

SIMULAÇÃO DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE BATERIAS PARA UTILIZAÇÃO EM MODELAGEM DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A REDE

Olga Moraes Toledo - olgatoledo@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Departamento de Engenharia de Controle e Automação

Delly Oliveira Filho – delly@ufv.br

Ana Carolina Ângelo Dorim - ana.dorim@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Resumo. A inserção de sistemas fotovoltaicos na matriz energética apresenta-se como um desafio. Em especial, a realidade brasileira, com um sistema fortemente centralizado apresenta uma dificuldade maior de gerenciar fontes energéticas de tamanho reduzido. As tecnologias para o armazenamento de energia são uma opção para o gerenciamento seguro destas fontes, em função de sua intermitência. O armazenamento de energia por meio de baterias tem sido alvo de cada vez maior número de pesquisas para que sua utilização seja viável, tanto no desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias quanto nas possibilidades de aplicação. Para esta finalidade, metodologias de simulação confiáveis são requeridas para servirem de apoio ao planejamento e operação elétricos do sistema interligado para uma inserção segura deste recurso. Por meio deste trabalho propõe-se uma metodologia para simulação do armazenamento de energia por meio de baterias estacionárias tipo chumbo - ácida regulada por válvula com vistas ao uso junto aos gestores do sistema elétrico. A metodologia utilizada foi o modelo KiBaM, e adaptada para a simulação de baterias tomando-se por base os dados dos fabricantes. Para a validação do sistema, foram comparados resultados obtidos com a bateria 12MC150, da linha Clean da marca Moura®, simulados e reais. Os resultados obtidos apresentaram um erro da ordem de 1%, tanto para a carga quanto para a descarga da bateria, representando um resultado favorável para esta modelagem.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia, Bateria chumbo-ácida, Planejamento e operação elétrica, Simulação.

1. INTRODUÇÃO

O mundo enfrenta, atualmente, uma dupla ameaça no setor da energia: (i) a inexistência de uma oferta segura e adequada de energia a preços acessíveis, e (ii) os danos causados ao ambiente pelo consumo de energia aliado uso de fontes energéticas com grande potencial poluidor, como por exemplo, petróleo e carvão. A ascensão rápida dos preços da energia e os recentes eventos geopolíticos servem para lembrar a importância que energia a preços acessíveis tem para o crescimento econômico e o desenvolvimento humano, bem como a vulnerabilidade do sistema energético global às crises da oferta. Segundo a IEA (2009) em torno de um bilhão e meio de pessoas não tem acesso a eletricidade, e apesar dos esforços para a erradicação deste problema, as previsões para médio prazo, 2030, ainda serão um bilhão e duzentos milhões de pessoas nesta situação.

Considerando-se este panorama, esforços para desenvolvimento de novas fontes energéticas e tecnologias mais acessíveis vêm sendo realizados. Novas tecnologias como equipamentos e componentes da eletrônica de potência, como os dispositivos *FACTS – Flexible Alternate Current Transmission Systems*, sistemas de controle, monitoramento e medição e ferramentas para suporte à decisão também estão sendo cada vez mais requeridas para a integração de todos estes sistemas. Os sistemas de transmissão e distribuição (T&D) de energia elétrica para se adaptarem a esses novos pressupostos devem ter características diferentes dos atuais. Estes novos sistemas devem prover uma operação otimizada efetiva, com ações de planejamento sob condições rotineiras e emergenciais e rápido restabelecimento depois de uma falha.

As características requeridas do sistema, ou de cada sub-sistema dentro do sistema interligado, para que se alcance um comportamento padrão são (Committee, 2009): (i) se adequar às opções para geração distribuída e armazenamento, sendo capazes de proceder à inserção destas tecnologias em larga escala; (ii) permitir o funcionamento do mercado por atacado de energia, inclusive permitindo o consumidor final as oportunidades de geração própria; (iii) ser capaz de auto-gestão por meio de sistemas de comunicação, monitoramento e controle em tempo real em cada subsistema, com a incorporação de métodos para automaticamente agir em caso de falta atuando na prevenção de um colapso maior do sistema; (iv) motivar e promover a inclusão do consumidor no sistema por meio de ações pró-ativas em gerenciamento de cargas, eficiência energética e geração e armazenamento em pequena escala; (v) ser capaz de prover alta qualidade de energia aonde for necessário, como por exemplo, em edifícios comerciais e indústrias que operem de forma inteligente, com grande número de equipamentos microprocessados, sensíveis à baixa qualidade de energia; (vi) ser seguro, oferecer vulnerabilidade mínima a erros humanos, desastres naturais, ataques terroristas e /ou cibernéticos; e (vii) permitir ao sistema uma operação eficiente e otimizada, utilizando as linhas de transmissão de forma mais eficiente

possível, integrada e coordenada para maximizar a função global em seu viés econômico. A Fig. 1 apresenta uma configuração desejável para a inserção destas novas características no sistema elétrico de potência.

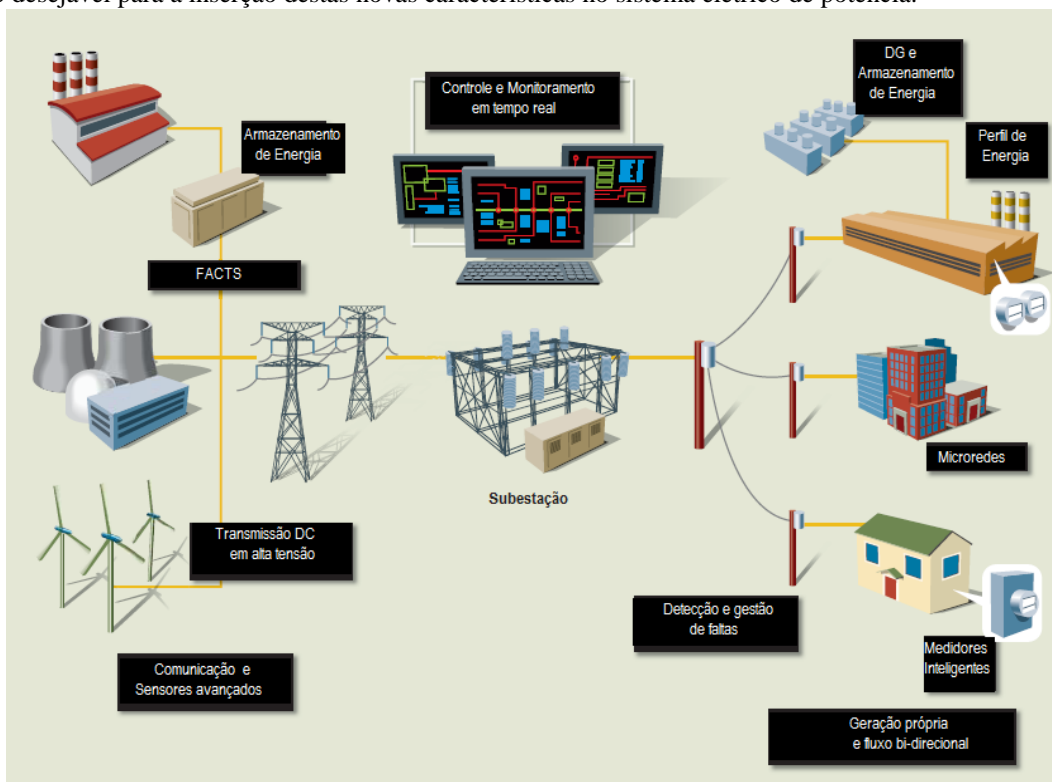


Figura 1- Nova configuração para atender aos novos pressupostos em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica (Committee, 2009).

Este novo sistema de T&D, conhecido como *smart grid*, apresenta fluxo bi-direcional, interações múltiplas entre gestores e alto índice de inserção de geração distribuída, em contrapartida com o sistema atual, que é unidirecional, com interações simples e baixo índice de geração distribuída (Burns, 2009).

O planejamento da expansão e operação elétrica, que é a etapa responsável por prover as melhores soluções para a expansão e exploração do sistema elétrico, para o atendimento do mercado atual e futuro, com os níveis de qualidade adequados, de acordo com as regras estabelecidas pelo órgão regulador, com o mínimo custo global (fixos e variáveis) e que maximizem o retorno do capital aos agentes envolvidos, deve se adequar a esses novos pressupostos (Fortunato, 1990).

Dentro das tecnologias para o planejamento da expansão e operação elétrica, as tecnologias para o armazenamento de energia vêm se destacando como sendo de vital importância. As novas fontes energéticas são, em sua maioria, intermitentes e de inserção distribuída o que torna o seu despacho muitas das vezes difícil, e por isso mesmo, desconsiderado. Sistemas de armazenamento de energia eficientes e confiáveis são alternativas para o despacho energético. Estes sistemas já são muito utilizados, a citar o gerenciamento do nível de reservatórios de água nas grandes usinas hidroelétricas brasileiras. Considerando-se os benefícios que o armazenamento de energia pode trazer ao sistema de distribuição elétrica, pode-se destacar: (i) aumento da estabilidade do sistema; (ii) redução do risco de colapso pelo suporte à operação isolada e (iii) restabelecimento do sistema depois de uma interrupção. Algumas tecnologias de armazenamento por meio de baterias tem demonstrado serem viáveis para esta utilização, como as baterias sódio-enxofre (NaS) e as baterias chumbo - ácido e já estão disponíveis comercialmente (Bjelovuk, 2008).

A simulação de sistemas de armazenamento, em especial por meio de baterias chumbo-ácido, é de vital importância para possibilitar uma inserção segura destas novas tecnologias no sistema. Este trabalho tem por objetivo o estudo de metodologia para a simulação do armazenamento de energia por meio de baterias estacionárias chumbo ácido regulada por válvula com vistas ao uso junto aos gestores do sistema elétrico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia proposta está de acordo com os critérios de suprimento de energia para previsão de potência consumida (carga da bateria) e potência entregue (descarga da bateria) horária visando utilização no planejamento da expansão e operação elétrica e abrange: (i) simulação do modelo de baterias proposto por; (ii) validar o modelos simulado por meio de estudo de caso e dados fornecidos pelo fabricante comparando com dados reais. As simulações foram desenvolvidas no programa HOMER®; e no programa Matlab®.

2.1 Modelo

O modelo utilizado para a simulação do funcionamento do banco de baterias foi o proposto por Manwell (1993, 1994, 1997, 2005) e atualizado por Bindner (2005), conhecido por modelo cinético da bateria (KiBaM). Neste modelo os efeitos não-lineares da bateria são descritos utilizando-se equações diferenciais. A carga da bateria é distribuída em dois tanques, diagrama da Fig. 2: (i) o tanque com a carga disponível e (ii) o tanque com a carga restrita. A carga disponível é aquela que está prontamente disponível para a conversão em eletricidade, já a carga restrita é aquela contém energia ainda em forma química, portanto não imediatamente disponíveis para a retirada.

A capacidade total da bateria é disposta em uma fração c como carga disponível e em uma fração $(1-c)$ para a carga restrita.

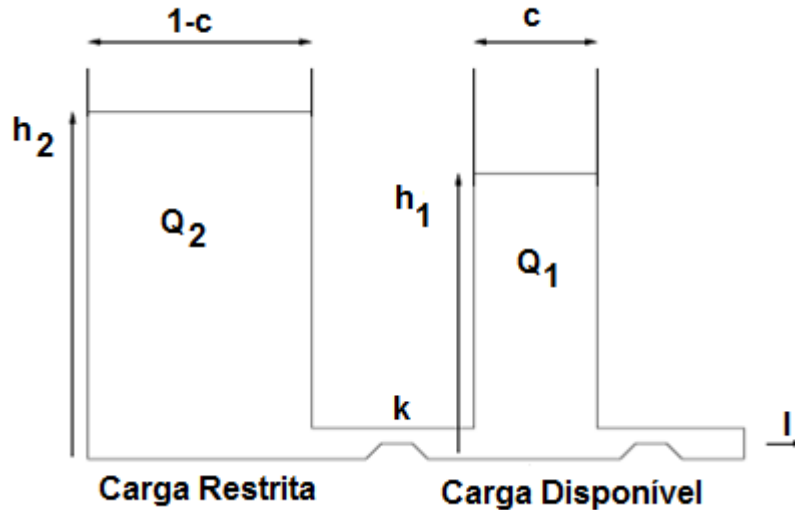


Figura 2 - Modelo Cinético da Bateria (MANWELL, 1995)

As equações diferenciais que definem o modelo são:

$$\frac{dQ_1}{dt} = -I(t) + k(h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = -k(h_2 - h_1) \quad (2)$$

em que:

- Q_1 = Capacidade máxima do tanque 1 (Ah);
- Q_2 = Capacidade máxima do tanque 2 (Ah);
- $I(t)$ = corrente de carga (-) ou descarga (+) da bateria em função do tempo (A);
- k = taxa que exprime a condutância entre os dois tanques (Ω^{-1});
- h_1 = altura do tanque 1 (V); e
- h_2 = altura do tanque 2 (V).

A altura dos tanques é definida por:

$$h_1 = \frac{Q_1}{c} \quad (3)$$

$$h_2 = \frac{Q_2}{(1-c)} \quad (4)$$

em que:

c = é a relação entre o tamanho do tanque de energia disponível e a soma dos dois tanque (Ah/V).

As condições iniciais do modelo, para bateria carregada, são descritos por: $Q_1(0) = cQ$ e $Q_2(0) = (1-c)Q$, em que Q é a capacidade nominal da bateria (Ah).

A energia máxima fornecida durante o ciclo de vida da bateria é dada por:

$$E_{\text{tempo de vida},i} = f_i d_i \left(\frac{Q_{\text{max}} V_{\text{nom}}}{1000 \text{W/kWh}} \right) \quad (5)$$

em que:

$E_{\text{tempo de vida},i}$	= energia máxima fornecida durante o ciclo de vida da bateria (kWh);
f_i	= número de ciclos para o término da vida útil (adimensional);
d_i	= profundidade de descarga da bateria (percentual);
Q	= capacidade máxima disponível da bateria (Ah);
V_{nom}	= tensão nominal da bateria (V).

A capacidade máxima da bateria (Q_{max}) é dada por:

$$Q_{\text{max}}=Q_1+Q_2 \quad (6)$$

2.2. Definição dos parâmetros por meio dos dados do fabricante

Três parâmetros que são utilizados para descrever este sistema dois tanques, $Q_{\text{máx}}$, k e c , são definidos através dos dados fornecidos pelo fabricante, conforme descrito a seguir. A capacidade teórica máxima da bateria (Q_{max}) é a soma da capacidade total dos dois tanques, que não é a capacidade nominal da bateria, visto que não pode ser totalmente fornecida. O parâmetro c é a relação entre o tamanho do tanque da energia disponível para o tamanho conjunto de ambos os tanques. A taxa constante (k) diz respeito à condutância entre os dois tanques, e está relacionada à taxa de conversão da bateria para energia química em elétrica disponível ou vice-versa.

A definição destes parâmetros é feita em função da curva de carga/descarga fornecida pelo fabricante. A curva de descarga fornece o tempo necessário para que, considerando uma determinada corrente de suprimento à carga, ocorra uma profundidade de descarga de 100%. A taxa de descarga é representada o escoamento de corrente em função do tempo. Considerando-se os dados tabelados fornecidos pelo fabricante, faz-se o ajuste da curva em um polinômio de 2ª ordem:

$$Q= A I^2+ B I+C \quad (7)$$

em que:

Q	= capacidade da bateria (Ah);
I	= corrente de carga/descarga (A);
A, B e C	= coeficientes do polinômio.

O parâmetro k , c e $Q_{\text{máx}}$ são definidos pelas equações (8), (9) e (10) respectivamente:

$$k=2A \quad (8)$$

$$Q_{\text{MAX}} = (-B^2/4A)+C+ Q_{\text{NOM}} \quad (9)$$

$$c = 1- \left(\frac{C}{Q_{\text{NOM}}} \right) \quad (10)$$

As simulações foram desenvolvidas no programa MATLAB®. Esse é um software, de caráter matricial, no qual, através da linguagem de programação adequada, problemas podem ser expressos em notação próxima à matemática e solucionados de maneira eficiente e confiável. As tarefas típicas realizadas pelo MATLAB incluem: (i) cálculo matemático e computacional; (ii) aquisição e análise de dados; (iii) visualização de resultados; (iv) modelagem, simulação e prototipação e (v) desenvolvimento de aplicativos (Porciuncula, 2012). A Fig. 3 retrata a plataforma de simulação de tal software.

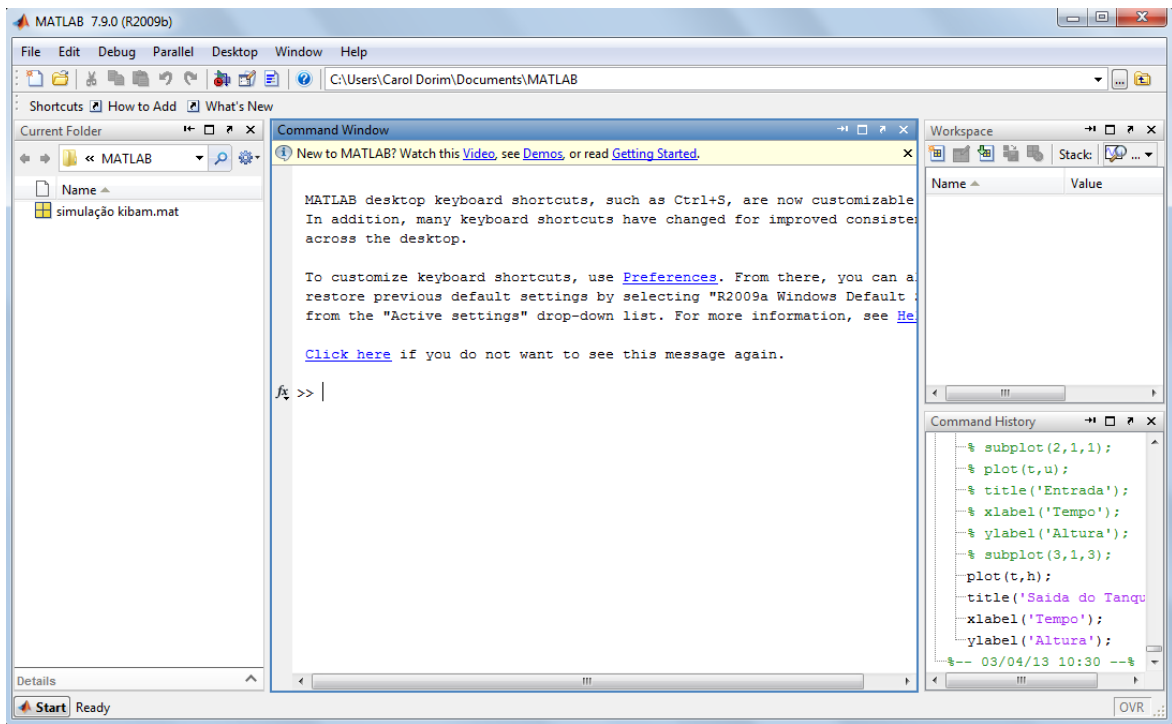


Figura 3 – Tela típica da plataforma de simulação do MATLAB®.

2.3 Validação do modelo com dados experimentais

Os ensaios de capacidade e durabilidade de baterias foram realizados pelo Green – Laboratório de Ensaio de Equipamentos Solares da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). A bateria escolhida para tais experimentos foi o modelo 12MC150 da linha Clean da marca Moura®, mostrada na Fig. 4, que é do tipo chumbo-ácida e possui as seguintes especificações técnicas: (i) dimensões: 512 mm de comprimento, 211 mm de largura e 233 mm de altura; (ii) peso: 43,8 kg e (iii) resistência interna: 3,1 mΩ (MOURA, 2013).

As baterias estacionárias dessa linha utilizam uma tecnologia que traz uma solução definitiva para os problemas associados à utilização de baterias reguladas a válvula (VRLA - *Valve Regulated Lead Acid Batteries*) em temperaturas elevadas. Enquanto as baterias VRLA necessitam de um ambiente controlado, as baterias da linha Clean incorporam proteção térmica própria, já que possuem ligas e grades resistentes. Esse fato, além de proporcionar ótimo desempenho, favorece sua utilização em regiões tropicais. Tem-se ainda, graças a essa tecnologia, chamada SPV (separar o ambiente interno do externo, por meio de um conjunto de válvulas especiais), baixa emissão de gases ácidos, estabelecendo uma categoria mais evoluída tecnologicamente no que tange as baterias chumbo-ácidas. Suas principais aplicações encontram-se nas áreas de: (i) telecomunicações; (ii) energia solar; (iii) fazendas; (iv) energia eólica; (v) boias e sinalização marítima; (vi) monitoramento remoto. (MOURA, 2013).



Figura 4 – Bateria do modelo 12MC150 da linha Clean da marca Moura®.
Fonte: (MOURA, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulação da bateria

Para o cálculo dos parâmetros, realizou-se um ajuste de curva polinomial, apresentado na Fig. 5. Tomando-se por base este ajuste, foram calculados os parâmetros k , c , Q_{\max} e Q_{\min} .

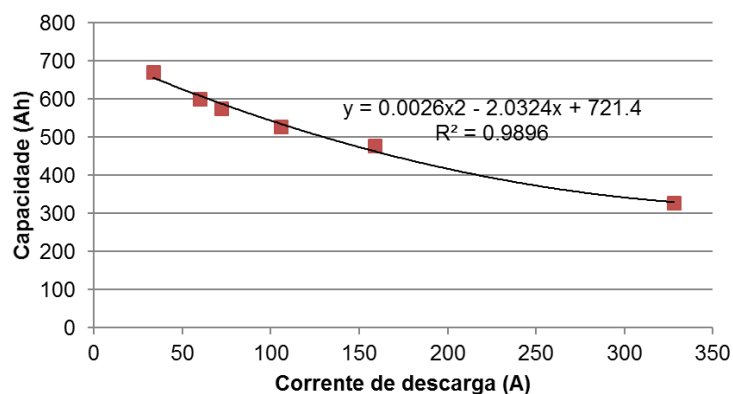


Figura 5 - Ajuste da curva para a bateria OPzV600.

Os parâmetros obtidos para a bateria OPzV 600 foram: $k=0.0051 \Omega^{-1}$, $c=0.1683 \text{ AhV}^{-1}$; $Q_{\max}=918.5 \text{ Ah}$ e $Q_{\min}=318.5 \text{ Ah}$. Com estes parâmetros, foi desenvolvido o modelo da bateria.

Para a bateria 12MC150 tem-se as seguintes constantes calculadas:

- $k = 0,0376 \Omega^{-1}$
- $c = 0,1122 \text{ AhV}^{-1}$
- $Q_{\max} = 408,74 \text{ Ah}$
- $Q_{\min} = 108,74 \text{ Ah}$

3.2 Carga e descarga do modelo- estudo de caso:

Utilizando o software MATLAB®, na plataforma Simulink, o modelo KiBaM foi simulado para um processo de carga e um de descarga. A Fig. 6 mostra o diagrama nessa plataforma que representa o modelo escolhido, onde o que diferencia os processos de carga e descarga são as condições iniciais declaradas nos blocos do tipo “*integrator*” (i.e., operador que efetuará a integral que resolve o modelo) e convenção de sinal para o valor de corrente (negativo para a carga e positivo para a descarga).

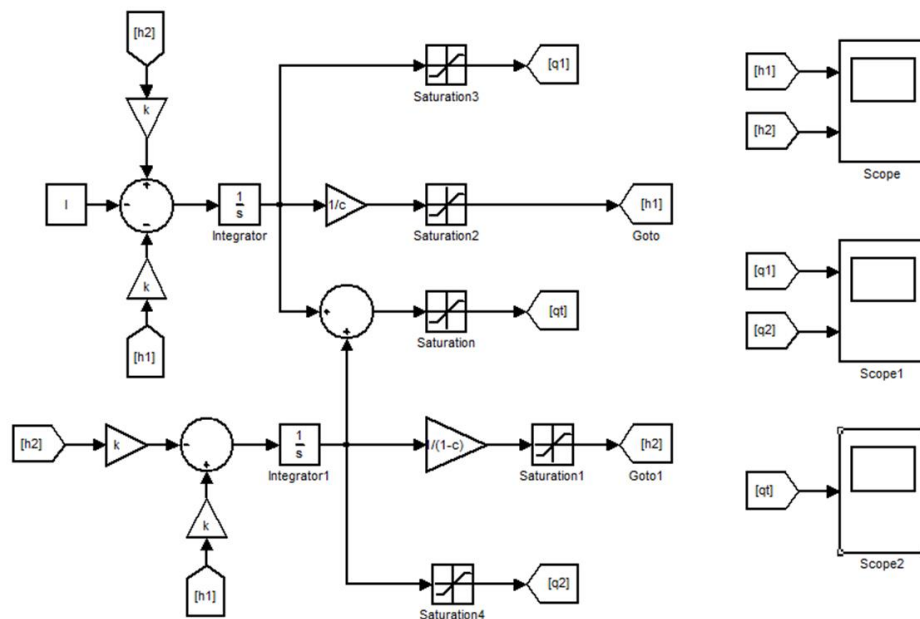


Figura 6 – Diagrama na plataforma Simulink do MATLAB® que representa o modelo KiBaM.

Para a simulação foram utilizados os mesmos valores de corrente utilizados nos ensaios, ou seja, uma corrente de carga de $(7,56 \pm 0,02)$ e de descarga de $(7,58 \pm 0,01)$ A. A simulação foi realizada considerando-se os valores limite obtidos de Q_{\min} e Q_{\max} para a bateria 12MC150, respectivamente, 108,74 Ah e 408,74 Ah. Comparando-se os resultados obtidos nas simulações com os dados fornecidos pelo Green Solar da PUC Minas, foram calculados os erros para o modelo de bateria citado. Para o ensaio realizado o ganho de capacidade ao final do ensaio de carga foi de 209,49 Ah. Considerando a condição inicial (totalmente descarregada) tem-se uma capacidade final de 318,23 Ah, para carga. Na simulação para 27h37min em um processo de carga, a previsão para a capacidade atingida pela bateria é de 315,89 Ah. Logo, o erro percentual associado a capacidade simulada e a obtida em ensaio foi de -0,74%. Para o tempo, obteve-se um resultado simulado de 27h56min (27,93 h) para que a capacidade final fosse atingida. Com isso, o erro percentual nessa simulação é de 1,11%.

Analogamente, para um dos ensaios de descarga realizados pelo Green o qual teve duração de 25h (vinte e cinco horas) e os erros associados foram, respectivamente de 0,96% e 1,12%, para capacidade e tempo.

Uma vez que se objetiva analisar o tempo de carga de um ciclo, a segunda análise é a requerida, obtendo-se cerca de 1% de erro, o que torna o modelo KiBaM extremamente confiável na previsão do tempo de carga para a bateria 12MC150 da linha Clean da marca Moura®.

4. CONCLUSÕES

A metodologia para simulação de baterias e banco de baterias apresentada é de fácil utilização e depende, para sua formulação de parâmetros que são fornecidos pelos fabricantes. Sua utilização no planejamento e operação elétrica pode agregar aos sistemas já instalados uma maior flexibilidade, permitindo uma projeção para diferentes situações dentro do sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo uma ferramenta importante para as novas configurações da rede de energia elétrica do futuro.

Agradecimentos

Os autores são gratos ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e CEMIG pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Bindner, H., T. Cronin, P. Lundsager, J. Manwell, U. Abdulwahid, I. Baring-Gould, 2005, Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries, Riso-R-1515. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, April 2005. Disponível em: <http://130.226.56.153/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1515.pdf>
- Fortunato, L.A.M.; Araripe Neto, T.A.; Albuquerque, J.C.R. & Pereira, M.V.F., 1990. Introdução ao Planejamento da Expansão e da Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica. Eletrobrás, Editora Universitária, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil.
- IEA, 2009. World Energy Outlook - 2009, International Energy Agency IEA.
- Manwell JF, MCGowan JG (1993) Lead acid battery storage model for hybrid energy systems, Solar Energy, 50, 399-405

- Manwell, J.F., et al. (1994) Evaluation of Battery Models for Wind/Hybrid Power System Simulations. in 5th European Wind Energy Association Conference. Thessaloniki, Macedonia, Greece.
- Manwell, J.F., et al., (1997) HYBRID2- A Hybrid System Simulation Model - Theory Manual. 1997, National Renewable Energy Laboratory.
- Manwell, J.F., et. al., (2005) Improvements to the Hybrid2 Battery Model, American Wind Energy Association Windpower , Conference, Denver

SIMULATION OF ENERGY STORAGE IN BATTERIES FOR THE UTILIZATION IN MODELING OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID

Abstract: *The integration of photovoltaic systems in the energy matrix is a challenge. In particular, in the Brazilian reality, with a strongly centralized system presents a greater difficulty to manage small scale energy sources. Technologies for energy storage are an option for the safe management of these sources, due to its intermittency. Energy storage in batteries have been the subject of increasing number of researchs so that their use be feasible in the development and improvement of technologies, as well as in the application possibilities. For this purpose, reliable simulation methodologies are required to serve in support of the planning and operation of the interconnected electric system for a safe insertion of such resource. Through this work we propose a methodology for simulation of energy storage in stationary batteries type lead - acid valve regulated in order to be use by the managers of the electric system. The methodology used was the KiBam model, and adapted for simulating batteries, taking in account the manufacturer data. To validate the system, results obtained with the battery 12MC150, from line Clean of Moura®, simulated and real were compared. The results showed an error of approximately 1% for both the charge and for the discharge of the battery, representing a positive result for this model.*

Key words: Energy Storage, lead- acid battery, Planning and electric operation, Simulation.