

MODELO MATEMÁTICO HÍBRIDO APLICADO À PREDIÇÃO DO TEMPO DE VIDA DE BATERIAS¹

Gabriel Attuati², Paulo Sausen³.

¹ Parte integrante do Projeto de pesquisa Análise, Modelagem e Desenvolvimento de Estratégias de Utilização de Filtros Ativos de Potência Cooperativos em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, desenvolvido no Grupo de Automação Industrial e Controle.

² Estudante do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, integrante do Grupo de Automação Industrial e Controle.

³ Professor do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, integrante do Grupo de Automação Industrial e Controle.

INTRODUÇÃO

Baterias recarregáveis vêm sendo cada vez mais utilizadas como forma de armazenamento e fonte de energia para diversos dispositivos e sistemas elétricos. Dentre estes se destacam celulares, tablets, notebooks, sistemas de comunicação, fontes de energia intermitentes, veículos elétricos, entre outros. A popularização dos dispositivos móveis foi uma das grandes responsáveis pelo aumento deste processo, e atualmente utiliza-se equipamentos com baterias nas indústrias, na educação, na saúde, na segurança e no próprio lazer. Apesar da mobilidade que o uso de baterias permite, todos os aparelhos alimentados por elas sofrem com o mesmo problema, o seu funcionamento é limitado ao tempo de vida da bateria, que é determinado de acordo com a sua capacidade e de acordo com a energia gasta pelo sistema (LAHIRI et al., 2002).

Diante desse desafio, torna-se importante o estudo das baterias recarregáveis, principalmente no contexto da criação de modelos que possam prever o seu tempo de duração, bem como estabelecer o percentual de carga de um sistema em funcionamento. O consumo de energia de um dispositivos sem fio é estudado utilizando modelos de desempenho, que descrevem os diversos estados em que o dispositivo pode estar, e a sua respectiva taxa de consumo. Devido a efeitos físicos não lineares da bateria, o seu tempo de vida depende também do padrão de descarga que está sendo realizado (JONGERDEN; HAVERKORT, 2008), e esses modelos de desempenho não conseguem levar estas características em consideração. Portanto, para obter resultados mais precisos é necessário utilizar um modelo matemático, que captura as características físicas reais de uma bateria e pode ser utilizado para prever o seu estado e comportamento sob diversas condições de carga e descarga.

Na literatura, muitos modelos de baterias podem ser encontrados. Diferentes aproximações são utilizadas, variando principalmente entre Modelos Eletroquímicos, Elétricos, Estocásticos e

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXII Seminário de Iniciação Científica

Analíticos. Cada um possui um grau de complexidade e precisão específico, possuindo suas vantagens e desvantagens dependendo do tipo de bateria e aplicação no qual será utilizado.

Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de apresentar um estudo sobre um modelo matemático específico, o Modelo Híbrido, que é capaz de descrever a descarga de baterias. O modelo em questão é simulado e sua implementação é validada. Posteriormente os seus parâmetros são extraídos a partir de dados de descargas de baterias de íon-lítio realizadas em laboratório, e esses novos parâmetros são incluídos na simulação. Os tempos de descarga entre a simulação e dados experimentais são comparados, obtendo-se assim a precisão do modelo implementado.

METODOLOGIA

Uma bateria consiste de uma ou mais células eletroquímicas, conectadas em série ou paralelo. A energia armazenada nessas células é convertida em energia elétrica através de uma reação química. Uma célula consiste de um ânodo (polo negativo), um cátodo (polo positivo) e um eletrólito, que separa os dois eletrodos. Durante a descarga, uma reação de oxidação acontece no ânodo. Nela, o agente redutor doa uma quantidade N de elétrons, os quais circulam através do circuito elétrico no qual a bateria está conectada. Já no cátodo ocorre uma reação de redução. Nessa reação, o agente oxidante aceita os N elétrons doados pelo agente redutor, completando assim o processo.

Tomando como referência uma situação ideal, a diferença de potencial das células se manteria constante durante todo o processo de descarga, e chegaria a zero quando não houvesse mais carga a ser transferida entre o ânodo e o cátodo. A capacidade da bateria também seria constante para qualquer corrente de descarga, e toda a energia armazenada seria utilizada. Porém para uma bateria real, devido a efeitos não lineares inerentes ao processo, a tensão diminui lentamente durante a descarga (Efeito de Recuperação), e a capacidade efetiva é menor para correntes de descarga maiores (Efeito de Taxa de Capacidade).

Deste modo, devido a estes efeitos não lineares, a modelagem matemática de uma bateria se torna complexa. Para correntes constantes, é possível facilmente calcular o tempo de vida (L) dividindo a sua capacidade (C) pela corrente de descarga (I): $L=C/I$. Porém devido aos efeitos não lineares essa relação não pode ser utilizada para baterias reais (JONGERDEN; HAVERKORT, 2008).

Sendo assim, através da análise dos modelos matemáticos encontrados na literatura, e das particularidades que o processo de descarga de uma bateria apresenta, optou-se pelo estudo de um modelo híbrido para a predição do tempo de vida de baterias. Esta escolha é em decorrência deste tipo de modelo ser uma nova tendência na simulação do tempo de vida de baterias por utilizar, em tese, o melhor de dois ou mais tipos de modelos. No caso do modelo escolhido ele é composto parte por um modelo analítico, e parte por um modelo elétrico. O modelo analítico utilizado é o Modelo Cinético de Bateria (KiBaM – Kinetic Battery Model em inglês), escolhido principalmente pelo fato de representar corretamente os efeitos não lineares da bateria e possuir descrição vasta e detalhada na literatura. Já o modelo elétrico tem a vantagem de demonstrar, com precisão, as características dinâmicas do circuito de uma bateria, como tensão de circuito aberto, tensão terminal e resposta transiente (KIM, 2012). O modelo KiBaM calcula o SOC (State of Charge, inglês para

Estado de Carga), levando em conta os efeitos não lineares, e o modelo elétrico utiliza este SOC para gerar a tensão de saída da bateria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo KiBaM descreve os processos químicos que ocorrem na bateria através de um processo cinético. É assumido que a bateria possui duas fontes de cargas, onde a carga é distribuída com uma relação de capacidade “c” ($0 < c < 1$) entre essas duas fontes, como ilustrado na Figura 1.

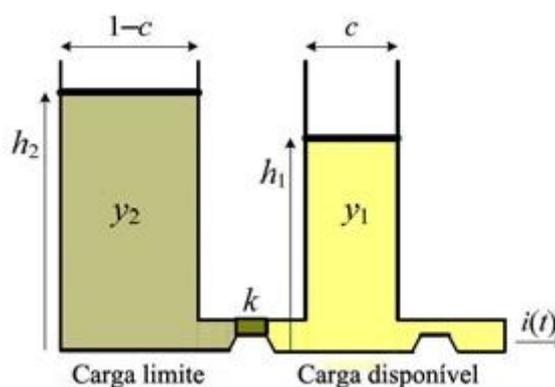


Figura 1 - Modelo KiBaM de bateria, Fonte: Adaptado de (KIM, 2012).

A fonte “carga disponível” fornece energia diretamente ao circuito (corrente $i(t)$), enquanto a fonte “carga limite” alimenta somente a fonte “carga disponível”, através de uma válvula “k”. A taxa na qual a carga flui entre as duas fontes depende do valor de “k” e da diferença entre as alturas h_1 e h_2 , onde h_1 representa o SOC da bateria. Dessa maneira, a bateria se torna completamente descarregada quando h_1 chega a zero.

Quando a bateria é descarregada com uma corrente $i(t)$, a fonte carga disponível diminui mais rapidamente do que a fonte carga limite, e conseqüentemente a diferença de altura entre elas aumenta. Quando a corrente diminui ou chega a zero, a carga flui da fonte limite para a fonte disponível até que as duas alturas sejam iguais. Dessa maneira, quando a bateria estiver em um período com pouca ou nenhuma atividade, mais carga se torna efetivamente disponível na fonte “carga disponível” do que quando uma alta corrente de descarga está sendo aplicada continuamente. Essa dinâmica descreve fielmente os efeitos não lineares Taxa de Capacidade e Recuperação.

Sendo assim, segundo (KIM, 2012), o SOC da bateria pode ser determinado pela equação (1):

$$SOC(t) = SOC_{inicial} - \frac{[\int i(t)dt + C_{indisponivel}(t)]}{C_{max}} \quad (1)$$

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXII Seminário de Iniciação Científica

Onde o termo C_{max} significa a capacidade máxima da bateria em Ah, o termo integral de $i(t)$ representa a energia sendo consumida, e o termo $C_{indisponível}(t)$ representa a capacidade indisponível da bateria, obtida através do modelo KiBaM. A equação (2) descreve a carga indisponível da bateria, onde i representa a corrente constante de descarga e $k'=k/(c(1-c))$.

$$C_{indisponível}(t) = (1 - c) \cdot \frac{i}{c} \cdot \left(\frac{(1 - e^{-k't})}{k'} \right) \quad (2)$$

Com as equações (1) e (2) é possível obter a porcentagem de carga (SOC) da bateria após determinado tempo e determinada corrente de descarga. A partir do SOC calculado pelo modelo KiBaM, o modelo elétrico consegue calcular a tensão de saída da bateria através da equação (3).

$$V_{out}(t) = V_0[SOC(t)] - i \cdot R_{serie} - V_{transiente}(t) \quad (3)$$

Onde:

$$V_0[SOC(t)] = a_0 e^{-a_1 SOC(t)} + a_2 + a_3 SOC(t) - a_4 SOC(t)^2 + a_5 SOC(t)^3 \quad (4)$$

$$V_{transiente}(t) = V_{transiente-S}(t) + V_{transiente-L}(t) \quad (5)$$

$$V_{transiente-S}(t) = R_{transiente-S} \cdot i \cdot [1 - e^{-t/\tau_S}] \quad (6)$$

$$V_{transiente-L}(t) = R_{transiente-L} \cdot i \cdot [1 - e^{-t/\tau_L}] \quad (7)$$

$$\tau_S = R_{transiente-S} \cdot C_{transiente-S} \quad (8)$$

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXII Seminário de Iniciação Científica

$$\tau l = R_{transiente-L} \cdot C_{transiente-L} \quad (9)$$

$$R_{transiente-S}(SOC) = c_0 e^{-c_1 \cdot SOC} + c_2 \quad (10)$$

$$C_{transiente-S}(SOC) = d_0 e^{-d_1 \cdot SOC} + d_2 \quad (11)$$

$$R_{transiente-L}(SOC) = e_0 e^{-e_1 \cdot SOC} + e_2 \quad (12)$$

$$C_{transiente-L}(SOC) = f_0 e^{-f_1 \cdot SOC} + f_2 \quad (13)$$

$$R_{serie}(SOC) = b_0 e^{-b_1 SOC(t)} + b_2 + b_3 SOC(t) - b_4 SOC(t)^2 + b_5 SOC(t)^3 \quad (14)$$

Como são muitas equações, principalmente na parte do modelo elétrico, e existem diversas variáveis que dependem de outras, as equações foram montadas na forma de diagrama de blocos no ambiente de simulação Simulink, conforme apresentado na Figura 2. Através dessa simulação, variáveis de entrada como corrente de descarga e capacidade da bateria, e variáveis de saída como tensão ou SOC podem ser facilmente manipuladas ou visualizadas.

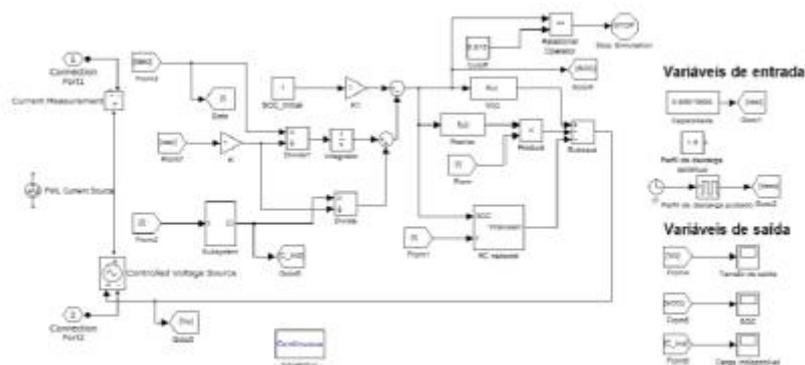


Figura 2 - Modelo KiBaM de bateria, Fonte: O Autor.

Em um primeiro momento, todas as constantes das equações apresentadas utilizaram os valores fornecidos pela literatura. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles encontrados na literatura, onde foi observado que a simulação realizada estava correta, concluindo assim a parte da validação do modelo implementado.

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXII Seminário de Iniciação Científica

Com a implementação validada, a próxima parte consistiu na extração dos parâmetros do modelo. Isso é realizado para que ele represente corretamente o comportamento de descarga de uma bateria específica. Para isso utilizou-se os dados de descargas de baterias de Lítio-Íon, de capacidade 950 mAh, que já haviam sido realizadas no laboratório previamente. Os métodos utilizados para a extração de parâmetros podem ser encontrados em (KIM, 2012). Somente os parâmetros da parte do modelo Kibam foram extraídos (c e k'), e para o modelo elétrico foram utilizados os valores fornecidos pela literatura. Na Tabela 1 é apresentado os valores das constantes utilizados nas simulações.

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| a_0 | -0.852 | a_1 | 63.867 | a_2 | 36.297 | a_3 | 0.559 | a_4 | 0.51 | a_5 | 0.508 |
| b_0 | 0.1463 | b_1 | 30.27 | b_2 | 0.1037 | b_3 | 0.0584 | b_4 | 0.1747 | b_5 | 0.1288 |
| c_0 | 0.1063 | c_1 | 62.49 | c_2 | 0.0437 | d_0 | -200 | d_1 | -138 | d_2 | 300 |
| e_0 | 0.0712 | e_1 | 61.4 | e_2 | 0.0288 | f_0 | -3083 | f_1 | 180 | f_2 | 5088 |
| c | 0.9158 | k' | 0.0002 | | | | | | | | |

Tabela 1 – Constantes utilizadas para a simulação, Fonte: O Autor.

Na Tabela 2 são apresentados os tempos de descarga das simulações para os diversos perfis de descarga, bem como o erro percentual em comparação aos valores experimentais.

| Descarga | T_experimental | T_simulação | Erro |
|----------|----------------|-------------|-------|
| 0,05 A | 70755 s | 67940 | 3,98% |
| 0,25 A | 14126 s | 13253 | 6,18% |
| 0,45 A | 7794 s | 7248 | 7,00% |
| 0,65 A | 5257 s | 4972 | 5,42% |
| 0,85 A | 3889 s | 3780 | 2,80% |
| 0,95 A | 3403 s | 3374 | 0,85% |

Tabela 2– Comparação dados experimentais e modelo simulado, Fonte: O Autor.

CONCLUSÕES

O principal objetivo deste artigo foi apresentar o uso de um modelo matemático híbrido para prever o tempo de vida de uma bateria que alimenta um dispositivo móvel. Para tanto foi realizada a implementação deste modelo, a partir das suas equações matemáticas, na ferramenta computacional Matlab, mais especificamente no ambiente Simulink. A partir desta implementação,

Modalidade do trabalho: Relatório técnico-científico
Evento: XXII Seminário de Iniciação Científica

inicialmente foi realizada a validação do modelo, e posteriormente realizado uma série de simulações com diferentes descargas para analisar a acurácia do modelo implementado.

A partir dos resultados obtidos nas simulações pode-se observar que o modelo híbrido implementado possui uma boa acurácia, apresentando um erro médio de apenas 4,37% quando comparado com dados reais de simulação. Este resultado confirma que o modelo em questão pode ser utilizado para a predição do tempo de vida de uma bateria pelo reduzido percentual médio de erro que o mesmo apresenta.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Matemática; Baterias; Modelo Híbrido

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JONGERDEN, M; HAVERKORT, B. "Battery modeling," Technical Report in Faculty Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, 2008.

KIM, Taesic. A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. Master Thesis. University of Nebraska. 2012.

LAHIRI, K; RAGHUNATHAN, A; PANIGRAHI, D. Battery-driven system design: A new frontier in low power design. 2002.