

ANÁLISE DE TÉCNICAS PARA APROXIMAÇÃO DA CURVA DE DESCARGA DE BATERIAS

DAVID C. C. FREITAS¹, ARTHUR P. S. BRAGA², DAVID N. COELHO³, EDSON C. NETO⁴, HUGERLES S. SILVA⁵

Instituto Federal do Ceará- IFCE Campus Pecém¹
E-mail: david.ciarlini@ifce.edu.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica PPGEE, Universidade Federal do Ceará UFC.
Fortaleza, CE, Brasil²
E-mail: arthurp@dee.ufc.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Teleinformática PPGETI Universidade Federal do Ceará
UFC^{3,4}. Fortaleza, CE, Brasil
E-mails: davidcoelho89@gmail.com, edsoncavalcanti@hotmail.com

Universidade Federal de Campina Grande UFCG⁵
E-mail: hugerles.silva@ee.ufcg.edu.br

Abstract— A battery models classification is presented. An analytical model is chosen. It is presented the parameters extraction proposed by the model. Two techniques, differential evolution DE and multi-layer perceptron MLP, are used to approximate the discharge curve of a battery model. Two intervals are used during the simulation: one for training and testing and another one for validation. There is a comparison between the three methods taking into account the computational effort, the processing time and the mean square error.

Keywords— lead-acid battery, battery models, discharge curve, parameters estimation.

Resumo— Uma classificação dos modelos de baterias é apresentada. Um modelo analítico é escolhido. É apresentada a forma de extração dos parâmetros proposto pelo modelo. Duas técnicas, evolução diferencial DE e perceptron de múltiplas camadas MLP, são utilizadas para aproximar a curva de descarga de um modelo de bateria. São utilizados dois intervalos durante a simulação: um para treinamento e teste e outro para validação. Há uma comparação entre os três métodos levando em consideração o esforço computacional, o tempo de processamento e o erro quadrático médio.

Palavras-chave— bateria chumbo-ácido, modelos de baterias, curva de descarga, estimação de parâmetros.

1 Introdução

A bateria de chumbo-ácido é uma das mais antigas formas de armazenar energia com capacidade de recarga. Ela é ainda preferida em várias circunstâncias, pois tem baixo custo quando comparada com outros tipos de baterias de mesma potência e capacidade. Entre os principais usos de baterias chumbo-ácido estão: veículos elétricos, fontes de energia ininterruptas e sistemas de comunicação (Leao et al, 2010).

A aplicação específica de fontes de energia ininterrupta é necessária onde não são toleradas falhas de energia, como em bancos e hospitais. Problemas em sistemas de energia têm sérios impactos econômicos e, em alguns casos, pode afetar a segurança humana. Bancos de baterias são usados para melhorar a confiabilidade desses sistemas (Chagas, 2007).

A operação normal de bancos de baterias envolve vários ciclos de carga e descarga. O problema do uso de bancos de baterias é a necessidade de periodicamente avaliar seus estados de carga SOC (do inglês, State of Charge) para verificar as

possibilidades de riscos em caso de falha. Como a medida do SOC não é diretamente disponível existe a necessidade de usar técnicas de estimação, geralmente baseada nas características elétricas da bateria. Esses modelos podem ser utilizados para prever o comportamento sob várias condições de carga e descarga (Ketzer et al, 2013).

Para estimar as características elétricas das baterias, são necessários procedimentos específicos em laboratórios (Schneider, 2010). Modelos de bateria simulam as características reais de operação e podem ser usados para prever seu comportamento em diferentes projetos. Uma importante característica de certos modelos é a estimativa do tempo de vida útil da bateria, que diminuiria a incerteza e afetaria diretamente o custo do projeto (Bindner et al, 2005).

O objetivo deste trabalho é comparar algumas técnicas de aproximação da curva de descarga de uma bateria. Nessa proposta, o modelo da bateria será apresentado e simulado. As técnicas de estimação utilizadas serão: evolução diferencial, rede perceptron de múltiplas camadas MLP (do inglês, Multilayer Perceptron) e a técnica dos três pontos já em uso na literatura.

2 Modelos de Baterias e suas Classificações

Os modelos de bateria são projetados para representar as características de operação atual e para prever o comportamento em diferentes ciclos de carga e descarga (Sousa, 2008).

Diversos modelos podem representar o mesmo fenômeno com diferentes níveis de complexidade. Modelos para aplicações específicas têm sido propostos na literatura para representar as baterias. Em relação à complexidade, os modelos podem ser classificados como eletroquímicos, analíticos e baseados em circuitos elétricos.

- **Modelos Eletroquímicos:** esses modelos simulam as propriedades físico-químicas das baterias. Eles incorporam o transporte de massa, termodinâmica e as características mecânicas, térmicas e elétricas dos materiais. Um exemplo dessa categoria é apresentado em (Liaw et al, 2002).
- **Modelos Analíticos:** esses modelos são baseados na interpolação e extrapolação dos dados obtidos dos testes do fabricante. Eles têm complexidade reduzida quando comparados com os modelos eletroquímicos. Exemplos dessa categoria são os trabalhos de (Bindner et al, 2005), (Andersson, 2006), (Shepherd, 1963), (Schiffer et al, 2007), (Tremblay et al, 2007), (Tremblay et al, 2009), (Cervone et al, 2012), (Achaibou et al, 2012) e (Kim et al, 2014).
- **Modelos baseados em Circuitos Elétricos:** esses modelos são baseados em circuitos elétricos equivalentes, por exemplo, levam em consideração resistores, capacitores, indutores, fontes de tensão e fontes de corrente. Os modelos (Durr, 2006), (Ceraolo, 2000), (Kaiser, 2003), (Jackey, 2007), (Wijewardana, 2014), (Seaman et al, 2014) e (Rezvanizani, 2014) pertencem a essa classe.

Em relação à proposta, duas classes podem ser estabelecidas: os modelos de tempo de vida e os modelos de desempenho. Uma breve descrição desses modelos é apresentada a seguir.

- **Modelos de Desempenho:** o primeiro tipo é o que modela o SOC, que é o principal parâmetro de um sistema de bateria. O segundo tipo, de tensão, modela a tensão nos terminais da bateria. Alguns exemplos dessas categorias são apresentados em (Kim, 2014), (Durr, 2006), (Seaman et al, 2014) e (Rezvanizani, 2014).
- **Modelos de Tempo de Vida:** Esses modelos são usados para estimar o impacto de um esquema particular de operação no tempo de vida esperado para uma bateria. Leva em

consideração a degradação da bateria. Os modelos (Liaw et al, 2002) e (Schiffer et al, 2007) pertencem a essa classe.

Neste trabalho será utilizado o modelo proposto por (Tremblay et al, 2007). Um modelo analítico que possui uma equação para descarga e alguns parâmetros a serem estimados. Esse modelo também pode ser utilizado para outras tecnologias de baterias, como as de íons de lítio. Na próxima seção, o modelo escolhido é detalhado.

3 Modelos Proposto por Tremblay et al. (2007)

O modelo escolhido neste trabalho é o proposto por Tremblay et al. (2007) e é apresentado na Fig. 1.

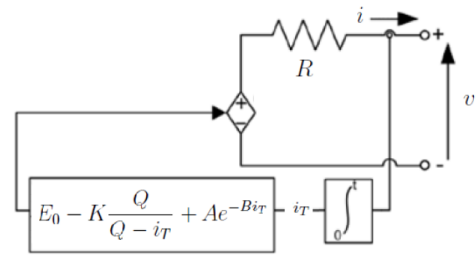


Fig. 1. Modelo de bateria proposto por Tremblay et al. (2007) com uma fonte de tensão controlada em série com uma resistência interna.

A equação de descarga desse modelo é dada por

$$v = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_T} - Ri + Ae^{-Bi_T} \quad (1)$$

Em (1), todas as variáveis representadas em letras minúsculas são dependentes do tempo: v , i e i_T . Os parâmetros e variáveis nessa equação são: v é a tensão da bateria, E_0 é a tensão de circuito aberto, K é a constante de polarização, Q é a capacidade nominal da bateria, i_T é a atual carga consumida, R é a resistência interna, i é a corrente da bateria durante a carga ou a descarga e A e B são constantes.

A estimação dos parâmetros proposta por Tremblay et al. (2007) é feita de forma simples. São necessários três pontos de uma curva de descarga da Fig. 2: o início da zona exponencial, o final da zona exponencial e o decaimento final da curva de descarga. Os três pontos são, respectivamente, P1, P2 e P3.

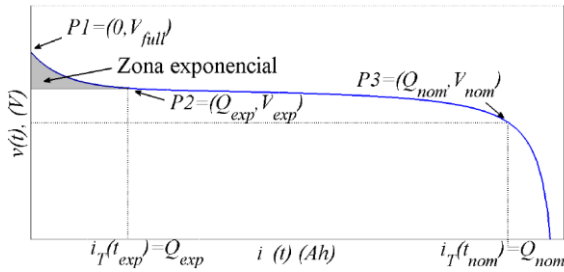


Fig. 2. Curva de descarga de uma bateria indicando os três pontos, P1, P2 e P3, para obtenção dos parâmetros proposto por Tremblay et. Al. (2007).

Os parâmetros A , B , K e E_0 são obtidos como apresentados nas equações a seguir.

$$A = V_{full} - V_{exp} \quad (2)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (3)$$

$$K = \frac{(V_{full} - V_{nom} + A(e^{-BQ_{nom}} - 1))(Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (4)$$

$$E_0 = V_{full} + K + Ri - A \quad (5)$$

(2) a (5) são usadas para estimar os parâmetros de (1). O valor de R deve ser conhecido e i_T é a integral da corrente no tempo.

4 Técnicas de Aproximação da curva de Descarga da Bateria

São utilizados três técnicas para aproximar a curva de descarga do modelo apresentado, são elas:

- **3 pontos:** método proposto por Tremblay et al. (2007) e apresentado na seção 3.
- **Evolução Diferencial:** ou DE, do inglês, é um algoritmo de computação evolutiva que utiliza vetores de parâmetros como população e gera novos vetores através da adição da diferença ponderada entre dois vetores de parâmetros a um terceiro indivíduo. Esses vetores são cruzados com outros e geram um novo vetor. Se esse último gerar uma função objetivo melhor que o inicial, será escolhido para a próxima geração (Engelbrecht, 2007).
- **Rede MLP:** é uma rede neural na qual os neurônios possuem uma função de ativação não-linear e diferenciável. A rede pode

possuir mais de uma camada escondida e possui alta conectividade (Engelbrecht, 2007).

A simulação foi realizada utilizando o simulink do software MatLab que já possui um modelo de bateria, conforme apresenta a Fig. 3.

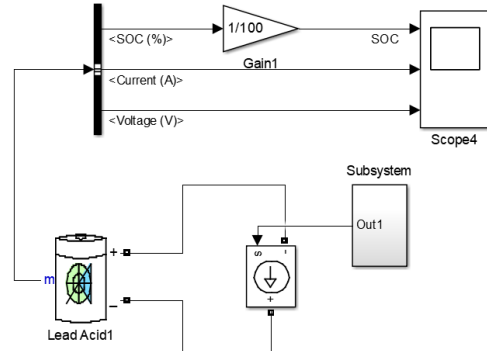


Fig. 3. Ambiente de simulação no simulink do Matlab com uma bateria conectada à uma fonte de corrente com um determinado padrão de carga e descarga (Subsystem) e gerando três sinais de saída: corrente (current), tensão (voltage) e estado de carga (SOC).

A Fig. 3 apresenta o ambiente de simulação utilizado para realizar os testes. Uma bateria (Lead Acid1) de 12V e 36Ah é conectada a uma fonte de corrente com certo padrão de carga e descarga (Subsystem) e três sinais de saídas são apresentados: estado de carga (SOC(%)), corrente (current(A)) e tensão (Voltage(V)). O ganho (Gain1) é utilizado para dar o valor do SOC em porcentagem. Esses sinais são conectados ao Scope4 e os dados de tensão e corrente são apresentados, respectivamente, nas figuras Fig. 4 e Fig. 5.

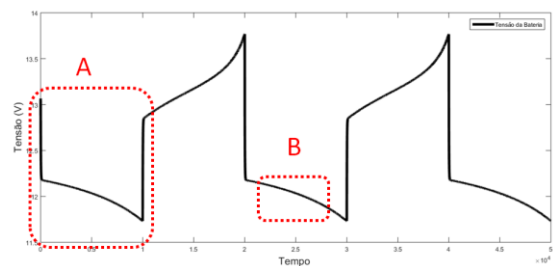


Fig. 4. Curva de tensão gerada pelo ambiente de simulação dado na Fig. 3. O intervalo para treinamento e teste é A e para validação é B.

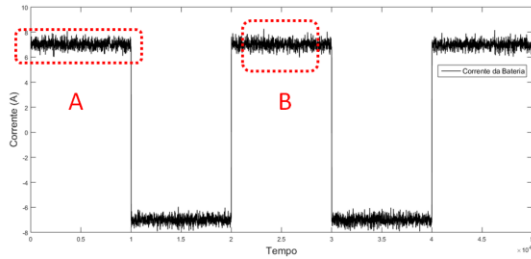


Fig. 5. Curva de corrente gerada pelo ambiente de simulação dado na Fig. 3. O intervalo para treinamento e teste é A e para validação é B.

A simulação é feita com 5000 pontos com um total de aproximadamente 14 horas (cada ponto equivale à aproximadamente 10 segundos). Conforme apresentado nas figuras Fig. 4 e Fig. 5, há duas situações: um intervalo para estimação, representado por A e um intervalo para validação, representado por B. No intervalo A, são utilizados 1000 pontos (do ponto 1 ao ponto 1000). Já no intervalo B, são usados 800 pontos (do ponto 2101 ao ponto 2900). A seguir, serão apresentados os métodos utilizados e os valores encontrados para estimação e teste.

Utilizando o método proposto por Tremblay et al. (2007), método dos 3 pontos, com o uso de (2) a (5), os valores encontrados para A , B , K e E_0 são apresentados na Tabela I.

Tabela I

Parâmetros	Valores Encontrados – 3 pontos
E_0	12,68
K	0,4555
A	0,86
B	13,88

Esses parâmetros são obtidos baseados na primeira curva de descarga representada por A na Fig. 4. O gráfico comparativo entre a tensão original e a tensão obtida com o método dos três pontos é apresentado na Fig. 6.

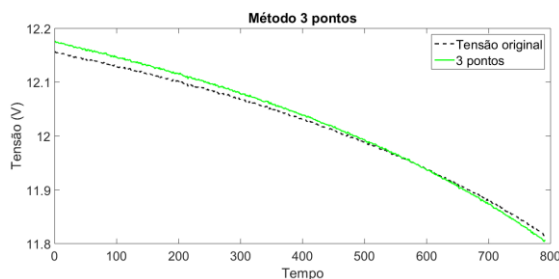


Fig. 6. Comparação da curva original com a curva obtida com a estimação dos parâmetros com o método proposto por Tremblay et al. (2007) no intervalo de validação.

A segunda técnica escolhida foi evolução diferencial. O valor de F , que é o tamanho do passo a ser dado na direção definida pelo vetor diferença, é 0,5, a população inicial possui 50 indivíduos cada um

com 4 parâmetros (A , B , K e E_0). A probabilidade de cruzamento é 0,8 e o critério de parada é o número de geração que é igual a 100. Foram definidos limites superiores e inferiores para cada uma das quatro variáveis, baseados em resultados existentes na literatura, conforme Tabela II.

Tabela II

Parâmetro	Valores mínimos e máximos
E_0	10 e 15
K	-1 e 2
A	-1 e 2
B	5 e 30

Os valores encontrados para os quatro parâmetros são apresentados na Tabela III e o gráfico comparativo entre esse método e o gráfico original é apresentado na Fig. 7.

Tabela III

Parâmetro	Valores Encontrados – DE
E_0	12,6203
K	0,4168
A	0,8839
B	27,1086

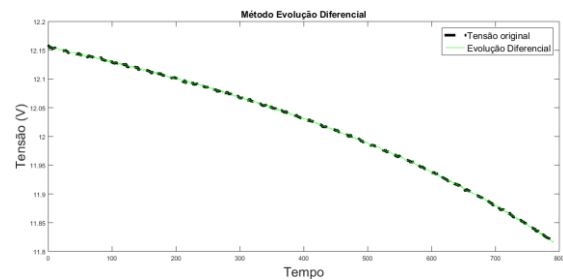


Fig. 7. Comparação da curva original com a curva obtida com a estimação dos parâmetros com o método evolução diferencial no intervalo de validação.

A terceira técnica foi MLP. É definida apenas uma camada escondida. A quantidade de neurônios na camada de saída é definida em cada teste. Como entrada, é definido um vetor coluna, consistindo de uma entrada atual de corrente e valores passados de tensão. A quantidade de valores passados de tensão é definida em cada teste. A saída é um único valor entre zero e um. A função de ativação é do tipo sigmoideal e há a necessidade de normalizar os dados de entrada e, ao final da validação, desnormalizar para apresentar os valores em níveis de tensão. A taxa de aprendizagem escolhida é de 0,01 e o número de épocas para cada teste é 1000.

O gráfico comparativo entre esse método e o gráfico original é apresentado na Fig. 8, utilizando um vetor de entrada com onze posições: uma entrada

atual de corrente e dez valores passados de tensão e cinco neurônios na camada escondida.

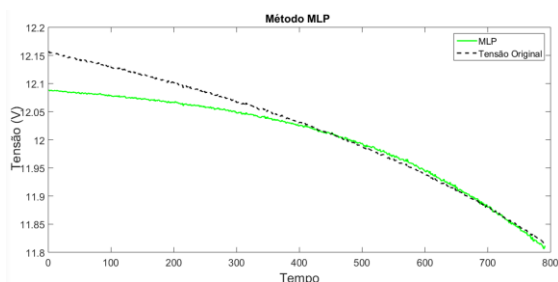


Fig. 8. Comparação da curva original com a curva obtida com a estimação dos parâmetros com o método evolução diferencial no intervalo de validação.

5 Resultados e Trabalhos Futuros

Realizaram-se testes com padrões de corrente na validação e na fase de testes com níveis semelhantes 7A.

A Fig. 9 apresenta o resultado das simulações apresentadas na seção anterior, abrangendo todos os três métodos.

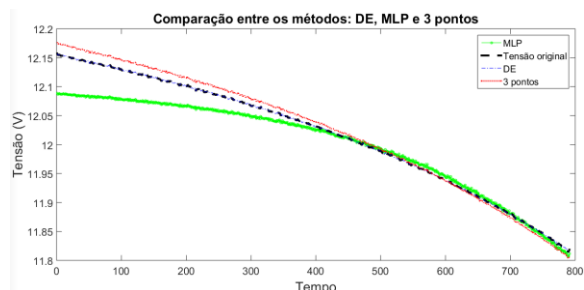


Fig. 9. Comparação entre todos os métodos apresentados na seção IV. O nível de corrente para treinamento/teste e validação é igual.

O erro quadrático médio entre cada uma das técnicas utilizadas e a tensão original é apresentado na Tabela IV.

Tabela IV

Método	Erro Quadrático Médio
3 pontos	1,2184e-04
DE	8,9203e-08
MLP	8,0808e-04

Após esse teste inicial, nove outros testes foram realizados combinando a quantidade de neurônios e de entradas passadas de tensão para a técnica MLP. Para cada uma das combinações, foram realizados dez testes, obtendo o valor com menor erro (melhor valor) e o valor médio, conforme apresenta a Tabela V.

Tabela V

3 Neurônios		5 Neurônios		7 Neurônios	
Melhor r	Média a	Melhor r	Média	Melhor	Média
3,6380e-05	1,2036e-04	3,2158e-05	1,3880e-04	3,3558e-05	1,4968e-04
1,2425e-04	7,2553e-04	9,4703e-05	6,2937e-04	3,1633e-05	5,2794e-04
1,5205e-04	7,7952e-04	6,2878e-04	1,1e-03	7,3918e-04	12e-04

A Tabela V é dividida da seguinte forma: foram feitas nove simulações combinando as três quantidades de neurônios e as três quantidades de valores de tensão anteriores (a primeira linha representa uma saída anterior, a segunda representa cinco saídas anteriores e a terceira, dez saídas anteriores). Para cada uma das simulações, foi obtido o menor valor e a média dos dez testes.

Das nove simulações, a que obteve o menor erro quadrático médio foi a topologia com sete neurônios e um vetor de entrada com cinco entradas passadas de tensão além do valor atual de corrente, obtendo um erro de 3,1633e-05. A Tabela V apresenta que, alterando apenas a quantidade de neurônios, não é certa a diminuição do erro. A curva apenas teve o erro da melhor resposta diminuído à medida que aumentava a quantidade de neurônios, quando se utilizaram cinco saídas anteriores de tensão no vetor de entrada. Para apenas um valor passado de tensão na entrada, o erro praticamente não altera o valor. Para dez valores passados de tensão no vetor de entradas, o erro aumenta à medida que o número de neurônios na camada escondida aumenta.

6 Conclusão

Neste trabalho, foram apresentados os modelos de bateria e sua classificação e o modelo utilizado que foi proposto por Tremblay (2007). Na literatura já existe um método para estimar os parâmetros da curva de descarga: método dos 3 pontos. Outras duas técnicas são utilizadas: Evolução Diferencial DE e Perceptron de Múltiplas Camadas MLP. Todas as abordagens foram testadas por meio de simulações computacionais.

Realizaram-se testes com padrões de corrente na validação e na fase de testes com níveis semelhantes (7A). Nesse caso, o método que utiliza DE teve o menor erro quadrático médio, seguido pelo método dos 3 pontos. A técnica com MLP teve o maior erro devido à parte inicial da curva de descarga do intervalo de validação. Na segunda parte dos testes, levando em consideração a alteração da quantidade de neurônios e quantidade de entradas, a topologia da MLP que obteve o melhor resultado, menor erro quadrático médio, foi com sete neurônios na camada escondida e um vetor de entrada com seis posições (entrada atual de corrente e cinco entradas passadas de tensão), obtendo um erro de 3,1633e-05. Ainda assim, comparando esse erro dessa topologia da rede

MLP, o método DE obteve o menor erro quadrático médio, seguido, respectivamente, pelo método MLP e método dos 3 pontos.

O custo computacional dos três métodos é bastante diferente. O método dos três pontos necessita de apenas 15 operações matemáticas e um tempo de 0,09s para executá-las.

A técnica com DE necessitou de 4s, enquanto que MLP utilizou mais de 16s para finalizar a simulação e obter a curva de tensão.

Dessa maneira, além da precisão e exatidão, deve-se levar em consideração o custo computacional na escolha do método a ser escolhido para estimar a curva de descarga de uma bateria.

Referências Bibliográficas

- Achaibou, N., M. Haddadi e M. Malek, “Modeling of lead acid batteries in PC systems”, *Energy Procedia*, v.18, n. 18, p. 538-544, 2012.
- Andersson, A., “Simulation model for improved battery lifetime for renewable based energy systems for rural areas”, Technical Report, Denmark, 2006.
- Bindner, H., T. Cronim, P. Lundsager, J.f. Manwell, U. Abdulwahid e I. Baring-Gould, “Lifetime modeling of lead acid batteries” Technical Report, DTU National Laboratory for Sustainable Energy, 2005.
- Ceraolo, M., “New dynamical models of lead-acid batteries”, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1184-1190, 2000.
- Cervone, A., M.C. Falvo e E. Santini, “A fast and accurate battery model suitable for production profiling in smart grids”, 8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MEDPOWER, v. 1, n.1, p. 1-6, 2012.
- Chagas, M.W.P., “Novas tecnologias para avaliação de baterias”, Dissertação de mestrado Instituto LACTEC 2007.
- Durr, M., “Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system”, *Journal of Power Sources*, v. 161, n. 2, p. 1400-1411, 2006.
- Engelbrecht, A.P., “Computational Intelligence – An Introduction”, 2nd edition, University of Pretoria, John Wiley, 2007.
- Jackey, R.A., “A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection”, 2007.
- Kaiser, R., “Development of battery lifetime models for energy storage systems in renewable energy systems”, RES, 2003.
- Ketzer, M.B., A.M.N. Lima, A.C. Oliveira e C.B. Jacobina, “Evaluating circuit topologies for battery charge equalization”. Conferência Internacional IEEE/IECON, 743-748, nov, 2013.
- Kim, J.H., “Modeling of battery for EV using EMTP/ATPDRAM”, *Journal of Electrical Engineering and Technology – JEET*, v. 9, n. 1, p. 98-105, 2014.
- Leao, J.F.A., Hartmann, L.V., M. Correa e A.M.N. Lima, “Lead-acid battery modeling state of charge monitoring” Conferência Internacional IEEE/APECC 2010, 239-243, fev, 2010.
- Liaw, B.Y., K.P. Bethune e X.G. Yang, “Advanced integrated battery testing and simulation”, *Journal of Power Sources*, v. 110, n. 2, p. 330-340, 2002.
- Rezvanianiani, M.S., “Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electrical vehicle EV safety and mobility”, *Journal of Power Sources*, v. 256, n. 1, p. 110-122, 2014.
- Schiffer, J., D.U. Sauer, H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager e R. Kaiser, “Model prediction for ranking leadacid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems”, *Journal of Power Source*, 168, 66-78, 2007.
- Schneider, K.K., “Modelos analíticos na predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis”, Dissertação de mestrado Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2010.
- Seaman, A., T.S. Dao e J. McPhee, “A survey of mathematics-based equivalent circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation”, *Journal of Power Sources*, v. 256, n. 1, p. 410-423, 2014.
- Shepherd, C.M., “Theoretical design of primary and secondary cell – part iii – battery discharge equation”, Technical Report, Washington DC, 1963.
- Sousa, J.R.B., “Modelagem e supervisão de bancos de baterias em sistemas de múltiplas fontes de energia utilizando redes de petri”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande UFCG, 2008.
- Tremblay, O., L.A. Dessaint e A.I. Dekkiche, “A generic battery model for the dynamic simulation oh hybrid electric vehicles”, Conferência Internacional IEEE/VPPC, 284-289, set, 2007.
- Tremblay, O. e L.A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications”, *World Electric Vehicle Journal*, 1184-1190, mai, 2009.
- Wijewardana, S., “New dynamical battery model for hybrid vehicles”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 4, n. 4, p. 622-631, 2014.