definida cronologicamente (anos/horas de uso), ou em termos do número de ciclos de carga-descarga (ciclo de vida da bateria). O fim da vida útil pode ser considerado o ponto no qual a capacidade da bateria esteja abaixo de um nível aceitável, ou o ponto no qual a capacidade máxima de potência a 80% DoD seja inferior a 80% de seu valor inicial.

O número de ciclos de carga/descarga de uma bateria é criticamente dependente do regime de carga/descarga a que está submetida à bateria, isto é, ao histórico de carga/descarga. Ciclos de descarga profunda e sobrecarga diminuem consideravelmente a vida útil da bateria. O contrário também é verdadeiro, ciclos de descargas rasos aumentam a vida útil da bateria. Quando são requeridas descargas profundas regulares, a maioria dos fabricantes recomenda que ela não exceda 80% da capacidade nominal da bateria.

## 10 CONCLUSÕES

Pelo exposto neste trabalho fica claro que a especificação de uma bateria para uma determinada finalidade não é imediata e envolve muitos pontos, tais como tensão nominal, capacidade nominal, dimensões, desempenho e custo. O desempenho técnico depende da aplicação destinada à bateria e para estimá-lo é necessário antecipar o ciclo de trabalho a ser atendido. A especificação de uma bateria pode ser definida em atributos vitais, aqueles que são indispensáveis; e atributos desejados, aqueles que devem ser avaliados considerando-se o custo e a capacidade de armazenamento. Entre as principais características que podem ser requeridas das baterias pode-se citar: um platô de tensão estável sobre uma boa profundidade de carga; alta energia específica e alta densidade de energia; alta potência de pico por unidade de massa e de volume; operação em uma faixa de temperatura bastante ampla; alta eficiência de energia; elevado número de ciclos de carga/descarga com profundidade de descarga; passível de carga rápida; boa retenção de carga em circuito aberto; capacidade de suportar sobrecarga e sobredescarga; confiabilidade de operação; pouca manutenção e, finalmente, robustez.

## REFERÊNCIA

DELL, Ronald M.; RAND, David A. J. *Understanding Batteries*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2001. 223 p.