

Os fusíveis devem ser colocados na saída de cada série tanto no polo positivo quanto no polo negativo. O fusível deve ser para corrente contínua, de preferência do tipo gPV (conforme IEC 60269-6), que é apropriado para operação em sistemas fotovoltaicos pois apresenta alta durabilidade.

Ao longo dos anos, vem se observando que os diodos de bloqueio apresentam alto índice de falhas, prejudicando o desempenho do sistema. O fusível fotovoltaico é um componente de proteção que pode substituir o diodo de bloqueio.

A Figura 4.14 apresenta o diagrama de um arranjo com 4 séries fotovoltaicas conectadas em paralelo. Para cada conjunto série instalam-se dois fusíveis fotovoltaicos, um em cada polaridade.

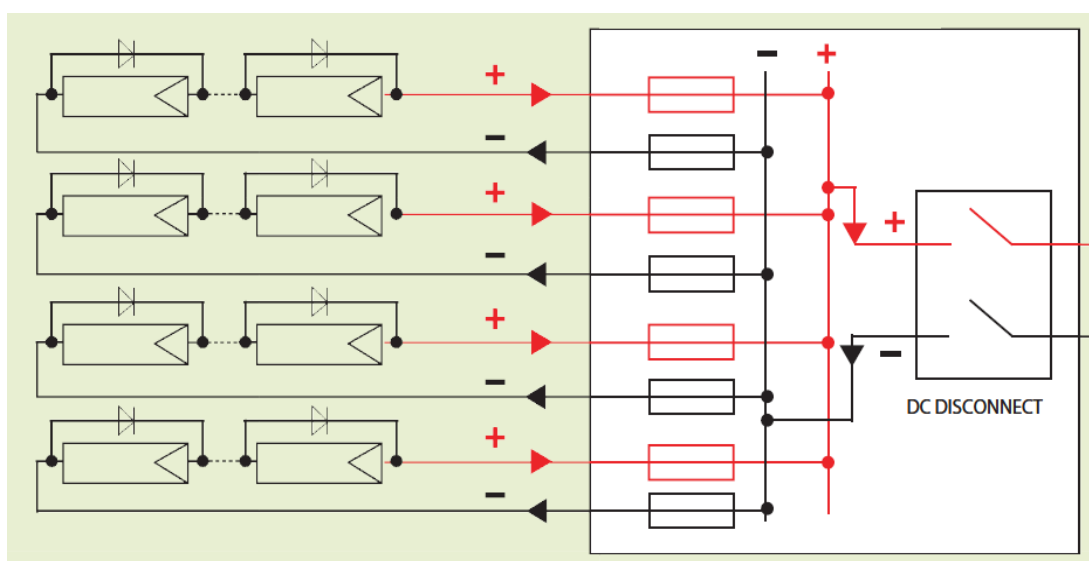


Figura 4.14 – Diagrama com 4 séries fotovoltaicas que utilizam fusíveis fotovoltaicos de proteção. Fonte: (Catálogo da Cooper-Bussmann: Photovoltaic System Protection Application Guide)

4.3 – Baterias

Em sistemas fotovoltaicos isolados da rede elétrica, o uso de dispositivos de armazenamento de energia faz-se necessário para atender a demanda em períodos nos quais a geração é nula ou insuficiente (à noite ou em dias chuvosos ou nublados, com baixos níveis de irradiância solar). Assim, parte da energia solar convertida em energia elétrica pelos módulos fotovoltaicos durante o dia é armazenada para ser usada em outros momentos para atender a demanda.

Pode-se também utilizar baterias para sistemas fotovoltaicos conectados à rede para a operação ilhada do sistema de geração no caso de falta da energia da rede elétrica. Sistemas assim são encontrados na Europa e nos EUA. No Brasil, para o caso de micro e minigeração, regulamentado pela RN Aneel N° 482/2012 (ANEEL, 212b) não há regulamentação prevendo este tipo de operação e as distribuidoras de energia não o aceitam, exigindo, inclusive, proteção para desligamento da geração em casos de ilhamento.

Existem, em princípio, diversas formas de armazenamento de energia, tais como campo elétrico (supercapacitores), campo magnético (indutores com supercondutores, *SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage*), energia mecânica (volantes de inércia - *flywheels*, ar comprimido, bombeamento de água), vetores energéticos (como o Hidrogênio) etc. Entretanto, a bateria eletroquímica ainda é o dispositivo mais utilizado em sistemas fotovoltaicos isolados, por ser uma forma conveniente e eficiente de armazenamento de energia elétrica.

Uma bateria é um conjunto de células ou vasos eletroquímicos, conectados em série e/ou em paralelo, capazes de armazenar energia elétrica na forma de energia química por meio de um processo eletroquímico de oxidação e redução (redox) que ocorre em seu interior. Quando uma bateria carregada é conectada a uma carga elétrica, ocorre o processo reverso, ou seja, uma corrente contínua é produzida pela conversão de energia química em energia elétrica.

As baterias podem ser classificadas, dependendo do tipo de célula que as compõe, em recarregáveis e não recarregáveis. Existem dois tipos básicos de células: primárias e secundárias.

As células primárias compõem as baterias que podem ser utilizadas apenas uma vez (não recarregáveis). Quando as células primárias descarregam-se completamente, sua vida útil se encerra e elas devem ser descartadas. As baterias não recarregáveis são geralmente utilizadas como fontes de energia de baixa potência, em aplicações tais como relógios de pulso, calculadoras e muitos outros aparelhos portáteis. É possível encontrar baterias compostas por células primárias que admitem recargas leves, aumentando sua vida útil.

As células secundárias compõem as baterias recarregáveis, ou seja, aquelas que podem ser carregadas com o auxílio de uma fonte de tensão ou corrente, e reutilizadas várias vezes. São comumente chamadas de “acumuladores” ou “baterias de armazenamento” e são úteis na maioria das aplicações por longos períodos, como por exemplo, em sistemas fotovoltaicos.

Dos vários tipos de acumuladores eletroquímicos existentes, a bateria de Chumbo-ácido (Pb-ácido) ainda é a tecnologia mais empregada. Baterias com tecnologias mais modernas, tais como Níquel-Cádmio (NiCd), Níquel-hidreto metálico (NiMH), íon de Lítio (Li-ion), dentre outras, embora apresentando vantagens (maior eficiência, maior vida útil, maior profundidade de descarga), geralmente não são ainda economicamente viáveis na maioria dos sistemas fotovoltaicos.

A Tabela 4.4 apresenta as principais características de alguns tipos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente.

Tabela 4.4 – Dados técnicos de catálogos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente. Os dados da tabela não correspondem necessariamente aos limites de cada tecnologia.

Fonte:(LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência η_{wh} [%]	Vida útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de operação		Aplicações típicas (exemplos)
							Carga padrão [°C]	Descarga [°C]	
Chumbo ácido ⁷ (Pb-ácido)	H ₂ SO ₄	20–40	50–120	80–90	3–20	250–500	–10 a +40	–15 a +50	Uso estacionário, tração, automotiva
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30–50	100–150	60–70	3–25	300–700	–20 a +50	–45 a +50	Mesmo tipo de aplicações das baterias chumbo-ácido, ferramentas, veículos elétricos
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	KOH	40–90	150–320	80–90	2–5	300–600	0 a +45	–20 a +60	<i>Notebooks</i> , celulares, câmeras fotográficas, veículos elétricos e híbridos, brinquedos
Íon de Lítio (Li-ion, Li-polímero)	Polímeros orgânicos	90–150	230–330	90–95	–	500–1000	0 a +40	–20 a +60	<i>Notebooks</i> , celulares, filmadoras, <i>smart cards</i> , veículos elétricos e híbridos
Bateria alcalina recarregável de Manganês (RAM) ⁸	KOH	70–100	200–300	75–90	–	20–50	–10 a +60	–20 a +50	Produtos de consumo, brinquedos
Cloreto de Níquel e Sódio (NaNiCl)	β'' -Al ₂ O ₃	~100	~150	80–90	–	~1000	+270 a +300	+270 a +300	Veículos elétricos e híbridos (possíveis aplicações estacionárias)

⁷ Não incluídas as baterias de eletrodos positivos tubulares, descritas no item 4.3.3.4.

⁸ RAM – *rechargeable alkaline manganese*

4.3.1 – Terminologia

A seguir é apresentada uma lista com os principais termos relativos a baterias.

Autodescarga

Em um processo espontâneo, todas as baterias descarregam-se gradualmente, através de processos químicos internos (perdas internas), quando não estão em uso. A este processo dá-se o nome de autodescarga.

A taxa de autodescarga é normalmente especificada como uma percentagem da capacidade nominal que é perdida a cada mês.

As baterias de Chumbo-ácido têm como característica uma alta taxa de autodescarga. Quando não estão sendo utilizadas, podem perder de 5 a 30 % por mês de sua capacidade, dependendo da temperatura e composição química de suas células. Comparativamente, a faixa média de autodescarga das baterias de Níquel-Cádmio é de 3 a 6 % ao mês.

Bateria

A palavra “bateria” refere-se a um grupo de células eletroquímicas conectadas eletricamente em série e/ou paralelo, para produzir tensão e/ou corrente mais elevadas do que a que pode ser obtida por uma única célula. Uma bateria pode também ser constituída por uma única célula, caso esta se constitua em um sistema de armazenamento eletroquímico completo. Assim, uma bateria é um dispositivo eletroquímico que converte energia química em energia elétrica e vice-versa.

Capacidade

Embora a capacidade de uma bateria seja normalmente definida como a quantidade de amperes-hora (Ah) que pode ser retirada da mesma quando esta apresenta carga plena, a capacidade de uma bateria também pode ser expressa em termos de energia (watts-hora).

Capacidade Nominal – é uma estimativa conservadora do fabricante, do número total de amperes-hora que pode ser retirado de uma célula ou bateria nova, para os valores especificados (de acordo com certos padrões ou normas, ou ainda do próprio fabricante) de corrente de descarga, temperatura e tensão de corte.

Capacidade Instalada – é o total de amperes-hora que pode ser retirado de uma célula ou bateria nova, sob um conjunto específico de condições operacionais, incluindo a taxa de descarga, temperatura, e tensão de corte.

Capacidade Disponível – é o total de amperes-hora (Ah) que pode ser retirado de uma célula ou bateria, sob um conjunto específico de condições operacionais, incluindo a taxa de descarga, temperatura, estado inicial de carga, idade e tensão de corte.

Capacidade de Energia – é o número total de watts-hora (Wh) que pode ser retirado de uma célula ou bateria totalmente carregada. Geralmente é obtido pelo produto da capacidade em Ah pela tensão nominal.

Teoricamente, uma bateria de 200 Ah deve ser capaz de fornecer corrente de 200 A durante 1 hora, ou 50 A por 4 horas, ou 4 A por 50 horas, ou ainda, 1 A por 200 horas. Porém, um fator que influencia na capacidade da bateria é a velocidade de carga ou descarga. Quanto mais lento for o descarregamento, ligeiramente maior será a sua disponibilidade de carga. Os fabricantes normalmente fornecem a capacidade para cada regime de descarga (daí ser importante a especificação das condições de uso).

Outro fator que influencia na capacidade é a temperatura de operação da bateria. As características das baterias normalmente são especificadas pelos fabricantes para uma temperatura de 25°C (embora possam ser encontrados valores mais comumente na faixa de 20 a 30°C, bem como outros, dependendo do tipo de bateria). Temperaturas mais baixas reduzem significativamente sua capacidade e temperaturas mais altas resultam em uma capacidade ligeiramente maior, acarretando, contudo, em aumento da perda de água do eletrólito e diminuição do número de ciclos durante a vida útil da bateria.

Carga

Conversão de energia elétrica em potencial eletroquímico, que ocorre no interior da célula, restaurando a energia química da mesma, mediante o fornecimento de uma corrente elétrica a partir de uma fonte externa.

Célula

Unidade eletroquímica básica de uma bateria, que possui uma tensão característica dependente dos materiais nela contidos. Uma célula é uma combinação de dois eletrodos (o anodo, sede da oxidação, e o catodo, sede da redução) e do eletrólito. A diferença em termos de energia livre entre o anodo e o catodo resulta no estabelecimento de uma diferença de potencial elétrico, a qual é a força motriz para as reações eletroquímicas que determinam o funcionamento da célula. Quando uma célula está descarregando, ocorrem reações químicas entre o material ativo de cada eletrodo e o eletrólito, que produzem eletricidade. Durante o processo de carga, a reação inversa ocorre, consumindo energia.

A polaridade dos eletrodos indica o sinal da carga que eles possuem. É essencial que os eletrodos positivo e negativo não se toquem. Caso isto ocorra, um curto-circuito será causado e a célula descarregará rapidamente, podendo até ser danificada.

Quando todo o material ativo nos dois eletrodos é convertido, a célula está completamente descarregada. Durante o carregamento o processo é revertido; ocorre a conversão do material ativo para o estado inicial.

Ciclo

A sequência carga-descarga de uma bateria, até uma determinada profundidade de descarga, é chamada de ciclo.

Densidade de energia

Capacidade de energia nominal normalizada pelo volume (Wh/L) ou pela massa (Wh/kg) da célula ou bateria.

Descarga

Processo de retirada de corrente elétrica de uma célula ou bateria, mediante o acoplamento de uma carga, através da conversão da energia química, disponibilizada como potencial eletroquímico, em energia elétrica, no interior da célula. Quando a descarga ultrapassa 50 % da capacidade da bateria, ela é chamada de descarga profunda.

Eficiência

Relação entre a saída útil e a entrada. Existem duas formas de expressar a eficiência de uma bateria:

Eficiência coulômbica ou de ampere-hora (Ah)⁹ – relação entre a quantidade de carga elétrica (Ah) retirada de uma célula ou bateria durante a descarga e a quantidade necessária para restaurar o estado de carga inicial. É calculada através da razão entre as integrais da corrente ao longo do tempo de descarga e de carga. A eficiência coulômbica é bastante afetada por reações eletroquímicas secundárias que podem ocorrer na célula ou bateria (e, portanto, depende do tipo de bateria e, de seus materiais constituintes), mas, sob condições adequadas de operação, para alguns tipos de baterias, esta é comumente elevada, sendo para uma bateria Chumbo-ácido tipicamente de 95%. A eficiência coulômbica também depende das taxas de carga/descarga e do estado de carga (quando a bateria está totalmente carregada, a eficiência coulômbica é de ~100 %, enquanto que quando está totalmente

⁹ Também chamada por alguns autores de eficiência farádica.

descarregada é de ~100 %). É importante alertar que alguns fabricantes se referem à eficiência coulômbica como sendo a eficiência da bateria, o que não é correto.

Eficiência voltaica ou de tensão (V) – razão entre a tensão (ou potencial) média durante a descarga de uma célula ou bateria e da tensão média durante a carga necessária para restaurar a capacidade inicial. Quando se considera o valor médio de potencial para uma bateria formada por muitas células pode-se constatar considerável dispersão dos valores característicos das células unitárias. Além disso, como a tensão é dependente do estado de carga, a eficiência voltaica também é influenciada por esta condição, notadamente pelos efeitos de polarização que ocorrem nos eletrodos e pelas resistências ao transporte de elétrons e de íons. A eficiência voltaica é também influenciada pelas taxas (correntes) de carga/descarga. Considerando que uma bateria Chumbo-ácido monobloco de 12 V num sistema fotovoltaico é carregada numa tensão média de 13,8 V e descarregada numa tensão média de 12,5 V, tem-se uma eficiência voltaica de ~90,5%.

Eficiência global ou de watt-hora (Wh) – Também conhecida como eficiência energética, pois é o produto das eficiências coulômbica e voltaica, sendo determinada pela razão entre a energia retirada da bateria durante o processo de descarga e a energia total característica do estado de carga inicial. Considerando os valores *default* acima apresentados para as eficiências coulômbica e voltaica, teríamos uma eficiência global de ~86% para uma bateria Chumbo-ácido.

Eletrodo

Os eletrodos são os componentes materiais de uma célula eletroquímica capazes de conduzir elétrons e podem ser constituídos por uma parte que fornece suporte estrutural para o material ativo e uma zona reacional rica no material eletroquimicamente ativo. Em uma célula eletroquímica existem dois eletrodos: o anodo, que é a sede da oxidação eletroquímica, funcionando como fonte dos elétrons, e o catodo, que é a sede da redução eletroquímica, funcionando como sorvedouro dos elétrons. Em se tratando de células secundárias (recarregáveis), durante o processo de descarga o anodo é o terminal negativo e o catodo é o terminal positivo, já durante o processo de carga ocorre o inverso, sendo o anodo o terminal positivo e o catodo o terminal negativo da célula.

Eletrólito

Meio material que proporciona o de transporte de íons entre os eletrodos anódico e catódico. Em algumas células, tais como as do tipo chumbo-ácido, o eletrólito pode também participar diretamente nas reações eletroquímicas de carga e descarga.

Equalização

Processo em que se busca igualar o estado de carga das células que compõem uma bateria. Para as baterias de Chumbo-ácido este processo é dimensionado para levar todas as células a carga plena. Alguns tipos de baterias requerem uma descarga total durante o processo de equalização.

Estado de carga

Capacidade remanescente disponível em uma bateria ou célula em determinado momento, expressa como porcentagem da capacidade nominal. Em inglês é denominada soc – *state of charge*. Por exemplo, se 25 Ah foram retirados de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah completamente carregada, o novo estado de carga é 75 %. É o valor complementar da profundidade de descarga.

$$\text{estado de carga (\%)} = 100 \times \frac{\text{capacidade remanescente na bateria (Ah)}}{\text{capacidade nominal da bateria (Ah)}}$$

$$\text{profundidade de descarga (\%)} = 100 - \text{estado de carga (\%)}$$

Estado de carga de 100% indica bateria totalmente carregada enquanto que 0% indica totalmente descarregada.

Estratificação

Divisão do eletrólito em camadas de diferentes densidades, sendo mais denso no fundo do vaso e apresentando, como consequência, a redução da capacidade da bateria e a corrosão da parte inferior dos eletrodos (placas). Tal fenômeno é mais significativo em baterias Chumbo-ácido, mas as questões relacionadas à homogeneidade e à uniformidade dos eletrólitos e dos eletrodos condicionam fortemente o desempenho dos vários tipos de baterias. Este efeito obviamente se aplica às baterias estacionárias ou fotovoltaicas, pois nas baterias automotivas e tracionárias a movimentação promove a mistura do eletrólito eliminando naturalmente a estratificação.

Flutuação

Processo de carga que busca manter as baterias ou células com um estado de carga próximo à carga plena, evitando que as mesmas permaneçam por longos períodos com estado parcial de carga. Este processo é importante para baterias de chumbo-ácido, sendo dispensável para as de níquel-cádmio.

Gaseificação¹⁰

Pode ocorrer em baterias de Chumbo-ácido, sendo também chamada de borbulhamento da bateria, correspondendo à geração de gás em um ou mais de seus eletrodos. A gaseificação ocorre em situação de carga para tensões acima da tensão de flutuação (e, portanto, também superiores a tensão nominal), caracterizando uma situação de sobrecarga, na qual toda a corrente elétrica passa a ser consumida no processo da eletrólise da água presente no eletrólito, o que resulta na formação de bolhas de Hidrogênio (H₂) e de Oxigênio (O₂). A persistência desse processo leva à perda de eletrólito e ao aumento da resistência interna da bateria, bem como ao incremento dos processos corrosivos que podem danificá-la irreversivelmente.

Grade

Estrutura condutora que suporta o material ativo de uma placa, mas que não participa quimicamente da reação de carga/descarga.

Material ativo

Constituinte de uma célula que participa diretamente da reação eletroquímica de carga e descarga. A capacidade de armazenamento de uma bateria é função da quantidade (massa) de material ativo que ela contém.

Placa

Montagem do material ativo e, em alguns casos, uma grade de suporte. As placas formam os eletrodos anódico e catódico de uma célula.

Polarização

Redução do valor do potencial de uma célula eletroquímica ou de seus eletrodos, a partir dos seus respectivos valores de equilíbrio, em função da passagem de corrente elétrica devido ao acoplamento de uma carga (impedância). Nos eletrodos, quando da conexão de cargas elétricas externas à célula, aparecem sobrepotenciais (ou sobretensões) – definido como a diferença entre o potencial real instantâneo de um eletrodo, numa certa circunstância, e o potencial de equilíbrio do eletrodo – que promovem a redução dos respectivos potenciais e estão associados a fenômenos reacionais e de transferência de massa. Em geral, em baixas densidades de corrente elétrica ocorre o predomínio da polarização por ativação devida à barreira de energia de ativação que limita o processo de transferência de elétrons no eletrodo, ao passo que em altas densidades de corrente é o processo difusivo de transporte de massa que se torna predominante, resultando na polarização por concentração. Além disso, sob diversas circunstâncias, pode haver um retardamento do processo

¹⁰ Também chamada de gaseio por alguns autores.

eletroquímico global como resultado das resistividades dos materiais constituintes dos eletrodos e do eletrólito, notadamente àquela relacionada à baixa concentração iônica do eletrólito, as quais resultam na polarização ôhmica.

Profundidade de descarga

A profundidade de descarga indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirado a partir do estado de plena carga. Em inglês é denominada *depth of discharge*. Por exemplo, a remoção de 25 Ah de uma bateria de capacidade nominal de 100 Ah resulta em uma profundidade de descarga de 25 %. É o valor complementar do estado de carga.

Deve-se observar que, sob certas condições, tais como taxas de descarga inferiores à que foi utilizada para especificar a bateria, a profundidade de descarga pode exceder os 100 %.

Segundo alguns fabricantes de baterias de níquel-cádmio, estas podem ser totalmente descarregadas e recarregadas sem sofrerem alteração no seu desempenho. Já as de chumbo-ácido possuem restrições quanto a descargas profundas. A profundidade de descarga da bateria chumbo-ácido a ser considerada em um projeto depende do tipo construtivo da mesma. Baterias chamadas OPzS e OPzV¹¹ aceitam até 80% de profundidade de descarga máxima enquanto baterias estacionárias comuns não devem passar de 50%. Quanto maior a profundidade de descarga, menor a quantidade de ciclos que a bateria chumbo-ácido vai apresentar em sua vida útil.

Separador

Material eletricamente isolante, microporoso e permeável ao fluxo de íons, usado para evitar o contato direto entre as placas que formam a célula.

Sobrecarga

Fornecimento de corrente elétrica a uma célula após a mesma ter atingido a carga plena. A sobrecarga não aumenta a disponibilidade de energia na célula ou bateria e pode resultar na gaseificação (borbulhamento) ou no sobreaquecimento da mesma, ambos possuindo reflexos negativos na vida útil do dispositivo. Em baterias com eletrólitos aquosos esta situação implica na perda de água.

Sulfatação

Formação e deposição de cristais de sulfato de Chumbo sobre as placas de uma bateria de Chumbo-ácido. Pode ser causada por se deixar este tipo de bateria descarregada por prolongados

¹¹ As baterias OPzS e OPzV são baterias Chumbo-ácido projetadas para descarga profunda, que possuem placas positivas tubulares envelopadas por separadores porosos e seus elementos apresentam-se em capacidades que variam de 150 a 4.000Ah. As baterias OPzS apresentam eletrólito líquido, e por isso são contidas em vasos transparentes para acompanhamento do nível do eletrólito, necessitando de reposição periódica de água destilada. As baterias OPzV são reguladas a válvula, apresentam eletrólito imobilizado na forma de gel, não requerem manutenção e podem ser instaladas na posição horizontal. Ambas serão descritas posteriormente no item 4.3.3.4.

períodos de tempo ou por submetê-la a severos e repetidos processos de descarga, podendo resultar, por exemplo, no aumento da resistência interna da bateria.

Taxa de carga

Valor de corrente elétrica aplicado a uma célula ou bateria durante o processo de carga. Esta taxa é normalizada em relação à capacidade nominal da célula ou bateria. Por exemplo, uma bateria de 500 Ah de capacidade nominal, com um intervalo de carga de 10 horas a corrente constante, tem sua taxa de carga expressa da seguinte forma:

$$\frac{\text{Capacidade Nominal}}{\text{Intervalo de Carga}} = \frac{500 \text{ Ah}}{10 \text{ h}} = 50 \text{ A} = \text{taxa } C/10$$

Da mesma forma, podem ser expressas diferentes taxas, como C/100 (100 h), C/20 (20 h) etc. A capacidade de uma bateria varia de acordo com a taxa de carga/descarga, conforme mostrado na Figura 4.15, onde se pode observar que a capacidade de uma bateria Chumbo-ácido (ver item 4.3.3) aumenta de forma não linear quando a taxa se reduz (e o número de horas de descarga aumenta). A figura é referenciada à capacidade em C/20, a qual é normalmente usada para o projeto de sistemas fotovoltaicos.

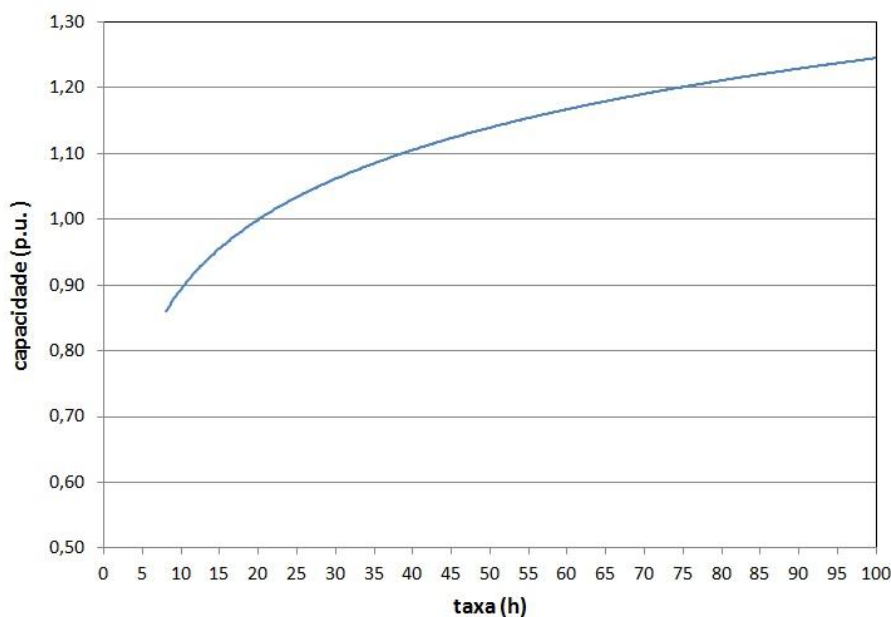


Figura 4.15 – Capacidade de uma bateria Chumbo-ácido em função da taxa de descarga, referenciada à capacidade em C/20 (capacidade @ C/20 = 1,0).

As expressões abaixo são algumas vezes utilizadas para conversão das capacidades nas taxas C/100 e C/10 para a taxa C/20 (válido para baterias Chumbo-ácido), quando outras informações não são disponíveis.

$$C/20(Ah) = 1,1 \cdot C/10(Ah) \tag{4.12}$$

$$C/20(Ah) = 0,9 \cdot C/100(Ah) \tag{4.13}$$

Como a eficiência coulômbica das baterias é inferior a 100 %, o tempo necessário para recarregá-las completamente em determinada taxa é maior que o indicado para a sua descarga com a mesma taxa.

Ao invés da taxa expressa por C/n aqui apresentada, é também possível, embora incomum, utilizar uma forma alternativa expressa por E/n , com base em energia (Wh) e potência (W), de forma totalmente análoga à apresentada.

Taxa de descarga

Valor de corrente elétrica durante o processo de descarga de uma célula ou bateria. Esta taxa pode ser expressa em amperes, mas é mais comumente encontrada normalizada pela capacidade nominal da bateria (ver taxa de carga).

Tensão de circuito aberto

Tensão (ou potencial, daí ser referido também como potencial de circuito aberto) nos terminais de uma célula ou bateria para um determinado estado de carga e a uma determinada temperatura, na condição em que não há corrente entre os terminais.

Tensão de corte

Valor de tensão em que a descarga da bateria é interrompida. Pode ser especificada em função das condições operacionais ou pode ser o valor determinado pelos fabricantes como tensão de final de descarga, a partir da qual danos irreversíveis podem ser causados à bateria.

Tensão de final de carga

Tensão da célula ou bateria na qual o processo de carga é interrompido por supor-se que a carga atingida é suficiente, ou que a bateria ou célula esteja plenamente carregada.

Tensão nominal

Tensão média de uma célula ou bateria durante o processo de descarga com uma determinada taxa de descarga a uma determinada temperatura.

Terminais

Pontos de acesso externo das baterias, que permitem a sua conexão elétrica.

Vida útil

A vida útil de uma bateria pode ser expressa de duas formas: número de ciclos ou período de tempo, dependendo do tipo de serviço para o qual a bateria foi especificada.

Para o primeiro caso, a vida útil é o número de ciclos, com uma determinada profundidade de descarga, a que uma célula ou bateria pode ser submetida antes de apresentar falhas em satisfazer as especificações. Este número, também chamado de vida cíclica, depende da profundidade de descarga do ciclo, da corrente de descarga e da temperatura de operação. Em sistemas fotovoltaicos, normalmente os ciclos carga/descarga são diários, de forma que o número de ciclos de vida corresponde ao número de dias de serviço.

Nas baterias de Chumbo-ácido, o fim de sua vida útil é geralmente tomado como o instante em que a célula, estando totalmente carregada, pode fornecer apenas 80 % da sua capacidade nominal. Esta perda permanente de 20 % está relacionada com a ciclagem e com a idade da bateria.

Em cada ciclo de uma célula, pequenas quantidades de material ativo são despreendidos dos eletrodos e depositados no fundo do vaso. Uma vez que este material separou-se do eletrodo, ele não pode ser utilizado novamente, reduzindo, assim, a capacidade da célula.

A capacidade de uma bateria também é permanentemente reduzida pelo seu envelhecimento, que está diretamente relacionado com a temperatura de operação/armazenamento e a forma de armazenamento das células.

Procedimentos que contribuem para o aumento da vida útil da bateria são: manutenção do estado de carga em baterias de Chumbo-ácido (equalização e flutuação), operação em ambientes de temperatura controlada, controle de sobrecargas e sobredescargas etc.

4.3.2 – Baterias recarregáveis

Como visto anteriormente, baterias recarregáveis são aquelas que apresentam uma constituição química que permite reações reversíveis. Com o auxílio de uma fonte externa, pode-se recuperar a composição química inicial e deixá-la pronta para um novo ciclo de operação. De acordo com a aplicação, elas podem ser classificadas como:

Automotivas - também conhecidas em língua inglesa como SLI (*starting, lighting, ignition*), são baterias projetadas fundamentalmente para descargas rápidas com elevadas taxas de corrente e com reduzidas profundidades de descarga. Esta condição é típica na partida de motores de combustão interna. Tem maior número de placas e placas mais finas, em relação aos outros tipos. Não são adequadas ao uso em sistemas fotovoltaicos, pois tem baixa vida útil para operação em regime de ciclagem.

Tração - indicadas para alimentar veículos elétricos como, por exemplo, empilhadeiras, e são projetadas para operar em regime de ciclos diários com descarga profunda e taxa de descarga moderada (C/6). Possuem liga de Chumbo com alto teor de Antimônio e apresentam alto consumo de água.

Estacionárias - são direcionadas tipicamente para aplicações em que as baterias permanecem em regime de flutuação e são solicitadas ocasionalmente para ciclos de carga/descarga. Esta condição é típica de sistemas de *no-break* ou UPS. Tem baixo Antimônio e baixo consumo de água.

Fotovoltaicas - são projetadas para ciclos diários de profundidade rasa a moderada com taxas de descarga reduzidas (C/20) e devem suportar descargas profundas esporádicas devidas à ausência de geração (dias nublados).

As baterias recarregáveis também podem ser diferenciadas quanto à forma de confinamento do eletrólito em:

Baterias abertas - também denominadas algumas vezes de **ventiladas** (*vented*), são baterias que necessitam de verificação periódica e eventual correção do nível do eletrólito. Seu eletrólito é líquido e livre (não é confinado no separador) e, por esta razão, devem trabalhar na posição vertical. As baterias Chumbo-ácido desta tecnologia são denominadas em língua inglesa de FLA – *flooded lead acid*, ou de FVLA – *free vented lead acid*, ou ainda apenas de VLA. Admitem operar com taxas até C/5.

Baterias seladas - possuem o eletrólito confinado (absorvido) no separador ou sob a forma de gel. Elas também são conhecidas como “livres de manutenção” porque não necessitam de adição de água. Os usuários ligados a aplicações em telecomunicações costumam denominá-las de baterias “reguladas a válvula”. As baterias chumbo ácido desta tecnologia são denominadas em língua inglesa de VRLA – *valve regulated lead acid*, sendo que, quando o eletrólito é absorvido numa manta de vidro porosa que serve de separador, são denominadas AGM – *absorbed glass matt*, enquanto que aquelas com eletrólito gel são muitas vezes do tipo OPzV (item 4.3.3.4). Baterias com eletrólito em gel admitem apenas taxas reduzidas, até C/20. Baterias chumbo-ácido similares às abertas vem sendo vendidas no Brasil como seladas, devido aos motivos detalhados posteriormente (item 4.3.3.2).

Os principais atributos para avaliação de baterias recarregáveis são: densidade de energia (volumétrica ou por peso), eficiência, capacidade, vida cíclica, taxa de autodescarga, reciclabilidade dos materiais e custo.

A eficiência das baterias recarregáveis depende de muitos fatores, dentre os quais se destacam: estado de carga, temperatura de operação, taxas de carga e descarga, além da idade.

Os fatores mais importantes que afetam o desempenho, a capacidade e a vida útil de qualquer bateria recarregável são: profundidade de descarga (por ciclo), temperatura, número de ciclos, controle da carga/descarga e manutenção periódica. A seguir, são detalhados estes fatores.

4.3.2.1 Profundidade de descarga, número de ciclos e temperatura

A profundidade de descarga e a temperatura são os parâmetros mais comumente usados pelos fabricantes de células para estimar a capacidade de vida cíclica da bateria. A Figura 4.16 ilustra os

efeitos da profundidade de descarga e da temperatura de operação na vida cíclica das células secundárias. Os valores da curva são indicativos e dão uma noção do comportamento dos parâmetros para as diversas baterias disponíveis. Recomenda-se, no entanto, que as especificações dos fornecedores sejam sempre consultadas, para se ter uma idéia mais precisa dos mesmos, já que esses parâmetros podem variar muito em função da tecnologia e do modelo da bateria.

A vida cíclica está inversamente relacionada com a profundidade de descarga e a temperatura. A capacidade de qualquer bateria secundária degrada-se mais rapidamente quando a temperatura de operação da bateria e a profundidade de descarga aumentam. Conforme já mencionado, as normas consideram o fim da vida útil de uma bateria Chumbo-ácido como o momento em que a capacidade remanescente da bateria é de 80% de sua capacidade nominal.

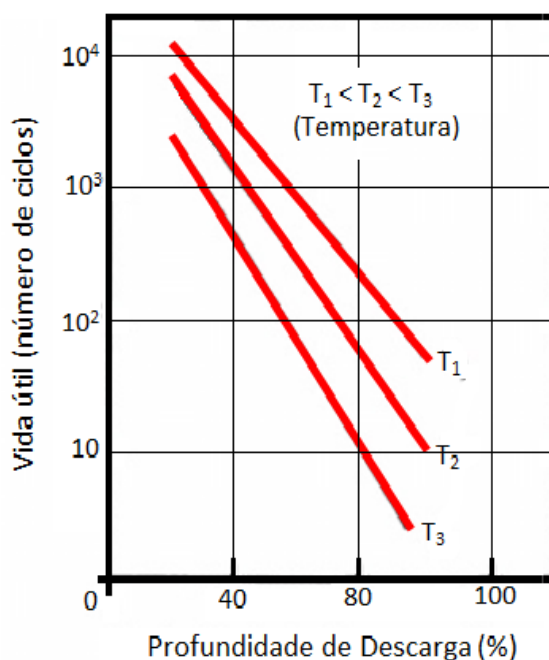


Figura 4.16 – Curvas típicas do efeito da profundidade de descarga e da temperatura na vida útil da bateria. Fonte: (IMAMURA; HELM; PALZ, 1992).

4.3.2.2 – Técnica e modo de operação do controle de carga

O carregamento é uma operação crítica, que afeta diretamente a vida útil da bateria. O objetivo principal de um sistema de controle de carga é carregar a bateria eficientemente, evitando os efeitos prejudiciais do excessivo carregamento. As Figuras 4.17 e 4.18 mostram, respectivamente, curvas típicas de carga e descarga de células de chumbo-ácido abertas.

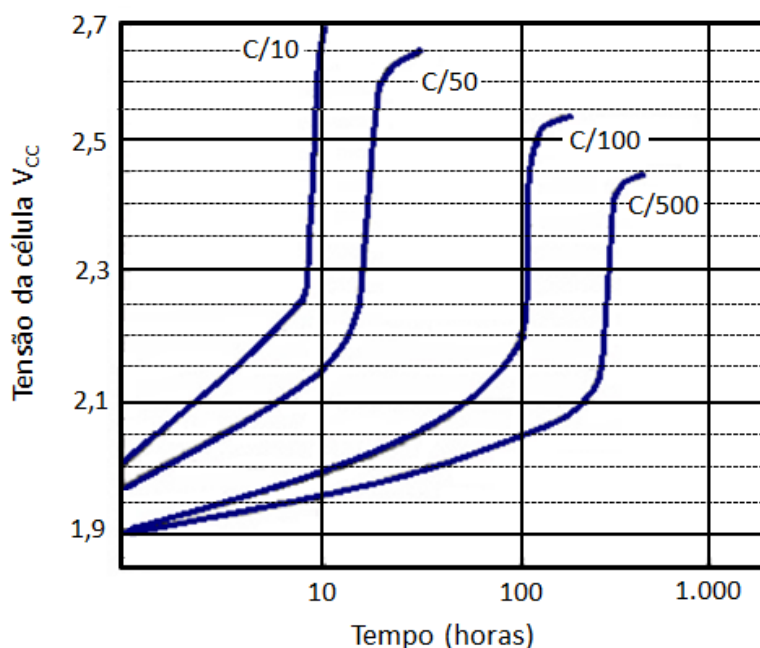


Figura 4.17 – Perfil típico da tensão durante o carregamento de uma célula Chumbo-ácido aberta, com várias taxas de carga. Fonte: (IMAMURA; HELM; PALZ, 1992).

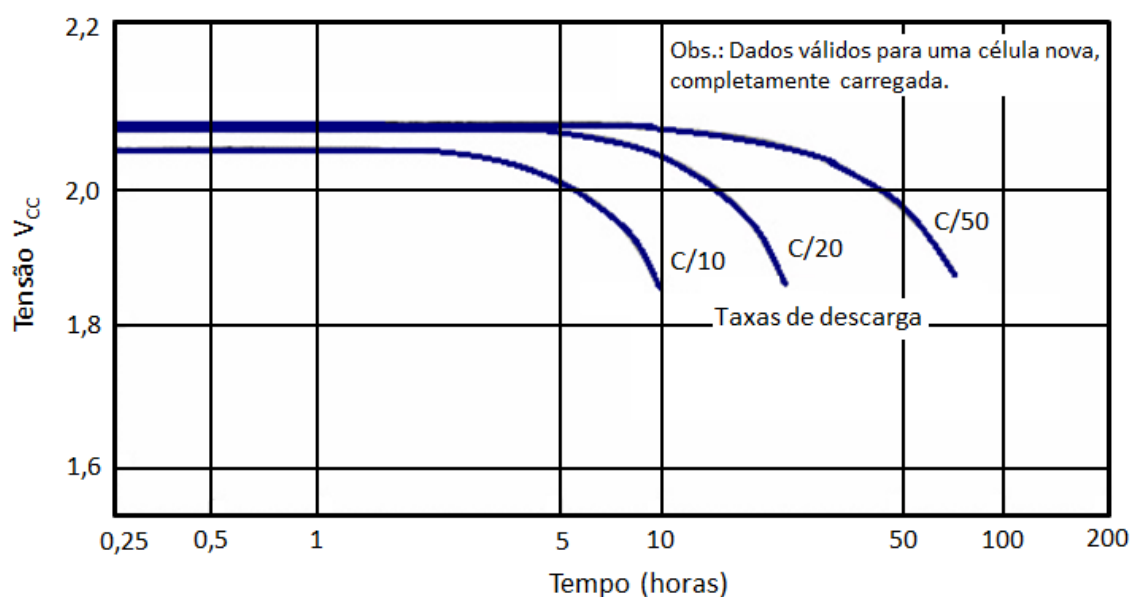


Figura 4.18 – Perfil típico da tensão durante o processo de descarga de uma célula Chumbo-ácido aberta, com várias taxas de descarga. Fonte: (IMAMURA; HELM; PALZ, 1992).

A produção dos gases oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2) em uma célula $Pb-H_2SO_4$ ocorre principalmente durante o processo de carga, mas também pode ocorrer durante uma descarga normal da bateria. As células de Chumbo-ácido abertas podem resistir a uma quantidade moderada de sobrecarregamento, desde que os gases produzidos possam escapar através de orifícios de ventilação. Entretanto, tanto a produção de oxigênio quanto as reações de recombinação são exotérmicas, resultando no conseqüente aumento da temperatura da bateria, de forma que é desejável que os controladores de carga sejam dotados de sensor de temperatura. Lembramos que aumentando a

temperatura da célula, aumenta-se também a taxa de degradação, tanto dos eletrodos, quanto dos separadores, reduzindo então a vida útil da bateria.

4.3.2.3 - Manutenção periódica do estado de carga

A maioria dos sistemas fotovoltaicos isolados tende a operar por dias ou até mesmo semanas sem o completo recarregamento das baterias, devido à falta de energia solar. A falta de recarregamento apropriado durante os períodos de tempo encoberto contribui para a redução da vida útil da célula, principalmente para as baterias de chumbo-ácido.

4.3.3– Baterias Chumbo-ácido

A bateria Chumbo-ácido foi inventada em 1859 por Planté¹², sendo que as células originalmente por ele desenvolvidas, apesar da mesma eletroquímica, tinham, entretanto, detalhes construtivos diferentes dos adotados atualmente, pois eram constituídas por placas planas de Chumbo puro sólido

As células Chumbo-ácido são a tecnologia de armazenamento de energia de menor custo por Wh atualmente disponível no mercado para aplicação em sistemas fotovoltaicos.

Hoje em dia as baterias Chumbo-ácido são constituídas utilizando dióxido de chumbo¹³ (PbO₂) como material ativo da placa (eletrodo) catódica e chumbo metálico (Pb), numa estrutura porosa altamente reativa (chumbo esponjoso), como material ativo da placa (eletrodo) anódica. Estas placas são imersas em uma solução diluída de ácido sulfúrico (H₂SO₄), que constitui o eletrólito (mistura, em geral, de 27-37 % de ácido sulfúrico e 73-63% de água, em volume).

Durante a descarga, o ácido sulfúrico reage com os materiais ativos das placas, produzindo água, que dilui o eletrólito. Durante o carregamento, o processo é revertido; o sulfato de Chumbo (PbSO₄) de ambas as placas, formado durante a descarga, é novamente transformado em Chumbo “esponjoso”, dióxido de Chumbo (PbO₂) e ácido sulfúrico (H₂SO₄).

A densidade do eletrólito varia durante o processo de carga e descarga e valores típicos para climas frios são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5–Densidade do eletrólito H₂SO₄ (valores típicos a 25°C).

Condição da célula	Densidade (g/cm ³)
Completamente descarregada	1,12
Completamente carregada	1,28

A densidade do H₂SO₄ concentrado é de 1,834 g/cm³ (@ 25°C), enquanto que a da água é de 1,00 g/cm³. Pela mistura em diferentes proporções, pode-se obter todos os valores intermediários de densidade. Para operação em climas quentes, como é o caso do Brasil, os fabricantes reduzem a

¹² Raymond Gaston Planté (1834-1889), cientista francês.

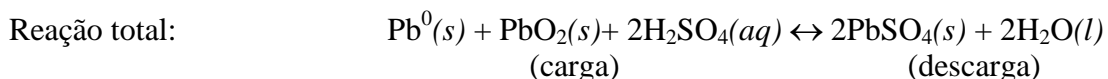
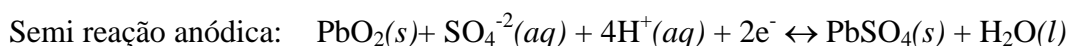
¹³ O PbO₂ também é chamado de óxido de Chumbo IV.

densidade do eletrólito (reduzindo a concentração de H_2SO_4), utilizando 1,20 a 1,24 g/cm^3 (bateria carregada), enquanto que para operação em climas mais frios, como os EUA, a densidade é aumentada, podendo ser de 1,28 g/cm^3 ou até mesmo atingir 1,30 g/cm^3 .

O ácido sulfúrico em solução aquosa, na verdade, sofre dissociação eletrolítica e fica sob forma iônica, conforme a reação abaixo.



A reação química reversível básica em uma bateria Chumbo-ácido é dada por:

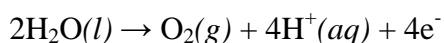


Quando a bateria está sendo descarregada, a reação ocorre no sentido da esquerda para a direita, enquanto que durante a recarga se dá no sentido inverso. Na descarga, ambas as placas igualam-se quimicamente, transformando-se em sulfato de Chumbo (PbSO_4).

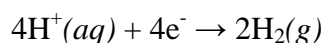
Quando a bateria é descarregada (sentido da esquerda para a direita na reação acima) o material ativo aumenta de volume nas placas, pois o PbSO_4 ocupa um volume de 1,5 vezes o do PbO_2 e de 3 vezes o do Pb^0 . Com isso, surgem tensões mecânicas que tendem a causar o desprendimento de material ativo, principalmente na placa positiva. Além de representar perda de material ativo, isso resulta em sedimentação no fundo do vaso, o que acaba por atingir as placas, causando curto-circuito entre elas e inutilizando a bateria.

O balanço de massa na reação é de ~12 g/Ah, de forma que, considerando uma tensão nominal de 2 V, teríamos uma densidade energética teórica de ~167 Wh/kg. Na prática, o valor real é bem menor, entre 20 e 40 Wh/kg, conforme mostrado na Tabela 4.4.

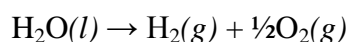
Durante a carga da bateria, enquanto a bateria ainda está num baixo estado de carga, uma pequena fração da corrente produz na placa positiva (anodo) a dissociação da água, produzindo Oxigênio (O_2) de acordo com a reação secundária abaixo. Este efeito se intensifica quando a placa positiva já está 70% carregada.



Durante a carga, a placa negativa (catodo) adianta (carrega mais rápido) em relação à placa positiva, e quando já está 90% carregada, a reação secundária de redução do Hidrogênio (H_2), mostrada abaixo, passa a consumir parte da corrente na placa negativa:



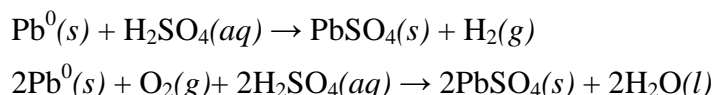
Quando a placa negativa já está totalmente carregada, então passa apenas a produzir Hidrogênio até que a placa positiva também atinja o mesmo estado de carga. Quando a célula já está completamente carregada e há predominância de Chumbo metálico e dióxido de Chumbo na composição química, começa a ocorrer somente a produção dos gases hidrogênio (H_2) e Oxigênio (O_2), por eletrólise da água, além de dissipação sob forma de calor que provoca o aquecimento da bateria. Isto acontece porque todo o material ativo das placas positivas foi completamente utilizado, de maneira que elas não são mais capazes de converter a corrente de carga em energia eletroquímica. Neste momento, a tensão da célula torna-se maior do que a tensão de gaseificação (eletrólise - cerca de 2,39 V por célula) e têm início as reações de sobrecarregamento, acelerando a produção de H_2 e O_2 (borbulhamento) e a consequente perda de água. A equação a seguir mostra a reação química da eletrólise (soma das duas reações acima).



No borbulhamento a produção de H_2 é de 0,418 L por Ah e a de O_2 é de 0,209 L/Ah, correspondendo a uma perda de água de 0,336 mL/Ah. Nas células Chumbo-ácido seladas esta reação tem que ser controlada, o que é às vezes feito por meio de recombinação do Hidrogênio (H_2) com o Oxigênio (O_2), por meio de válvulas catalíticas (ver item 4.3.3.3), de forma a impedir o acúmulo do Hidrogênio (H_2), bem como a perda de água.

As bolhas de gases produzidas durante o borbulhamento também tem o efeito adicional de contribuir para a erosão das placas, principalmente a placa positiva, e a perda de material ativo, o qual sedimenta no fundo do vaso. O fenômeno do borbulhamento, porém, tem o efeito benéfico de agitar o eletrólito e eliminar a estratificação.

As principais reações de autodescarga da bateria Chumbo-ácido ocorrem na placa negativa e são apresentadas abaixo. Em regime de flutuação, a corrente de flutuação na bateria deve ser igual à corrente representada por estas reações. A taxa de autodescarga depende da idade do elemento e da temperatura.



Um elemento de bateria pode ser modelado conforme o circuito elétrico mostrado na Figura 4.19, onde R_i representa a resistência interna enquanto que V_e representa a tensão em aberto do elemento ideal. Ambos os parâmetros R_i e V_e são dependentes de detalhes construtivos como a densidade do eletrólito e a espessura e a liga das placas. Além disso, eles não tem valores fixos, mas dependem da temperatura e do estado de carga do elemento. V_{bat} é a tensão externa nos terminais da

bateria. Como já visto, quando a bateria é carregada, há produção de ácido sulfúrico, que é liberado do eletrólito, aumentando a concentração de portadores de carga (íons), reduzindo assim a R_i e aumentando a V_e . Durante a descarga ocorre o efeito inverso.

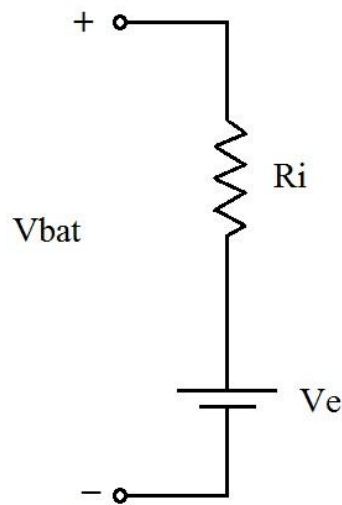


Figura 4.19 – Modelo de circuito de um elemento de bateria.

A tensão V_{bat} se reduz a V_e quando o elemento está em aberto, porém, quando está sob corrente, surge o efeito de R_i , que consiste em produzir uma perda de energia e também queda de tensão. O elemento aquece, pela dissipação de potência $R_i \times (I_{bat})^2$, mas este efeito é muito pequeno nos níveis de corrente usados em sistemas fotovoltaicos, de forma que, em nosso caso, a bateria em bom estado e em operação normal (excetua-se aqui a carga de equalização) funciona praticamente à temperatura ambiente. Na descarga, R_i reduz a tensão disponível nos terminais externos da bateria, enquanto que durante a recarga, reduz a tensão de recarga disponível para o elemento, conforme a Equação 4.14.

$$V_{bat} = I_{bat} \times R_i + V_e \quad (4.14)$$

Onde:

V_{bat} (V) – tensão nos terminais do elemento;

I_{bat} (A) – corrente no elemento, considerada positiva na recarga (entrando no elemento) e negativa na descarga (saindo do elemento);

R_i (Ω) – resistência interna do elemento;

V_e (V) – tensão do elemento ideal (sem resistência)

Num trabalho do Cepel contemplando um lote de 840 baterias sem manutenção tipo monobloco de 12V, para SFIs, de duas capacidades (e dois diferentes fabricantes), foram levantados os valores médios das resistências internas (R_i) para baterias em bom estado, totalmente carregadas, mostrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Exemplos de resistências internas (R_i) de dois modelos de baterias sem manutenção. Fonte: (GALDINO, 2010).

Capacidade (Ah)	Resistência ($m\Omega$)
150	2,64
170	2,40

Alguns autores apresentam a equação empírica (4.15) relacionando densidade do eletrólito à tensão V_e , válida para a tensão de circuito aberto em repouso.

$$V_e = \rho + 0,84 \quad (4.15)$$

Onde:

ρ (g/cm^3) – densidade do eletrólito;
 $0,84$ – constante.

A construção básica de uma célula não-selada é mostrada na Figura 4.20. A grade¹³ consiste de uma estrutura feita de Chumbo metálico (sólido), que suporta o material ativo das placas e conduz corrente elétrica. O material tradicionalmente usado para fabricação das grades de Chumbo é uma liga de Chumbo-Antimônio, embora outras ligas, em especial ligas de Chumbo-Cálcio, também têm sido utilizadas, por terem características adequadas a certas aplicações. Cada célula contém um conjunto de placas positivas conectadas eletricamente em paralelo, e um outro conjunto de placas negativas, conectadas da mesma forma, ambos os conjuntos intercalados e imersos no eletrólito.

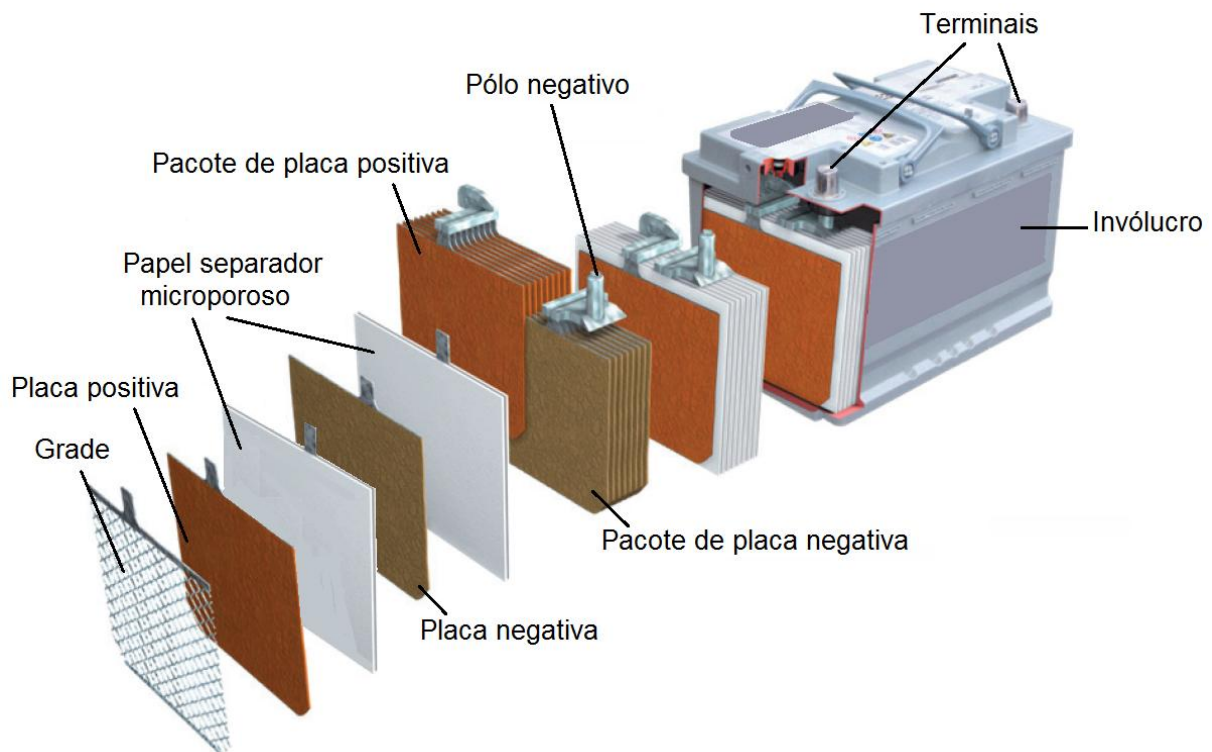


Figura 4.20 – Vista explodida mostrando as principais partes constituintes de uma célula eletroquímica. Fonte: (ZOBAA, 2013).

¹³ A grade é também chamada de grelha por alguns fabricantes.

Para impedir o contato entre as placas positivas e negativas e, conseqüentemente, o curto-circuito da célula, utilizam-se isolantes finos, chamados de separadores. Estes separadores, feitos de material isolante poroso, permitem a livre passagem do eletrólito entre as placas, ao mesmo tempo em que impedem o contato físico entre elas. Em muitos casos, os separadores assumem a forma de envelopes e assim também ajudam a fixar o material ativo nas placas.

A utilização de ligas de Chumbo com outros elementos nas placas positivas permite modificar algumas propriedades das baterias, sendo mais utilizadas as ligas de Chumbo-Cálcio (Pb-Ca) e Chumbo-Antimônio (Pb-Sb). É interessante observar que a dopagem do Chumbo com outros elementos não tem influência na reação principal da bateria, mas apenas nas reações secundárias, que já foram apresentadas acima, além de em suas propriedades mecânicas.

O Antimônio (Sb) é um componente de liga que aumenta a resistência mecânica da placa, evitando a perda de material ativo durante a ciclagem e tornando assim as baterias mais resistentes a descargas profundas. Em compensação, por diminuir a tensão de borbulhamento, acelera a reação de decomposição da água (eletrólise) contida no eletrólito, que é a razão pela qual as baterias abertas devem ter água adicionada periodicamente. Atualmente, as ligas ditas de alto Antimônio, usadas em aplicações tracionárias, apresentam um teor deste de ~6 %. As de baixo Antimônio, que é o caso das baterias estacionárias e fotovoltaicas, tem um teor de $\leq 2\%$, normalmente contendo também uma pequena quantidade (~0,02%) de Selênio (Se).

Com o objetivo de reduzir a decomposição da água na bateria, durante o seu carregamento, ligas de Chumbo-Cálcio (Pb-Ca) também têm sido utilizadas. O teor de Cálcio é baixo, inferior a 0,1 %, podendo conter também estanho (Sn) e Prata (Ag). A vida cíclica das baterias Pb-Ca é inferior às de Pb-Sb. No Brasil, a principal aplicação da liga de Chumbo-Cálcio tem sido as baterias automotivas que, em geral, são vendidas como “livres de manutenção”.

Os eletrodos negativos tem pouca variação sendo, praticamente em todos os tipos de baterias Pb-ácido, constituídos por placas planas de Pb esponjoso.

Entre os parâmetros de projeto considerados pelo fabricante da bateria para cada aplicação estão: número de placas, espessura das placas, liga das placas positivas, densidade do material ativo, projeto das placas positivas, densidade do eletrólito, quantidade de eletrólito e tipos de separadores.

Os tipos de bateria de Chumbo-ácido mais adequados aos sistemas fotovoltaicos isolados são conhecidos como baterias solares ou baterias fotovoltaicas. Historicamente, os tipos de baterias de Chumbo-ácido mais comumente utilizadas no Brasil para esta aplicação são as baterias sem manutenção com liga de Chumbo-Cálcio nas placas positivas, semelhantes (mas não iguais) às automotivas. Também tem sido usadas, em menor escala, baterias seladas com eletrólito absorvido e baterias abertas com liga de baixo Antimônio nas placas positivas. Mais recentemente, baterias de

Chumbo-ácido estacionárias com placas tubulares (OPzS e OPzV) começaram a entrar também neste segmento do mercado no Brasil.

4.3.3.1 - Baterias abertas com liga de baixo-Antimônio nas placas positivas

A característica principal destes tipos de baterias é que elas possuem placas positivas feitas de uma liga de Chumbo com baixo Antimônio (cerca de 1 a 3 %) além de possivelmente uma pequena quantidade de Selênio. São compostas por células não-seladas, possuem placas planas empastadas de média espessura e estão contidas em um vaso feito de plástico transparente para facilitar a inspeção visual do nível do eletrólito de cada célula e das condições físicas das placas e separadores.

O uso do Antimônio e de placas de média espessura aumenta a vida cíclica das células para descargas profundas, mas reduz a tensão de borbulhamento. A baixa porcentagem de Antimônio minimiza o efeito da gaseificação e da autodescarga.

Uma vantagem das células não-seladas é que a bateria pode ser fornecida a seco e o eletrólito pode ser adicionado no local da instalação. No caso da bateria ter sido fornecida a seco, não há possibilidade de ocorrer sulfatação, resultante da autodescarga. Além disso, não haverá maiores problemas se a bateria for virada.

Embora este tipo de bateria seja projetado para operar em ciclos profundos, esta nunca deve ser totalmente descarregada. Precauções, como o uso de controlador de carga com função de proteção contra descarga excessiva (LVD, ver item 4.5), que impede a ocorrência de descargas abaixo de um determinado valor, devem ser tomadas, para evitar que isto aconteça.

O principal inconveniente de uso de uma bateria com baixo-Antimônio aberta em sistemas fotovoltaicos é que, apesar da pouca necessidade de manutenção, ela necessita ser feita regularmente, para evitar danos permanentes. Isto envolve verificar o nível do eletrólito e preenchê-lo, quando necessário, com água destilada ou deionizada.

Outra desvantagem das baterias abertas é a névoa ácida produzida pelo borbulhamento excessivo, que flui através dos orifícios de ventilação e se deposita em superfícies próximas. Pelo fato de ser ácida, esta névoa danifica as partes metálicas dos contatos elétricos dos terminais.

4.3.3.2 - Baterias sem manutenção

As baterias fotovoltaicas sem manutenção usam uma liga de Chumbo-cálcio (Pb-Ca) nas placas positivas, o que minimiza a taxa de gaseificação a ponto de não ser necessário preencher o eletrólito regularmente com água. O único requisito de manutenção é que os terminais precisam ser limpos a cada 12 meses. Estas baterias nunca devem ser viradas, pois, se houver derramamento de líquido, será impossível realizar a sua reposição.

O efeito do Cálcio é praticamente oposto ao Antimônio: reduz o consumo de água, mas, por outro lado, também reduz a vida útil em regime de ciclagem. Assim, considera-se que há duas desvantagens das baterias livres de manutenção Pb-Ca quando instaladas em sistemas fotovoltaicos. Uma é a já citada reduzida vida-cíclica para ciclos profundos, quando comparadas com as de placas positivas de baixo Antimônio. A outra característica que pode ser considerada como desvantagem é que elas são sempre fornecidas com eletrólito. Isto aumenta o risco de deterioração durante o período de armazenamento e/ou distribuição e o eletrólito pode ser perdido se as baterias forem viradas por descuido. Além disso, é necessário recarregá-las periodicamente enquanto estiverem armazenadas, para evitar a ocorrência de sulfatação.

As baterias Pb-Ca tem taxa de autodescarga inferior às de Pb-Sb, que está ligada a um consumo de corrente em flutuação também menor, mas esta característica vantajosa não é considerada importante na aplicação em sistemas fotovoltaicos.

Visualmente, tais baterias são similares às automotivas, contudo, em comparação com as baterias automotivas (SLI), estas baterias fotovoltaicas têm algumas diferenças construtivas: maior quantidade de eletrólito, menor número de placas (mais espessas) em cada célula, maior espaço para sedimentação no fundo do vaso, além de menor densidade do eletrólito.

Este é o tipo de bateria que vem sendo o mais utilizado em Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFIs) no Brasil há muitos anos, do qual existem diversos fabricantes, que fornecem monoblocos de 12V (6 células em série) com capacidades de até 220Ah @ C/20 (no exterior podem ser encontrados monoblocos de maiores capacidades, até 500Ah), sendo encontradas comumente as capacidades de 100Ah, 120Ah, 150Ah e 180Ah. A experiência acumulada indica que a durabilidade delas nos SFIs é de cerca de 4 anos, respeitando uma descarga rasa, ou seja, uma profundidade de descarga máxima inferior a 20% na ciclagem diária.

4.3.3.3 - Baterias seladas

As baterias de Chumbo-ácido seladas reguladas a válvula (VRLA) são bastante utilizadas, porque não necessitam de nenhum tipo de manutenção, além de não haver risco de contato com o eletrólito.

O princípio básico das baterias seladas é usar um ciclo interno de Oxigênio para eliminar a perda de água sob condições normais de operação. As baterias seladas apresentam características específicas para que o ciclo de Oxigênio ocorra. Por isso, o tamanho (capacidade) total das placas positivas é ligeiramente menor do que o das placas negativas. Assim, as placas positivas são totalmente carregadas antes que as placas negativas atinjam este estado. Isto é importante para que somente as placas positivas gaseifiquem; desta forma, apenas Oxigênio gasoso (O₂) é produzido. O Oxigênio gasoso produzido flui através do eletrólito para os espaços das placas negativas onde ele reage para

formar o sulfato de Chumbo e água. Além disso, o carregamento transforma o sulfato de Chumbo em Chumbo e restabelece o balanço químico da célula. O resultado final é que o Oxigênio fica circulando, das placas positivas para as placas negativas, durante o sobrecarregamento, e não é perdido. Este processo só acontece com o Oxigênio. Isto ocorre pelo fato da célula estar limitada positivamente, para impedir as placas negativas de alcançarem o estado de carregamento total e, conseqüentemente, produzir Hidrogênio, o qual é absorvido muito lentamente. Como parte do ciclo de Oxigênio, deve haver um fluxo livre de gás Oxigênio das placas positivas para as placas negativas.

As células seladas podem resistir a uma completa descarga mais eficientemente do que os outros tipos de célula de Chumbo-ácido. Entretanto, elas devem ser recarregadas o mais rápido possível, para impedir danos permanentes.

Outra tecnologia desenvolvida é o uso de dispositivos de recombinação catalítica, onde o Hidrogênio (H_2) produzido é recombinado com Oxigênio (O_2) e devolvido à célula como água. Tais dispositivos contem como catalisador o Paládio (Pd), numa matriz cerâmica, e fabricantes afirmam que eles têm 98% de eficiência na recuperação do Hidrogênio.

As principais desvantagens das baterias seladas em relação às baterias abertas são: custo e a impossibilidade de serem distribuídas e/ou armazenadas sem o eletrólito. Embora tenham uma baixa taxa de autodescarga, podem ser prejudicadas permanentemente pela sulfatação se forem mantidas sem carregamento por longos períodos. O custo destas baterias pode ser compensado por sua maior capacidade útil, associada à possibilidade de trabalharem com maiores valores de profundidade de descarga.

4.3.3.4 - Baterias estacionárias com placas tubulares (OPzS e OPzV)

As baterias OPzS e OPzV apresentam características construtivas semelhantes, sendo as OPzS (abreviatura da expressão em alemão *Ortsfest Panzerplatte Spezial*) baterias estacionárias com placas positivas tubulares em liga Pb-Sb (baixo Antimônio), contendo eletrólito líquido e separadores especiais, podendo ser caracterizadas como baterias do tipo FLA, enquanto que as OPzV (do alemão *Ortsfest Panzerplatte Verschlussen*), são, por sua vez, baterias estacionárias com placas tubulares, contendo eletrólito (H_2SO_4) imobilizado em um gel e válvulas de segurança, podendo ser caracterizadas como baterias seladas reguladas por válvula (VRLA).

Sua principal diferença com relação aos modelos já descritos nesta seção é a configuração dos eletrodos positivos, constituídos por placas tubulares, que são envolvidas por tubos permeáveis através dos quais o eletrólito circula. A principal função desses tubos é manter a matéria ativa confinada, o que permite um aumento da vida cíclica da bateria. Para uma profundidade de descarga de 80 %, estas baterias podem apresentar vida cíclica superior a 1.500 ciclos. Se comparadas às tecnologias de

armazenamento apresentadas na Tabela 4.4, este valor é superior aos dos demais acumuladores eletroquímicos. A Figura 4.21 apresenta uma vista em corte do tipo de bateria OPzV.

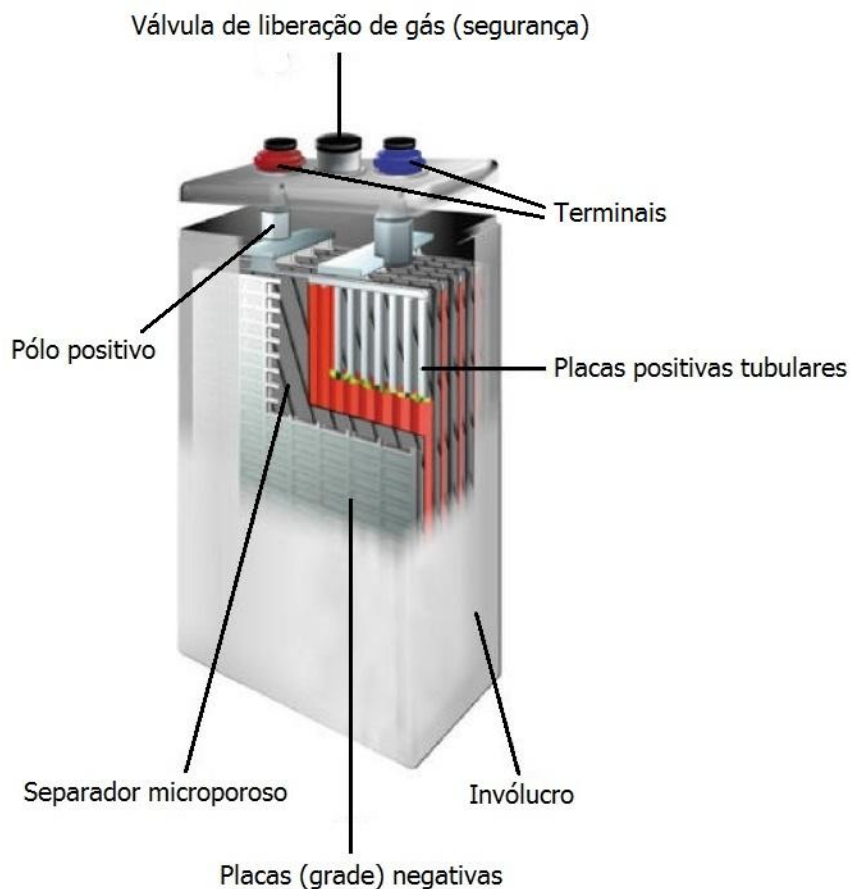


Figura 4.21 – Vista em corte de uma bateria do tipo OPzV. Fonte: (Exide Technologies, 2003).

No caso das baterias OPzV deve-se alertar que os controladores de carga devem operar em tensões mais baixas em relação a outros tipos de baterias Chumbo-ácido, e que elas são muito sensíveis a sobrecargas por não suportarem gaseificação. Alguns autores afirmam que elas apresentam maior custo, porém menor vida útil do que outros tipos de baterias Chumbo-ácido de descarga profunda. Entre as vantagens da bateria OPzV estão:

- Não requerem reposição de água;
- Podem ser usadas em qualquer posição;
- Não tem problemas de estratificação;
- Não liberam gases, não apresentado risco de incêndio/explosão, portanto os requisitos relativos a salas de baterias são menos exigentes, não requerendo ambientes ventilados para sua instalação;
- Não tem problemas de vazamentos de eletrólito, por isso o risco de acidentes envolvendo contato pessoal com ácido (pele, olhos) é praticamente inexistente;
- Tem menos restrições para transporte, podendo inclusive ser transportada via aérea, ao contrário dos demais tipos.

Estas vantagens não são específicas apenas de baterias OPzS, mas também aplicáveis a outros tipos de baterias com eletrólito em gel.

A maior desvantagem das baterias de placas tubulares tipo OPzV e OPzS ainda está relacionada ao seu custo mais elevado, quando comparado ao de outras baterias Chumbo-ácido. Além disso, há poucas indústrias nacionais que fabricam esse tipo de baterias, especialmente a OPzV. No entanto, a maior vida útil, somada a uma leve redução de custos que estas baterias têm experimentado nos últimos anos, vem melhorando sua relação custo-benefício, tornando-as uma opção viável em algumas aplicações, principalmente onde há relativa facilidade de aquisição destes modelos de baterias ou onde a logística para troca de baterias é crítica e custosa.

Tanto a OPzV quanto a OPzS são indicadas para aplicações em locais remotos e de difícil acesso, especialmente onde a capacidade da bateria deve ser elevada (e.g. MIGDIs). As baterias OPzS requerem reposição de água do eletrólito em intervalos de 6 a 12 meses, dependendo da especificação em projeto e da sua utilização, por isso devem ser utilizadas em locais onde haverá manutenção. As baterias OPzV, por sua vez, dispensam manutenção, entretanto são mais sensíveis a temperaturas elevadas: a cada 10°C de elevação da temperatura de operação, a OPzV pode perder metade de sua vida útil.

As baterias OPzS e OPzV normalmente são disponíveis comercialmente no Brasil em células individuais de 2 V com capacidades podendo atingir 4000 Ah. O catálogo de um determinado fabricante nacional, por exemplo, oferece 16 diferentes modelos de células 2 V OPzS, com capacidades de 150Ah a 2500Ah (@C/10). Em função da disponibilidade de capacidades em uma faixa bastante larga que atinge valores bastante elevados, não é necessário associar tais baterias em paralelo nos sistemas fotovoltaicos, o que constitui uma vantagem técnica.

A principal vantagem desta tecnologia seria uma vida útil esperada bem maior de, pelo menos, o dobro das normalmente usadas no Brasil (item 4.3.3.2), ou seja, pelo menos 7 anos para uma profundidade de descarga diária de 40%, muito embora não haja ainda experiência de campo acumulada sobre isso no país, pois esta tecnologia de bateria está sendo usada em sistemas fotovoltaicos no país há relativamente pouco tempo. Por outro lado, como desvantagens, teríamos um custo inicial significativamente mais elevado para o banco de baterias e, no caso das OPzS, necessidade de reposição periódica de água destilada. Especificamente quanto ao custo do banco de baterias, deve-se levar em conta que a análise não pode ser feita somente com base no custo inicial do material, mas sim com base no custo do ciclo de vida, contabilizando custos de transporte e mão de obra (instalação e manutenção), os quais são significativos para sistemas fotovoltaicos implantados em locais de difícil acesso. Por isso, existe tendência atual de utilização de baterias OPzS em tais sistemas fotovoltaicos, cujas características (entre elas, a maior vida útil), em muitos casos supostamente resultam em menor custo de ciclo de vida e maior confiabilidade (SOARES, 2008).

4.3.3.5 - Efeito da temperatura

Ao contrário dos módulos fotovoltaicos, cujas especificações são sempre em 25 °C (STC), a temperatura nominal das baterias não é padronizada. A temperatura nominal de determinada bateria é a adotada pelo respectivo fabricante nas folhas de dados técnicos. Geralmente é de 25°C, mas pode também ser 27°C ou mesmo outros valores.

Sabe-se que a velocidade das reações químicas dobra ou até triplica para um incremento de 10 °C na temperatura (regra de van't Hoff)¹⁴.

A redução da temperatura causa a redução da mobilidade dos portadores de carga no eletrólito, o que se traduz num aumento da resistência interna (R_i) e redução da capacidade (Ah) da bateria. Segundo alguns autores, tipicamente a capacidade se reduz 1% para cada redução de 1 °C na temperatura. Por isso, observa-se que baterias automotivas em clima frio tem mais dificuldade em dar partida nos veículos. Assim, bancos de baterias para operação em ambientes frios podem ter de ser superdimensionados.

Adicionalmente, a redução da temperatura causa redução do volume (contração) da água, contudo, uma vez que a quantidade do ácido não muda, aumenta a sua concentração, o que aumenta a V_e .

Embora esta não seja normalmente uma preocupação no Brasil, o problema com temperaturas abaixo de 0°C é que o eletrólito poderá congelar se a bateria estiver descarregada, pois o ácido diluí e congela a uma temperatura mais alta. Quando há congelamento, a bateria não opera e poderá sofrer danos permanentes. Num estado de carga de 20 %, o ponto de congelamento é de cerca de -10°C em uma bateria típica. Isto deve ser considerado no projeto do sistema, e baterias projetadas para serem utilizadas em climas muito frios têm uma concentração de ácido mais elevada, o que mantém o eletrólito em estado líquido em baixas temperaturas.

Por outro lado, quando a temperatura da bateria aumenta, isso resulta em aumento da mobilidade, aumento da capacidade (Ah) e redução da R_i . A tensão V_e , entretanto, se reduz de cerca de -5mV/°C elemento, sendo que, da mesma forma, a tensão de borbulhamento também se reduz, o que deve ser compensado pelo controlador de carga, para não prejudicar a bateria. O aumento da velocidade das reações químicas com a temperatura também traz outros inconvenientes: aumento da taxa de autodescarga, corrosão da placas, redução da vida útil e sulfatação acelerada em baterias que não estão totalmente carregadas.

¹⁴ Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911), cientista holandês, Prêmio Nobel de Química de 1901.

Alguns fabricantes recomendam sobredimensionar o banco de baterias em 30% caso seja prevista sua operação numa temperatura média abaixo de 15 °C ou acima de 35 °C.

Características típicas de baterias de chumbo-ácido de 12 V são apresentadas na Tabela 4.7 para a temperatura de 20°C.

Tabela 4.7–Tensões características de células e baterias de chumbo-ácido. Fonte: (ROBERTS, 1991).

Tensões características	Tensões a 20°C (V)	
	Célula	Bateria com seis células
Nominal	2	12
Tensão máxima	2,3 – 2,5	14,0 - 15,0
Tensão de flutuação	2,2 – 2,3	13,0 – 14,0
Tensão de circuito aberto com carga plena ¹	2,1 – 2,2	12,5 – 13,0
Tensão limite de descarga para medida da capacidade ²	1,8 – 1,9	10,8 – 11,4
Variação de tensão com a temperatura ³	-0,05 V para cada 10°C de aumento	-0,33 V para cada 10°C de aumento

Notas:

1. Estas tensões aplicam-se depois de deixar o sistema desconectado por pelo menos uma hora (tensões da bateria em repouso).
2. O valor limite estabelecido para a desconexão por baixa tensão depende da profundidade de descarga recomendada e da corrente de descarga. Alguns controladores de carga desconectam as baterias pela contabilização do estado de carga das mesmas e não só pelo nível de tensão nos terminais.
3. Observar as especificações do fabricante quanto à tensão de referência para a compensação da tensão com a temperatura, pois alguns adotam 25°C e outros 27°C, embora nesta tabela a referência seja de 20°C.

A correção da tensão de uma célula com temperatura deve ser feita com a equação abaixo.

$$V(T) = V_{Tref} + K \times (T - T_{ref}) \quad (4.16)$$

onde:

$V(T)$ (V) – tensão da célula na temperatura T;

V_{Tref} (V) – tensão da célula na temperatura de referência adotada na documentação do fabricante;

K (V/°C) – coeficiente de temperatura da célula especificado pelo fabricante;

T (°C) – temperatura da célula;

T_{ref} (°C) – temperatura de referência adotada na documentação do fabricante;

As baterias Chumbo-ácido não devem ser operadas continuamente acima de 40°C, caso contrário poderão ocorrer danos permanentes às placas. Em um dado estado de carga, mudanças de temperatura também afetam as medições do peso específico do eletrólito e da tensão.

A Tabela 4.8 informa a redução da vida útil devido a temperaturas elevadas para baterias seladas tipo VRLA, com eletrólito absorvido (AGM), e foi transcrita do catálogo do respectivo fabricante. Com relação a esta tabela, é importante observar que se aplica a baterias seladas, as quais geralmente sofrem mais os efeitos da temperatura do que as baterias abertas.

Tabela 4.8– Redução da vida útil de baterias Chumbo-ácido tipo VRLA em função da temperatura média anual de operação. Fonte: (GNB 1).

Temperatura média anual (°C)	Redução da vida útil (%)
25 °C	0%
30 °C	30%
35 °C	50%
40 °C	66%
45 °C	75%
50 °C	83%

4.3.3.6 - Sulfatação

Um problema que comumente ocorre nas células de Chumbo-ácido é o fenômeno chamado de *sulfatação*, que é o processo de formação e deposição de cristais de sulfato de Chumbo (PbSO_4) sobre as placas das células. Em condições típicas de operação, forma-se, durante a descarga, uma camada de sulfato de Chumbo na superfície das placas. No início do processo, existem muitos espaços em volta de cada pequeno cristal de sulfato de Chumbo por onde o eletrólito pode ainda alcançar os materiais ativos (dióxido de Chumbo e Chumbo metálico), espaços estes que vão se reduzindo à medida em que a bateria vai sendo descarregada. Entretanto, se a bateria permanece muito tempo descarregada, gradualmente os pequenos cristais de sulfato de Chumbo juntam-se e recristalizam-se para formar cristais maiores. Este fenômeno constitui-se em problema, já que os cristais maiores tornam-se irreversíveis, ou seja, não são decompostos durante o recarregamento.

A sulfatação reduz permanentemente a capacidade da célula devido à perda de material ativo, além e aumentar a resistência interna (R_i), por serem os cristais maus condutores. Assim, todas as precauções devem ser tomadas para impedir a sua ocorrência. A seguir são apresentados alguns fatores que acentuam o processo de sulfatação e que, portanto, devem ser evitados:

- Manutenção da célula descarregada por longos períodos de tempo;
- Carregamentos baixos ou parciais prolongados;
- Operação contínua acima de 45°C;
- Permitir que o eletrólito torne-se fortemente concentrado.

Quando duas ou mais destas condições ocorrem ao mesmo tempo, o processo de sulfatação é ainda mais acelerado. O primeiro sinal de sulfatação geralmente acontece quando uma bateria parece carregar rapidamente, como indicado pela elevada tensão de carregamento. Entretanto, uma medição do peso específico mostra que o estado de carga ainda está baixo. Manter uma lenta corrente durante o carregamento poderá minimizar os danos, mas geralmente a capacidade da bateria se reduzirá irreversivelmente.

A melhor maneira de evitar a sulfatação é carregar a célula regularmente, para que todo o sulfato de chumbo seja revertido. Para aplicações em ciclos profundos, os fabricantes recomendam que as baterias sejam recarregadas imediatamente após cada descarga profunda.

Isto não é, todavia, possível em sistemas fotovoltaicos, quando a descarga profunda é resultante do tempo nublado. Neste caso, seria necessário reduzir as cargas alimentadas pelo sistema até a normalização do estado de carga das baterias ou recarregar as baterias por intermédio de outras fontes.

A taxa de sulfatação varia para os diferentes tipos de células, dependendo da qualidade das placas e da sua aplicação. Os materiais ativos contêm aditivos que retardam a taxa de sulfatação, mas não a evitam completamente. Em lugares onde a temperatura média está acima de 30°C é possível utilizar um eletrólito “tropical”, com uma baixa concentração de ácido sulfúrico. A baixa concentração reduz os danos à estrutura da grade das placas positivas, diminuindo a taxa de sulfatação.

4.3.3.7 - Hidratação

Quando a bateria sofre descarga profunda, consumindo todo o H_2SO_4 , e permanece neste estado por um período longo, então pode ocorrer, além da sulfatação, outro tipo de falha na bateria, o fenômeno denominado hidratação.

Com baixa concentração de ácido, o (hidr)óxido de Chumbo torna-se solúvel na água, o que não ocorre no meio ácido, e fica então em solução no eletrólito. Quando a bateria é recarregada, a concentração do ácido aumenta e o óxido em solução transforma-se em sulfato de Chumbo, que precipita.

O sulfato precipitado no vaso produz manchas brancas e representa perda de material ativo. Porém, o sulfato que precipita nos poros do separador pode ser convertido durante a carga em Chumbo metálico e formar dendritos metálicos microscópicos entre as placas positiva e negativa, que resultam em curto-circuito.

Para evitar o fenômeno, a bateria não deve ser totalmente descarregada, e nem permanecer descarregada por períodos longos.

4.3.3.8 - Sedimentação

Conforme já mencionado em itens anteriores, com a operação normal da bateria (ciclos de carga e descarga) ocorre, devido a vários motivos, o desprendimento de material ativo das placas e sua sedimentação no fundo do vaso. Caso a sedimentação acumulada atinja as placas, poderá causar o curto-circuito entre placas, inutilizando a bateria.

4.3.3.9 – Água para baterias

Segundo um determinado fabricante, as especificações de pureza da água destilada/deionizada para baterias são as apresentadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9– Valores máximos admissíveis de impurezas em água para baterias. Fonte: (GNB 2).

Valores máximos admissíveis de impurezas em água para baterias	
Sólidos totais	500 ppm
Sólidos fixos	350 ppm
Matéria orgânica e volátil	200 ppm
Ferro (Fe)	4,0 ppm
Manganês (Mn)	0,007 ppm
Nitratos (NO ₂)	15,0 ppm
Amonia (NH ₄)	5,0 ppm
Cloretos (Cl)	25,0 ppm

A norma Brasileira NBR 14197:1998, por sua vez, traz diferentes especificações, transcritas na Tabela 4.10.

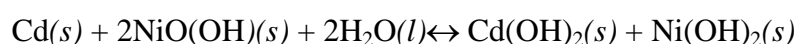
Tabela 4.10– Concentração máxima de impurezas permitida na água destilada e/ou deionizada. Fonte: (ABNT, 1988).

Concentração máxima de impurezas permitida na água destilada e/ou deionizada	
Resíduo de evaporação	10 mg/L
Substâncias orgânicas oxidáveis	20 mg/L
Halogenetos totais, como cloretos	1,0 mg/L
Nitratos	1,0 mg/L
Amônia	5 mg/L
Manganês (Mn)	0,1 mg/L
Cobre (Cu)	1,0 mg/L
Ferro (Fe)	1,0 mg/L

4.3.4– Baterias Níquel-Cádmio e Níquel-hidreto metálico

As baterias Níquel-Cádmio (Ni-Cd) têm estrutura física similar às de chumbo-ácido, mas ao invés de placas de Chumbo, o hidróxido (óxido) de Níquel III, NiO(OH), é utilizado nas placas catódicas e o cádmio (Cd) ou ligas de Cádmio e Ferro nas placas anódicas. O eletrólito é uma solução aquosa de hidróxido de Potássio (KOH), em concentrações de 20-34%. O KOH é um álcali (base), por isso são classificadas como baterias alcalinas. Ressaltamos que este composto é tão prejudicial ao ser humano (efeito corrosivo) e ao meio ambiente (contaminação de cursos d'água) quanto o ácido sulfúrico das células Chumbo-ácido, de forma que os cuidados necessários no seu manuseio são idênticos

O funcionamento da célula de Ni-Cd pode ser expresso pela seguinte reação eletroquímica:



Aqui também a reação de descarga ocorre no sentido da esquerda para a direita e a de recarga no sentido inverso.

A Tabela 4.11 apresenta características típicas para as células de Níquel-Cádmio. Estas baterias podem sobreviver ao congelamento e ao degelo sem sofrerem nenhuma alteração no seu desempenho. As temperaturas elevadas também têm menor efeito sobre elas do que sobre as baterias de chumbo-ácido.

Uma vez que a tensão nominal por elemento de Ni-Cd é de 1,25 V, monoblocos de 12 V têm 10 células em série.

Tabela 4.11– Tensões características de células e baterias de Níquel-Cádmio. Fonte: (ROBERTS, 1991).

Tensões características	Tensões a 20°C (V)	
	Célula	Bateria com dez células
Nominal	1,25	12
Tensão máxima para baterias abertas	1,50 – 1,65	15,0 – 16,5
Tensão de flutuação para baterias abertas	1,40 – 1,45	14,0 – 14,5
Taxa de carga para baterias seladas	C/10	C/10
Tensão de circuito aberto para os diversos estados de carga	1,20 – 1,35	12,0 – 13,5
Tensão mínima limite	0	9 ¹

Nota: 1. Para evitar polaridade reversa para a primeira célula na bateria que se encontra completamente descarregada.

As baterias de Níquel-Cádmio são menos afetadas por sobrecargas, podem sofrer ciclos profundos, ser totalmente descarregadas e mantidas assim, sem maiores prejuízos às placas, não estão sujeitas à sulfatação e seu carregamento não sofre influência da temperatura. Entretanto, têm a desvantagem de apresentar “efeito memória¹⁵”, que pode reduzir a capacidade de carga útil da bateria.

Uma desvantagem das células de Níquel-Cádmio, em relação às de Chumbo-ácido, é que os meios de medição do estado de carga não são simples. Isto se deve ao fato de existir muito pouca variação da tensão e do peso específico do eletrólito durante a descarga. Entretanto, essa limitação pode ser solucionada com o uso de um controlador de carga digital microprocessado, capaz de determinar o estado de carga com grande precisão a partir de integração no tempo do fluxo de corrente na bateria.

Não são aplicadas cargas de equalização em baterias Ni-Cd.

São citadas as seguintes vantagens das baterias Ni-Cd em comparação com as de Pb-H₂SO₄:

- Podem ser submetidas a sobrecargas;

¹⁵ O chamado *efeito memória* ocorre nas baterias de NiCd quando elas são operadas de forma inadequada, sendo repetidamente recarregadas sem terem sido totalmente descarregadas, o que acaba “viciando-as” a carregar somente uma quantia de energia bem menor do que sua capacidade. Ele se deve a modificações químicas sofridas pelos materiais utilizados na confecção das células, como, por exemplo, a formação de cristais de Cádmio.

- Podem ser totalmente descarregadas;
- São mais robustas;
- Tem bom desempenho a baixas temperaturas e podem ser congeladas;
- Tem baixa resistência interna;
- Mantem voltagem constante durante a descarga;
- Podem ser carregadas a taxas elevadas;
- Tem vida útil mais longa.

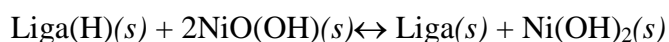
As baterias Ni-Cd normalmente têm um custo inicial consideravelmente mais alto do que as de Chumbo-ácido, mas também apresentam ganhos operacionais como custos de manutenção reduzidos e uma vida cíclica maior. Algumas fontes informam que as baterias Ni-Cd são as que tem menor custo por ciclo. Entretanto, apesar das vantagens apresentadas, o fator custo inicial e outras desvantagens, como a presença de metais tóxicos¹⁶ em sua composição e a severa autodescarga, fazem com que a bateria de Níquel-Cádmio seja uma tecnologia pouco utilizada em instalações fotovoltaicas. Não se tem conhecimento de seu uso em sistemas fotovoltaicos no Brasil, somente no exterior.

As baterias de Níquel-Cádmio também podem ser abertas (ventiladas) ou seladas, sendo que as primeiras foram as mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos. Elas também produzem gases H₂ e O₂ durante sobrecargas e também necessitam de reposição de água.

Atualmente, as baterias de Níquel-Cádmio foram substituídas pelas baterias de hidreto metálico de Níquel (NiMH) em muitas aplicações, em função, principalmente, de sua maior densidade energética, maior eficiência energética e de suas características ambientais menos desfavoráveis, uma vez que utilizam substâncias menos tóxicas em sua composição.

Nas baterias de Níquel-Hidreto metálico, o eletrodo catódico é de NiO(OH), hidróxido(óxido) de Níquel III ou oxi-hidróxido de Níquel III, e o anodo é formado por uma liga metálica que tem a propriedade de formar hidretos (compostos com Hidrogênio, MH). As ligas que apresentam esta propriedade podem ser de Níquel com Terras-Raras como LaNi₅, ou de Titânio e Zircônio, como TiZr₂, que têm sido bastante utilizadas. O eletrólito também é uma solução de KOH (Hidróxido de Potássio), ou seja, também são baterias alcalinas.

A tensão nominal da célula é de 1,2V e seu funcionamento pode ser expresso pela seguinte reação eletroquímica:



O controle do carregamento deste tipo de bateria é considerado crítico, pois a carga excessiva causa geração de gases (O₂) e prejudica seu desempenho. O efeito memória nelas é quase inexistente.

¹⁶ O Cd é um metal tóxico.

Embora seu custo seja mais elevado, as baterias de NiMH praticamente substituíram as de Ni-Cd na maioria das aplicações, mas não se tem conhecimento sobre seu uso em sistemas fotovoltaicos, principalmente no Brasil.

4.3.4.1 –Efeito da temperatura em baterias Ni-Cd

Baterias abertas de Níquel-Cádmio podem ser utilizadas para operação numa extensa faixa de temperatura, ou seja, de -25 a 45°C. O eletrólito congela abaixo do limite inferior de temperatura, mas nenhum dano é causado.

Para otimizar a utilização de uma célula selada, é importante manter a temperatura da célula bem abaixo de 45°C em todos os momentos, especialmente durante o processo de equalização, quando algum calor é produzido pela célula. Acima de 45°C o separador degrada-se lentamente e eventualmente as placas se tocam. Isto significa que a célula é curto-circuitada internamente e fica inutilizada. Outro problema com temperaturas elevadas é causado pelo fato do eletrólito evaporar lentamente. Células seladas para aplicação em temperaturas elevadas têm um melhor separador e selo para resistir a temperaturas acima de 65°C.

As especificações de tensão e capacidade de baterias são geralmente fornecidas para 25°C. Para temperaturas mais altas ou mais baixas, as tensões são ligeiramente diferentes, por isso os controladores de carga devem ter compensação de temperatura. Não há mudança na capacidade com a temperatura, exceto abaixo de -20°C, quando a capacidade começa a cair, devido ao congelamento do eletrólito.

Abaixo de 5°C a absorção do oxigênio é lenta. Assim, a corrente de equalização para células seladas de Ni-Cd deve ser menor do que C/10, para evitar a produção de hidrogênio.

4.3.5 – Baterias Li-íon

As baterias de Li-íon apresentam altas densidades energéticas, na faixa de 80-150 Wh/kg, sendo, por isso, atualmente, utilizadas em larga escala em equipamentos eletrônicos portáteis, como câmeras fotográficas, *laptops*, celulares, etc. Tem sido também utilizadas em veículos elétricos.

É considerada uma tecnologia promissora e que ainda tem muito espaço para novos desenvolvimentos. O funcionamento da célula de Li-íon pode ser expresso pela seguinte reação eletroquímica:



O catodo é um composto de Lítio (Li) da forma LiMO₂, onde M representa um metal de transição, sendo Ni, Co e Mn os mais usados, produzindo íons de Lítio durante a descarga. O anodo,

designado por C_n , é formado por Carbono com a propriedade de receber e acumular íons de Lítio, podendo, entre outros, ser de uma estrutura denominada fullereno ou C_{60} .

Uma das vantagens deste tipo de célula é a tensão nominal elevada, podendo atingir 3,5V, de forma que são usadas 4 células em série para compor um bloco de 12V. Outras vantagens são a alta densidade energética, a ausência de “efeito memória”, a possibilidade de suportar altas taxas de carga e descarga, o baixo tempo de carga e a baixa taxa de auto-descarga.

À guisa de exemplo, segundo a documentação do fabricante (THUNDER SKY), um determinado modelo de bateria de $LiFePO_4$ (fosfato de Lítio-Ferro), com densidade energética de $\sim 84Wh/kg$, pode suportar taxas de carga/descarga de $C/1/3$, equivalente a 20min (muito superior às taxas usadas em sistemas fotovoltaicos), e atinge uma vida cíclica de 3000 ciclos com profundidade de descarga de 80%.

O desenvolvimento de novas formulações químicas e novos materiais para as baterias Li-íon prossegue, incluindo a utilização de nanotecnologias (materiais nanoestruturados).

Normalmente o emprego de baterias Li-íon requer uma estratégia de controle e um sistema de segurança incluindo proteção contra sobrecarga, descarga excessiva, sobrecorrente, curto-circuito, altas temperaturas e tensões elevadas. As baterias de Li-íon podem explodir ou incendiar. O controle tem de ser feito em cada célula individualmente e o controlador é sofisticado e denominado de BMS – *battery management system*. No caso da aplicação em sistemas fotovoltaicos, contudo, uma vez que as taxas de carga/descarga são bastante baixas, entende-se que um grau de sofisticação bem menor é suficiente.

Apesar de diversas vantagens, o custo inicial ainda impede o uso de baterias Li-íon em SFIs, embora já existam no Brasil estudos sobre isso (SOARES et al., 2012).

4.3.6– Características ideais para uso de baterias em sistemas fotovoltaicos isolados

A operação de uma bateria usada em um sistema fotovoltaico isolado (SFI) deve atender a dois tipos de ciclos:

- Ciclos rasos a cada dia;
- Ciclos profundos por vários dias (tempo nublado) ou semanas (durante o inverno).

Os ciclos profundos ocorrem quando o carregamento não é suficiente para repor a quantidade de carga usada pelos aparelhos durante todo o dia. Por isso, o estado de carga depois de cada ciclo diário é ligeiramente reduzido e, se isto ocorrer por um período de vários dias, levará a um ciclo profundo. Quando as condições meteorológicas melhoram, volta a haver um carregamento extra, aumentando o estado de carga depois de cada ciclo diário.

As características mencionadas a seguir devem ser observadas para que as baterias tenham um bom desempenho quando instaladas em um SFI:

- Elevada vida cíclica para descargas profundas;
- Necessidade de pouca ou nenhuma manutenção;
- Elevada eficiência de carregamento;
- Baixa taxa de autodescarga;
- Confiabilidade.

Outros fatores que também devem ser considerados no momento de escolher a bateria adequada para esta aplicação são:

- Disponibilidade de fornecedores;
- Garantia e condições de garantia da bateria;
- Distância, duração e custo do transporte para o local;
- Custo da capacidade útil para um ciclo;
- Custo da capacidade útil para o ciclo de vida;
- Necessidade de manutenção durante o armazenamento;
- Peso;
- Densidade de energia;
- Temperatura ambiente do local da instalação;
- Disponibilidade e custo dos controladores de carga.

Estes fatores podem variar bastante para os vários modelos de bateria e também dependem das características locais. A escolha da bateria envolve o conveniente equilíbrio de todos os fatores mencionados.

Entre os modelos disponíveis no mercado, as baterias Chumbo-ácido são as mais utilizadas em SFI, apesar das baterias de NiCd e NiMH apresentarem características operacionais mais favoráveis. As baterias de NiCd e NiMH não apresentam problemas de descargas profundas ou de sulfatação e, portanto, podem permanecer completamente descarregadas por longos períodos. Entretanto, o custo mais elevado e o número reduzido de fornecedores desses tipos de baterias, em relação às Chumbo-ácido, têm limitado o seu uso em pequenos sistemas. As baterias automotivas são projetadas para curtos períodos de rápida descarga, sem danificá-las. Por este motivo, elas não são apropriadas para SFI, pois sua vida útil em regime de ciclagem é bem menor do que de outras tecnologias de baterias. Em qualquer situação, é indispensável conhecer as características elétricas da bateria selecionada e escolher um controlador de carga adequado.

As baterias para aplicações fotovoltaicas comercializadas no Brasil devem apresentar a etiqueta do Inmetro, como a da Figura 4.22, afixada no próprio produto. O âmbito de aplicação da etiquetagem de baterias, expressa na portaria Inmetro nº 004/2011 (INMETRO, 2011), envolve baterias estacionárias de baixa intensidade de descarga, de tecnologia alcalina Níquel-Cádmio ou Chumbo-ácido, para aplicação fotovoltaica, excluindo-se baterias automotivas ou tracionárias. Os ensaios a serem realizados são de capacidade, durabilidade, retenção de carga (autodescarga), regeneração da capacidade e eficiência de carga/descarga para as baterias com a seguinte classificação:

- Chumbo-ácida ventilada sem reposição de água;
- Chumbo-ácida ventilada com reposição de água e vaso transparente ou translúcido;
- Chumbo-ácida regulada por válvula;
- Bateria alcalina Níquel-Cádmio ventilada;
- Bateria alcalina Níquel-Cádmio regulada por válvula.



LOGOMARCA E INFORMAÇÕES DO FORNECEDOR DO PRODUTO	
TIPO (Tecnologia da bateria)	
MODELO (Código comercial)	CAPACIDADE NOMINAL (120h até 1,80Vpe* @ 25°C) XXXX Ah
TENSÃO NOMINAL XX V	NÚMERO DE CICLOS (Conforme RAC nº 013) XXXX
Regulamento de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para Energia Fotovoltaica - RAC/013-FOT - Bateria	
 PROCEL	PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA 
ESTE PRODUTO TEM SEU DESEMPENHO APROVADO PELO INMETRO E ESTÁ EM CONFORMIDADE COM O PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM	
*1,00Vpe para bateria Ni-Cd	Unidade: mm

Figura 4.22–Modelo de etiqueta do Inmetro para baterias. Fonte: (Inmetro, 2011).

Os fabricantes normalmente recomendam que uma bateria Chumbo-ácido não seja armazenada por um período superior a 12 meses, e que, caso o período de armazenamentos atinja 6 meses, a bateria seja submetida a uma recarga.

4.3.7 – Transporte, descarte e reciclagem de baterias

As baterias inservíveis são consideradas lixo tóxico e, portanto, representam risco para a saúde humana e para o meio ambiente. Por isso não podem ser descartadas no lixo comum, em aterros sanitários, lançadas em corpos d'água, abandonadas no meio ambiente a céu aberto, incineradas etc, o que pode inclusive ser sujeito a sanções previstas na Lei de Crimes Ambientais (Lei N° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998).

Conforme as resoluções CONAMA Nº 257/99 e 401/2008, as baterias ao fim de sua vida útil devem ter uma disposição final adequada, devendo ser entregues pelo usuário ao respectivo fabricante, importador ou distribuidor, ou, no caso de baterias Chumbo-ácido, opcionalmente a um reciclador devidamente licenciado, o qual deverá processar e reciclar, caso possível, os compostos químicos nelas contidos de acordo com a regulamentação ambiental vigente.

Outrossim, na resolução ANTT¹⁷ Nº 420/2004 as baterias de qualquer tipo são classificadas como produtos perigosos para fins de transporte terrestre. As baterias Chumbo-ácido são incluídas na classe 8 – substâncias corrosivas, e as de Lítio na classe 9 – substâncias e artigos perigosos diversos. Assim, os requisitos exigidos para seu transporte incluem embalagens específicas, viaturas corretamente sinalizadas e conduzidas por pessoal devidamente habilitado em curso aprovado pelo CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito, entre outros. O descumprimento da resolução ANTT No 420/2004 também pode ser caracterizado como crime ambiental.

A sinalização para produtos perigosos é definida na norma ABNT NBR 7500 (Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos), sendo a sinalização aplicável a baterias Chumbo-ácido mostrada na Figura 4.23.

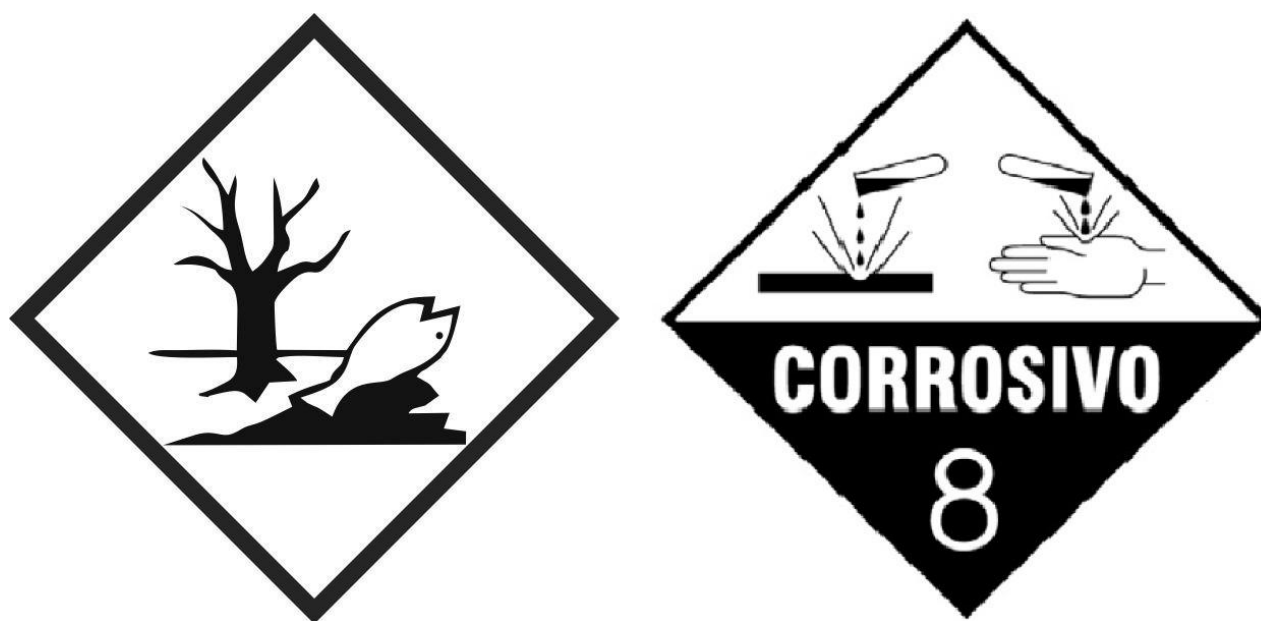


Figura 4.23 – Sinalização aplicável a baterias Chumbo-ácido.

4.3.8 – Salas de Baterias

Para bancos de baterias de SFIs maior porte, como, por exemplo, aqueles instalados em MIGDIS (ver Figura 7.17), requisitos para salas de baterias devem ser observados.

Um dos itens que devem ser previstos é a instalação, sob os bancos de baterias, de bandejas para captação e retenção do ácido que eventualmente vazar.

¹⁷ ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

Em função da produção de gases em baterias Chumbo-ácido não seladas, devem ser atendidos requisitos em relação à ventilação, pois a mistura de H₂ no ar tem LII¹⁸ de cerca de 4% em volume, ou seja, torna-se explosiva em concentrações superiores a esta. Caso se trate de baterias abertas, então entende-se que a área seria classificada na norma NBR IEC 60079-10 como zona 1, enquanto que se forem baterias seladas será zona 2. Quanto à classificação do gás, o Hidrogênio é classificado nesta norma no grupo denominado IIC, considerado o de maior risco. Em função disto, a instalação elétrica das salas de baterias deve ser adequada a atmosferas explosivas.

Uma das possibilidades de proteção é a instalação de detectores que acionem exaustores (e possivelmente também um alarme) quando a concentração de H₂ superar cerca de 20-25% daquela concentração LLI. A exaustão deve sempre ser feita para o exterior, ou seja, o ar não pode ser direcionado a outro ambiente fechado.

A renovação de ar necessária em salas de baterias para evitar concentrações perigosas de H₂ é especificada na Norma DIN VDE 0510, de acordo com a Equação 4.17.

$$Q = 0,05 \times N \times I \times (C/100) \quad (4.17)$$

Onde:

Q (m³/h) – vazão de ar;

N (adimensional) – número de elementos (2 V) na sala;

I (A) – corrente de carga em A para cada 100Ah; Para carga em regime de flutuação deve ser considerada uma corrente de 1 A para cada 100Ah de capacidade do banco em C/10; para carga em tensões maiores do que a de flutuação, sem atingir o borbulhamento, deve-se utilizar 2 A para cada 100Ah;

C (Ah) – capacidade do elemento;

0,05 – constante.

Recomenda-se também que as salas de baterias sejam dotadas de sistema de detecção e alarme de incêndio, incluindo detectores de fumaça e detectores térmicos.

Outra questão importante no projeto de salas de baterias é a temperatura. As baterias, não devem, por exemplo, ser instaladas ao lado de uma parede que recebe radiação solar direta durante a maior parte do dia, ou mesmo próximas a algum equipamento aquecido. Diferenças de temperatura entre elementos de um mesmo banco também devem ser evitadas, pois isto resulta em diferenças de tensão e de desempenho. Alguns fabricantes recomendam que esta diferença não deve superar os 3°C, assim, também não se deve, por exemplo, posicionar mesmo apenas alguns elementos próximos a uma fonte de calor.

Salas de baterias devem ser devidamente sinalizadas e, de forma a evitar acidentes, o acesso restrito somente a pessoal técnico habilitado, utilizando os EPIs adequados.

¹⁸ LII – Limite Inferior de Inflamabilidade.