

MODELO MATEMÁTICO PARA BATERIAS AUTOMOTIVAS OPERANDO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS

Luis H. Vera ^{1,2}, e-mail: lh_vera@yahoo.com.ar.

¹ Grupo en Energias Renovables, Universidad Nacional del Nordeste.

Arno Krenzinger ², e-mail: arno.krenzinger@urfgs.br

² Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Resumo: *Muitos países latino-americanos, com uma quantidade significativa da população vivendo em zonas rurais, sem acesso a energia elétrica e a serviços sociais básicos, encontram na tecnologia fotovoltaica um caminho para seu desenvolvimento humano e produtivo. Os sistemas fotovoltaicos isolados da rede de distribuição de energia elétrica (SFA) utilizam, em geral, baterias automotivas como meio de armazenamento de energia. Estas baterias realizam um acoplamento elétrico com o gerador através de sua tensão, a qual permite calcular o estado de carga da bateria e determina o ponto de trabalho do painel fotovoltaico. Definir o comportamento do sistema de acumulação de energia é de grande importância devido a seu efeito na confiabilidade dos SFA. Com o objetivo de estudar e prever o comportamento de baterias em SFA, o Laboratório de Energia Solar da UFRGS desenvolveu um sistema de ensaios de baterias, com o qual podem ser reproduzidas condições reais de operação sob um entorno controlado. Neste trabalho é apresentada uma análise experimental que permite, em conjunto com estudos teóricos, obter algoritmos para determinar o valor da tensão de baterias em diferentes condições de operação. Os algoritmos, implementados em modelos matemáticos, foram incorporados em um programa computacional que simula o comportamento de um SFA. Resultados obtidos através da aplicação de algoritmos específicos comparados com valores adquiridos diretamente na bancada de ensaios mostraram desvios máximos da ordem de 6%, os quais são adequados para uma simulação realizada em uma base horária de tempo.*

Palavras Chave: *Sistemas Fotovoltaicos Autônomos, Baterias Automotivas, Modelo Matemático.*

1. INTRODUÇÃO

Uma das aplicações dos geradores fotovoltaicos é operar em instalações isoladas da rede elétrica, configurando os denominados Sistemas Fotovoltaicos Autônomos (SFA). Estes sistemas normalmente são compostos por três partes básicas: o gerador fotovoltaico, os elementos de condicionamento de potência e proteção e as baterias que armazenam a eletricidade gerada.

O sistema de geração está constituído por módulos fotovoltaicos, responsáveis pela conversão de energia solar em energia elétrica, pelo inversor, responsável pelo condicionamento de potência, pelo controlador de carga, que controla o fluxo de energia entre o dispositivo gerador e os pontos de consumo e as baterias, encarregadas de armazenar a energia gerada pelos módulos.

No momento de avaliar a instalação de um SFA, os principais requisitos que estes sistemas devem satisfazer são: ser tecnicamente e economicamente viáveis, e assegurar o fornecimento contínuo de energia. Para atingir estas metas é necessária uma apropriada metodologia de dimensionamento destes sistemas. No momento de realizar o dimensionamento do sistema, o tamanho do painel fotovoltaico depende da carga, que por sua vez está ligada com a capacidade e desempenho da unidade de acumulação. Uma boa determinação da interação entre eles é essencial.

O parâmetro encarregado de vincular o gerador, acumulador e cargas é a tensão da bateria, que tem a missão de polarizar o painel e definir o ponto de trabalho do sistema, ou seja, o dispositivo que é o elo entre as cargas e o sistema de geração é a bateria, que, funcionando dentro de instalações em laboratórios ou em sistemas implantados por diferentes programas de eletrificação rural, têm mostrado uma perda prematura de capacidade ou falha total antes do previsto. Diversos autores concordam que os principais agentes que levam à falta de energia nestas instalações são um gerenciamento inadequado entre carga/descarga, superestimativa da vida útil e à ausência de manutenção (Copetti e Macagnan, 2007). Nos SFA, o processo de carga das baterias é comumente interrompido devido à demanda de energia de cargas externas ou variações de irradiância. Durante o processo de descarga, ao logo de horas com sol, energia e corrente são fornecidas pelo sistema de potência. À medida que a demanda aumenta parte da corrente começa a ser extraída da bateria. No momento em que o processo ocorre durante a noite, a energia é fornecida exclusivamente pela bateria.

As flutuações de tensão com a corrente de operação dificultam conhecer o estado da bateria, e isto faz com que não seja precisa a informação sobre o estado de carga (EC). Para conhecer o EC real, é necessário conhecer o tempo de carga e descarga, o valor da corrente, a taxa de carga e descarga, a eficiência na carga e o estado inicial de carga. Em

uma simulação numérica, o algoritmo que caracteriza a tensão das baterias requer uma boa precisão para que no momento do regulador agir, o corte do fluxo de energia ocorra no valor em que um regulador real atuaria.

Neste trabalho são confrontados os resultados obtidos através de 4 modelos matemáticos frente a valores medidos de tensão, sob condições controladas de carga/descarga e temperatura. Estes modelos, em geral verificados para regime permanente de operação (carga/descarga a correntes constantes), prevêm um bom seguimento do comportamento sem requerer tarefas computacionais complicadas e de lento processamento. Estes modelos foram utilizados para verificar seu comportamento em condições dinâmicas e, no caso de não apresentarem um bom resultado, identificar as modificações necessárias para corrigi-los.

2 MODELOS MATEMÁTICOS PARA BATERIAS

Um modelo matemático deve representar o comportamento das baterias durante a operação nas condições específicas de cada aplicação. Portanto, os modelos matemáticos, bem ajustados, convertem-se em uma ferramenta muito útil para o estudo e análise do funcionamento dos SFA. Quanto mais o modelo se aproxima dos resultados experimentais, mais precisa é a determinação do comportamento real e o sistema trabalha em torno de valores esperados. Assim sendo, no momento de analisar o sistema, será obtida uma alta confiança no dimensionamento realizado utilizando estes modelos.

Existem muitos modelos para baterias de chumbo, em geral eles descrevem o estado de carga da bateria (ou banco de baterias) para uma condição de repouso em função da sua tensão, mas o seguimento da tensão para valores dinâmicos em geral apresenta consideráveis desvios que aumentam ao longo do tempo. Alguns modelos mostram um desvio constante nos valores de tensão em relação às condições reais (Armenta-Deu, 2003).

Os modelos para estimar o comportamento das baterias podem ser classificados em modelos de comportamento interno e modelos de comportamento externo ou de simulação. Modelos internos têm sido desenvolvidos para simular o comportamento de baterias considerando a interação entre o painel, regulador de carga e as baterias, fornecendo uma relação entre a tensão, a corrente e o estado de carga. Os modelos de bateria apresentam dificuldade de generalização, pois dependendo do tipo e tamanho da bateria, os parâmetros do modelo variam. A maioria dos modelos que utilizam parâmetros como o *EC*, e não as características eletroquímicas dos materiais utilizados nas células, só representam o comportamento das baterias sob carga em 75% de seu processo, já que não consideram o comportamento na situação de sobrecarga ou sobre descarga, e a evolução destes processos.

Um dos primeiros modelos que contemplou esta observação foi desenvolvido por Shepherd (1965). Este modelo podia ser aplicado no processo de descarga das baterias. Posteriormente este modelo foi aperfeiçoando por Copetti e Chenlo (1993). Este último, por sua vez foi otimizado para baterias de uso automotivo por Moura (1996). Estes dois últimos modelos são válidos tanto para carga como descarga, inclusive na região de sobrecarga, e possuem um termo que corrige o efeito da temperatura e variações nas taxas de carga e descarga. Outro tipo de modelo, baseado em elementos não lineares em um circuito, foi descrito por Salameh et al (1992). Modelos deste tipo são basicamente empíricos e os parâmetros são encontrados por ajuste de equações às curvas medidas. Os mesmos são adequados para serem introduzidos em simulações computacionais de SFA por sua simplicidade.

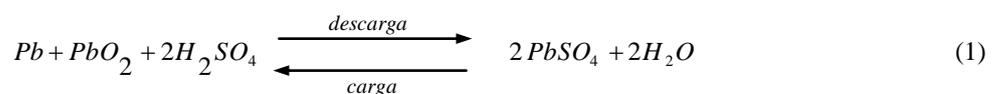
Os modelos internos tentam prever os processos físicos e químicos que ocorrem dentro das baterias como as reações químicas, o transporte do eletrólito e condução de eletricidade dentro de cada elemento. Estes modelos podem representar a evolução dos processos em uma ou duas dimensões (Gu et al, 2002), ajustando-se aos processos dinâmicos de carga e descarga.

3 COMPORTAMENTO DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Os acumuladores são células eletroquímicas dentro de um recipiente onde se encontram dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica. Quando estas células são submetidas a cargas ou descargas, ocorrem reações químicas reversíveis em seu interior.

Um dos eletrodos, formado de dióxido de chumbo, é o pólo positivo (ânodo) e o outro, de chumbo poroso puro, é o pólo negativo (cátodo). Ambos estão imersos em uma solução de ácido sulfúrico (eletrólito) dissolvido em água.

No processo de descarga, as reações químicas entre o material dos eletrodos e do eletrólito produzem a circulação de uma corrente elétrica, no sentido inverso do processo de carga, onde a reação se dá consumindo energia. As reações químicas que ocorrem no interior deste tipo de acumuladores são apresentadas na Eq. (1).



Durante o processo de carga, uma corrente elétrica entra na bateria pelo ânodo, formando óxido de chumbo (PbO₂) no ânodo e chumbo puro (Pb) no cátodo. Neste processo ácido sulfúrico (H₂SO₄) é liberado no eletrólito, aumentando sua densidade. Já na descarga, a corrente elétrica sai pelo ânodo, formando sulfato de chumbo (PbSO₄) nos dois

eletrodos absorvendo o ácido sulfúrico do eletrólito, com uma correspondente diminuição de sua densidade. Assim é possível determinar o estado de carga (*EC*) de uma bateria de forma bastante simples, medindo densidade do eletrólito (Lasnier e Ang, 1990). A densidade do eletrólito permite uma precisa medição do *EC* em baterias abertas, mas este método não é possível aplicar-se para baterias seladas. No entanto, a tensão de circuito aberto nos terminais de baterias em repouso varia quase linearmente com o *EC* (Linden, 1995), fato utilizado para estimar o *EC* (Fig. 1).

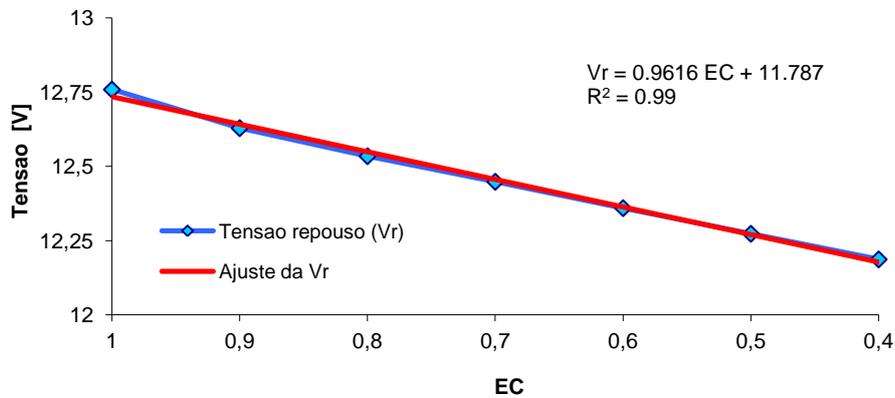


Figura 1. Variação da tensão de repouso medida em uma bateria selada de 150 Ah para diferentes *EC*.

Para as baterias com células de Pb-ácido de 2 V, a densidade do eletrólito (δ) varia entre 1,20 e 1,28 g/cm³, os quais correspondem a valores de tensão, em estado de repouso, entre 2,04 e 2,12 V por célula (Ross et alii, 2000).

Baterias de chumbo-ácido trabalhando em SFA têm a característica de ter uma faixa limitada de profundidade de descarga (*PD*). Atingindo este valor, o controlador de carga deve desligar as baterias das cargas consumidoras. Se este valor é excedido várias vezes, a bateria sofre uma sobredescarga, que leva a danos permanentes na mesma (sulfatação). No caso contrário, se a bateria é sobrecarregada, a corrente injetada na bateria passa a dissociar a molécula de água do eletrólito em hidrogênio, no pólo negativo, e oxigênio, no pólo positivo, implicando em um consumo de água que aumenta a concentração do ácido ocasionando finalmente a corrosão do eletrodo. Para evitar que alguma destas duas situações ocorra, os SFA utilizam um controlador de carga, que protege a bateria de sobrecarga ou sobredescarga. É assim que o fluxo de corrente é interrompido desde o arranjo até a bateria ou da bateria aos elementos de consumo no processo de sobrecarga ou sobredescarga, respectivamente. Existem estudos que sugerem diferentes tipos de controle de carga e descarga de baterias para aperfeiçoar seu funcionamento (Benchetrite, 2005; Oliveira, 2005)

Em sobrecarga prolongada as baterias "livres de manutenção" também perdem água e a sua reposição não é possível.

3.1 Variação da tensão com a corrente de operação

Termodinamicamente o estado de estabilidade da bateria é no processo de descarga (Linden, 1995), onde a tensão é menor que a tensão de circuito aberto para iguais valores de *EC*. Na carga a situação é diferente devido a que uma determinada quantidade de energia é utilizada para manter as reações eletroquímicas. Esta situação faz com que a tensão utilizada na carga das baterias seja maior que a tensão que se mede em circuito aberto.

A diferença entre a tensão de circuito aberto e a tensão de carga ou descarga ocorre devido à resistência ôhmica e à resistência de polarização da bateria. As resistências ôhmicas podem ser calculadas através de uma descarga rápida (menor que um minuto), medindo corrente injetada e tensão antes e depois da descarga.

Já o efeito da resistência de polarização pode demorar algumas horas para ser porque é necessário o tempo para o equilíbrio do sistema ser atingido através da difusão de massa dentro de cada vaso da bateria

As perdas de energia devidas à resistência de polarização ocorrem quando uma corrente passa através dos eletrodos, ocasionando as correspondentes reações químicas. Estas perdas são devidas à (1) ativação, que conduz a reação eletroquímica na superfície do eletrodo, e (2) concentração, resultante da transferência de massa.

Os efeitos de polarização consomem uma parte da energia, que é perdida como calor, e por esta razão nem toda a energia teórica disponível é totalmente convertida em energia elétrica útil. Os efeitos de polarização por ativação e concentração podem ser calculados teoricamente através de parâmetros eletroquímicos e de transferência de massa. No entanto, na prática existe uma grande dificuldade para determinar estes parâmetros devido à complexa estrutura física dos eletrodos, por serem corpos compostos de material ativo, aglutinante, e material condutor. Eles usualmente têm uma estrutura porosa de pouca espessura que requerem modelos matemáticos complexos para estimar os componentes de polarização.

O outro fator importante que afeta o desempenho, é a resistência interna, parâmetro que produz uma queda de tensão em condições de operação e consome parte da energia que é transformada em calor. Esta queda de tensão devida à resistência interna é usualmente denominada como "resistência de polarização ôhmica" (*Ri*), cujo valor é proporcional à corrente extraída do dispositivo. A resistência de polarização ôhmica total é a soma da resistência iônica do eletrólito

(considerando o separador e os eletrodos porosos), das resistências das massas ativas e as resistências de contato entre as massas ativas e o eletrólito. Estas resistências são de natureza ôhmica e seguem uma relação linear entre corrente e queda de tensão. A resistência aumenta quase linearmente com a diminuição da gravidade específica do eletrólito, por esta razão quando o estado de carga é baixo a resistência interna é maior que para estados de carga elevados.

A diferença entre o valor da resistência interna para um estado de carga de 100% e para um estado de carga de 0% é de aproximadamente 40% para uma mesma temperatura. Com variação de temperatura de 40°C a resistência pode variar até 50%.

3.2 Características na carga e descarga

Baterias que trabalham em SFA estão submetidas a uma variedade de correntes de carga e descarga, assim como também a uma ampla faixa de condições de operação. Estas variações devem-se à mudança de demanda efetuada pelas cargas elétricas, e porque a energia gerada pelos dispositivos fotovoltaicos está diretamente ligada com as condições climáticas do lugar de implantação do sistema.

Quando uma bateria é descarregada, sua tensão é menor que a tensão teórica. Esta diferença é causada por perdas ôhmicas de polarização. Quando as baterias são descarregadas, a tensão diminui devido à resistência interna e a resistência de polarização. Se a corrente de descarga é constante, a tensão decresce suavemente até a tensão de corte e a gravidade específica diminui na mesma proporção que os Ah descarregados. Para evoluções convencionais de carga a corrente constante, pode-se observar que baterias de chumbo ácido operam dentro de uma pequena faixa de tensão, aproximadamente 0,4 V por elemento, e nas descargas a faixa de tensão é de aproximadamente 0,2 V por elemento.

Determinações experimentais das características entre tensão e corrente de vários sistemas eletroquímicos, na região da sobrecarga, mostram que existe uma relação exponencial entre a corrente aplicada e a tensão. Tafel (apud Linden, 1995) estabeleceu uma equação geral que descreve esta relação (Eq. 2). Nas outras regiões apresentam uma relação quase linear.

$$\eta = a \pm b \log (I) \quad (2)$$

4 METODOLOGIA DE ENSAIO

Escolheram-se 4 modelos matemáticos de baterias para testar seu comportamento sob condições de carga e descarga com corrente constante (seguindo a norma NBR 6581). Os modelos matemáticos escolhidos foram o Modelo de Copetti (1993), modelo de Moura (1996), modelos de Lasnier (1990) com as modificações realizadas por Vera (2004) para considerar o processo de sobrecarga, e o modelo utilizado no programa computacional PVSyst (2007). A escolha dos modelos foi realizada porque são modelos gerais que não precisam de grande quantidade de dados de entrada para calcular a tensão da bateria, que consideram a região de sobrecarga, que consideram o efeito de temperatura e são citados em outros estudos (Silvestre, 2001; Diaz 2001). A metodologia utilizada para verificar o comportamento dos modelos matemáticos de baterias do tipo automotivo é a seguinte:

1. Utilizando os 4 modelos, com os parâmetros experimentais definidos por seus correspondentes autores, comparar os valores medidos para um processo de carga e descarga, com corrente e temperatura constante, para baterias automotivas de diferentes capacidades.
2. Nos casos em que os resultados dos modelos não se ajustem, realizar uma nova definição dos parâmetros experimentais ou modificações para ajustar as curvas de carga descarga medidas e calculadas.
3. Escolher os dois modelos com melhor ajuste e comparar os valores calculados com os valores medidos através de ensaios intermitentes.
4. Verificar o ajuste das equações entre valores calculados e medidos, e, caso seja necessário, realizar um novo ajuste.
5. Com os algoritmos modificados, comparar novamente os valores de tensão medidos de carga e descarga em regime permanente com os valores calculados. Em caso de um bom comportamento passar ao item seguinte.
6. Comparar os valores de tensão da bateria medidos ao logo de vários dias de ensaios com os valores calculados.
7. Verificar o comportamento através de uma comparação entre valores medidos e calculados
8. Caso seja necessário, modificar parâmetros dos modelos e novamente realizar o procedimento descrito nos itens 4 e 5.

Para realizar a metodologia antes descrita foi utilizado o sistema e procedimentos especificados por Vera e Krenzinger (2007).

5 VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO ENTRE VALORES CALCULADOS E MEDIDOS

Os resultados obtidos e uma análise dos mesmos são apresentados a seguir.

5.1 Carga e descarga à corrente constante

O objetivo desta etapa é verificar quais modelos são mais apropriados para descrever o comportamento de baterias automotivas com diferentes capacidades operando em condições de carga e descarga constante. Uma das baterias tem 36 Ah e a outra tem 150 Ah de capacidade nominal. Ambas são ensaiadas com correntes correspondentes a uma descarga em 20 h. As curvas apresentadas na Fig. 2 (a) e (b) foram obtidas experimentalmente utilizando os modelos com os parâmetros sugeridos por cada autor. Todos os ensaios foram realizados com uma taxa de corrente correspondente a um regime C_{20} e uma temperatura de 25 °C.

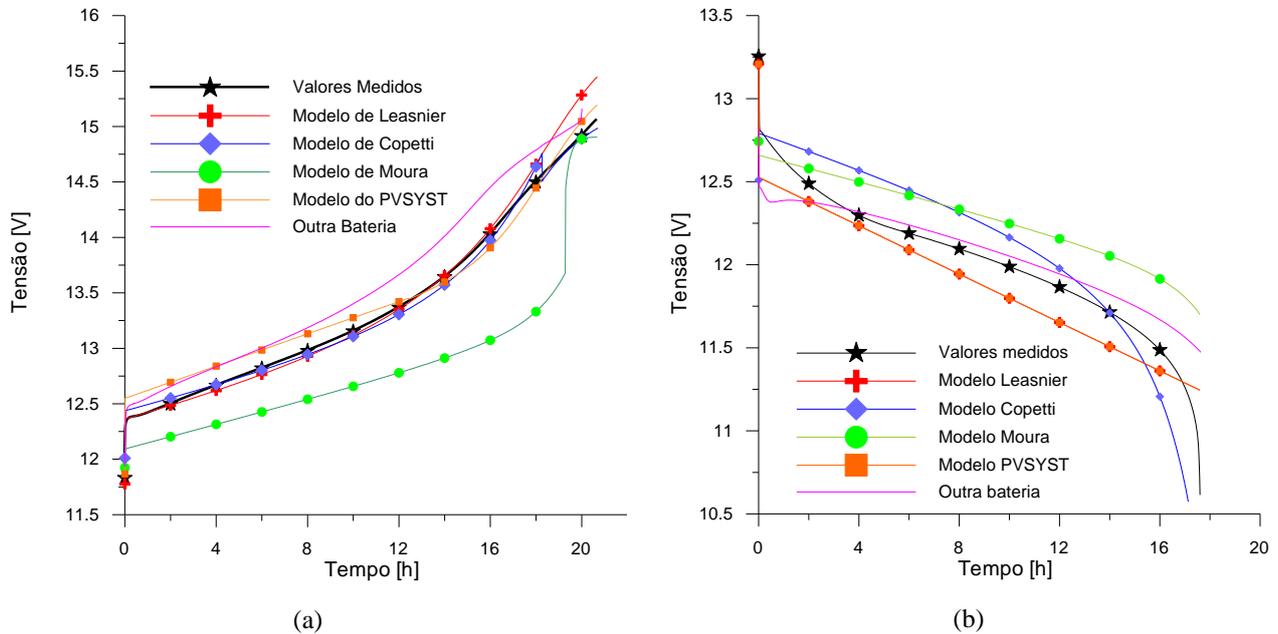


Figura 2. (a) Curvas de carga para os 4 modelos matemáticos escolhidos e valores medidos em uma bateria de 150 Ah e (b) Curvas de descarga para os 4 modelos matemáticos escolhidos e valores medidos em uma bateria de 150 Ah.

Foram ensaiadas quatro baterias de 150 Ah de capacidade nominal, com o mesmo tempo de uso e do mesmo fabricante. Os valores medidos nos ensaios de carga/descarga permitiram ver que embora as baterias tivessem iguais características e iguais condições de uso, suas curvas de carga e descarga não tinham uma total correspondência e, uma delas apresentava um comportamento um pouco diferente das outras. Esta curva é apresentada com o intuito de mostrar que o comportamento entre baterias iguais, cujo histórico de utilização seja o mesmo, têm curvas de carga/descarga diferentes. Segundo Vela e Chenlo (2004) uma mesma bateria ensaiada em iguais condições também tem um comportamento não repetitivo. Para a comparação apresentada foi utilizada uma curva que teve um comportamento médio em comparação com as outras baterias medidas.

Para estes ensaios o modelo que apresentou os maiores desvios foi o modelo de Moura e o que melhor se ajustou foi o modelo de Copetti. É importante destacar que o modelo de Moura foi realizado utilizando o modelo de Copetti como base, mas foi ajustando para baterias automotivas abertas de 36 Ah.

O mesmo procedimento foi utilizado para comparar valores de tensão na carga e descarga para uma bateria de 36 Ah, sendo o modelo de Moura o que apresentou os menores desvios.

Analisando os 4 modelos apresentados e comparando com os valores medidos conclui-se que devem ser realizadas modificações em cada um dos modelos para um bom ajuste para baterias de diferentes capacidades.

Utilizando os modelos ajustados para baterias de diferentes capacidades foram obtidas as curvas apresentadas na Fig. 3. Realizando ajustes nos parâmetros do modelo de Moura, foi possível chegar a valores quase idênticos que os parâmetros obtidos com o modelo de Copetti. Devido a este comportamento, na Fig. 3 é apresentada a curva obtida pelo modelo de Copetti. O mesmo procedimento foi realizado para verificar o ajuste dos modelos para baterias de 36 Ah.

Após realizar os ajustes, foram calculados o erro médio (EM) e o erro médio quadrático (EQ) entre os valores medidos e calculados (Tab. 1).

O modelo modificado que apresentou o melhor comportamento para carga e descarga (para as baterias de 150 Ah e 36 Ah) foi o modelo de Lasnier, seguido pelo modelo utilizado no software PVSyst e por último o modelo de Copetti. As diferenças apresentadas entre um modelo e outro são pequenas, de forma que qualquer um dos modelos poderia ser utilizado.

Devido ao fato de que o modelo do PVSyst necessita maior número de dados de entrada que os outros modelos, e que muitas vezes estes dados são de difícil obtenção, este modelo não passou para a etapa seguinte de verificação do seu comportamento. Desta forma, os modelos de Copetti e de Lasnier modificados são utilizados para, em um ensaio de carga e descarga intermitente, verificar seu comportamento em relação aos valores medidos.

A relação entre o valor da tensão de repouso das baterias com seu correspondente estado de carga fornece uma relação quando se trabalha com baterias seladas, onde não é possível medir a massa específica do eletrólito.

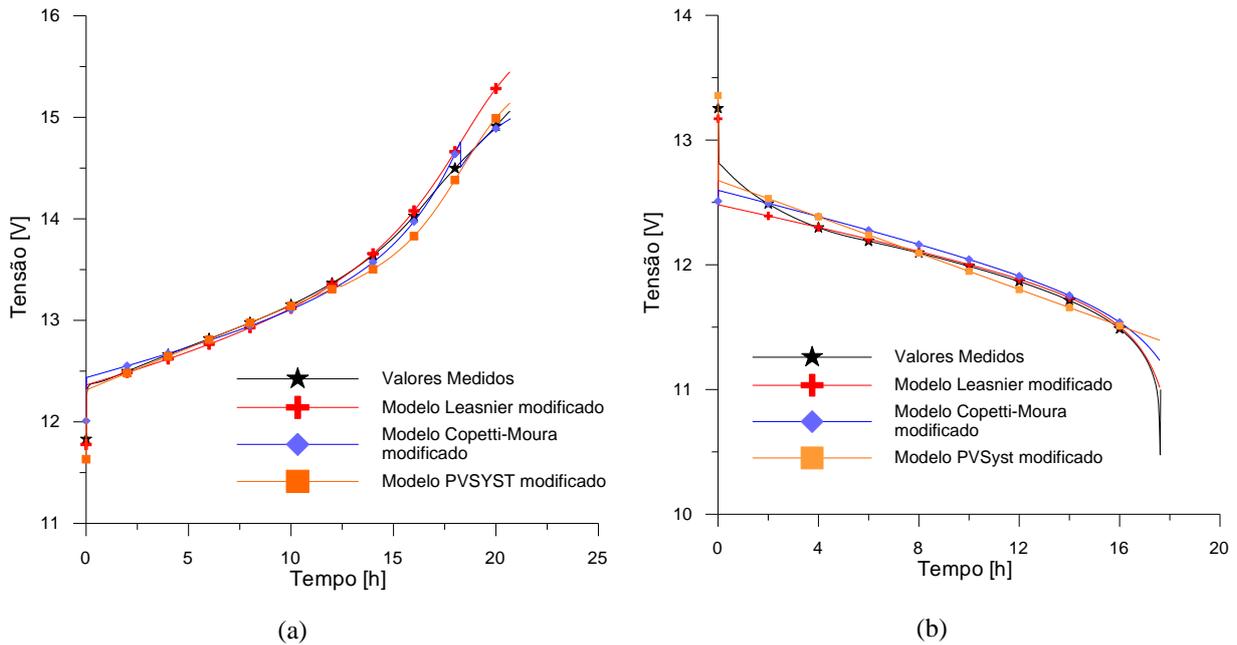


Figura 3. (a) Curva de carga medida para uma bateria de 150 Ah e curvas obtidas com modelos modificados e (b) curvas de descarga medida para uma bateria de 150 Ah e obtida com os modelos modificados.

Tabela 1. Valores médios e valores médios quadráticos calculados para baterias do tipo automotivo de 150 Ah e 36 Ah para processos de carga e descarga

Capacidade Ah	Erros %	Lasnier		Copetti		PVSyst	
		Carga	Descarga	Carga	Descarga	Carga	Descarga
150	EM	0,21	-0,08	-0,09	0,45	-0,36	0,14
	EQ	0,83	0,71	0,41	1,24	0,64	1,20
36	EM	0,11	0,21	3,06	0,52	-0,31	1,02
	EQ	0,65	0,83	2,85	1,16	0,75	1,74

Os ensaios de carga e descarga intermitente em diferentes intervalos de tempo foram realizados com o objetivo de obter a tensão que a bateria atinge em repouso para distintos *EC*, assim como o comportamento dinâmico. Analisando o comportamento da V_r , observou-se que as tensões de repouso atingidas após uma hora e após duas horas são levemente diferentes na carga e na descarga. Desta maneira, para determinar qual é o estado de carga real associado a um valor de tensão, deve-se analisar o comportamento da tensão considerando o tempo de desconexão.

Para realizar a análise temporal da V_r na carga e descarga, foi estudado o comportamento da tensão, depois de retirada a corrente de descarga em diferentes *EC*, e um estudo similar foi realizado no processo de carga. Na Fig. 4 são apresentadas as curvas de V_r para carga e descarga em diferentes *EC*.

Uma análise preliminar permite observar que a recuperação da tensão na descarga, para todos os intervalos ensaiados, teve um comportamento similar, ou seja, esta recuperação responde a uma mesma equação para diferentes *EC*, apresentado um deslocamento vertical em função do *EC*. A função que responde a este comportamento é do tipo logarítmico e é apresentada na Eq. 3.

$$y = a + b \cdot \ln(t) \tag{3}$$

Para o processo de descarga, para ambos os ensaios, a variável “*a*” é uma função do *EC* e o parâmetro “*b*” é constante ao longo de todo o ensaio.

Para o processo de carga, a variável “*a*” é também uma função do *EC* e o parâmetro “*b*” é constante ao longo de todo o ensaio, mas “*a*” é diferente para carga e descarga, ou seja, a tensão tem tempos de estabilização diferentes entre carga e descarga. As curvas da V_r , depois de um processo de carga para diferentes *EC*, ao serem deslocadas verticalmente, superpõem-se, corroborando o fato de que a constante de atenuação continua sendo a mesma. Ajustando equações para as diferentes curvas de atenuação de tensão, concluiu-se que os valores de “*b*” são muito próximos e os

valores de “a” variam segundo o *EC*. Comprando os valores obtidos com as equações propostas e as medidas, obtiveram-se elevados coeficientes quadráticos de correlação (maiores que 0,99).

O comportamento observado após um processo de carga confirma que os primeiros instantes são os que definem a principal diminuição de tensão. Para o processo de carga e descarga, ocorre um comportamento similar, com a diferença que neste último o parâmetro “b” é quase 5 vezes maior e é negativo, implicando que a variação de tensão instantânea seja maior.

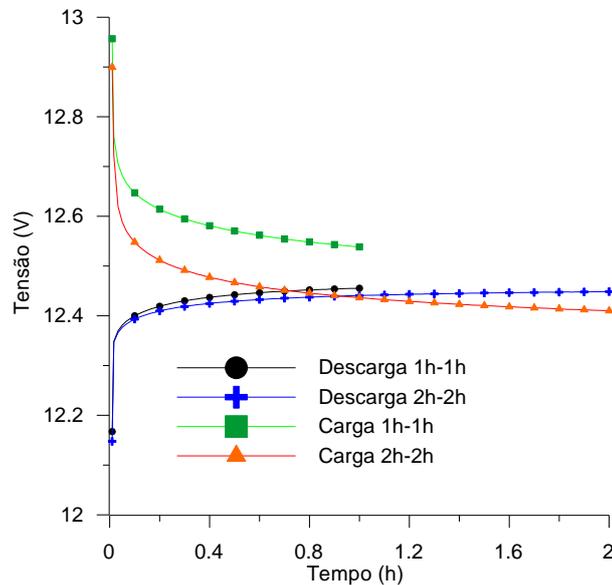


Figura 4. Curvas de evolução da tensão de repouso após um processo de carga e descarga.

O fenômeno de autodescarga afeta o valor da tensão após uma descarga, ou seja, depois de um determinado tempo o valor da V_r se estabilizará para na seqüência começar a decrescer. Segundo experiências realizadas para um regime C_{20} , o tempo que demora o efeito de autodescarga para produzir uma inversão de comportamento de V_r é de aproximadamente 15 h, apresentado uma variação de tensão, até o começo deste fenômeno, da ordem de 0,06V.

Nas Eq. 4 e 5 são apresentadas as correções sugeridas para o V_r para carga e descarga.

$$V_{RD} = V_{rd} + 0,0097 \cdot \ln(t) + \left(0,16 \frac{I_d}{I_{C20}} EC \right)^{0,5} \quad (4)$$

$$V_{RC} = V_{rc} - 0,055 \cdot \ln(t) + \left(0,96 \frac{I_c}{I_{C20}} EC \right)^{3,2} \quad (5)$$

onde V_r é calculado segundo as Eq.6 e 7

$$V_{rc} = 2,0 - 0,126 \cdot EC \quad (6)$$

$$V_{rd} = 2,138 - 0,13 \cdot (1 - EC) \quad (7)$$

Utilizando as Eq. 6 e 7 para determinar o valor V_{rc} e V_{rd} e considerando que o valor de V_r real é o atingido na descarga (por ser o estado de equilíbrio termodinâmico), determinou-se que para valores de *EC* baixos, a V_{rc} é atingida após 12 horas de suspender a descarga, e para elevados *EC*, a tensão demoraria mais de 100 h para atingir o valor de V_r .

Os modelos matemáticos utilizados para simular a V_r , em geral, consideram valores de tensão de repouso para carga e para descarga iguais ou, em alguns casos, realizam um deslocamento de tensão de carga em relação à descarga, mas mantendo a mesma inclinação.

Não considerar o efeito de diminuição logarítmico da tensão produziria uma defasagem entre valores de tensão medidos e simulados, e quanto menor for o intervalo de tempo de simulação, menor será essa defasagem.

5.2 Comportamento da bateria na carga e descarga em ensaios intermitentes

Com os modelos de Copetti e Lasnier modificados e considerando a componente logarítmica de estabilização da tensão (Eq. 4 e 5) foram calculados os valores de tensão.

O modelo Copetti foi o que ajustou melhor seu comportamento com os valores medidos e seus resultados, antes e depois da modificação logarítmica, são apresentadas na Fig. 5. Além da componente de atenuação logarítmica, novamente foi necessário variar levemente o valor de alguns dos parâmetros antes modificados.

Com as modificações realizadas chegou-se a um modelo matemático com capacidade de calcular a tensão de uma bateria automotiva de 150 Ah com um elevado coeficiente de correlação (0,997).

Na Fig. 6 pode-se observar a variação do estado de carga da bateria e o valor da tensão em processos de carga e descarga intermitente. Para valores de tensão de repouso diferentes, têm-se iguais valores de estado de carga.

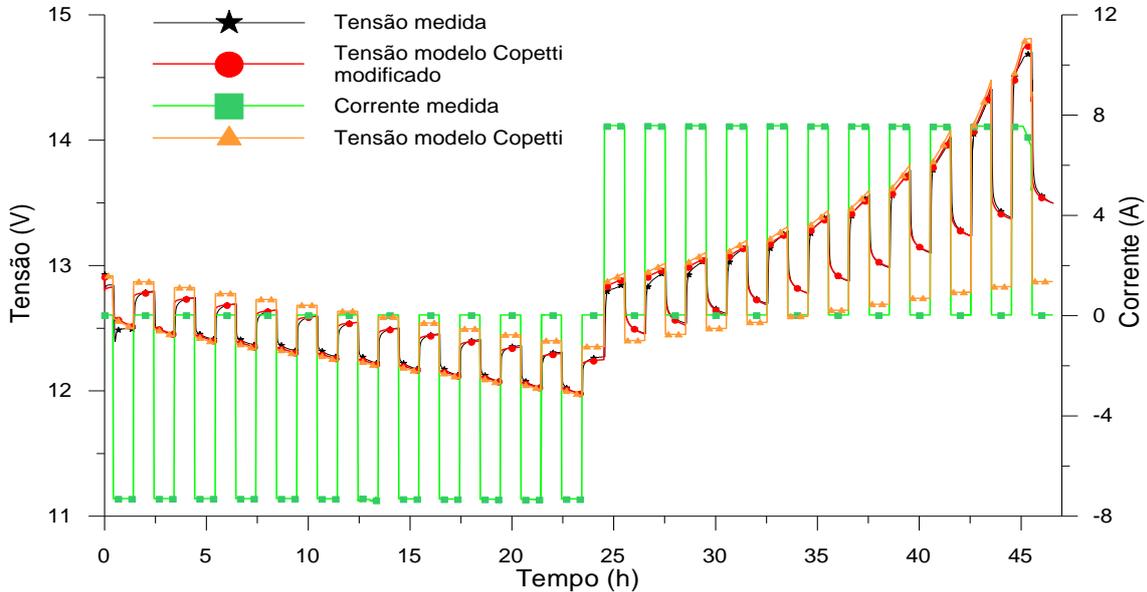


Figura 5. Valores de tensão medidos em um ensaio intermitente e valores de tensão calculados utilizando o modelo de Copetti e o modelo de Copetti modificado.

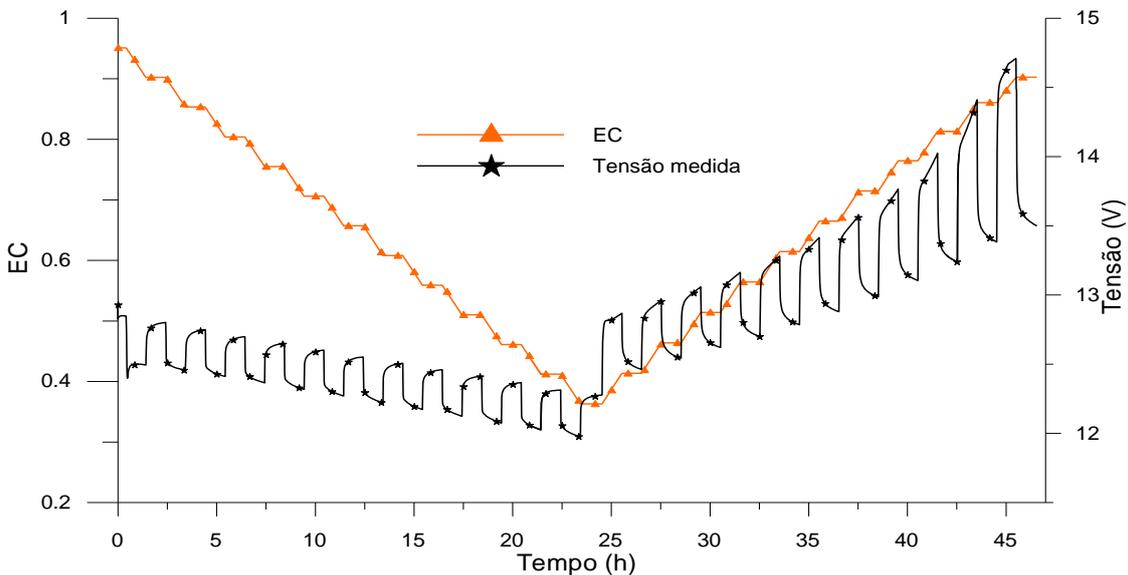


Figura 6. Variação do EC ao longo do ensaio de carga/descarga intermitente para intervalos horários.

Para verificar a consistência deste novo equacionamento nas condições de carga e descarga contínua, estas novas equações foram aplicadas para os primeiros ensaios e os resultados mostraram-se consistentes para o modelo de Copetti, mas para o modelo de Lasnier não foram obtidos resultados tão promissores. Na Fig. 5 pode-se observar que os valores de tensão medidos e simulados mostraram-se satisfatórios. No gráfico também se podem apreciar as diferenças nos valores de tensão de repouso no caso de não considerar a componente de amortecimento da tensão de repouso após uma carga ou de uma descarga. Este comportamento é devido a que a bateria, considerada nos modelos simplificados como uma fonte de tensão em série com uma R_i , também tem associada uma capacitância que ocasiona este efeito de amortecimento no valor da tensão. Esse amortecimento, também chamado de histerese (Vasebi, 2007), implica em que um mesmo EC apresente diferentes valores de tensão de repouso para um processo de carga e descarga.

5.3 Carga e descarga de uma bateria em condições de operação

O próximo passo é comprovar se o modelo, que é apresentado detalhadamente por Vera e Krenzinger (2008), tem um bom comportamento em situações dinâmicas em SFA sob condições de operação. Para atingir este objetivo foi utilizada a bancada desenvolvida no Laboratório de Energia Solar da UFRGS em conjunto com um programa que gerencia os valores de carga e descarga da bateria (Vera e Krenzinger, 2007).

As primeiras comparações realizadas em condições controladas de operação são em base horária, já que o objetivo deste estudo é desenvolver um algoritmo para realizar simulações nesta base temporal para ser utilizado dentro do software *PVSize* (Vera, 2004).

O perfil de consumo utilizado tem a intenção de representar a energia demandada em uma habitação rural na qual moram 5 pessoas. O perfil de consumo corresponde ao descrito em Tolmasquim (2004) para uma habitação rural. O fornecimento e extração de energia, de forma simultânea na bateria a diferentes taxas, e por diferentes intervalos de tempo, resultam em um gráfico de evolução de tensão como o mostrado na Fig. 7.

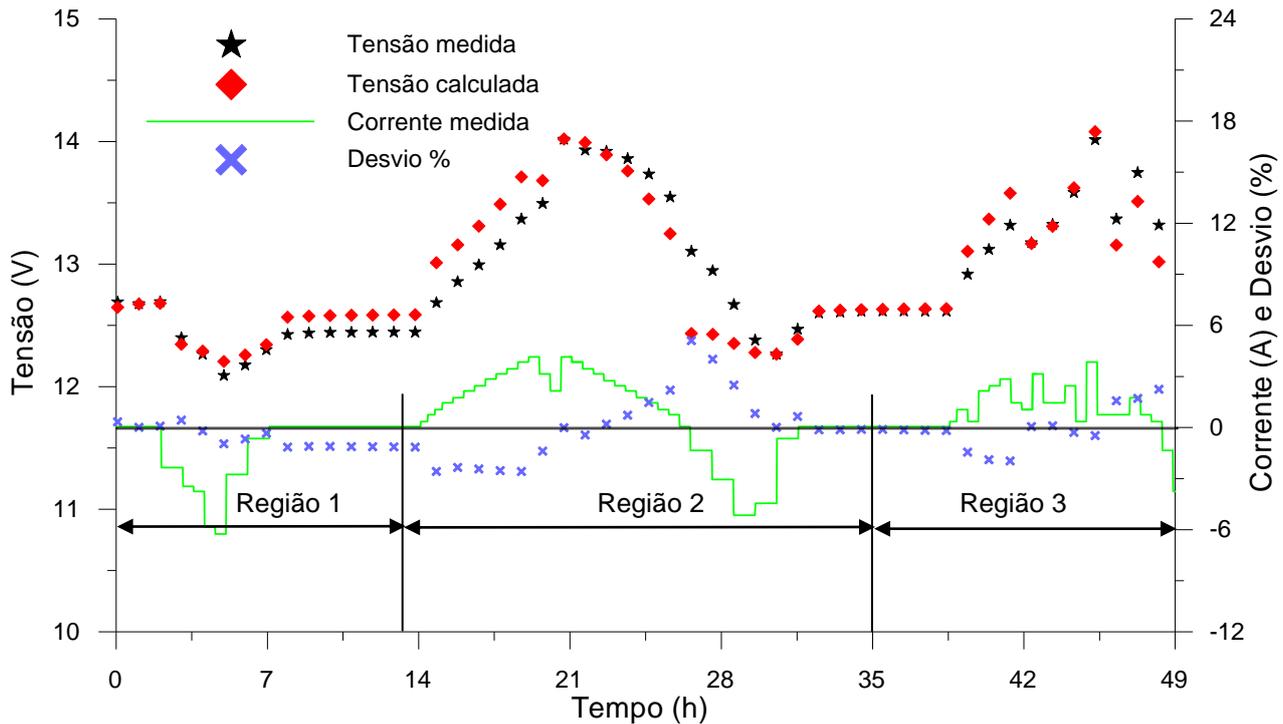


Figura 7. Valores de tensão e corrente medidos e valores de tensão calculados utilizando o modelo Copetti modificado.

O perfil de carga e descarga apresentado na Fig.7 pode ser dividido em 3 regiões diferentes. Na região 1 tem-se um perfil de consumo de energia noturno, na região 2 tem-se um perfil de demanda e geração ao longo de um dia de céu limpo, nesta região considera-se que existe um consumo de energia em taxas de correntes diferentes, fato que provoca uma diminuição no valor da tensão. Na região 3 apresenta-se um dia com muitas nuvens e por isso tem-se um perfil de demanda/geração com cristas e vales, finalizando com um processo de descarga (típico de consumo noturno).

O ensaio realizado é apresentado na Fig. 7 mostrando os valores horários de tensão medidos e calculados utilizando o modelo de Copetti modificado.

Pode-se observar que existem desvios entre os valores medidos e calculados. Estes desvios estão dentro de uma faixa considerada aceitável para uma simulação em intervalos horários de tempo. Neste modelo os valores máximos e mínimos de tensão devem ficar dentro de uma faixa de 6% de erro em relação aos valores reais. Os valores calculados, aceitando este erro, são suficientemente próximos para evitar que os cortes do controlador de carga, entre valores medidos e simulados, não coincidam e, por correspondência apresentem uma diferente probabilidade de perda de carga (Kaldellis, 2004) ou distinta quantidade de energia não utilizada no sistema.

Através de uma análise dos desvios entre valores medidos e calculados, determinou-se que estas diferenças ocorrem principalmente quando existem passos discretos de aumento e diminuição de corrente sobre a bateria, ou seja, o modelo tem uma boa resposta antes e depois de passar de um estado de carga para um estado de repouso e vice-versa. O modelo também tem um bom comportamento quando passa de um estado de descarga para um estado de repouso e vice-versa.

É importante destacar que o modelo de Copetti foi idealizado para condições quase estáticas, razão pela qual um melhor ajuste será realizado agregando elementos no modelo que considerem as condições dinâmicas que se apresentam na realidade. Armenta-Deu (2003) propõe uma metodologia de cálculo que mostra desvios entre valores medidos e

simulados menores que 1%, mas este modelo não é tão simples para sua implementação computacional, e por ser um modelo híbrido devem ser definidos parâmetros de difícil obtenção (espessura de placas, quantidade de matéria ativa, percentagens de ligas metálicas das placas, propriedades químicas dos materiais ativos e eletrólito, etc).

Este estudo mostrou que modelos que reproduzem os fenômenos de carga e descarga em condições estáticas não reproduzem com igual fidelidade os valores de tensão para condições de carga e descarga com correntes variáveis. Embora tenha sido realizada uma sucessão de ajustes para ter um modelo que permitisse um bom seguimento do comportamento de baterias automotivas (na carga e descarga), para condições permanentes e intermitentes, quando se aplica um perfil de carga e descarga discreto e variável, os valores de tensão obtidos não refletem a resposta esperada.

A proposta para ajustar a equação de Copetti modificada para condições dinâmicas foi modificar os parâmetros constantes dentro das equações apresentadas pela mencionada autora, para que eles adquirissem valores em função da taxa de carga ou descarga e a tensão, permitindo ao modelo responder às condições de operação de um SFA.

6. CONCLUSÕES

As baterias automotivas de chumbo-ácido apresentam características próprias de construção e comportamento diferentes segundo a aplicação à qual será submetida, distintas das baterias estacionárias e de tração; mas os fundamentos de sua operação são os mesmos.

Embora as baterias automotivas não sejam as ideais para as aplicações fotovoltaicas, surgem como alternativa viável e com tendência de melhorar seu aproveitamento conforme evoluam estudos para sua aplicação em SFA.

No aperfeiçoamento de modelos de comportamento, a dificuldade nas medidas de estado de carga e do cálculo da eficiência e estado de carga em condições dinâmicas, são os principais problemas enfrentados. O modelo de comportamento utilizado neste trabalho mostrou-se satisfatório nas condições estacionárias e ensaios intermitentes, mas com deficiências nas condições dinâmicas.

O cálculo do estado de carga deve considerar a eficiência de carga que depende da corrente, do estado de carga e de todos os componentes da resistência interna da bateria, sendo a resistência interna, a soma da resistência de condução e a resistência de polarização. No modelo utilizado neste trabalho, entretanto, a eficiência de carga tem relação direta com a resistência de condução (ôhmica), mas nada avalia sobre a resistência de polarização.

Pequenas modificações realizadas no modelo de Copetti permitem ter uma equação que represente de forma consistente o comportamento dinâmico em base horária de baterias selada de Pb-ácido. Um termo que considera o processo de difusão, o qual produz uma diminuição logarítmica da tensão depois de um processo de carga ou descarga, foi incrementado no modelo, para que o valor simulado da tensão mostre que o amortecimento da tensão de repouso tem diferentes comportamentos para carga e descarga. O comportamento deste amortecimento é independente do *EC* após instantes de suspensa a carga ou a descarga.

Para simular o comportamento dinâmico de baterias em SFA, é mais importante determinar o comportamento da tensão em função de taxas variáveis de corrente para diferentes *EC*, que procurar um perfeito ajuste da inclinação que a curva da tensão apresenta para uma descarga e carga (antes de apresentar sobrecarga) com corrente constante.

Conclui-se que se deveria buscar uma relação entre eficiência de carga e resistência de polarização para se obter êxito na descrição do estado de carga da bateria em situações dinâmicas. Esta relação, acredita-se, pode ser obtida modificando alguns parâmetros constantes dentro da equação do cálculo de tensão, e expressar os mesmos como uma função das condições imediatamente anteriores.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, entidade governamental brasileira promotora do desenvolvimento científico e tecnológico, além da FINEP e Eletrobrás.

REFERENCIAS

- Armenta-Deu C., 2003. Prediction of battery behavior in SAPV applications. *Renewable Energy*, 28(11), pp 1671-1684.
- Benchetrite, D., Le Gall, M., Bach, O., Perrin, M., Mattera F., 2005. Optimization of charge parameters for lead-acid batteries used in photovoltaic systems. *Journal of Power Sources*, 144, pp 346-351.
- Copetti, J. B. ; Maccagnan, M. H., 2007. Baterias em sistemas solares fotovoltaicos. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza - CE.
- Copetti, J., Lorenzo, E. E Chenlo, F. A., 1993. General Battery Model for PV System Simulation. *Progress in Photovoltaics*, 1(4): pp 283-292.
- Díaz P., Muñoz J., 2001. SHS battery modelling: Definition, tests and validation. 17th Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, pp. 619-622.
- Gu W. B., Wang G. Q. and Wang C. Y. 2002 Modeling the overcharge process of VRLA batteries. *Journal of Power Sources*, Volume 108, Issues 1-2, Pages 174-184.

- Kaldellis, J. K., Koronakis P., Kavadias, K., 2004. Energy balance analysis of a stand-alone photovoltaic system, including variable system reliability impact. *Renewable Energy*, 29(7), pp 1161-1180
- Lasnier, F. ; Gag Ang, T., 1990. *Photovoltaic Engineering Handbook*. Adam Hilger
- Linden, A, 1995. *Batteries Handbook*. Wiley and Sons. Philadelphia EUA.
- Moura, J.F.C. Caracterização de Baterias Automotivas para Uso Solar Fotovoltaico. Dissertação de Mestrado, PROMEC/UFRGS, Porto Alegre RS, 1996.
- Norma NBR 6581 (1989): Bateria Chumbo-ácido de partida – Verificação das características elétricas e mecânicas.
- Oliveira, L.G.M., 2005. Estratégia de Controle de Carga e Descarga em Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Brasil.
- PVSyst, programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos, University of Geneva. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com>> Acesso em: 08 Set. 2007.
- Ross, J. N., Markvart, T., He, W., 2000. Modelling battery charge regulation for a stand-alone photovoltaic system. *Solar Energy*, 69(3), pp 181-190.
- Salameh Z., Casacca A, Lynch W., 1992. A mathematical model for lead-acid batteries. *Transaction on Energy Conversion*, IEEE, Volume: 7, pp 93-98
- Shepherd C. M., 1965. Design of Primary and Secondary Cells. *J. Electrochem. Soc.* 112, 657.
- Silvestre, S., Guasch, D., Goethe, U., Castañer, L., 2001. Improved PV battery modelling using Matlab. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, pp. 609-612.
- Tolmasquim M., 2004. Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil”, *Relume Dumará*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Vasebi, A., Partovibakhsh, M., Mohammad, S., Bathaee, T., 2007 A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, In Press.
- Vela N, Chenlo C., 2004. Comportamento não repetitivo de baterias In: XII Congreso IBÉRICO e VII Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo (Espanha), v. 2. p. 819-824.
- Vera, L.H., 2004. “Programa para Dimensionamento e Simulação de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Vera, L. H.; Krenzinger, A., 2008. Resultados Simulados e Medidos em em Sistema Fotovoltaico Autônomo. Trabalho aceito para sua publicação no XXXI Congreso de ASADES y XVII Reunión de la IASEE. Mendoza, Argentina.
- Vera, L. H.; Krenzinger, A. , 2007. Comportamento de baterias automotivas seladas sob diferentes condições de operação. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 11, p. 04.33-04.40.

MATHEMATICAL MODEL FOR SLI BATTERIES IN STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract: *Many Latin-American countries with a significant amount of the population living in rural zones, without access the electric power and basic social service, find in the photovoltaic technology a way for human and productive development. The stand-alone photovoltaic systems (SAPS) use, in general, motor vehicle starting, lighting and ignition (SLI) batteries as a way of storage energy. These batteries make an electric match with the photovoltaic generator through their voltage, setting its working point. Predict the behavior of the accumulation system has great importance because its performance affects the reliability of SAPS. With the objective to study and to predict the behavior of batteries in SAPS, the Solar Energy Laboratory at UFRGS developed a batteries test system, where real conditions of operation can be reproduced under controlled conditions. This work presents experimental analysis that allowed, with theory studies, to obtain algorithms to determine the voltage of lead-acid batteries in different operation conditions. The algorithms, implemented in mathematical models, were incorporated into a software that simulates the behavior of SAPS. Results obtained through the application of these algorithms were compared with values acquired in a battery test system, and showed maximum deviation about 6%, that was considered appropriate for an hourly time basis simulation.*

Keywords: *Systems Autonomous Photovoltaic, SLI Batteries, Mathematical Model.*