



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/28  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**EXTENSÃO DA VIDA ÚTIL DE BATERIAS DE SISTEMA FOTOVOLTAICO SUBMETIDAS À CICLOS EM  
ESTADO PARCIAL DE CARGA E RECARGA PULSADA**

**Juliano de Andrade(\*)  
Institutos lactec**

**Patricio Rodolfo Impinnisi  
Institutos lactec**

**RESUMO**

O objetivo do presente trabalho foi o de verificar a viabilidade de um método não convencional de recarga de baterias chumbo ácido, como maneira de controlar a sua degradação ao operar em baixos estados de carga. Foi demonstrado que a carga pulsada é mais eficiente que a convencional para controlar a sulfatação das placas de baterias, o que pode aumentar a vida útil em regimes fotovoltaicos. Este protocolo de carga pulsada e estado parcial de carga, futuramente comporá um método de gerenciamento de baterias de sistemas fotovoltaicos, a fim de entender sua vida útil e diminuir o custo operacional.

**PALAVRAS-CHAVE**

Bateria, fotovoltaico, vida-útil, carga-pulsada

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Diversos setores ligados à geração e distribuição de energia elétrica fazem uso de baterias. Na proteção contra falhas no fornecimento, para alimentar equipamentos de importância crítica e, mais recentemente, associados à produção de energia a partir de fontes alternativas e sistemas de armazenamento de energia (Power Storage). A energia elétrica de fontes alternativas é produzida de forma intermitente e nem sempre coincide com o momento de uso da mesma. As baterias servem para normalizar o seu consumo. Neste tipo de operação, porém, as baterias podem permanecer sem recarga por períodos relativamente longos, o que diminui muito a sua expectativa de vida (1). E devido a essa eventual pouca disponibilidade de energia para recarga, é desejável que as baterias chumbo ácido para esse tipo de aplicação tenham uma boa eficiência de recarga, que é a razão entre a quantidade de carga efetivamente assimilada pela bateria, pela quantidade fornecida à mesma durante a recarga. É sabido que a aceitação de carga de baterias chumbo ácido diminui com o aumento do seu estado de carga, ou seja, baterias descarregadas "aceitam" praticamente toda a carga fornecida e em taxas relativamente elevadas, ao passo que baterias praticamente carregadas (acima de 85%, aproximadamente), tem uma baixa aceitação, devido à reações paralelas que tem impacto considerável nesses altos estados de carga (2).

No caso de sistemas fotovoltaicos, as baterias chumbo ácido dizem respeito à menos de 15% dos custos de implantação do sistema, mas podem chegar a mais de 50% dos custos totais, ao longo da vida útil do mesmo, devido à substituições (3).

Já foi demonstrado em outros trabalhos que a principal causa de falha de baterias ligadas a fontes renováveis é a sulfatação das placas negativas, que ocorre quando os cristais de PbSO<sub>4</sub> normalmente produzidos durante a descarga (e também na autodescarga) se dissolvem e reprecipitam na superfície de cristais maiores (4). Estes grandes cristais dificilmente podem ser recarregados.

(\*) BR-116 - KM 98 - Nº 8813 - Centro Politécnico da UFPR. Curitiba - PR  
Telefone: 41 3361-6184. Endereço eletrônico: juliano.andrade@lactec.org.br

Por estes motivos, a COPEL DIS, juntamente com os Institutos Lactec vem desenvolvendo uma metodologia de gerenciamento de baterias para sistemas fotovoltaicos baseado em operação em estado parcial de carga e recarga tipo pulsada, que maximizem a aceitação de carga, sem permitir que ocorra a sulfatação das baterias. Este procedimento será implementado em um protótipo de controlador de carga ao final do projeto. No presente trabalho serão apresentados alguns dos resultados iniciais, da influência da carga pulsada na recuperação da sulfatação e também em eventuais ciclos de carga e descarga completa

## 2.0 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nos testes foram utilizadas baterias seladas comerciais. As baterias foram inicialmente submetidas a ciclos de carga convencional e descarga ( $I_{\text{carga}} = 0,1C_{10}$ ,  $E_{\text{carga}} = 14,8 \text{ V}$ ,  $I_{\text{desc}} = 0,1 C_{10}$  até  $E_{\text{corte}} < 10,5 \text{ V}$ ) para estabilizar o valor da sua capacidade, após uma recarga completa, foram deixadas 7 dias em circuito aberto. Após este período, ambas as baterias foram descarregadas, para medir sua capacidade, e posteriormente recarregadas, uma delas pelo método convencional e a outra utilizando carga pulsada ( $t_{\text{on}} = t_{\text{off}} = 500 \text{ ms}$ ,  $I_{\text{on}} \text{ médio} = 5C$ , sendo " $t_{\text{on}}$ " o tempo com passagem de corrente durante um pulso e " $t_{\text{off}}$ " o de corrente zero). A recarga durante estes ciclos foi limitada de tal maneira que as baterias recebessem apenas a quantidade de carga correspondente à medida na descarga, ou seja, sem "sobrecarga", típica de baterias Pb-ácido. As etapas de repouso, medida de capacidade e recarga foram repetidas até que a capacidade de uma das baterias atingisse um valor menor que 80% do inicial (critério normalmente utilizado com fim de vida útil de baterias Pb-ácidas).

Após o término dos ensaios descritos acima as baterias foram desmontadas e suas placas analisadas por microscopia eletrônica de varredura, para verificar as diferenças morfológicas nos seus materiais ativos.

E para avaliar o impacto da carga pulsada na vida útil de baterias em ciclos constantes de carga, amostras foram submetidas a ensaios de reserva de capacidade (descargas de 25 A até o potencial de corte), seguida de recarga ( $0,1C_{10}$  A e 14,8 V) até que a carga fornecida fosse igual à capacidade medida (esse procedimento, implica em uma recarga incompleta, na maioria dos casos).

## 3.0 - RESULTADOS

A carga pulsada foi utilizada para se tentar recuperar a capacidade de baterias submetidas a regimes específicos que sabidamente comprometem a sua vida útil; a estocagem em estado parcial de carga e ciclos de reserva de capacidade.

A Figura 1 mostra a variação da capacidade de duas baterias seladas ao longo de ciclos de carga e descarga de estabilização (primeiros 4 ciclos) e ao longo do experimento de estocagem (à partir do 15º dia). Neste tipo de ensaio as baterias foram mantidas descarregadas por uma semana, completamente recarregadas com carga pulsada ( $t_{\text{on}} = t_{\text{off}} = 500 \text{ ms}$  e em seguida novamente descarregadas para medir a sua capacidade. Baterias de fontes renováveis de energia estão sujeitas a esse tipo de ciclo em condições desfavoráveis. Os valores de capacidade, representados foram normalizados pelo valor máximo de capacidade de cada bateria obtido durante o ensaio para facilitar a sua comparação. Os valores da capacidade da bateria que durante o experimento de estocagem foi recarregada com carga convencional estão representados por cruzes (+) e daquela cuja recarga foi feita de forma pulsada, por círculos vazados (○).

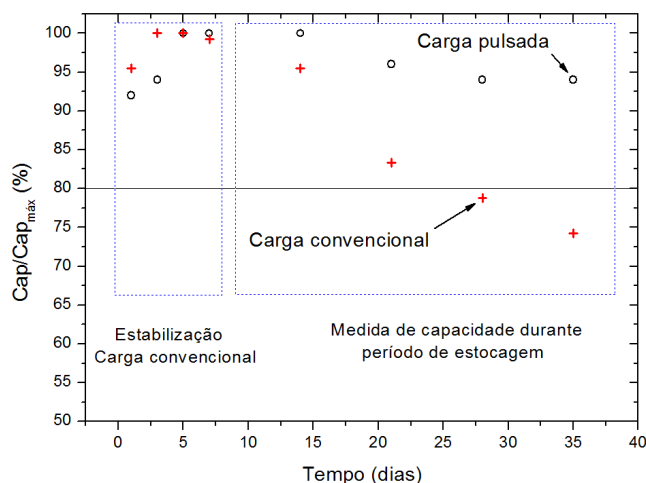


Figura 1 - Capacidade normalizada ao longo dos experimentos de estabilização e de estocagem, para uma bateria recarregada com carga pulsada e outra de forma convencional.

É possível notar que após 27 dias de ensaio a bateria submetida à carga convencional atingiu o fim da sua vida útil, enquanto aquela submetida a ciclos de carga pulsada apresentou uma capacidade próxima à inicial mesmo após 35 dias de ensaio.

Na Figura 2 são vistas duas imagens de MEV, sendo a imagem “A” a da superfície da placa negativa submetida à carga pulsada e a “B” a daquela submetida à carga convencional. É possível ver que a porosidade da placa negativa da bateria carregada pelo método convencional é bem menor, o que dificulta a entrada de eletrólito no interior da mesma, limitando a quantidade do material ativo que participa da descarga e, consequentemente, a capacidade da placa.

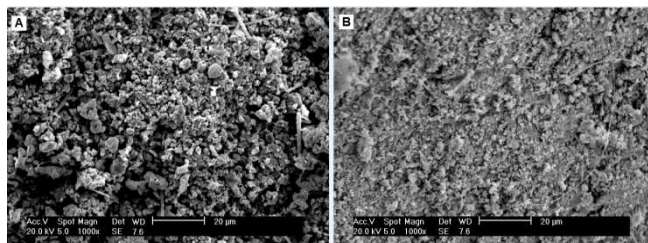


Figura 2 – Superfície de placas negativas submetidas ao experimento de estocagem. (A) Estocagem com carga pulsada e (B) estocagem com carga convencional.

Como dito anteriormente, o processo de dissolução e reprecipitação do  $\text{PbSO}_4$  aumenta o tamanho médio dos cristais e este processo é cumulativo, ou seja, tende a se agravar com a passagem dos ciclos. Esse aumento no volume dos cristais pode diminuir o volume dos poros da placa.

A imagem “A” da Figura 3 mostra o material ativo da placa negativa submetida à recarga pulsada na região de interface com a haste coletora de corrente da placa. E a imagem “B” foi feita numa mesma região da placa submetida à recarga convencional. Nota-se inicialmente que não há uma diferença considerável na porosidade do material ativo de ambas as placas. Nota-se também que os cristais na imagem “A” são menores, e que aqueles na imagem “B”, além de maiores, apresentam bordas e faces mais bem definidas, típico de cristais de  $\text{PbSO}_4$  formados por reprecipitação (5).

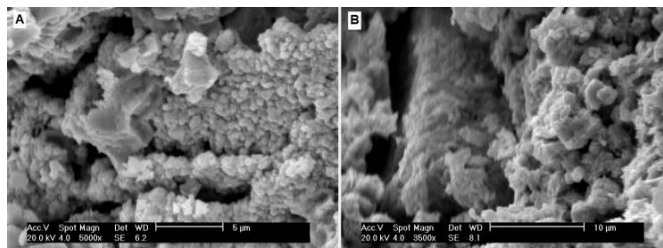


Figura 3 – Material ativo de placas negativas submetidas ao experimento de estocagem, próximo à interface com o coletor de corrente. (A) Estocagem com carga pulsada e (B) estocagem com carga convencional

Em placas de baterias chumbo ácido, o material ativo é suportado por grades de ligas de Pb. A corrente elétrica gerada/consumida no material ativo é conduzida para o exterior da bateria pelas hastes da grade. Logo, a interface entre o material ativo e as hastes da grade tem um papel importante no desempenho da placa. Cristais pequenos são mais ativos eletroquimicamente, o que se traduz num melhor comportamento do sistema. O acúmulo de grandes cristais de  $\text{PbSO}_4$ , que não são reduzidos durante as recargas, junto a haste da grade, diminui a área para a passagem da corrente elétrica, além de diminuir a quantidade de material ativo que efetivamente participa da descarga.

Na Figura 4 é visto o comportamento típico de uma bateria em ciclos de reserva de capacidade (repetidos ciclos de descarga completa). Nos primeiros 13 ciclos foi utilizada recarga convencional e nos últimos, carga pulsada.

É possível verificar que a capacidade da bateria aumenta um pouco quando se passa a utilizar a carga pulsada, mas logo retorna a cair abaixo dos 80% do seu valor inicial, indicando que algumas modificações morfológicas benéficas ocorreram na estrutura das placas durante a carga pulsada, mas que este efeito logo foi suplantado pelos mecanismos de degradação.

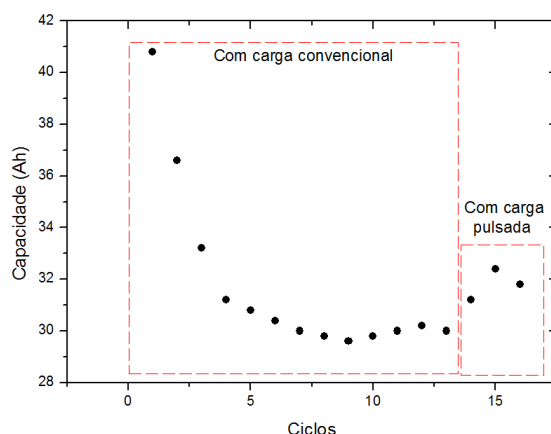


Figura 4 - Capacidade ao longo de ciclos de medida de reserva de capacidade (descarga com 25 A até 10,5 V). Ciclos com carga convencional e também com carga pulsada.

Os motivos deste comportamento foram explorados na microestrutura do material ativo e das grades das placas. Ao desmontar a bateria, uma análise inicial por microscopia revelou que as placas positivas sofreram com má distribuição de corrente. Isso, pois havia nitidamente regiões com  $\text{PbSO}_4$  remanescente e outras regiões aparentemente bem carregadas.

A Figura 5 mostra a haste de uma placa positiva da bateria após a falha no ensaio ilustrado na Figura 4, na região identificada inicialmente que sofrera com recarga insuficiente.

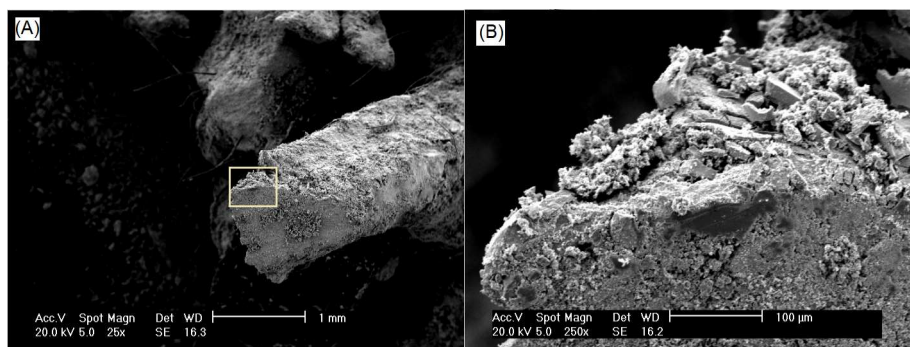


Figura 5 – (A) Interface PAM/haste de uma placa da bateria submetida aos ciclos de reserva de capacidade ilustrados na Figura 4. Região descarregada da placa. (B) Magnificação da região marcada na imagem (A).

É possível verificar na imagem (B) da Figura 5 a presença de grandes cristais com faces bem definidas, estrutura típicas de cristais de  $\text{PbSO}_4$ . A presença de sulfato na interface PAM/grade é o motivo para a má distribuição de corrente de carga na placa, pois estes grandes cristais de  $\text{PbSO}_4$  são isolantes elétricos que aumentam a resistividade nestas regiões da placa, diminuindo o fluxo de corrente local. Estes cristais devem ter se formado durante os ciclos de recarga convencional, e foram apenas parcialmente recuperados durante a carga pulsada com elevada corrente.

A Figura 6 mostra também uma região de interface PAM/haste, mas da região da placa cuja análise inicial sugeriu um bom nível de carga.

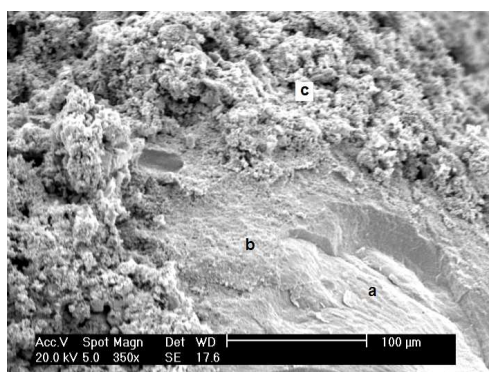


Figura 6 - Interface PAM/haste de uma placa da bateria submetida aos ciclos de reserva de capacidade ilustrados na Figura 4. Região aparentemente bem carregada.

Na imagem da Figura 6 é possível identificar três regiões distintas, baseando-se nas suas morfologias. (a) o material ativo, (b) uma camada intermediária densa e (c) a haste de chumbo. A região intermediária (b), que parece cobrir de forma contínua grandes regiões da grade, parece ser uma camada densa de  $PbO$ , resultado da corrosão da grade, causada pela concentração no fluxo de corrente elétrica. Análises de teor de átomos de oxigênio realizadas por emissão de raios X (EDS) diretamente na região mapeada corroboram esta suposição. Estas análises, no entanto, não foram realizadas de maneira precisa por uma questão de calibração do equipamento, e foram utilizadas apenas com caráter secundário.

No caso das placas negativas não houve macroregiões distintas, e a imagem de MEV da superfície de uma destas placas é mostrada na Figura 7.

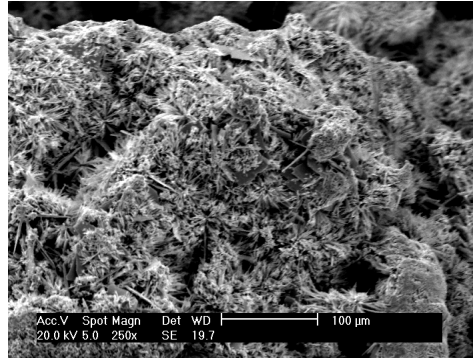


Figura 7 - Imagem de MEV típica da superfície de uma placa negativa retirada da bateria submetida ao ensaio de reserva de capacidade.

É possível verificar uma grande quantidade de cristais filiformes, típicos de alguns tipos de  $PbSO_4$ , o que indica a sulfatação irreversível nesta placa.

As análises na microestrutura das placas da bateria submetida ao ensaio de reserva de capacidade indicaram que, apesar do uso da carga pulsada ter implicado em uma recuperação da capacidade, os mecanismos de degradação continuaram agindo em ambas as placas, o que levou à falha da bateria. A carga pulsada, neste caso. O valor elevado de corrente utilizado na carga pulsada pode, inclusive ter efeitos deletérios ao médio prazo, na placa.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

No presente trabalho foi demonstrado que a recarga de baterias feita através de pulsos de corrente de valor relativamente elevado podem ter efeitos benéficos na sua vida útil em determinados casos, o que pode implicar em um diminuição nos gastos com manutenção e reposição, caso o gerenciamento destas baterias seja feito adequadamente. Isso foi verificado para um regime de uso típico de baterias utilizadas em associação com fontes alternativas de geração de energia.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) RUETSCHI, P. Aging mechanisms and service life of lead–acid batteries. *Journal of Power Sources*, v. 127, n. 1-2, p. 33-44, 2004.
- (2) Misra, A. A. Lead acid systems - Charging. *Encyclopedia of Power Sources*, Ed. Garche J. Elsevier, Amsterdam. vol 4, p. 764. 2009
- (3) Perrin M., Lemaire-Potteau E. Remote area power supply: Batteries and fuel cells. *Encyclopedia of Power Sources*, Ed. Garche J. Elsevier, Amsterdam. vol 1, p. 65. 2009.
- (4) R. H. Newnham, em: D. A. J. Rand, P. T. Moseley, J. Garche, C. D. Parker (Editores), “Remote-Area Power Supply (RAPS) Systems and the Valve-Regulated Lead-Acid Battery”. Amsterdam: Elsevier. 2004 p. 479
- (5) Y Yamaguchi., et. al. “Study of charge acceptance for Lead Acid Battery Trough In Situ EC – AFM Observation – Influence of Open Circuit Standing Time on the Negative Electrode”. *Journal of Power Source* vol. 102, p. 155, 2001

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Juliano de Andrade.

Data de nascimento: 03/05/1979

Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), em 2003. Mestrado e Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais pela mesma instituição em 2005 e 2010, respectivamente. Atua na área de eletroquímica e baterias desde 1998, com experiência em mecanismos de reações de baterias chumbo ácido, análise superficiais, dimensionamento de bancos de baterias, gerenciamento de baterias para distintas aplicações. Atualmente é pesquisador pleno III dos Institutos lactec e professor do Mestrado Profissional do mesmo, onde leciona as disciplinas de Tecnologia de Materiais e de Sistemas de Armazenamento de Energia. Também atua na área de corrosão de materiais metálicos. Possui 3 orientações e 3 co-orientações de mestrado, todas na área de acumuladores de energia. Participou de diversos projetos de pesquisa, dentre os quais, “Desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento de baterias” e “Avaliação de distintos tipos de baterias de íon Li conectadas a rede elétrica de distribuição”. Dentro do âmbito do programa de P&D ANEEL, já coordenou dois projetos de pesquisa na área de eletroquímica, dentre os quais, “Desenvolvimento de um carregador pulsado portátil para baterias de sistemas fotovoltaicos”. Possui 6 artigos publicados em periódicos, 15 apresentações em eventos um pedido de patente.”



Patricio Rodolfo Impinnisi

Data de nascimento: 05/03/1962

Graduado em Física - Moscow State University Lomonossov (1989), Mestrado em Física Matemática - Moscow State University Lomonossov (1991) e Doutorado em Química pela Universidade Federal de São Carlos (1995). Atualmente é pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná - UFPR, e do Programa de Pós Graduação em Tecnologia dos Institutos lactec. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Eletroquímica, atuando principalmente nas seguintes áreas: Baterias de chumbo-ácido (produção e funcionamento), impedância eletroquímica, células a combustível (operação), sistemas de acumulação de energia, fontes alternativas de energia, entre outros