

BATERIAS EM SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Jacqueline Biancon Copetti – jcopetti@unisin.br

Mario Henrique Macagnan – mhmac@unisin.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Engenharia Mecânica

3409 - Conversão fotovoltaica da energia solar

Resumo. *A bateria de armazenamento é fundamental nos sistemas autônomos de energia solar fotovoltaica (FV), sendo o componente responsável por garantir o fornecimento constante de energia, mesmo nos períodos de baixa geração. No entanto, ainda é o componente menos estudado. As experiências registram as falhas de sistemas, o que leva ao descrédito do uso desta tecnologia, que se devem quase sempre à falha na bateria, por mau dimensionamento, uso e controle. Este trabalho apresenta uma revisão sobre o uso das baterias em sistemas fotovoltaicos, aplicações, problemas, características operacionais e mecanismos de envelhecimento. A importância dos modelos de comportamento na simulação dos sistemas é mostrada e como estes são úteis para estudar o comportamento dinâmico da instalação e ajudar a selecionar a melhor estratégia de controle para aumentar a vida da bateria.*

Palavras-chave: *Armazenamento em sistemas FV, baterias de chumbo-ácido, mecanismos de envelhecimento, modelos de baterias, simulação e otimização de sistemas FV*

1. INTRODUÇÃO - USO E SITUAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS EM ALGUNS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DO BRASIL

Convencionalmente as baterias eletroquímicas de chumbo-ácido são aplicadas a veículos e sistemas de emergência mostrando-se versáteis, confiáveis e apresentando uma boa relação custo-eficiência para estas aplicações. Desde que os sistemas de potência, que incorporam tecnologias renováveis como a solar fotovoltaica, foram introduzidos como alternativas energéticas de geração de eletricidade para diversas aplicações na solução de deficiências de eletrificação rural, iluminação pública, fornecimento de energia para sistemas de telecomunicações, navegação e sinalização, por exemplo, o uso destas baterias foi a opção encontrada para o armazenamento da energia elétrica gerada, adaptando a geração intermitente à demanda, e assim garantindo um fornecimento constante de energia. A escolha destas baterias foi e é determinada em função do custo e da disponibilidade, sendo uma tecnologia aparentemente de fácil adaptação a esta aplicação.

Os sistemas solares fotovoltaicos têm encontrado um mercado crescente, graças à redução de custos de fabricação e à melhoria da qualidade dos módulos fotovoltaicos, que hoje já alcançam um alto grau de desenvolvimento tecnológico. Neste sentido, diversos projetos e programas vêm sendo implantados na última década em nosso país com o objetivo da universalização do serviço de eletricidade a partir da tecnologia solar, para zonas rurais ou de difícil acesso, beneficiando diversas comunidades. Dentre eles vale citar o programa nacional PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios do Ministério de Minas e Energia, que iniciou em 1996 (Galdino e Lima, 1999), o Programa Luz Solar/CEMIG de 1999 (Diniz, et al., 2000), o projeto piloto da COPEL de 1996 (COPEL, 2000), o projeto ECOWATT/Elektro no Vale do Ribeira de 1997 (Almeida Prado e Pereira, 1998), o Programa Luz do Sol/Alagoas de 1998, o Programa Xingó de 1999 (CNPq/CHESF/SUDENE e Universidades, 2002), entre outros.

Os sistemas são instalados para uso doméstico em residências e aplicações comunitárias como escolas, postos de saúde, igrejas, centros comunitários, postos telefônicos, postos policiais, etc. São compostos basicamente por módulos fotovoltaicos, baterias e controladores de carga e suprem, principalmente, as necessidades de iluminação e algumas cargas CC, como rádio e TV. Cargas AC, como TV, refrigeradores e eletrodomésticos, estão presentes em algumas instalações com o uso de inversores. Os projetos, em geral, seguem um padrão de dimensionamento, e em alguns casos como, por exemplo, nas últimas fases do PRODEEM foram estabelecidos padrões de sistemas ou “kits” para simplificar o processo, desde a licitação até a instalação e manutenção.

Dos resultados publicados de diagnósticos realizados em instalações no país, alguns relacionados aos programas citados anteriormente, se verificou que muitos sistemas apresentaram falhas, ou inclusive deixaram de funcionar, em grande parte por falha nas baterias, que não alcançaram o tempo de vida estimado de 4 anos. Por exemplo, Galdino e Lima (1999) relataram que os sistemas individuais das primeiras fases do PRODEEM não funcionavam devido à perda de capacidade das baterias após um ou dois anos de funcionamento. Já Pimentel et al., (1998) publicaram que entre todos os componentes dos sistemas avaliados em instalações rurais de Pernambuco o que mais preocupava era a bateria, pois na prática sua vida útil se mostrou muito menor, sendo verificada a perda de capacidade da bateria em aproximadamente 30% das instalações visitadas, o que é bastante significativo, já que este problema ocasiona a interrupção do fornecimento de energia elétrica à instalação durante os períodos noturnos e chuvosos. A Figura 1, apresentada no diagnóstico destes autores, mostra os percentuais de falhas relativos aos componentes dos sistemas analisados.

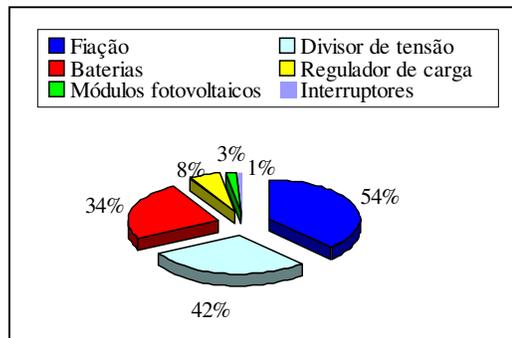


Figura 1. Percentual de casas que apresentaram falhas em componentes dos sistemas fotovoltaicos em Mirandiba – PE (Pimentel et al., 1998).

A avaliação realizada por Zilles et al.(2000) nas instalações do projeto Ecowatt também mostrou perda de capacidade das baterias, além da má qualidade das instalações e a desinformação dos usuários. Foi detectado que os sistemas estavam sobredimensionados (números de painéis fotovoltaicos em relação a consumo), o que sobrecarregava o sistema de baterias causando a morte prematura das mesmas. Também, segundo Correia e Soliano (2002), a Bahia possui um elevado número de sistemas FV isolados (aproximadamente 11427, que correspondem a 700 kWp), mas a maior parte destes não funcionam e, devido à dificuldade de acesso, permanecem desatendidos.

De forma diferente dos demais, os projetos da COPEL e do Luz do Sol foram concebidos com um centro FV de cargas de baterias, como forma de garantir as baterias sempre carregadas e diminuir os problemas com manutenção e trocas. Ao usuário caberia unicamente levar a bateria até o centro a cada 3 ou 4 dias. No entanto, se verificou uma estratégia não acertada. De acordo com Santos (2001), as baterias do projeto da COPEL perderam rapidamente sua capacidade devido às condições de operação dos centros de carga e a relação destes com a geração e o consumo nas residências, o que gerou alterações nos ciclos de carga e descarga das baterias. A necessidade de troca de baterias ocorreu em períodos menores, elevando o custo anual do projeto. Já o Programa Luz do Sol também iniciou sua operação com um centro de cargas, mas uma vez verificado que o mesmo não era efetivo foi desmontado e sistemas individuais foram montados a partir dos equipamentos do desmonte.

Nestes projetos, a manutenção das baterias quando preventiva fica a cargo do usuário. Às concessionárias cabem as manutenções que exigem trocas das baterias, além de lâmpadas e reatores, até defeitos mais graves como a troca do controlador. No entanto, alguns programas, como o Luz Solar/CEMIG, em função da experiência negativa dos primeiros sistemas passou a fornecer as baterias aos usuários em compartimentos fechados para evitar o contato, e por tanto, possíveis acidentes, e o uso das mesmas para outras cargas não especificadas no sistema. Como a concessionária é a proprietária da bateria, tem interesse em prolongar sua vida e minimizar os custos com manutenção e trocas. Porém, na prática as trocas de baterias não se viabilizam, em função das distâncias e qualidade das estradas, pelo menos em um tempo adequado para garantir o funcionamento constante do sistema, prejudicando o sucesso dos projetos e gerando um sentimento de desconfiança com a tecnologia.

Quando as baterias falham, o sistema não funciona e isto leva à insatisfação do usuário com o que foi lhe oferecido, ou os usos finais que lhe foram autorizados. Isto está muito bem explicitado em relatos de usuários. Segundo Santos (2002), os usuários declararam que como o sistema não funciona à noite como era

o esperado, eles passaram a usar “bastante” de dia, pois conforme dizem, “para valer o dinheiro” que eles pagam. Desta forma, a bateria nunca carrega plenamente.

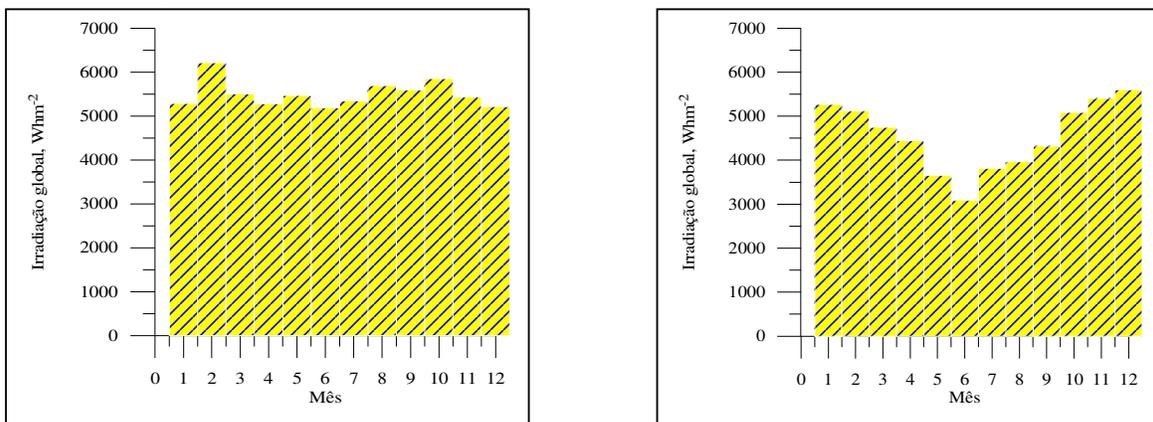
De tudo isto se conclui que existe desde uma má adaptação da solução tecnológica, até problemas de gerenciamento dos sistemas pós-instalação, que não garantem a sustentabilidade dos mesmos. A má adaptação inclui necessariamente a questão de dimensionamento adequado ao consumo, seleção de equipamentos e estratégia de controle e operação dos sistemas. A manutenção se vê que é um ponto fundamental. E neste cenário a bateria é um elemento chave, não somente no aspecto operacional, que garante o funcionamento do sistema, mas nos custos do sistema. A progressiva redução no preço das células solares fez com que o armazenamento suponha uma fração importante da inversão total requerida em uma instalação (pode significar de 20 a 25% do custo do sistema), isto porque, como mostrado anteriormente, é o elemento que sofre o maior desgaste durante a operação do sistema e periodicamente deve ser substituído ao longo da vida da instalação.

2. UM POUCO SOBRE AS BATERIAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Aumentar a eficiência e a durabilidade dos sistemas implica entender como funciona o acumulador e sua relação com os outros elementos. Selecionar adequadamente o tipo, o tamanho e as características do acumulador, assim como a estratégia de controle que deve ser aplicada ao mesmo.

O sistema de armazenamento de energia deve funcionar continuamente em ciclos de carga e descarga, de intensidade e duração variáveis em função da intermitência da geração de energia e dos diversos tipos de consumo. A um ciclo diário (determinado pelos perfis de geração e consumo) se superpõe um ciclo sazonal, que depende da evolução da radiação solar ao longo do ano. Conforme a aplicação um ciclo diário pode variar desde superficial (profundidade de ciclagem em torno de 15%) a profundo (maior que 80%). Assim, as baterias em aplicações fotovoltaicas podem operar em condições de cargas e descargas irregulares, longos períodos em baixa carga ou em sobrecarga e sob variações na temperatura. Isto varia muito conforme a localização do sistema e da demanda. Em um estudo realizado por Morante (2004) sobre a demanda de sistemas domiciliares de instalações nacionais se verifica que o consumo médio mensal pode variar desde 0,24 kWh/mês até 4,8kWh/mês, dependendo do tipo de família, das cargas e do uso das mesmas. O consumo diário é praticamente concentrado à noite, considerando as cargas de iluminação, rádio e TV, mas há usos de alguns eletrodomésticos durante o dia. O estudo registrou que o consumo não é linear, nem constante ao longo do tempo, de acordo com os hábitos de cada família e região.

Por outro lado, grande parte dos sistemas FV estão localizados nas regiões Norte e Nordeste onde o ciclo anual de radiação solar não apresenta uma sazonalidade muito marcada, como se pode ver na Fig. 2a, pois estas regiões apresentam uma média anual, mais ou menos constante e acima de 5 kWh/m². Para comparação, se apresenta na Fig. 2b o perfil de radiação anual para o sul do país, onde as estações do ano são bem definidas e o período de inverno exerce uma influência muito grande no comportamento dos sistemas aí instalados, pois o nível de insolação diminui. Para um consumo constante ao longo do ano estas condições de geração submetem a bateria a condições operacionais muito variáveis. Os dados apresentados no trabalho de Sauer et al. (1997) sobre a análise de instalações localizadas na Europa Central, principalmente na Alemanha, reforçam esta idéia.



a)

b)

Figura 2. Perfil típico anual de radiação solar para as regiões a) Nordeste (Petrolina-BA) e Sul (Porto Alegre – RS)

Com relação ao tipo de armazenamento, o eletroquímico, ou a bateria recarregável é o sistema utilizado. As baterias convertem energia elétrica em química, quando carregam, e a energia acumulada é convertida em elétrica novamente quando descarregam. A bateria de chumbo-ácido é considerada ainda hoje a mais viável de utilização, por ser uma tecnologia conhecida e dominada, que apresenta uma boa relação entre rendimento, custo e vida útil, além da disponibilidade.

Diferentes formas construtivas desta bateria estão disponíveis no mercado para suprir a demanda das aplicações convencionais: arranque (automotivas), tração (veículos elétricos) e estacionárias (auxiliar dos sistemas de alimentação ininterrupta). Independente das características construtivas específicas, esta bateria envolve os materiais ativos chumbo (Pb) e óxido de chumbo (PbO₂) nas placas e ácido sulfúrico (H₂SO₄) como eletrólito. Na descarga forma sulfato de chumbo (PbSO₄) e na carga os materiais ativos são revertidos, ou seja, $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2$.

Para entender melhor o que passa com a bateria quando as condições de operação são tão variáveis vamos verificar suas principais características. As reações químicas que ocorrem na bateria dependem da capacidade, do regime de corrente de carga e descarga e da temperatura de operação. Somado a isto, os processos normais podem ser alterados em função do tempo de operação da mesma, ou seja, do seu grau de envelhecimento.

2.1 A capacidade de uma bateria

A quantidade de eletricidade, ou a capacidade útil, é dada pelo produto da corrente de descarga pelo tempo de duração da mesma e depende de como são utilizados os materiais ativos no processo. A descarga se caracteriza por uma progressiva diminuição da tensão, da densidade do eletrólito e do estado de carga e influem os fatores construtivos da bateria (estrutura dos materiais ativos, porosidade, concentração de ácido, espessura das placas) e os fatores operacionais, como o regime de corrente (I_t= corrente para t horas de descarga), a temperatura e a tensão final de descarga. A Figura 3 apresenta dados medidos de descarga (Copetti et al., 1997, 1993), mostrando o efeito do regime de descarga na variação da tensão para dois tipos construtivos de baterias: uma estacionária (C₁₀₀=100Ah), aberta ou ventilada, e formada de 6 vasos individuais de 2V cada, e a outra selada, livre de manutenção, em estrutura monobloco de 12V (C₁₀=95 Ah). Complementando a análise desta figura, a Tab. 1 apresenta os valores obtidos de capacidade para estas baterias nos diferentes regimes de descarga, adicionando a bateria automotiva monobloco 12 V (C₂₀=36Ah).

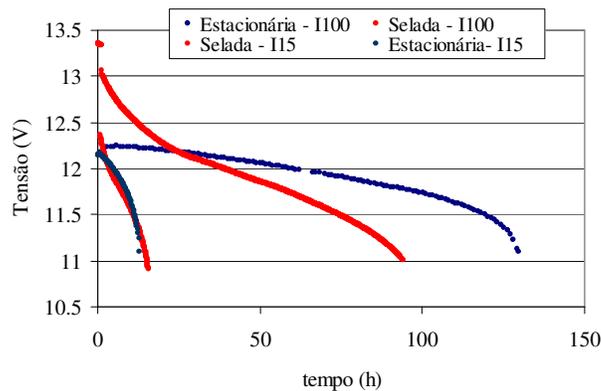


Figura 3. Variação da tensão da descarga para dois regimes de corrente e dois tipos de baterias, conforme dados medidos a 25°C.

Através da Fig. 3 pode-se ver como a tensão diminui com o tempo na descarga e a diferença com o regime refletindo-se diretamente no cálculo da capacidade apresentado na Tab.1. Nesta tabela se pode verificar a influência dos fatores externos na capacidade. Para regimes mais elevados (I₁₀) as baterias dão menores capacidades, pois se descarregam mais rapidamente e as transformações internas são superficiais (tempo limitado para o processo de difusão do eletrólito), ao contrário das descargas a regimes menores (I₁₀₀) que a capacidade aumenta. A menores correntes se produz um melhor e mais completo uso dos materiais ativos e do ácido e se obtém uma distribuição de correntes mais uniforme. Considerando os valores médios de consumo e irradiação, se pode dizer que os regimes usuais das aplicações fotovoltaicas costumam ser de

baixa intensidade de corrente, claro que isto dependerá também do dimensionamento do sistema, e dos dias de autonomia estabelecidos.

Tabela 1. Capacidades para dois regimes de descarga (a 10 horas- C_{10} e a 100 horas- C_{100}) conforme dados medidos por Copetti et al. (1997, 1993) e Moura (1995).

Baterias (12V)	Densidade (g/cm ³)	Tensão final (V)	Capacidade (Ah)	
			C_{10}	C_{100}
Estacionária ¹ ($C_{10}=100Ah$)	1,24	11,1	127,8	194,2
Automotiva ² ($C_{20}=36Ah$)	1,26	11,0	26,0	30,5*
Selada ² ($C_{10}=95Ah$)	1,27	11,0	74,6	99,7

¹Bateria de fabricação Alemã; ² Baterias de fabricante nacional. *Esta capacidade da bateria automotiva foi obtida para um regime correspondente a 60 horas de descarga, ou seja, C_{60} .

As diferenças nos valores obtidos, principalmente para as baterias estacionária e selada, que possuem praticamente a mesma capacidade nominal para 10 horas, podem estar associadas aos aspectos construtivos, pois a estrutura interna deve adaptar-se à aplicação a que se destinam. As baterias estacionárias são para aplicações em que a maior parte do tempo se mantêm carregadas e, esporadicamente, são submetidas a descargas profundas, por isso possuem placas grossas ou tubulares. Estas características construtivas fazem com estas baterias possam suportar as condições de ciclagem e, portanto, se comportem melhor que as demais em sistemas FV, mas por serem abertas exigem manutenção para reposição de água. Neste sentido as baterias seladas são interessantes, pois são livres de manutenção e, diferente das abertas, possuem uma quantidade limitada de eletrólito e um valor mais elevado de densidade. No entanto, os dados medidos não correspondem à capacidade nominal fornecida pelo fabricante, sendo observado que após ciclos de acondicionamento e testes repetitivos a bateria perdia capacidade.

As baterias automotivas são indicadas para descargas rápidas e, portanto, correntes elevadas, sendo por isto fabricadas com placas planas e delgadas. Esta bateria não se comportou bem ao longo do tempo a correntes reduzidas, e se observou que os regimes impostos nos experimentos aceleraram os mecanismos de envelhecimento da mesma.

2.2 Como influi a temperatura na capacidade

A capacidade diminui com a diminuição da temperatura, pois a resistividade do eletrólito aumenta de forma significativa, diminuindo a velocidade dos processos de difusão iônica. A solução adotada para sistemas instalados em regiões com baixas temperaturas é utilizar ácido mais concentrado nas baterias. Por outro lado, a operação a altas temperaturas pode ocasionar danos irreversíveis à bateria por efeito da corrosão. A Tabela 2 apresenta os valores de capacidade para três temperaturas para a bateria estacionária. Estes resultados foram obtidos a partir de medidas realizadas com temperatura controlada durante todo o ensaio de descarga (Copetti, 1993). A temperatura de operação pode se converter em um fator intensificador dos processos de envelhecimento da bateria, de modo que a mesma deve ser protegida das condições ambientais acondicionando-a adequadamente para garantir seu funcionamento.

Tabela 2. Capacidade em função da temperatura para dois regimes de operação para uma bateria estacionária.

Temperatura (°C)	Descarga - Capacidade (Ah)	
	C_{10}	C_{100}
5	90,71	109,29
25	127,8	194,25
45	143,93	206,2

2.3 O processo de carga e sobrecarga

Durante a carga, ocorre o restabelecimento dos materiais ativos nas placas aumentando a tensão, a densidade do ácido e o estado de carga. Na parte final da carga, denominada sobrecarga, junto com o

processo reversível de renovação dos materiais ativos ocorre o processo irreversível da hidrólise no meio ácido. A progressiva escassez da matéria ativa faz com que parte da corrente destinada a carregar a bateria seja empregada na decomposição e liberação de gases (O_2 na placa positiva e H_2 na negativa), ocasionando perda de água, aumento da concentração do eletrólito e elevação da temperatura. Como consequência o cálculo do estado de carga da bateria não é direto, pois mais ampéres-hora são requeridos para alcançar 100% do estado de carga que aqueles obtidos na descarga. A Fig. 4 apresenta curvas de carga, com sobrecarga, para dois tipos de bateria: estacionária e selada, para diferentes regimes de carga (a correntes correspondentes a 10 horas de descarga, ou I_{10} , e 30 horas, ou I_{30}).

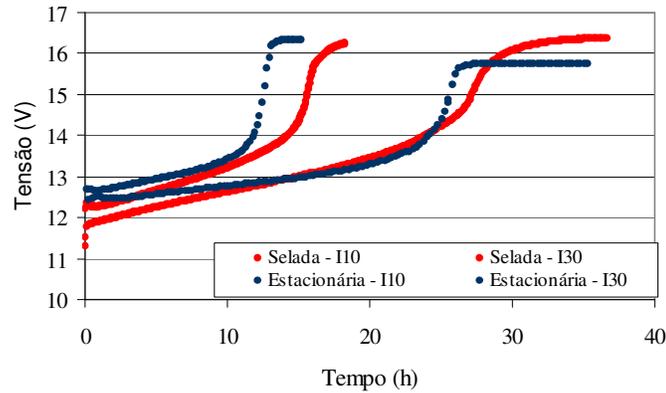


Figura 4. Curvas de carga a 25°C para dois tipos de baterias (por Copetti et al., 1997e 1994).

Em baterias abertas, o desprendimento de gases depende da tensão de carga, temperatura, tipo de liga da grade das placas e presença de impurezas. A gaseificação é mais pronunciada em baterias com liga de chumbo-antimônio (PbSb), que com chumbo-cálcio (PbCa). A tensão e o regime de carga são também dependentes da temperatura. A tensão de plena carga aumenta à medida que a temperatura diminui e viceversa, de acordo com os dados da Tab. 3.

Tabela 3. Tensão final de carga em função da temperatura para dois regimes de operação para uma bateria estacionária (dados medidos por Copetti, 1993).

Temperatura (°C)	Carga – Tensão final (V)	
	I_{10}	I_{100}
5	16,90	-
25	16,32	15,06
45	15,90	14,64

É importante ter em consideração dois aspectos relacionados às baterias dos sistemas em nosso país. As regiões onde são instalados estes sistemas têm uma temperatura média anual de 25 a 32°C, e, além disso, como a geração é mais ou menos constante ao longo do ano (Fig. 2) as baterias estarão constantemente em sobrecarga, que também aumenta a temperatura interna da bateria. Portanto, deve-se ter um cuidado especial com relação às tensões de controle do regulador de carga (Tab. 3) para minimizar estes efeitos, além do seu correto acondicionamento, isolando-a das condições ambientais. Ainda com relação ao efeito da temperatura, seu aumento se combinado com regimes de corrente mais elevados pode levar à corrosão da grade positiva. Uma alternativa para zonas quentes é utilizar eletrólito com densidade mais baixa, entre 1,2 e 1,22 g/cm³, como forma de diminuir esta tendência.

Analisando estas características e os fatores que influem na operação da bateria, complicando-se ainda mais devido à interrelação entre eles, é imprescindível que haja um grande comprometimento no dimensionamento do sistema fotovoltaico para combinar a geração com a demanda e os dias de autonomia, de modo a dimensionar corretamente a capacidade necessária do sistema de baterias, já que os regimes típicos de carga são dados pelo tamanho do gerador e os de descarga pela demanda. No caso de nosso país, considerando as regiões em que são instalados os sistemas, com um ciclo anual de insolação conforme Fig. 2a, deve-se levar em conta que a bateria poderá enfrentar muito mais situações de sobrecarga e temperaturas elevadas. As situações de descargas profundas são mais escassas, a menos que o consumo seja maior que o previsto. Neste ponto entra controlador de carga/descarga, que é fundamental para garantir o bom

funcionamento do sistema e proteger a bateria. No entanto o ajuste do controlador, em geral feito por tensão, também está condicionado ao conhecimento do comportamento da bateria nas condições de cargas e descargas (Figs. 3 e 4).

Encontramos alguns exemplos destas situações nos trabalhos apresentados sobre avaliações de instalações nacionais. Conforme Zilles et al.(2000) as instalações do projeto ECOWATT apresentaram sistemas sobredimensionados com relação à geração que penalizavam o sistema de baterias com sobrecargas constantes. Além disso, o problema se agravava pela falta de conhecimento do usuário, que acreditava que limitando seu consumo preservaria a vida do sistema, e desta forma sobrecarregava ainda mais a bateria. Isto poderia ter sido em grande parte evitado pelo correto valor da tensão de corte do controlador, mas esta não estava corretamente ajustada (fixada em 16V), levando às baterias a gaseificação, perda de água e corrosão das placas.

Exemplo oposto se tem no caso das instalações do projeto da COPEL, com o Centro FV de Cargas de Baterias (CFCB). Neste caso as baterias descarregadas somente deveriam ser levadas ao centro a cada 3 ou 4 dias para serem carregadas. Estas baterias acabavam sendo submetidas a descargas profundas, pois o estado de carga não depende somente dos dias de uso e sim como é feito este uso. Provavelmente, como os usuários temiam ficar sem energia gastavam mais do que o previsto. Além disso, os regimes de descarga eram diferentes dos de carga, pois a intenção era carregar o mais rápido possível (período de um dia), assim usando correntes mais elevadas do que as correntes de descarga. O esquema adotado pelo CFCB consistia em realizar a troca da bateria descarregada pela bateria carregada, semelhante ao sistema do botijão de gás, mas isso gerou problemas, pois os consumos eram diferentes e as baterias apresentavam diferentes capacidades e estados de carga. Finalmente, o que foi relatado é que os períodos de recarga passaram para 2 dias e as baterias exigiram trocas muito mais freqüentes que o previsto.

3. POR QUÊ A BATERIA FALHA NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS?

A vida útil é o período durante o qual a bateria é capaz de operar dentro das condições determinadas pela aplicação, mantendo a capacidade e o nível de rendimento requerido. Não pode ser estabelecida em termos absolutos, já que é fortemente influenciada pela forma de utilizar a bateria, como se verifica nos exemplos do item anterior. Então os fatores determinantes da degradação da bateria dependem principalmente das condições operacionais. Em cada ciclo de carga/descarga a diferentes regimes e temperaturas, se produzem mudanças internas irreversíveis que limitam a aceitação de carga e ocasionam uma redução gradual na capacidade disponível, levando em alguns casos à morte da bateria. Os principais mecanismos de envelhecimento das baterias são:

3.1 Estratificação

Denomina-se estratificação quando o eletrólito reage de uma maneira não uniforme originando um gradiente de densidade entre a parte superior e inferior da bateria. Este fenômeno, desenvolvido principalmente durante o processo de carga, tem por consequência a distribuição não uniforme da corrente e evita que o sistema alcance um estado homogêneo de carga. Pode ser eliminado por gaseificação, agitação mecânica e circulação de eletrólito.

Quanto menores as correntes de operação na bateria, mais intensifica este mecanismo. A parte superior dos eletrodos carrega mais que a inferior, resultando em diferenças internas no estado de carga. Isto afeta a operação de ciclagem, ou seja a parte inferior da bateria irá operar sem estar plenamente carregada por longos períodos de tempo, levando ao incremento de outro mecanismo denominado sulfatação. Dependendo do tipo de bateria e da aplicação, este problema pode ser evitado por agitação do sistema, o que acaba sendo muitas vezes impraticável nas aplicações fotovoltaicas. De forma mais viável, o problema pode ser reduzido se a quantidade de material ativo for reduzida da parte superior a inferior.

3.2 Sulfatação - Degradação das placas negativas

A sulfatação ocorre em baterias descarregadas durante períodos prolongados ou submetidas a recargas insuficientes, apresentando perda irreversível de matéria ativa produzida pela recristalização dos cristais de $PbSO_4$ formados durante a descarga, que se convertem em cristais maiores, que dificilmente são revertidos na carga posterior, resultando aumento de resistência interna, maior geração de calor e diminuição de capacidade.

3.3 Desprendimento de matéria ativa - Degradação das placas positivas

A sucessão de ciclos de carga/descarga causa uma contínua dilatação e contração dos materiais formados nas placas positivas, pela conversão de PbO_2 em $PbSO_4$ e viceversa, que se traduz em uma série de tensões mecânicas reduzindo a adesão do material ativo à grade e provocando seu desprendimento. Este efeito é mais acentuado quanto maior a profundidade de descarga diária e a intensidade de corrente. A corrosão estrutural da grade positiva também provoca desprendimento do material, mas está associada à sobrecarga excessiva e aumento da temperatura. O material que se deposita no fundo da bateria aumenta o risco de curto-circuitos entre as placas.

O tipo de placas e a liga da grade podem influir de forma significativa nestes mecanismos. Ligas de PbSb tendem a favorecer a aderência do material ativo e aumentar a resistência à ciclagem, mas podem aumentar a gaseificação e a perda de água, fortalecendo a corrosão. Já ligas de PbCa resultam em efeitos contrários, reduzem a perda de água, mas não resistem aos ciclos profundos e repetidos e são mais sensíveis à corrosão em condições de baixa carga.

4. EXISTE UMA BATERIA ESPECÍFICA PARA USO SOLAR?

A bateria para aplicações FV deve apresentar como principais características: capacidade de ciclagem, alta eficiência energética, longa vida útil, pouca manutenção e baixo custo. Combinando as características das baterias descritas nos itens anteriores com as condições impostas pelos sistemas FV, facilmente se chega à conclusão que as baterias convencionais não se adaptam satisfatoriamente. Com um correto dimensionamento e estratégia de controle do sistema é possível conseguir melhores condições de funcionamento, mas ainda se conta com um fator não previsível que é o usuário do sistema, que pode alterar completamente a condição de uso da bateria. Na prática o que se observa é que a vida útil da bateria é mais curta que o esperado.

Embora existam tecnologias em desenvolvimento, e algumas inclusive tenham se mostrado muito promissoras, hoje ainda são muito caras para a quantidade de energia acumulada requerida em sistemas de energia renováveis. Exemplos são as de níquel, de lítio e de vanádio (Rydh, 1999).

Neste sentido as baterias de chumbo-ácido continuarão por muito tempo a dar a melhor relação custo-desempenho. Alguns sistemas em que houve um acompanhamento mais contínuo as baterias estacionárias abertas, que têm uma expectativa de vida de até 8 anos para uma profundidade de descarga de até 50%, apresentaram bons resultados. No entanto são mais caras e exigem freqüente manutenção para repor água aumentando ainda mais os custos.

Para a aplicação solar, o que vem sendo feito ao longo dos últimos anos são adaptações ou modificações estruturais em cima das baterias convencionais de modo a melhorar seu comportamento nas condições operacionais dos sistemas solares. Neste sentido se tem disponível baterias de chumbo-ácido sem manutenção, ou do tipo regulados por válvulas (VRLA), com sistema de recombinação de gases que evitam a perda de água. Estas baterias podem ser com eletrólito absorvido em manta de fibra de vidro (AGM) ou gel. Embora confiáveis como as estacionárias abertas, têm custo elevado e problemas com temperaturas elevadas. As baterias automotivas, em função do baixo custo, despertam interesse. Assim alguns projetos têm focado em simples modificações desta bateria, sem alterar sua tecnologia fundamental, para melhorar seu pobre desempenho nos regimes típicos de carga e descarga dos sistemas FV domiciliares. Entre as modificações já propostas estão: menor concentração do eletrólito, maior volume de eletrólito, placas mais grossas e ligas PbCa ou baixa porcentagem de antimônio, para evitar a perda de água. Segundo estudo desenvolvido no projeto Europeu Joule (JOR3-CT98-0203) citado por Torcheux (2001), uma bateria padrão automotiva com placas finas de cálcio foi modificada substituindo o eletrólito padrão por uma nova formulação (4% de sílica coloidal e 2,2 % de ácido fosfórico) que permitiu melhorar o tempo de vida em ciclagem para aplicações solares.

A escolha em geral nos projetos nacionais, e principalmente quando se trata de sistemas domiciliares isolados, é por baterias de chumbo-ácido automotivas seladas, pois se verificou das primeiras instalações que o nível de eletrólito baixava e a dificuldade de reposição de água se tornava uma fonte de problemas. Os custos anuais da instalação refletem os custos reais de operação relacionados à manutenção e trocas e, assim, uma bateria com pouca ou livre de manutenção passa a ser um parâmetro importante, especialmente se os sistemas são pequenos e localizados em zonas rurais de difícil acesso.

5. QUAL O PAPEL DOS MODELOS DE COMPORTAMENTO DE BATERIAS?

A confiabilidade do sistema está associada não somente à variabilidade da radiação solar, mas às falhas dos seus componentes. O comportamento do sistema FV e a relação entre seus componentes pode ser estudada e otimizada através da simulação, que possibilita levantar as situações que levariam ao seu mau funcionamento e, no caso específico da bateria, a sua morte prematura. Para isto é imprescindível contar com modelos matemáticos para cada componente do sistema que representem corretamente as características tensão-corrente dos mesmos. Estes modelos são combinados em um algoritmo computacional através do fluxo energético descrevendo como os componentes se interrelacionam durante a operação do sistema, dando como resultado pontos de operação, que determinam a corrente que o gerador entrega em cada instante e o balanço energético ao longo do tempo.

No caso da bateria, é importante analisar a sensibilidade do dimensionamento para diferentes capacidades do acumulador e do gerador, a especificação do sistema de controle e a relação com os mecanismos de envelhecimento, além da influência do tipo de perfil de consumo diário. Para isto é necessário um modelo que possa representar os processos de carga e descarga a diferentes condições operacionais. Simplesmente usar o fluxo de energia através da bateria para prever a evolução do seu estado de carga durante o período de simulação, como muitos programas de simulação e dimensionamento fazem, não permite realizar estes estudos.

Alguns dos modelos propostos nos últimos anos são baseados, por exemplo, no comportamento físico-químico e as equações que o descrevem, como o de Gu et al. (1997). Já outros são baseados em experimentos realizados a condições controladas, como os de Salameh et al. (1992) e Copetti (1993), ou ainda aqueles que tentam dar uma melhor descrição do comportamento dinâmico como o de Protogeropoulos (1994) e o de Ross et al. (2000).

A aplicabilidade do modelo de Copetti (1993) foi verificada através de um programa computacional e um extenso trabalho de simulação desenvolvido para estudar aplicações domiciliares. Este modelo de bateria foi desenvolvido, ajustado e normalizado com a capacidade C_{10} , a qual é fornecida pelos fabricantes. O modelo tem equações de descarga, carga, sobrecarga e capacidade, que são aplicadas a uma faixa ampla de regimes de operação e temperaturas. Inicialmente o modelo foi generalizado para baterias estacionárias e no passo seguinte para baterias automotivas (Moura e Copetti, 1995). O programa simulou um ano típico, permitindo acompanhar o comportamento dinâmico das correntes na bateria hora a hora. Pode-se verificar como a especificação do regulador associada ao dimensionamento pode afetar a eficiência de armazenamento e a vida útil das baterias em termos de sobrecarga, consumo de água, corrosão, estratificação e sulfatação. Foram testados, entre outros aspectos, quais os valores de tensões que devem ser ajustados no controlador para desconectar e reconectar a carga. Os resultados deste estudo são apresentados no trabalho apresentado por Copetti et al. (1994). Implementando o modelo, os resultados foram usados para desenvolver um modelo de custos do sistema, que relaciona o tamanho do gerador e do acumulador com o número de operações de manutenção à bateria e trocas ao longo da vida útil projetada do sistema, devido aos aspectos de degradação da mesma (Chenlo e Copetti, 1994).

CONCLUSÃO

Com base no descrito se poderia dizer que a confiabilidade e sustentabilidade dos projetos é muito comprometida quando o sistema falha e que a bateria é um dos responsáveis. Vale a pena investir mais no estudo deste componente, conhecer os tipos e como funciona, estudar através da simulação seu comportamento e dimensioná-lo adequadamente. O que parece ocorrer é que há um descaso em relação à bateria. Selecioná-se a tecnologia mais barata sem que haja preocupação com sua adaptabilidade ao sistema, logo o custo anual do sistema passa a ser muito mais caro. Muito pode ser melhorado investindo neste componente, nos controladores de carga e na estratégia de controle adequada.

REFERÊNCIAS

- Almeida Prado, A.F., Pereira, O.S., 1998, Programa Ecowatt – Uma alternativa comercial para energia solar fotovoltaica. II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, SP, p.216-218.
- Barbosa, E.M.S, et al., 2002, Programa Xingó. Encontro do meio Rural - Agrener 2002, Campinas -SP.
- Chenlo, F., Copetti, J.B., Vela, N., 1994, Life-time and sizing of Pb-acid batteries for stand alone PV systems, 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, p.408-411.
- Copetti, J.B., 1993, Lead-acid batteries for PV applications, Journal of Power Sources, 28, p.173-180.

- Copetti, J.B., Chenlo, F., Lorenzo, E., 1994, Role of battery model in PV simulation and sizing programmes. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, p.412-415.
- Copetti, J.B., 1997, Relatório projeto n.º 30.0425/94.5/ CNPq.
- Correia, J.S.S. e Pereira, O.S., 2002, Perspectivas para a universalização da eletrificação no Estado da Bahia, Bahia Análise e Dados, Salvador-BA, SEI, V11 n.4, p.58-67.
- Diniz, A.S.A.C., et al., 2000, The utility model for rural pre-electrification with photovoltaic:CEMIG's LUZ SOLAR Programme, Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, Anchorage, AK, USA, p.1740-1743.
- Galdino, M.A.E., Lima, J.H.G., 1999, Aspectos Técnicos do Programa PRODEEM para Eletrificação Rural Baseada em Energia Solar Fotovoltaica. 4º Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia, Rio de Janeiro.
- Gu, H., et al., 1997, Numerical modeling of electrochemical and transport processes in lead-acid batteries. Journal of Electrochemical Soc., 144, 2053.
- Morante, F., 2004, Demanda de energia elétrica e desenvolvimento socioeconômico: o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas FV. Tese de doutorado. PPG em Energia da USP, 311p.
- Morante, F. e Zilles, R., 2000, Medidas de consumo em sistemas fotovoltaicos domiciliares, Encontro do Meio Rural - Agrener 2000. Campinas- SP.
- Moura, J.F.C. e Copetti, J.B., 1995, Caracterização de baterias automotivas para uso solar fotovoltaico, XIII Congresso Brasileiro e II Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica – COBEM-CIDIM/95.
- Pimentel, R.B., et al., 1998, Diagnóstico de sistemas fotovoltaicos instalados em zona rural do Estado de Pernambuco, Anais do IV Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis – Recife, p.2-7.
- Programa Eldorado, 1997, Projeto Parques Estaduais do Litoral Paulista – Departamento de Planejamento e expansão do setor elétrico – Divisão de Planejamento da geração - CESP.
- Protogeropoulos, C., et al., 1994, Battery state of voltage modelling and na algorithm describing dynamic conditions for long-term storage simulation in a renewable system. Solar Energy, 53(6), p.517-527.
- Relatório Técnico (ADG–A/PER 1035), 2000, Aspectos gerais do setor rural brasileiro: bases para avaliação integrado do programa nacional de eletrificação rural “Luz no Campo”, CEPTEL.
- Ross, J.N., et al., 2000, Modelling battery charge regulation for stand-alone photovoltaic system, Solar Energy, 69(3), p.181-190.
- Rydh, C.J., 1999, Environmental assessment redox and lead-acid batteries for stationary energy storage. Journal of Power Sources, 80, p.21-29.
- Salameh, Z.M., et al., 1992, A mathematical model for lead-acid batteries. IEEE Trans. Energy Conv., 7, 93.
- Santos, R. R., Zilles, R., 2001, PV Residential Electrification: a case study on Solar Battery Charging Stations in Brazil. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 6(9), p.445-453.
- Santos, R.R dos, 2002, Procedimentos para eletrificação rural fotovoltaica domiciliar no Brasil: uma contribuição a partir de observações de campo. Tese de doutorado. PPG em Energia da USP, 238p.
- Torcheux, L., Lailler, P., 2001, A new electrolyte formulation for low cost cycling lead acid batteries. Journal of Power Sources, 95, p.248-254.
- Valente, L.C.G. et al., 1994, PV rural electrification pilot project in the Northeast of Brazil. 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, p. 2008-2011.
- Zilles, R., et al., 2000, Avaliação dos sistemas fotovoltaicos instalados nas residências dos moradores da Ilha do Cardoso, Encontro do Meio Rural - Agrener 2000. Campinas- SP.

BATTERIES IN PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEMS

Abstract. *The storage battery is basic in stand-alone photovoltaic systems, being the responsible component for guaranteeing the constant supply of energy. However, is the component less studied. The experiences register the failures of systems, what it leads to the discredit of the use of this technology. These failures almost always are attributed to the batteries, for bad sizing, use and control. This work presents a review on the use of the batteries in PV systems, applications, problems, operational characteristics and aging mechanisms. The importance of the behavior models in the simulation of the systems is shown. Also the model usefulness to study the dynamic behavior of the installation and to help to select the best control strategy to increase the life of the battery are presented.*

Key words: PV system storage, lead-acid batteries, ageing mechanisms, battery behavior models, PV systems simulation and optimization.