

Representação do envelhecimento no modelo de uma bateria de chumbo-ácido

Eduardo G. Souza ^{*,***} Saulo O. D. Luiz ^{**,***}
Antonio M.N. Lima ^{**,***}

** Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (e-mail: eduardo.guimaraes@itemm.org.br).*

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (e-mail: saulo@dee.ufcg.edu.br)*

**** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (e-mail: amnlima@dee.ufcg.edu.br)*

Abstract: This work aims to build a model for representing the state of health, state of charge, open-circuit voltage, and internal resistance of a lead-acid battery over its lifetime under different temperature conditions. The model is composed of a state of charge submodel, an electrical submodel, and lookup tables. The model parameters are estimated, and the lookup tables are populated based on experimental data collected from battery aging tests. By using the proposed model, it is possible to predict, with reasonable accuracy, the state of health, the state of charge, the open-circuit voltage, and the internal resistance of the battery over its lifetime.

Resumo: Este trabalho visa construir um modelo para representar o estado de saúde, estado de carga, tensão de circuito aberto e resistência interna de uma bateria chumbo-ácido ao longo de sua vida útil sob diferentes condições de temperatura. O modelo é composto por um submodelo de estado de carga, um submodelo elétrico e tabelas de pesquisa. Os parâmetros do modelo são estimados, e as tabelas de pesquisa são preenchidas com base em dados experimentais coletados de testes de envelhecimento da bateria. Utilizando o modelo proposto, é possível prever, com razoável precisão, o estado de saúde, o estado de carga, a tensão do circuito aberto e a resistência interna da bateria ao longo de sua vida útil.

Keywords: Lead Acid Battery; Aging; Model; State of Charge; State of Health; Internal Resistance.

Palavras-chaves: Bateria Chumbo-ácido; Envelhecimento; Modelo; Estado de carga; Estado de Saúde; Resistência interna.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de armazenamento de energia permitem criar uma rede elétrica mais resiliente, o que é especialmente importante quando novas fontes renováveis são adicionadas ao sistema elétrico. Uma bateria eletroquímica é um dispositivo de armazenamento de energia que apresenta elevada eficiência e baixo índice de poluição. O tempo de vida de um sistema de armazenamento de energia baseado em baterias eletroquímicas depende da forma como ocorrem os ciclos de carga e descarga das baterias, ou equivalentemente do estado de saúde das baterias.

No modelo de Tremblay et al. (2007), é representada a relação entre o estado de carga e a tensão da bateria durante a descarga. Todavia, este modelo é preciso apenas em baterias novas, pois ele não leva em conta a deterioração ao longo da vida da bateria. Esse modelo não é útil para fazer predições do estado de carga após terem ocorrido vários ciclos de carga e descarga do acumulador. Para corrigir essa limitação, é necessário que o envelhecimento da bateria também seja representado no modelo.

Usando o modelo de Ahmed et al. (2015), é possível determinar o fim de vida e o estado de saúde de uma bateria que é submetida a múltiplos ciclos de carga e descarga (ciclos iguais) sob as mesmas condições ambientais. Nesse caso, os autores definiram um mapa com um fator de severidade que inclui variáveis relacionadas à dinâmica da bateria, tais como entradas externas e fatores conhecidos de envelhecimento. No entanto, esse modelo não contempla a dinâmica elétrica da bateria.

Este trabalho propõe um método para incluir o efeito do envelhecimento num modelo matemático de uma bateria de chumbo-ácido. Diferentemente dos trabalhos anteriores, o método e o modelo aqui propostos podem ser usados para prever a vida útil, o estado de carga, a tensão terminal e a resistência interna da bateria. Diferentemente de técnicas de estimação de estado de carga e estado de saúde baseadas em algoritmos de inteligência artificial, tais como filtros de Kalman e Redes Neurais Artificiais, neste trabalho foi apresentado como utilizar os dados experimentais coletados por meio da norma SAE J2801SAE International (2007) para a criação de *Lookup Tables* de estimação de capacidade, resistência interna e tensão de circuito aberto da bateria de chumbo-ácido.

2. DEFINIÇÕES

O estado de carga [*state of charge* (SOC)] de uma bateria é utilizado para descrever a capacidade remanescente de um acumulador eletroquímico. De modo geral, o SOC é utilizado na estratégia de gerenciamento da bateria e, desse modo é necessário estimá-lo com precisão, para permitir a implementação de políticas de proteção da bateria e prevenir situações de utilização que ofereçam risco à sua vida útil. O SOC também pode ser calculado pela razão entre a capacidade de fornecer corrente ($Q(t)$) e a capacidade nominal (C_n), ou seja,

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{C_n}, \quad (1)$$

em que t é o tempo contínuo. A capacidade nominal é fornecida pelo fabricante e representa a máxima quantidade de carga que pode ser armazenada em uma bateria, em ampère-hora (Ah).

O estado de saúde [*state of health* (SOH)] é um indicador da capacidade atual da bateria carregada em comparação com sua capacidade inicial. O SOH é diretamente relacionado ao tempo de vida útil e pode ser utilizado na definição de políticas de manutenção de sistemas eletrônicos baseados em baterias. O SOH reflete o estado geral da bateria e sua capacidade, considerando fatores como carga, resistência interna, tensão e auto descarga. O SOH é a razão entre a capacidade de descarga de uma bateria completamente carregada ($C_c(t)$) e a sua capacidade nominal (C_n), ou seja,

$$SOH(t) = \frac{C_c(t)}{C_n}. \quad (2)$$

2.1 Envelhecimento da bateria

O envelhecimento de uma bateria é a perda da capacidade de armazenar energia ao longo do seu tempo de utilização. Essa diminuição da capacidade de armazenamento decorre das reações químicas que ocorrem no acumulador, as quais resultam na degradação dos materiais contidos na bateria, tais como: a perda de H_2O , que aumenta a densidade do eletrólito; sulfatação das placas, que é o fenômeno onde o sulfato de chumbo não se transforma em material ativo, ou seja, a bateria não retém energia; e corrosão das grades positivas, que ocorre durante a transformação de sulfato de chumbo em dióxido de chumbo durante a recarga. Esses efeitos ocorrem durante os ciclos de carga e descarga da bateria e são influenciados diretamente pela temperatura e os perfis de tensão e corrente durante a carga e a descarga. Essas degradações ocorrem até que a bateria não consiga mais reter energia, fornecer energia suficiente para a aplicação ou ocorra um curto-circuito interno que resulta na diminuição da tensão nos polos do acumulador, que é quando a bateria atinge o fim de sua vida útil.

3. TRABALHOS RELACIONADOS

O comportamento de baterias de chumbo-ácido pode ser representado de diferentes maneiras (Hartmann, 2013). Os principais modelos são (Freitas, 2016):

- Modelos analíticos nos quais utiliza-se expressões para cálculo da capacidade e do tempo de vida. Apesar de terem uma boa acurácia, geralmente estas expressões são complexas e de difícil implementação.

- Modelos eletroquímicos que são baseados em processos químicos que ocorrem na bateria, em geral com grande detalhamento. Esses modelos tem uma grande acurácia, porém são de difícil implementação pelo elevado número de parâmetros utilizados.
- Modelos de tempo de vida que utilizam o histórico da bateria são modelos que necessitam de grande quantidade de dados de utilização e possuem pouca precisão devido à variabilidade no processo produtivo.
- Modelos análogos que utilizam parâmetros externos da bateria para representação de um circuito elétrico equivalente composto por fontes de tensão ou de corrente, resistores, capacitores e indutores (Freitas, 2016). Esses modelos geralmente determinam o SOC e a tensão nos terminais da bateria, sem considerar seu envelhecimento.

Neste trabalho, utiliza-se um modelo do tipo análogo para representar a dinâmica elétrica da bateria. Essa escolha vem do fato de que os parâmetros desse modelo podem ser estimados a partir de medições de grandezas externas, tais como tensão e corrente nos terminais da bateria. Vale destacar que os parâmetros deste tipo de modelo variam devido ao envelhecimento descrito na seção anterior. Os modelos do tipo análogo, se enquadram em três categorias (Chen and Rincón-Mora, 2004):

- Modelos de impedância que utilizam um resistor e um indutor para representar a resistência e a indutância internas da bateria, e uma impedância Z_{ac} para representar o comportamento eletroquímico da bateria, com a finalidade de representar o modelo elétrico como mostrado na Figura 1.
- Modelos de Thévenin que utilizam dois resistores, um em paralelo à fonte de tensão para representar a auto descarga, e outro em série para representar a resistência interna da bateria, além de uma associação em paralelo de um resistor e um capacitor para o comportamento transiente, como representado na Figura 2.
- Modelos de *runtime* que são compostos por uma rede de circuitos elétricos que simulam a resposta DC e a vida útil do acumulador, como apresentado na Figura 3.

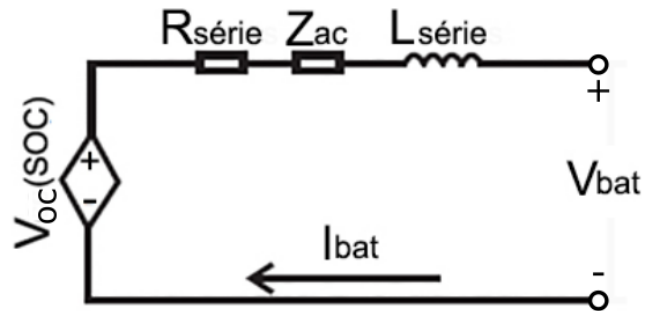


Figura 1. Modelo baseado em impedância (Neves, 2018).

4. MODELO PROPOSTO

O modelo proposto nesse trabalho é composto por um submodelo que descreve o estado de carga, um submodelo elétrico e tabelas de pesquisa. Os parâmetros do modelo foram estimados e as tabelas de pesquisa foram

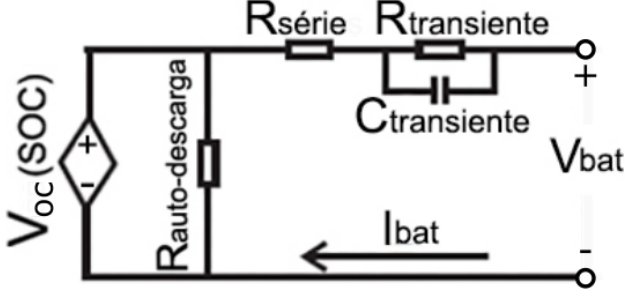


Figura 2. Modelo baseado no equivalente de Thevenin (Neves, 2018).

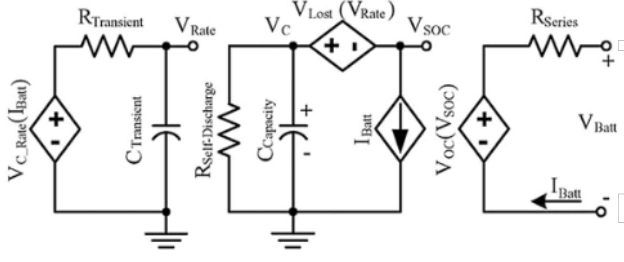


Figura 3. Modelo de *runtime* (Neves, 2018).

preenchidas a partir de dados experimentais de ensaios de envelhecimento realizados nesse trabalho.

4.1 Premissas de modelagem

A principal premissa é que o modelo proporcione uma estimativa fiel à realidade de utilização de uma bateria chumbo-ácido em um ambiente tropical, funcionando em estado parcial de carga. Além dessa premissa básica, o desenvolvimento do modelo matemático proposto nesse trabalho foi pautado pelo seguinte conjunto de premissas:

- (1) As entradas são a corrente da bateria e a temperatura ambiente. A temperatura foi escolhida como variável, pois Ahmed et al. (2015) comprovou sua elevada influência no tempo de vida da bateria.
- (2) As saídas são as estimativas de tensão de circuito aberto, a tensão nos terminais da bateria, resistência interna, estado de carga e estado de saúde.
- (3) O modelo deve conter a representação de circuito elétrico equivalente da bateria para permitir a estimação da tensão nos terminais da bateria.
- (4) Os dados experimentais foram coletados a partir de ensaios com uma bateria de chumbo-ácido de 70Ah, pela disponibilidade de amostras para ensaios de validação.

4.2 Capacidade de descarga

A capacidade de descarga C_c de uma bateria completamente carregada é uma função da contagem do *ciclo* atual e da temperatura T , ou seja,

$$C_c(t) = f_1(\text{ciclo}, T(t)), \quad (3)$$

em que *ciclo* é a quantidade de vezes que a bateria passou pelo processo de carga e descarga por completo. Cada ciclo é composto por uma descarga de 50% de profundidade de descarga, que é um valor de descarga utilizado no mercado automotivo para ensaios de vida útil em baterias,

e uma recarga completa. Neste trabalho, a capacidade atual da bateria é representada pela *lookup table* (LUT) de capacidade, cujas entradas são o ciclo atual da bateria e a temperatura instantânea. A temperatura deve ser incluída por ser um fator determinante no envelhecimento e na capacidade de cada ciclo da bateria; a temperatura foi controlada durante os ensaios de laboratório.

4.3 Estado de saúde

O estado de saúde *SOH*, baseado no padrão automotivo, é representado por

$$SOH(t) = \frac{C_c(t) - (0,8C_n)}{0,2C_n} \times 100\%. \quad (4)$$

Numa bateria nova, a capacidade de descarga C_c é igual a 100% da capacidade nominal C_n , e o estado de saúde é 100%. No fim de vida útil da bateria, considera-se que a capacidade de descarga C_c é 80% da capacidade nominal C_n , e o estado de saúde é 0%.

4.4 Circuito equivalente

Neste trabalho foi considerado um modelo elétrico composto por uma fonte de tensão V_{OCV} [*open circuit voltage* (OCV)] em série com um resistor R_{in} . Considera-se que os valores de V_{OCV} e de R_{in} são funções do estado de saúde e da temperatura, ou sejam,

$$R_{in}(t) = f_2(SOH(t), T(t)), \quad (5)$$

e

$$V_{OCV}(t) = f_3(SOH(t), T(t)). \quad (6)$$

As funções $f_2(\cdot, \cdot)$ e $f_3(\cdot, \cdot)$ foram implementadas por intermédio de *lookup tables*.

Mediante essas considerações, a tensão nos terminais da bateria pode ser calculada por

$$V_{bat}(t) = V_{OCV}(t) - R_{in}(t)i(t), \quad (7)$$

na qual $i(t)$ é corrente que circula pela bateria.

4.5 Estado de carga

O estado de carga é estimado utilizando-se o modelo de Neves et al. (2016). Para isso, é determinada inicialmente a *carga aparentemente perdida* $\sigma(t)$, igual à soma da integral da corrente elétrica no tempo e a carga indisponível na bateria devido à difusão dos portadores de carga no eletrólito. A função de transferência entre a corrente da bateria $I(s) = \mathcal{L}[i(t)]$ e a carga aparentemente perdida $\Sigma(s) = \mathcal{L}[\sigma(t)]$ é apresentada em (8), em que o parâmetro β é relacionado à taxa de difusão dos portadores de carga. A *carga disponível* $a(t)$ é igual a $C_c(t) - \sigma(t)$. Finalmente, o *estado de carga* $SOC(t)$ em (9) é o percentual da capacidade disponível para descarga em relação à capacidade de descarga de uma bateria totalmente carregada.

$$\frac{\Sigma(s)}{I(s)} = \frac{1}{s} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{s + \beta^2 m^2} \quad (8)$$

$$SOC(t) = \frac{a(t)}{C_c(t)} \times 100\% \quad (9)$$

5. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Na coleta de dados experimentais considerou-se um lote de baterias de 70Ah que são utilizadas no mercado automotivo nacional. No planejamento dos experimentos considerou-se que temperaturas de operação variavam entre 10 °C e 50 °C, representando a faixa de temperaturas típica do vão motor de um veículo padrão.

5.1 Materiais e métodos

Foram realizadas cargas e descargas num lote de teste com 9 baterias de 70Ah e foram escolhidas as temperaturas de 20 °C, 30 °C e 45 °C. As baterias do lote foram divididas em três grupos de três amostras, um para cada classificação de temperatura. Todas as amostras em cada temperatura foram submetidas à mesma rotina de testes, e ao final a média das três que ficaram na mesma condição de temperatura foi considerada como um valor comum.

Para os ensaios de envelhecimento deste trabalho, onde são realizadas cargas, descargas e testes de capacidade, foram utilizados módulos cicladores programáveis chamados de Digatron, fabricados pela *Digatron Power electronics*, uma empresa especializada nesse tipo de equipamento. Eles possuem a funcionalidade de impor tensão ou corrente na bateria de maneira a controlar os parâmetros de carga e descarga, sendo sua precisão de 0,1V e 0,01A. Assim foi possível envelhecer a bateria programando o equipamento para seguir a norma de envelhecimento escolhida. O multímetro FLUKE 289 TRUE RMS foi utilizado para a medição da resistência interna das baterias.

Banhos térmicos foram utilizados para manter a temperatura desejada nas baterias durante os ensaios realizados. Esses banhos são ambientes fechadas com circulação de água com temperatura controlada, onde as baterias permanecem com 80% de corpo imerso em água, assim garantindo uma homogeneidade térmica no eletrólito.

No estudo do envelhecimento adotou-se o procedimento de ciclagem (carga e descarga) preconizado na norma SAE J2801SAE International (2007). Essa norma determina que o procedimento deve ser encerrado após uma determinada quantidade de repetições ou quando ocorrer alguma falha (o fim da vida útil da bateria). Tendo em vista que o presente estudo visa determinar a vida útil da bateria e não a quantidade de ciclos necessários para homologação do produto, os experimentos foram realizados até o fim da vida útil da bateria. No procedimento de ciclagem adotado há uma descarga de 50% de SOC e em seguida uma recarga para obter 100% de SOC. Nesse caso, o SOC é computado a partir da última leitura de capacidade da bateria e o critério de falha é o mesmo do padrão automotivo, ou seja, uma capacidade menor do que 80% da nominal ou uma tensão muito baixa que não possibilite continuar a descarga.

Na Figura 4 é representado o diagrama do experimento para a descarga. É conectada uma fonte de corrente aos terminais da bateria em série com um amperímetro para a determinação da corrente drenada da bateria e seu SOC ao longo da descarga. Na Figura 5 são representados os diagramas do experimento para a carga. É conectada uma fonte de corrente aos terminais da bateria no início da

carga, durante a qual a tensão da bateria cresce continuamente até um valor em que se troca automaticamente a fonte de corrente por uma fonte de tensão. Esta carrega a bateria até o final do processo de carga, durante o qual a corrente decresce continuamente.

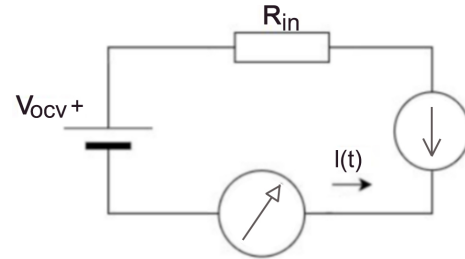


Figura 4. Diagrama do experimento para a descarga.

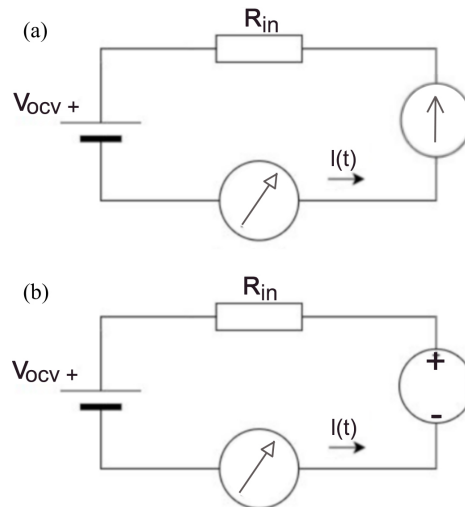


Figura 5. Diagrama do experimento para a carga: (a) início da carga com corrente constante; (b) restante da carga com tensão constante.

Como o procedimento de ciclagem é contínuo e as medições de determinadas quantidades só podem ser realizadas com a bateria fora de teste, definiu-se que seria feita uma coleta de capacidade, massa, resistência interna e tensão de circuito aberto a cada 3600 ciclos; repetindo-se essas medições até o fim de vida útil da bateria. Após cada coleta é efetuada uma recarga completa, a qual demanda 24 h.

Os valores médios de C_c , R_{in} , V_{OCV} e da massa são apresentados nas Tabelas 1, 2, 3, e 4, respectivamente. Verifica-se na Tabela 1 que a perda de C_c foi mais severa para $T = 45^\circ\text{C}$. Houve aumento de V_{OCV} e de R_{in} . O aumento de V_{OCV} pode ser explicado pela perda de massa da bateria e o aumento de R_{in} é devido à corrosão. Houve perda de massa da bateria a cada etapa de envelhecimento devida à perda de água.

% de envelhecimento	$C_c(t)$ (Ah), 20°C	$C_c(t)$ (Ah), 30°C	$C_c(t)$ (Ah), 45°C
0%	69,25	69,93	68,14
20%	59,53	62,35	61,17
40%	55,48	60,04	58,96
60%	52,46	52,39	53,04
80%	41,72	39,48	35,55
100%	25,98	25,35	15,90

Tabela 1. $C_c(t) \times \%$ envelhecimento.

% de envelhecimento	R_{in} (Ω), 20°C	R_{in} (Ω), 30°C	R_{in} (Ω), 45°C
0%	3,95	3,85	3,80
20%	3,80	3,73	3,88
40%	3,86	3,81	3,83
60%	4,20	4,18	4,12
80%	4,22	4,85	5,16
100%	4,79	6,30	4,02

Tabela 2. $R_{in} \times \%$ envelhecimento.

% de envelhecimento	V_{OCV} (V), 20°C	V_{OCV} (V), 30°C	V_{OCV} (V), 45°C
0%	12,07	12,11	12,10
20%	12,26	12,29	12,27
40%	12,36	12,36	12,36
60%	12,43	12,50	12,46
80%	12,73	12,78	12,87
100%	12,81	12,92	13,03

Tabela 3. $V_{OCV} \times \%$ envelhecimento.

% de envelhecimento	Massa (kg), 20°C	Massa (kg), 30°C	Massa (kg), 45°C
0%	20,382	20,397	20,155
20%	20,124	20,171	19,944
40%	19,723	19,771	19,559
60%	20,124	19,528	19,319
80%	20,171	19,274	19,066
100%	19,944	19,115	18,885

Tabela 4. Massa $\times \%$ envelhecimento.

5.2 Implementação do modelo

O diagrama de blocos do modelo é apresentado na Figura 6. O diagrama foi proposto de forma a representar o fenômeno do envelhecimento, a dependência de parâmetros internos da bateria em relação à temperatura, a dinâmica de difusão de portadores de carga no eletrólito, e a estimação da tensão nos terminais da bateria. As entradas do modelo são a corrente e a temperatura. As saídas do modelo são as estimativas de tensão de circuito aberto, a tensão nos terminais da bateria, resistência interna, estado de carga e estado de saúde. A quantidade de ciclos aos quais a bateria foi submetida é calculada por intermédio do autômato. As expressões (3), (5) e (6) foram implementadas respectivamente por meio das LUTs C_c , R_{in} e V_{OCV} , que foram preenchidas por meio dos dados apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. O SOH é o estado de saúde da bateria, que é 0% quando a capacidade da bateria atinge $0,8C_n$, que indica que ela está fora da janela de uso para o ramo automotivo, que é o foco do trabalho. O SOH é calculado por meio da expressão (4) e é então utilizado como entrada no modelo de Neves para se determinar o estado de carga inicial e também é entrada nas LUTs de resistência interna R_{in} e tensão de circuito aberto V_{OCV} . As saídas destas LUTs são usadas para o cálculo da tensão nos terminais da bateria por meio da expressão (7). As expressões (8) e (9) do modelo de Neves (2018) foram implementadas no bloco denominado Modelo Neves.

Para contar a quantidade de ciclos ao longo da vida do acumulador e assim definir o parâmetro de entrada para a *Lookup Table* de capacidade, é utilizado um autômato cuja entrada é o sinal da corrente [carga (+), descarga (-), repouso (0)]. No autômato, foram representados os possíveis estados que a bateria pode assumir durante sua vida útil, assim como as possíveis transições entre os estados. A saída do autômato é representada em (10), onde $X = \{carga, descarga, repouso\}$ é o conjunto de estados, E é o conjunto de eventos associados ao autômato, $f : X \times E \rightarrow X$ é a função de transição, $\Gamma : X \rightarrow 2^E$ é a função de eventos ativos e x_0 é o estado inicial.

$$S = (X, E, f, \Gamma, x_0) \quad (10)$$

Nesse trabalho, considera-se que, após uma descarga, acontecerá uma carga que fornece de volta ao acumulador a quantidade total de energia cedida pelo mesmo. O autômato foi desenvolvido considerando que, sempre que uma carga iniciar, a bateria completou um ciclo. A saída do autômato é um contador de ciclos, que serve de entrada para a tabela de capacidade. O autômato tem seis transições descritas na Tabela 5. Qualquer transição para o estado *carga* gatilha a ação de incrementar o contador. O diagrama de estados do autômato é apresentado na Figura 7.

Evento	Transição	Ação
$i > 0$	Repouso $\rightarrow$ Carga	Incrementa contador (+1)
$i > 0$	Descarga $\rightarrow$ Carga	Incrementa contador (+1)
$i < 0$	Repouso $\rightarrow$ Descarga	Mantém contador
$i < 0$	Carga $\rightarrow$ Descarga	Mantém contador
$i = 0$	Carga $\rightarrow$ Repouso	Mantém contador
$i = 0$	Descarga $\rightarrow$ Repouso	Mantém contador

Tabela 5. Tabela de transições do autômato.

5.3 Avaliação do modelo

A avaliação do modelo foi feita por intermédio de quatro simulações computacionais para diferentes perfis de temperatura: uma para cada temperatura de teste (20 °C, 30 °C e 45 °C), e uma com temperatura variável. Nas Figuras 8, 9 e 10 são apresentados os perfis de envelhecimento da bateria para as temperaturas de teste. O SOH inicial da simulação considera o SOH real medido da bateria, que tem uma variação de 5% em relação ao seu valor nominal devido a variações do processo de manufatura. Verifica-se que a tensão nos terminais da bateria muda durante cargas e descargas e seu valor médio aumenta ao longo do tempo. O SOC da bateria varia entre 100% e 50%, correspondendo a uma profundidade de descarga de 50%. A capacidade de descarga da bateria decai ao longo do tempo. A resistência interna é apresentada separadamente na Figura 11, a qual contém os sinais de resistência interna nas simulações a 20°C, 30°C, e 45°C.

Ao analisar os gráficos gerados na simulação, percebemos que a bateria tem um envelhecimento variado de acordo com a temperatura de entrada. É visível que nas simulações em temperaturas mais altas, a capacidade de ciclagem é maior, gerando uma melhor utilização da bateria. Isso se dá pelo fato de que as reações químicas que ocorrem na bateria são em sua maioria exotérmicas e assim, diretamente afetadas pela temperatura. Também deve-se salientar que, ao elevar muito a temperatura, outras reações podem ser favorecidas, como o consumo de água e corrosão de grade, o que diminuiriam a vida da bateria. As simulações também foram além da situação onde obtemos $C_c = 0,8C_n$, para que se possa avaliar baterias que não são utilizadas na indústria automotiva, ou que são utilizadas em aplicações de *Second Life* nas quais ela ainda terá a capacidade de ciclagem por um longo tempo a depender da aplicação.

Na Figura 12, é apresentado o resultado de uma simulação onde os valores de temperatura foram escolhidos de forma aleatória ao longo do tempo de vida da bateria. Esses valores variam de 10 a 50 graus Celsius, que são

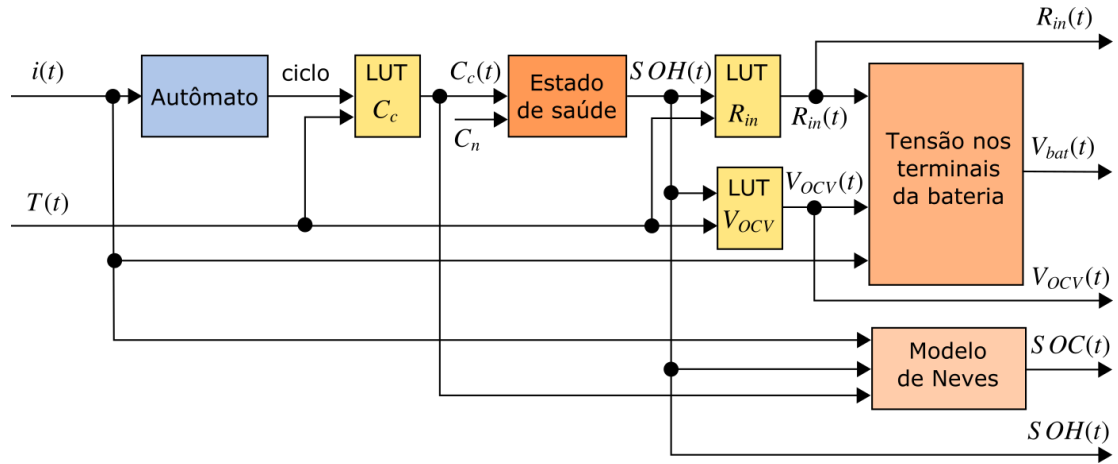


Figura 6. Diagrama de blocos do modelo proposto.

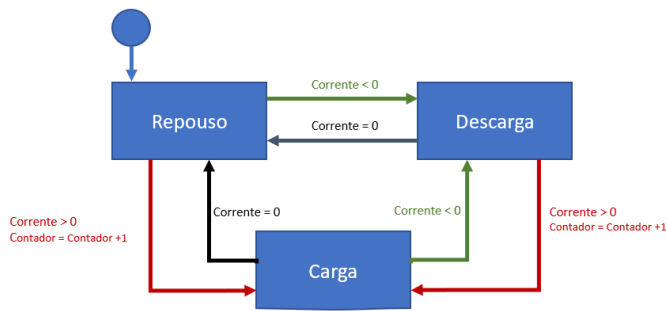


Figura 7. Autômato para contagem de ciclos.

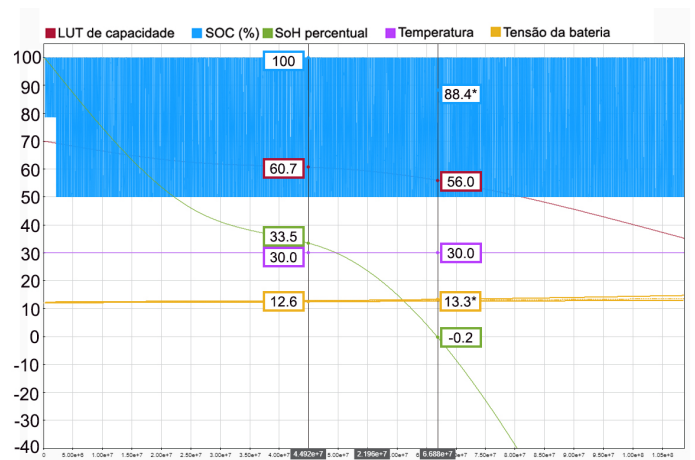


Figura 9. Resultado da simulação @ 30°C.

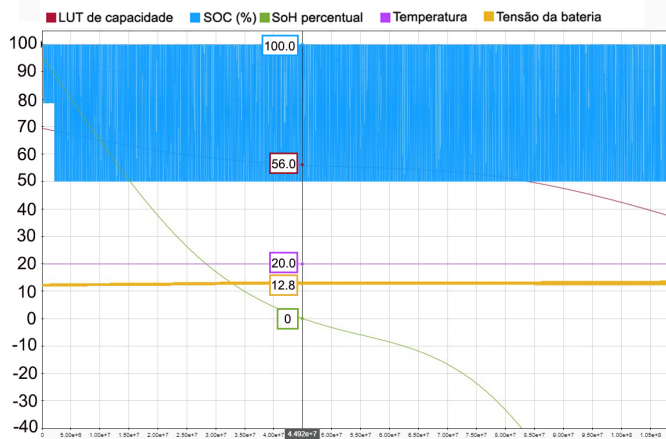


Figura 8. Resultado da simulação @ 20°C.

temperaturas que extrapolam o intervalo considerado no modelo, que é de 20 a 45 graus Celsius. Pode-se perceber que, quando a temperatura varia, o estado de saúde, a capacidade e a tensão de operação também mudam. Em modos gerais, quando existe um aumento de temperatura, a capacidade da bateria também aumenta, e quando ocorre uma diminuição da temperatura, a capacidade da bateria diminui. Quando a bateria é submetida a uma temperatura maior, sua capacidade tem uma pequena elevação em valor, porque ao longo do tempo a bateria será capaz de fornecer uma maior quantidade de energia.

Um comportamento semelhante acontece com o estado de saúde, que também tem variações em seu cálculo de

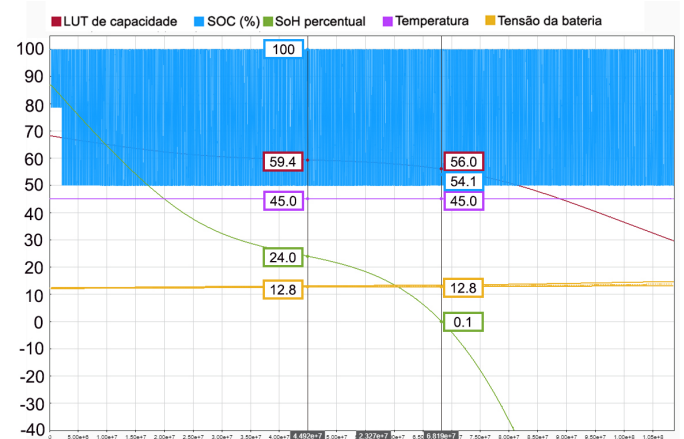


Figura 10. Resultado da simulação @ 45°C.

SOH, porém essas reduções são mais acentuadas e ocorrem de maneira mais rápida. É interessante observar que a bateria submetida a baixas temperaturas sempre terá seu estado de saúde reduzido. Porém, quanto mais baixa a temperatura, mais rapidamente ela envelhece. Caso a temperatura aumente, o acumulador ainda irá conseguir fornecer um pouco de energia.

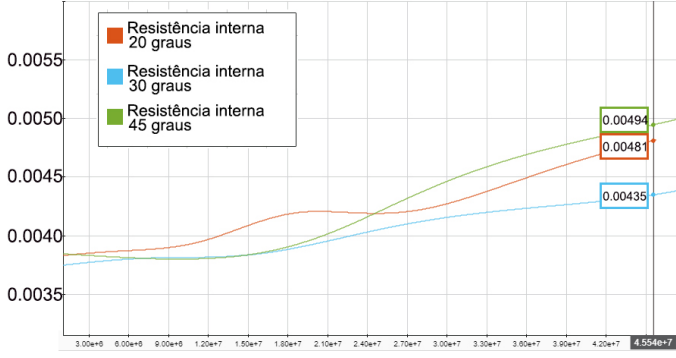


Figura 11. Resultados das resistências internas nas simulações: @ 20°C, @ 30°C, @ 45°C.

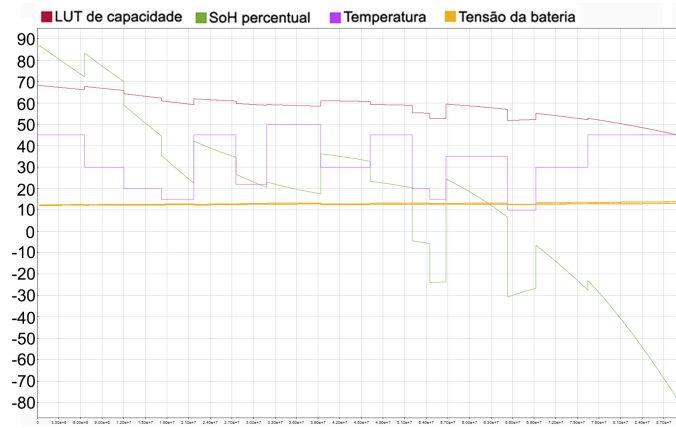


Figura 12. Simulação com variação de temperatura.

Para sabermos a precisão do nosso modelo, também foi calculado o erro para algumas das simulações. A variável utilizada para este cálculo foi a capacidade, que é o valor de maior influência no tempo de vida da bateria. Essa é a variável de maior importância para o cálculo de erro pois a capacidade instantânea define o SOH da bateria, que é utilizado para os cálculos de resistência interna, tensão de circuito aberto e tensão da bateria.

Para calcular o erro de capacidade numa simulação, foi utilizado o modelo em uma temperatura fixa e comparado o valor obtido com o de uma das amostras utilizadas nos experimentos, nas mesmas condições. O erro foi determinado por meio da expressão em (11), onde C_s é a capacidade obtida na simulação em determinado momento da vida útil da bateria e C_m é a capacidade real medida.

$$e_C(t) = \frac{C_s(t) - C_m(t)}{C_m(t)} \times 100\% \quad (11)$$

O menor valor de erro de capacidade foi encontrado para a temperatura de 20°C, como apresentado na Figura 13. Obtivemos uma diferença máxima de 1,19Ah quando a bateria estava em aproximadamente 70% de estado de saúde, o que corresponde a 8,51% da variação total. A 30°C obteve-se o maior valor de erro do modelo, chegando em 1,82Ah em aproximadamente 35% de SOH. Sendo assim, uma variação de 13,06%, como apresentado na Figura 14.

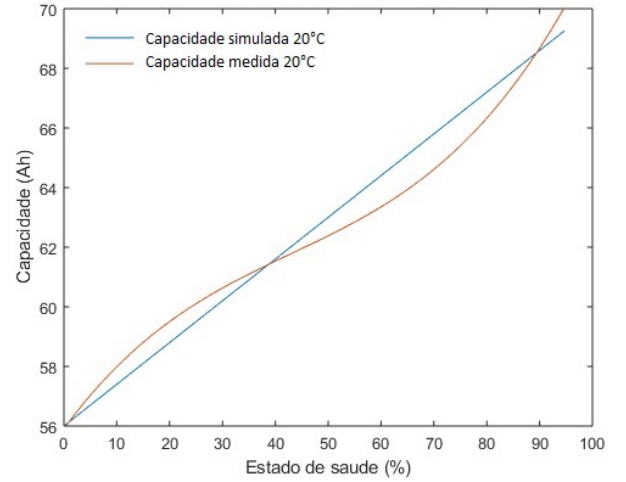


Figura 13. Capacidades simulada e medida @ 20°C.

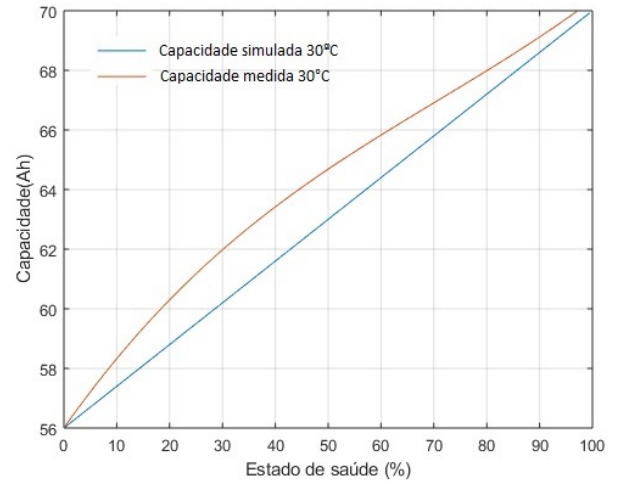


Figura 14. Capacidades simulada e medida @ 30°C.

6. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi criado um modelo de envelhecimento bem definido para baterias de chumbo-ácido com capacidade de 70Ah submetidas a diferentes condições de temperatura. Foi possível simular e determinar a utilização de uma bateria automotiva ao longo de sua vida útil. Utilizando dados experimentais para a criação de *Lookup Tables* e o modelo de Neves et al. (2016), foi possível estimar as variáveis desejadas no modelo. A tensão nos terminais da bateria foi determinada considerando-se um circuito equivalente. O estado de saúde em relação à capacidade nominal da bateria também foi estimado, a partir de uma LUT específica apenas com dados experimentais. A tensão de circuito aberto e a resistência interna também foram estimados ao longo de toda a vida útil do acumulador, independente do estado de carga da bateria. Foram obtidos resultados com erros menores que 15% e que podem fornecer uma previsibilidade do estado de saúde da bateria, identificar qual a capacidade remanescente do acumulador baseado em sua utilização atual e parâmetros de tensão de circuito aberto e resistência interna, os quais afetam diretamente a carga à qual a bateria está

conectada. Todos os resultados abrangem uma faixa de utilização de temperatura de 40°C , que representa bem o ambiente tropical onde essa bateria é majoritariamente utilizada.

A representatividade dos dados experimentais comparados a dados obtidos em campo é válida pois, por se tratar de um ensaio acelerado, foi utilizada a norma que representa bem a profundidade de descarga de um veículo com tecnologia *Start-stop*. Essa norma foi utilizada neste trabalho para forçarmos o modo de falha mais comum em campo em um tempo reduzido, utilizando a mesma profundidade de descarga, apenas com mais repetições em um menor intervalo de tempo. Devido a esse fato, o modelo é baseado em quantidade de ciclos realizados, que é equivalente ao visto em campo e não ao tempo que a bateria leva até chegar em seu fim de vida. O modelo apresentado neste trabalho pode ser adaptado para outras baterias chumbo-ácido, tais como baterias estacionárias, desde que a composição dos materiais (grade, massa e eletrólito) seja a mesma, e o procedimento de envelhecimento siga a norma de envelhecimento específica da aplicação da bateria.

Este trabalho também gerou um novo modelo de estado de saúde para baterias de chumbo-ácido, contendo majoritariamente dados experimentais, para os usuários de acumuladores, que até os dias de hoje se deparam com falha inesperada da bateria em diversas situações. Também trouxe uma contribuição à literatura, na área de simulação de baterias, que carece de modelos experimentais que levem em consideração o estado de saúde da bateria, bem como modelos para aplicações em países com temperaturas elevadas. O erro obtido variou entre aproximadamente 8% e 13%, mas sua precisão ainda pode ser melhorada por meio de ensaios complementares, para se diminuir as incertezas devido a variações no processo produtivo. As curvas de simulação foram similares às curvas médias adquiridas nos testes experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro proporcionado por PPgEE/UFCG, CAPES, CNPq e ITEM.

REFERÊNCIAS

- Ahmed, R., Gazzarri, J., Onori, S., Habibi, S., Jackey, R., Rzemien, K., Tjong, J., and LeSage, J. (2015). Model-based parameter identification of healthy and aged li-ion batteries for electric vehicle applications. *SAE Int. J. Alt. Power.*, 4, 233–247.
- Chen and Rincón-Mora (2004). Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and i-v performance. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, 504–511.
- Freitas, D. (2016). *Contribuições à Estimativa das Características Elétricas e ao Tempo de Vida Útil de Baterias de Chumbo-Ácido*. Master's thesis, UFCG.
- Hartmann, L. (2013). *Armazenamento e conversão de energia utilizando inversores fonte de impedância modificados em sistemas fotovoltaicos de iluminação*. Master's thesis, UFCG.
- Neves, B.H.M., Vilar, B.M.J.C., Silva, F.D.M., Luiz, S.O.D., Silva, J.J., and Perkusich, A. (2016). Battery lifetime estimation by means of an analytical continuous-time model. In *Conf. Rec. of INDUSCON'2016*, 1–5.
- Neves, B. (2018). *Modelo híbrido no tempo contínuo para estimação da autonomia de baterias*. Master's thesis, UFCG.
- SAE International (2007). Comprehensive life test for 12v automotive storage batteries. Standard J2801_200704, Amsterdam, NL.
- Tremblay, O., Dessaint, L., and Dekkiche, A. (2007). A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. In *Conf. Rec. of VPPC'2007*, 284–289.