

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Estimação dos Parâmetros do Modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I de uma Bateria utilizando Algoritmo Genético

Marcia de Fatima Brondani¹

Airam Teresa Zago Romcy Sausen²

Paulo Sérgio Sausen³

Manuel Osório Binelo⁴

Departamento de Ciências Exatas e Engenharia, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Modelagem Matemática, Unijuí, Ijuí, RS

Resumo. Neste trabalho é proposta uma metodologia baseada em Algoritmo Genético (AG) para a estimação dos parâmetros do modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I, sendo este utilizado para a modelagem matemática do tempo de vida de baterias de Lítio Íon Polímero (LiPo). A validação do modelo e do método utilizado para a sua parametrização é realizada por meio de uma análise comparativa entre os resultados simulados e os dados experimentais, coletados em uma plataforma de testes. Os resultados obtidos demonstram a acurácia do modelo em predizer o tempo de vida das baterias aqui estudadas, além do bom desempenho do método heurístico AG aplicado ao processo de parametrização.

Palavras-chave. Estimação de Parâmetros, Tempo de Vida de Baterias, Algoritmos Genéticos, Modelo Elétrico

1 Introdução

A demanda por dispositivos móveis mais eficientes tem impulsionado avanços em tecnologias de baterias recarregáveis. As baterias de Lítio Íon Polímero (LiPo) apresentam alta densidade de energia e de potência, sendo mais leves e mais compactas [5]. No entanto, possuem uma vida útil de aproximadamente 400 ciclos de carga/descarga, o que resulta na substituição mais frequente, implicando assim um maior desperdício de energia por meio da produção e do transporte, bem como, um aumento no descarte [2].

Neste contexto, a predição do tempo de vida de baterias a partir de modelos matemáticos [1, 4, 6, 7] pode contribuir para a otimização do uso e projeto de novas baterias, incorrendo no desenvolvimento de tecnologias de energia sustentável. Dentre os modelos aplicados para esta finalidade, destaca-se o modelo elétrico para Predizer *Runtime*

¹brondani.marcia@gmail.com

²airam@unijui.edu.br

³sausen@unijui.edu.br

⁴manuel.binelo@unijui.edu.br

e Características V-I [1]. Este modelo é capaz de capturar as características elétricas e dinâmicas, tais como, a tensão em circuito aberto, a capacidade utilizável e a resposta transiente [1]. Entretanto, os parâmetros deste modelo são usualmente obtidos por meio de experimentação extensiva, o que torna esta parametrização relativamente empírica [1, 4].

Neste trabalho é proposta uma metodologia baseada em Algoritmo Genético (AG) [3] para a estimação dos parâmetros do modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I, aplicado à modelagem matemática do tempo de vida de baterias de LiPo. O AG proposto e o modelo são implementados no *software Matlab*. A validação do modelo e do método utilizado para a sua parametrização é realizada por meio de uma análise comparativa entre os resultados simulados e os dados experimentais, coletados em uma plataforma de testes.

O restante deste artigo está organizado como segue. Na Seção 2 é apresentado o modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I, bem como são descritas suas equações. Na Seção 3 são apresentados os dados experimentais utilizados para a estimação dos parâmetros e para a validação do modelo. Na Seção 4 é descrita a metodologia proposta para a estimação dos parâmetros baseada em AG. Na Seção 5 são apresentados os resultados das simulações computacionais. E, na Seção 6 é apresentada a conclusão.

2 Modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I

O modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I [1] foi proposto a partir da combinação de modelos baseados em *Runtime* (circuito da esquerda) e em Thevenin (circuito da direita), conforme apresentado na Figura 1. O circuito da esquerda é composto por uma resistência de autodescarga $R_{Self-discharge}$, uma capacitância $C_{Capacity}$ que representa a carga total armazenada na bateria e uma fonte de corrente controlada I_{Batt} . Estes são aplicados para modelar a capacidade, o estado de carga *SOC* e o tempo de vida da bateria. Já o circuito da direita fornece a resposta transiente, sendo constituído por uma resistência R_{Series} , duas redes resistivas capacitivas RC dispostas em paralelo e uma fonte de tensão controlada $V_{OC}(V_{SOC})$. Esta última representa a relação não linear entre a tensão de circuito aberto V_{OC} e o *SOC*, descrito pela tensão V_{SOC} [1].

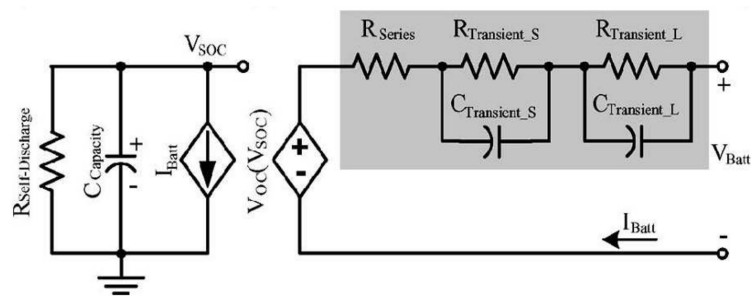


Figura 1: Modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I [1].

Para modelar a resposta transiente são consideradas duas constantes de tempo, de curta e longa duração. Estas são definidas no período de $t_0 < t < t_r$, em que t_0 é o tempo inicial e t_r é o tempo de término do período. Durante o intervalo de $t_0 < t < t_d$, a bateria

é descarregada com uma corrente constante ($I_{Batt} > 0$) e, de $t_d < t < t_r$, ela permanece ociosa ($I_{Batt} = 0$), sendo t_d o tempo final da descarga [4]. As respostas transientes de curta e de longa duração são representadas pelas seguintes resistências e capacitâncias, respectivamente: $R_{Transient_S}$, $C_{Transient_S}$, $R_{Transient_L}$ e $C_{Transient_L}$. Em estado estacionário, $C_{Transient_S}$ e $C_{Transient_L}$ desempenham a função de um circuito aberto, oferecendo uma alta resistência à corrente contínua. No entanto, em condição transiente, estes capacitores se comportam como um curto circuito para o momento transitório, até que estejam totalmente carregados [1].

A capacidade utilizável da bateria é capturada a partir da relação estabelecida entre os componentes $C_{Capacity}$, $R_{Self-discharge}$, R_{Series} , $R_{Transient_S}$ e $R_{Transient_L}$. O cálculo da $C_{Capacity}$ é dado pela equação

$$C_{Capacity} = 3600Capacityf_1(Cycle)f_2(Temp), \quad (1)$$

onde: $Capacity$ é a capacidade nominal, $f_1(Cycle)$ é o fator de correção do número de ciclos e $f_2(Temp)$ é o fator de correção da temperatura.

A variação da capacidade utilizável é causada pela intensidade da corrente de descarga aplicada à bateria, sendo negligenciados outros aspectos que também podem alterá-la, tais como o número de ciclos, a temperatura e o tempo de armazenamento. Logo, o valor da $R_{Self-discharge}$ é desconsiderado, e ambos os fatores de correção são iguais a 1. Desta forma, diferentes correntes aplicadas a $C_{Capacity}$ implicam as quedas de tensão ao longo do resistor equivalente, que corresponde à soma das resistências R_{Series} , $R_{Transient_S}$ e $R_{Transient_L}$. Isto resulta em um conjunto de valores de SOC medidos distintamente de acordo com o decaimento da tensão, diminuindo gradativamente a capacidade utilizável da bateria durante a sua descarga [1].

Assim, a tensão de saída V_{Batt} pode ser expressa como

$$V_{Batt} = V_{OC}(V_{SOC}) - I_{Batt}R_{Series} - V_{Transient}(t), \quad (2)$$

onde: $V_{Transient}(t)$ é a tensão transiente, calculada a partir da equação

$$V_{Transient}(t) = V_{Transient_S}(t) + V_{Transient_L}(t), \quad (3)$$

onde: $V_{Transient_S}(t)$ é a tensão transiente de curta duração e $V_{Transient_L}(t)$ é a tensão transiente de longa duração, ambas dadas pelas equações (4) e (5), respectivamente,

$$V_{Transient_S}(t) = \begin{cases} R_{Transient_S}I_{Batt}(t) \left[1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_S}} \right], & t_0 < t < t_d \\ V_{Transient_S}(t_d)e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_S}}, & t_d < t < t_r \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{Transient_L}(t) = \begin{cases} R_{Transient_L}I_{Batt}(t) \left[1 - e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau_L}} \right], & t_0 < t < t_d \\ V_{Transient_L}(t_d)e^{-\frac{(t-t_d)}{\tau_L}}, & t_d < t < t_r \end{cases} \quad (5)$$

onde: $V_{Transient_S}(t_d)$ é a tensão transiente de curta duração no tempo final da descarga, $\tau_S = R_{Transient_S}C_{Transient_S}$, $V_{Transient_L}(t_d)$ é a tensão transiente de longa duração no tempo final da descarga e $\tau_L = R_{Transient_L}C_{Transient_L}$ [4].

Os elementos V_{OC} e R_{Series} da equação (2), assim como $R_{Transient_S}$, $C_{Transient_S}$, $R_{Transient_L}$ e $C_{Transient_L}$, que modelam a resposta transiente de tensão, são funções de SOC , descritas pelas seguintes equações

$$V_{OC}(SOC) = a_0e^{-a_1SOC} + a_2 + a_3SOC - a_4SOC^2 + a_5SOC^3, \quad (6)$$

$$R_{Series}(SOC) = b_0e^{-b_1SOC} + b_2, \quad (7)$$

$$\begin{cases} R_{transient_S}(SOC) = c_0e^{-c_1SOC} + c_2, \\ C_{transient_S}(SOC) = d_0e^{-d_1SOC} + d_2, \\ R_{transient_L}(SOC) = e_0e^{-e_1SOC} + e_2, \\ C_{transient_L}(SOC) = f_0e^{-f_1SOC} + f_2. \end{cases} \quad (8)$$

A metodologia adotada na literatura para a estimação dos 21 parâmetros das equações (6), (7) e (8) é baseada na técnica de ajuste de curvas, utilizando 4 curvas pulsadas de descargas de baterias [1]. Neste trabalho é proposto um outro método de estimar estes parâmetros a partir da aplicação de AG, tendo como referência uma única curva pulsada de descarga. Esta curva é gerada por meio de dados experimentais, apresentados a seguir.

3 Dados experimentais

Neste trabalho são utilizados dados experimentais para a estimação dos parâmetros do modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I, da mesma forma que para a validação do mesmo. Estes dados são referentes às baterias de LiPo novas, modelo *PL383562 – 2C*, coletados a partir de uma plataforma de testes desenvolvida pelo Grupo de Automação Industrial e Controle (GAIC), da Unijuí.

Os testes experimentais realizados para a parametrização do modelo são baseados no procedimento adotado por [1], que considera uma curva de descarga pulsada contendo de 6 a 10 pulsos. Desta forma, para este estudo é utilizada a curva de descarga pulsada de 400 mA, com o período de 1300 s, em que nos primeiros 700 s é aplicada a corrente de descarga, e nos 600 s restantes a bateria permanece ociosa. Esta sequência é repetida até a bateria atingir a tensão de *Cutoff* correspondente a 3 V. Destaca-se que esta curva é escolhida a partir de 6 ensaios realizados com diferentes baterias, os quais apresentam comportamentos muito semelhantes e as curvas geradas ficam muito próximas.

Para a validação do modelo é considerado um conjunto de perfis de descargas constantes, que abrange correntes baixas, médias e altas, respeitando a capacidade de 800 mA, limitada pelas baterias aqui estudadas. Logo, são definidos 4 perfis: 100 mA, 250 mA, 500 mA e 650 mA. Para cada um destes perfis são realizados 6 ensaios, obtendo o tempo de vida experimental (t_{ve}) de cada ensaio e o t_{ve} médio do perfil. Este último é usado como métrica para o cálculo do erro do modelo. Estas baterias também são descarregadas até atingirem a tensão de 3 V.

4 Estimação de parâmetros

A estimação dos parâmetros do modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I é realizada a partir da aplicação do método heurístico AG [3]. Considera-se, na proposição deste algoritmo, a interação entre os dados experimentais e os resultados simulados pelo modelo análoga ao meio ambiente. O código genético de cada indivíduo corresponde aos 21 parâmetros do modelo que necessitam ser estimados, apresentados nas equações (6)-(8). Cada parâmetro é um cromossomo, discretizado em quatro dígitos decimais, que são os genes. A aptidão de cada parâmetro está diretamente relacionada à função objetivo F , que caracteriza este problema de otimização, dada pela equação

$$F = f_c \left(\int_0^{t_{ve}} |V_{Batt} - V_e| dt \right) + f_v (|t_{vs} - t_{ve}|), \quad (9)$$

onde: f_c é o fator de importância da curva experimental, t_{ve} é o tempo de vida experimental (s), V_{Batt} é a tensão simulada pelo modelo (V), V_e é a tensão experimental (V), f_v é o fator de importância do tempo de vida experimental e t_{vs} é o tempo de vida simulado pelo modelo (s).

Desta forma, o AG é implementado no *software Matlab* e é inicializado com uma população aleatória, definida de acordo com os limites mínimos e máximos estabelecidos para cada parâmetro. A cada iteração do AG, os valores dos parâmetros otimizados são informados ao modelo e este é executado, fornecendo a curva simulada que descreve o decaimento da tensão em função do tempo e conseqüentemente, o tempo de vida simulado ao atingir o nível de *Cutoff*. Além dos dados simulados, é utilizada como referência a curva experimental pulsada de 400 mA, com o respectivo tempo de vida experimental.

A função aptidão é fundamentada no método de mapeamento Escala de Potência, sendo obtida a partir do inverso de F (equação (9)), ou seja, F^{-1} . Isto significa que quanto menor é o valor de F , maior é a aptidão dos parâmetros para o caso estudado. Assim, ao atingir o critério de parada, o AG fornece os valores dos 21 parâmetros do modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I otimizados, contidos no indivíduo mais apto. Ressalta-se que a configuração do AG se dá de maneira empírica por meio da realização de vários testes, considerando aspectos fundamentais tais como a estabilidade, a convergência, a qualidade das respostas e os limites impostos pelo custo computacional do algoritmo.

Com a definição dos parâmetros, o modelo é testado para diferentes perfis de descargas, incluindo o perfil de descarga utilizado para a estimação dos seus parâmetros. Este procedimento é realizado a fim de validar a metodologia proposta para a estimação dos parâmetros, bem como verificar a acurácia do modelo ao aplicá-lo para simular o tempo de vida de baterias de LiPo.

5 Resultados

Nesta seção são apresentados os principais resultados das simulações realizadas com o modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I utilizando os parâmetros otimizados pelo AG. Para a análise dos resultados, considera-se a diferença entre os tempos de vida

simulados e os tempos de vida experimentais, obtida a partir do cálculo do erro relativo percentual.

A validação da estimação dos parâmetros é exposta na Figura 2, que contém a curva experimental pulsada utilizada na parametrização do modelo, ou seja, de 400 mA; e a curva simulada gerada a partir da aplicação deste mesmo perfil de descarga pulsada ao modelo. Nota-se que o comportamento da curva simulada assemelha-se à curva experimental, estando ambas muito próximas. Neste caso, o t_{vs} é de 12300 s e t_{ve} é de 12338 s, apresentando o erro significativamente baixo de 0,30%.

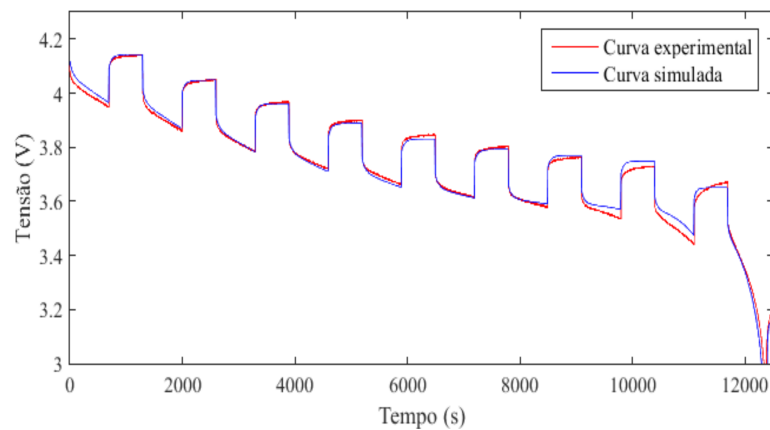


Figura 2: Validação da estimação de parâmetros.

O modelo é submetido a 4 diferentes perfis de descargas constantes a fim de validá-lo. Na Tabela 1 são apresentados estes perfis com seus respectivos tempos de vida simulados e experimentais médios, evidenciando os erros do modelo. O menor erro é obtido para o perfil de 500 mA devido a este se encontrar mais próximo da intensidade da corrente usada para estimar os parâmetros do modelo. Ao considerar as simulações realizadas para estes perfis, percebe-se que este modelo apresenta erros consideravelmente baixos, obtendo a média de 0,71%.

Tabela 1: Validação do modelo.

Perfis (mA)	t_{vs} (s)	t_{ve} médio (s)	Erro (%)
100	28030	27819,6	0,75
250	11110	11244,8	1,19
500	5495	5472,6	0,40
650	4195	4217	0,52

6 Conclusão

Neste trabalho foi realizada a estimação dos parâmetros do modelo para Predizer *Runtime* e Características V-I a partir da aplicação do método heurístico AG, sendo este modelo utilizado para a modelagem matemática do tempo de vida de baterias de LiPo. Assim como o AG proposto, o modelo também foi implementado na ferramenta computacional *Matlab*. A validação do modelo e do método utilizado para a parametrização foi feita por meio da análise comparativa entre os resultados simulados e os dados experimentais, adquiridos na plataforma de testes. Diante dos resultados obtidos, verifica-se que o modelo é capaz de predizer com acurácia o tempo de vida das baterias de LiPo, e que a utilização do AG sistematiza o processo de parametrização sem que este dependa de aspectos subjetivos, assim como ocorre na análise visual de curvas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes, pelo apoio financeiro e à Unijuí e o GAIC, pela infraestrutura.

Referências

- [1] M. Chen and G. Rincón-Mora, Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 504-511, Junho, 2006.
- [2] G. P. Hammond, T. Hazeldine, Indicative energy technology assessment of advanced rechargeable batteries, *Applied Energy*, vol.138, pp. 559-571, 2015.
- [3] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, USA, 1975.
- [4] T. Kim, W. Qiao, A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics an nonlinear capacity effects, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 26, pp. 1172-1180, 2011.
- [5] W. H. Meyer, *Polymer Electrolytes for Lithium-Ion Batteries*, *Advanced Materials* 10, pp. 439-448, 1998.
- [6] D. Rakhmatov and S. Vrudhula, An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems, National Science Foundation's State/Industry/University Cooperative Research Centers (NSFS/IUCRC), Center for Low Power Electronics (CLPE), pp. 1-6, 2001.
- [7] V. Ramadesigan, P. W. C. Northrop, S. De, S. Santhanagopalan, R. D. Braatz, V. R. Subramanian, Modeling and simulation of lithium-ion batteries from a systems engineering perspective, *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 159, pp. 31-45, 2012.