

Modelos de circuito elétrico de baterias de chumbo ácido para aplicações do cálculo de SOC utilizando Filtro de Kalman

1st Daniel Gallas dos Reis
Engenharia de Controle e Automação
IFRS - Campus Farroupilha
Farroupilha, Brasil
danielgreis_@hotmail.com

2nd Ivan Jorge Gabe
Engenharia de Controle e Automação
IFRS - Campus Farroupilha
Farroupilha, Brasil
ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br

Resumo—Este artigo corresponde ao Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Controle e Automação do IFRS - Campus Farroupilha e tem como objetivo tecer uma análise sobre os diferentes modelos elétricos possíveis para serem usados no cálculo do SOC (State of Charge ou Estado de Carga) de uma bateria de chumbo ácido. O estudo realizado foi direcionado a partir das dificuldades encontradas no TCC I de parametrização do algoritmo do Filtro de Kalman, levando à pesquisas e simulações mais aprofundadas dos circuitos elétricos equivalentes para baterias de chumbo ácido. Os modelos levantados apresentaram-se bastante desafiadores para se parametrizar com parâmetros fixos para a aplicação proposta, levando à apenas uma aproximação do resultado da curva de flutuação de tensão da bateria, sem êxito na representação perfeita do comportamento da bateria utilizada nos testes.

Palavras-chave—State of Charge, filtro de Kalman, modelo elétrico, baterias elétricas.

I. INTRODUÇÃO

Dispositivos eletrônicos portáteis estão cada dia mais acessíveis às mãos dos usuários espalhados pelo mundo, e como consequência, há cada vez mais o uso de baterias para garantir o abastecimento energético desses aparelhos. E mesmo com este aumento exponencial acontecendo há décadas na indústria eletrônica, ainda surgem dúvidas sobre o comportamento e a gestão energética de baterias, devido ao fato dela ser submetida a diferentes, e as vezes imprevisíveis regimes de operação que afetam seu estado de vida.

Os principais fatores observados para melhorar a gestão energética da bateria são o *State of Charge* (Estado de Carga - SOC) e o *State of Health* (Estado de Saúde - SOH) que mostram o estado atual de carga, normalmente em porcentagem de 0% a 100%, e o estado de vida, que pode ser expresso como quantidade de ciclos ou também na escala de 0 a 100%. Parte dos resultados necessários para gerir a energia de uma bateria é proveniente, na maioria dos casos, do método da Integral da Corrente, necessitando do conhecimento prévio dos parâmetros de capacidade, constante de Coulomb e o estado de carga atual da bateria, para determinação do SOC. Porém estes algoritmos geralmente induzem erros de medida

e de ruído para o cômputo do valor de SOC. Outro método muito utilizado na eletrônica moderna é o filtro de Kalman, um algoritmo de predição de estados futuros, passados e presentes, que, no caso da bateria, serve para prever seu estado de carga a partir do modelo matemático da mesma, além de permitir o descarte estatístico de erros e ruídos de medida. Este modelo matemático pode ser algo bastante complexo de ser encontrado e parametrizado [3], mas a partir deste, é possível eliminar estatisticamente os erros de medida e ruídos para a determinação do SOC. Neste trabalho será abordado diferentes tipos de modelos elétricos equivalentes e suas formas de determinação dos componentes internos, sendo analisado para os valores dos parâmetros da bateria do autor, e posteriormente do modelo utilizado para levantamento de dados deste trabalho. Propôs-se encontrar um modelo que pudesse representar de forma coerente a bateria analisada para o presente trabalho, porém, devido a complexidade de parametrização dos métodos estudados, apenas se aproximou do modelo que representava de forma mais semelhante possível o comportamento da bateria.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. Gestão Energética

A gestão energética de uma bateria é realizada por um sistema chamado BMS (Battery Management System), no qual controla o estado de carga e de vida da bateria. Este sistema faz uso de algoritmos matemáticos que monitoram variáveis internas e externas afim de retornar principalmente os valores de SOC e SOH (*State of Charge e State of Health*). Os estados da bateria revelam ao usuário dados necessários para manutenção e usabilidade da mesma, isto é, referencia-se a qualidade atual por meio da contagem de ciclos da bateria e também se entende o melhor momento para recarregá-la e evitar a falta de energia interna. O SOC ou estado de carga é um valor medido normalmente de 0 a 100% correspondente a fração de carga restante nas células da bateria [3]. O SOC é o produto do algoritmo de Kalman aplicado ao modelo elétrico da bateria. Já o Estado de vida da bateria corresponde de forma direta 'a vida útil da bateria, levando em consideração

a contagem da quantidade de ciclos realizados nas células da mesma. Este também faz uso de algoritmos internos do BMS para chegar ao seu resultado procurado.

Ambas análises, do estado de carga e do estado de vida, são importantes para entender a resposta da bateria quando há carga consumindo sua energia. De forma mais geral, a análise mais utilizada por usuários de baterias é o SOC, pois este corresponde a um valor imediato do estado da carga desta, indicando quando é o momento ideal para recarregá-la. Para definição destes métodos de determinação de estado, é importante conhecer os parâmetros internos, e muitas vezes externos também, para que o algoritmo responsável pela determinação deste valor, possa retornar valores mais confiáveis. [7]

B. Modelo Elétrico da Bateria

Para que algoritmos de previsão, tal como o SOC, funcionem corretamente, é necessário o uso de um modelo elétrico equivalente de funcionamento da bateria. Segundo [4], um modelo elétrico equivalente preciso é necessário para estabelecer os parâmetros iniciais para alimentação do Filtro de Kalman. Além disso, [4] ainda adiciona que o modelo equivalente ideal deve seguir os seguintes requisitos: primeiramente, o modelo deve ser capaz de simular as características estáticas e dinâmicas da bateria em condições de trabalho; em seguida, a definição física do modelo deve refletir os comportamentos que se deseja identificar no funcionamento da bateria.

Existem diversos tipos de modelos equivalentes, cada aplicação, por possuir comportamentos distintos, faz uso de diferentes modelos. Dentre eles, são encontrados em algumas bibliografias os seguintes modelos, baseados no circuito equivalente de Thevenin. Dependendo do comportamento a ser averiguado, modelos de "n" circuitos RC série ou paralelo podem ser utilizados. O circuito adotado por [4] trata-se de um par de paralelos RC, considerando a tensão nos terminais da bateria como o somatório das tensões de circuito aberto, do resistor de linha e de cada um dos paralelos de RC, como mostrado na figura 1.

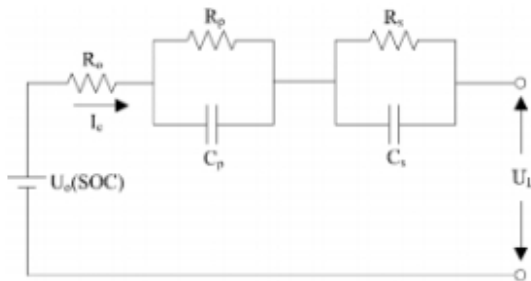


Figura 1. Circuito de modelo elétrico para baterias de chumbo ácido de ordem 2. FONTE: [4]

Segundo [4] é utilizado o método matemático para circuitos elétricos da lei de Kirchoff para se encontrar a corrente elétrica da malha e as tensões sobre cada par de resistor-capacitor. Como pode ser analisado na 1, o sistema de correntes e tensão dos terminais pode ser calculado através da equação 1.

$$\begin{cases} I_c = \frac{U_p}{R_p} + C_p \frac{dU_p}{dt} \\ I_c = \frac{U_s}{R_s} + C_s \frac{dU_s}{dt} \\ U_L = U_o - R_o I_c - U_p - U_s \end{cases} \quad (1)$$

Para continuação do cálculo de previsão, o autor utiliza a metodologia expressa no fluxograma da Figura 2.

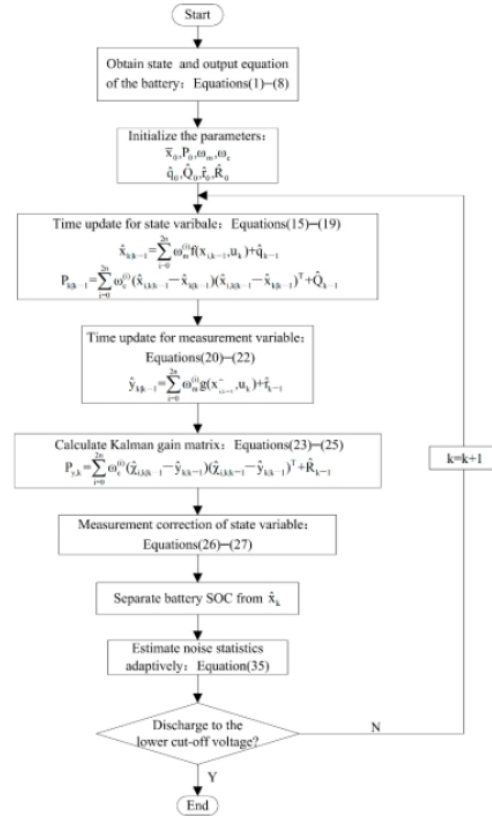


Figura 2. Fluxograma adotado por [4] para utilização do modelo equivalente para previsão de SOC por Kalman. Fonte: [4]

Em diferente aplicação, [8] utiliza o mesmo circuito demonstrado anteriormente, porém este adiciona mais um par de RC na malha, como pode ser visto na Figura 3. Porém o autor direciona seus estudos em torno de um modelo de primeira ordem como fácil de ser estimado, porém que retorna uma tensão de resposta diferente da tensão de resposta real da bateria, enquanto o modelo de segunda ou maior ordem, tem maior dificuldade de ser parametrizado, mas retorna uma resposta mais fiel à tensão real de resposta da bateria.

Em [8] é demonstrada uma metodologia numérica para determinar os modelos equivalentes de circuitos RC em série, baseadas na curva de tensão de relaxamento das baterias. Logo, os dois parâmetros a serem obtidos são:

$$E = v(0^-), R_0 = (v(0^-) - v(0^+))/I \quad (2)$$

E os outros parâmetros principais $(R_1, C_1), \dots, (R_n, C_n)$ devem ser avaliados conforme a resposta da tensão $v(t)$ no período de tempo t , simplificando o modelo à equação:

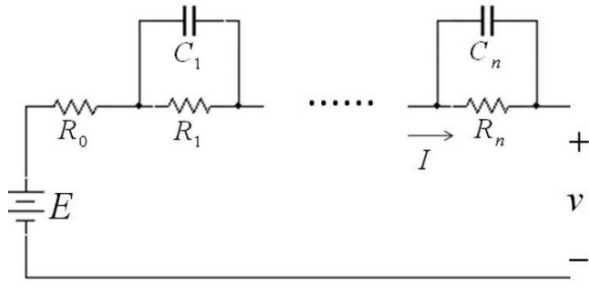


Figura 3. Modelo elétrico equivalente de ordem "n". Fonte: [8]

$$v(t) = E - R_0 I - \sum_{k=1}^n R_k I (1 - e^{-\frac{t}{R_k C_k}}) \quad (3)$$

Para a análise do modelo em terceira ordem, o autor expõe a equação 4 para determinação dos parâmetros do circuito equivalente.

$$v(t) = E - R_0 I - R_1 I (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}) - R_2 I (1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}) - R_3 I (1 - e^{-\frac{t}{R_3 C_3}}) \quad (4)$$

Para encontrar os valores dos seis parâmetros desconhecidos (R_k, C_k), sendo $k = 1, 2, 3$, o autor selecionou seis instantes igualmente espaçados no tempo, sendo $t_k = kT$, onde $k = 1, 2, \dots, 6$, logo:

$$d_1 = e^{-\frac{T}{R_1 C_1}}, d_2 = e^{-\frac{T}{R_2 C_2}}, d_3 = e^{-\frac{T}{R_3 C_3}} \quad (5)$$

Então, para $k = 1, 2, \dots, 6$:

$$v(kT) = E - R_0 I - R_1 I (1 - d_1^k) - R_2 I (1 - d_2^k)$$

$$- R_3 I (1 - d_3^k), k = 1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

A partir disto, o autor assume os seguintes passos para computar os valores desconhecidos:

Assume-se:

$$u_1 = d_1 + d_2 + d_3, u_2 = d_1 d_2 + d_2 d_3 + d_3 d_1, u_3 = d_1 d_2 d_3 \quad (7)$$

1) Computar

$$b_1 = E - R_0 - v(T) e b_k = v((k-1)T) - v(kT) \quad (8)$$

2) Computar

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_3 & -b_2 & b_1 \\ b_4 & -b_3 & b_2 \\ b_5 & -b_4 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} \quad (9)$$

3) Entende-se as raízes de:

$$q^3 - 2u_1 q^2 + (u_1^2 + u_2) q + (u_3 - u_1 u_2) = 0 \text{ sendo } q_1, q_2, q_3 \quad (10)$$

Logo:

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

4) Logo,

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ d_1 & d_2 & d_3 \\ d_1^2 & d_2^2 & d_3^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Então, chega-se a $R_k = \frac{x_k}{I(1-d_k)}$, $C_k = -\frac{T}{R_k \ln d_k}$, com $k = 1, 2, 3$

Para simulação destes valores o autor utiliza o software *Matlab*, compilando o código anexo no apêndice A.

Além destes há também autores que utilizam malhas com apenas um par de RC, para aplicações de modelos onde apenas o SOC deve ser estimado, utilizando um modelo mais simples, facilitando os cálculos necessários para se encontrar os parâmetros internos da bateria [3]. Este, por sua vez, por utilizar apenas uma malha RC, adiciona um ramo parasita, para simular perdas nas medições e simulações da bateria, como pode ser visto na figura 4.

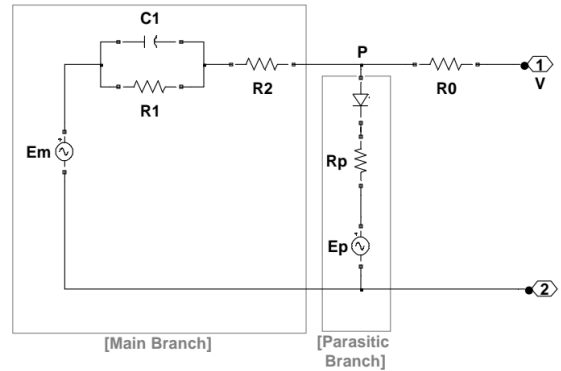


Figura 4. Modelo elétrico equivalente proposto por [3]. Fonte: [3]

Segundo [3], para que se possa encontrar os valores dos parâmetros internos, é indicado o uso das seguintes equações, que levam em consideração fatores ambientais e de utilização da bateria. Essas equações são apenas consideradas para baterias de chumbo ácido e baseadas nas análises empíricas e da folha de dados da bateria:

1) **Tensão do ramo principal:**

$$E_m = E_{m0} - K_E (273 + \theta) (1 - SOC) \quad (13)$$

Onde:

- E_m é a tensão de circuito aberto;
- E_{m0} é a tensão de circuito aberto inicial, com a bateria 100% carregada;
- K_E é uma constante em $V/^\circ C$;
- θ é a temperatura em $^\circ C$ do eletrólito;
- SOC é o estado de carga da bateria.

2) **Resistência do terminal**

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (14)$$

Onde:

- R_0 é a resistência do terminal;
- R_{00} é o valor para R_0 quando o SOC = 100%;
- A_0 é declarado como uma constante;
- SOC é o estado de carga da bateria.

3) Resistência 1 do ramo principal:

$$R_1 = -R_{10} \ln DOC \quad (15)$$

Onde:

- R_1 é a resistência do ramo principal;
- R_{10} é declarado como uma constante em Ohms;
- DOC é a profundidade de carga da bateria.

4) Capacitância do ramo principal

$$C_1 = \tau_1 / R_1 \quad (16)$$

Onde:

- C_1 é o capacitor do ramo principal;
- τ_1 é a constante de tempo do ramo principal;
- R_1 é a resistência do ramo principal.

5) Resistência 2 do ramo principal

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp(A_{22}I_m/I^*)} \quad (17)$$

Onde:

- R_2 é a resistência 2 do ramo principal;
- R_{20} é uma constante em Ohms;
- A_{21} é declarado como uma constante;
- A_{22} é declarado como uma constante;
- E_m é a tensão de circuito aberto;
- SOC é o estado de carga da bateria;
- I_m é a corrente do ramo principal;
- I^* é a corrente nominal da bateria;

6) Capacidade extraída da bateria

$$Q_e(t) = Q_{e_init} + \int_0^t -I_m(\tau) d\tau \quad (18)$$

Onde:

- Q_e é a carga extraída da bateria;
- Q_{e_init} é a carga extraída inicial;
- I_m é a corrente do ramo principal;
- τ é uma variável de integração de tempo;
- t é a simulação do tempo em segundos.

7) Estado de Carga (State of Charge)

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0, \theta)} \quad (19)$$

Onde:

- SOC é o estado de carga da bateria;
- Q_e é a carga atual da bateria em Ampere-Segundos;
- C é a capacidade da bateria em Ampere-Segundos;

- θ é a temperatura do eletrólito.

A determinação destes parâmetros para chegar no modelo elétrico da bateria pode ser algo complexo e difícil de ser padronizado, como afirma [3]. Existem diversos métodos e equações que podem ser seguidas para encontrar estes valores, porém não existe um modelo certo e outro errado, já que cada bateria se comporta de uma forma diferente e precisa ser analisada de forma singular. Segundo [8], o modelo da bateria, a partir do circuito equivalente de Thevenin depende de diversos fatores como por exemplo o SOC, a carga, temperatura, e até o histórico de ciclos da bateria.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No processo de desenvolvimento de um sistema de predição de estados de uma bateria, seja este o estado de carga, ou estado de vida (SOC ou SOH), é necessário o estudo das metodologias e algoritmos que computam as informações em um resultado final. Dentre diversas metodologias, assume-se o Filtro de Kalman como algoritmo que retorna os resultados mais confiáveis devido suas características de predição de estados futuro, passado e atual.

Para alimentação de parâmetros do algoritmo de Kalman, faz-se necessário o dimensionamento de um circuito elétrico equivalente, no qual será usado como modelo de base para a realização das predições por Kalman. Seguindo a proposta realizada no Trabalho de Conclusão de Curso I de Engenharia, foi estudado diferentes modelos equivalentes para uma bateria de chumbo ácido, tipo de bateria disponível no laboratório de elétrica do IFRS campus Farroupilha, como mostrado na figura 5.

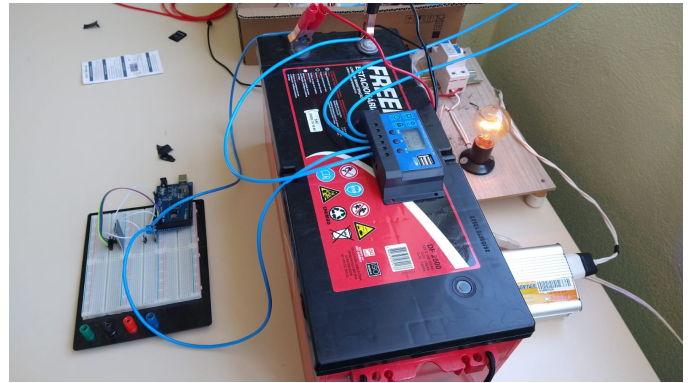


Figura 5. Bateria estacionária de chumbo ácido Freedom 2500. FONTE: [2]

Com o objetivo de conseguir aplicar o filtro de Kalman e analisar a predição do SOC da bateria, foi proposto o estudo de diferentes modelos elétricos equivalentes para ser utilizado como entrada do algoritmo de predição relacionado à bateria analisada. Esta, por sua vez, possui como principais características [2]:

- Modelo Heliar Freedom 2500
 - Tensão de 12V;
 - Capacidade de 130 Ah
 - Resistência interna de 2,60mΩ;

– Corrente de curto circuito de 4615A.

Primeiramente foi reunido as principais referências para o entendimento dos passos necessários para se realizar a aplicação do filtro de Kalman na predição do estado de carga da bateria em questão [1]. De forma geral, o grande desafio seria o desenvolvimento de um circuito que se comportasse de forma equivalente aos parâmetros físicos e dinâmicos da bateria real, uma vez que, o algoritmo de Kalman possui fácil acesso e simulação, utilizando softwares como o *Matlab e Simulink*, porém de difícil parametrização, isto é, encontrar os valores dos parâmetros deste modelo equivalente [9]. Sendo assim, dividiu-se o estudo em duas etapas, dando enfoque ao estudo e obtenção deste modelo equivalente, pela sua maior complexidade, e a fim de encontrar resultados compatíveis com os dados experimentais, foi executado o algoritmo sobre este modelo, após resultados estáveis da comparação do modelo com os testes práticos.

Ao iniciar-se o processo de pesquisa e estudo de possíveis modelos equivalentes para serem utilizados como "tradutores" do comportamento da bateria, deparou-se com uma grande diversidade de circuitos e metodologias para encontrar os parâmetros que o compõe. Por conta disso, decidiu-se utilizar, como ponto de partida, o artigo de referência do trabalho de conclusão de curso 1, [1]. Devido ao fato das baterias possuírem comportamentos diferentes umas das outras, e de que há uma possibilidade considerável de que um modelo não funcione em duas baterias distintas, se faz necessário uma análise minuciosa de resposta do modelo e da tensão da bateria. O modelo de circuito elétrico com parâmetros fixos tem a desvantagem de representar o comportamento do perfil de tensão de circuito aberto para um dado estado de vida da bateria. Logo, se pretende averiguar quais os tipos de circuitos que devem ser usados para a determinação do SOC em baterias de chumbo ácido.

A. Circuito RC Paralelo

O primeiro circuito testado trata-se de um modelo de segunda ordem, ou seja, com um par de resistores e capacitores em paralelo, como visto na figura 6 [1]. Este modelo é composto por dois capacitores denominados *Capacitor de Superfície* e *Capacitor Bruto*, além das resistências de terminal, de superfície e final. Seus valores foram encontrados pelo autor a partir das equações que este chamou de *Cálculo de Parâmetros Iniciais*, como pode ser visto nas equações 20, 21, 22.

$$C_{bruto_energia} = \frac{1}{2} C_{bruto} (V_{100\%SOC}^2 - V_{0\%SOC}^2) \quad (20)$$

$$C_{superficie} = \frac{\tau}{R_e + R_s} \quad (21)$$

$$0,0046 = R_t + \left[\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_s} \right] \quad (22) \quad (23)$$

Onde:

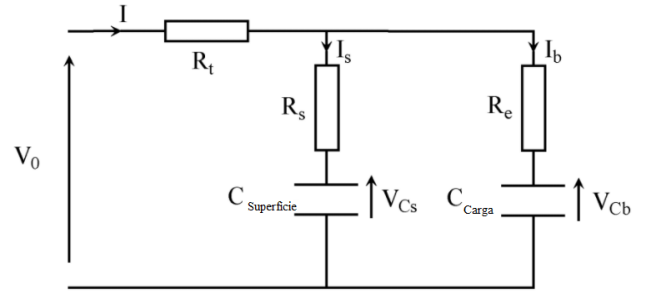


Figura 6. Circuito elétrico equivalente de segunda ordem. FONTE: [1]

- C_{bruto} é a capacitância determinada a partir da capacidade de energia armazenada;
- $V_{100\%SOC}$ é a tensão da bateria em circuito aberto com o estado de carga interno em 100%, ou seja, completamente carregada;
- $V_{0\%SOC}$ é a tensão da bateria em circuito aberto com o estado de carga interno em 0%, ou seja, completamente descarregada;
- $C_{superficie}$ depende de resultados da excitação de alta frequência da célula para determinar a constante de tempo dada pelo capacitor de superfície e sua resistência;
- τ é a constante de tempo dada pelo capacitor de superfície e sua resistência;
- R_e é a resistência final do circuito;
- R_s é a resistência de superfície;
- R_t é a resistência terminal.

Outro ponto de grande importância levantado durante a pesquisa das metodologias de dimensionamento dos modelos equivalentes foi a forte recomendação de não sujeitar a bateria à um SOC = 0. Isto porque, em uma bateria de chumbo ácido, descarregar sua carga à zero pode fazer com que esta pare de funcionar, pois não conseguirá perpetuar suas reações químicas internas [5]. Este modelo tem o objetivo de medir o armazenamento e os fenômenos de perda, mas não reproduz o fenômeno de tensão de relaxamento, por exemplo. Logo é um modelo que só pode ser usado para análise de SOC em condições muito específicas.

B. Circuito Duplo RC Série

O segundo artigo abordado para parametrização do modelo elétrico equivalente foi o representado pela figura 1, [4]. Este por sua vez apresenta um modelo de Thevenin calculado a partir das leis de Kirchhoff, resultando nas seguintes equações usadas para obtenção de um modelo em espaço de estados:

$$\begin{cases} I_c = \frac{U_p}{R_p} + C_p \frac{dU_p}{dt} \\ I - c = \frac{U_s}{R_s} + C_s \frac{dU_s}{dt} \\ U_L = U_o - R_o I_c - U_p - U_s \end{cases}$$

Este modelo pode sofrer alterações devido ao regime de corrente e tudo que altera a capacidade da bateria, pois o valor de C (Capacitância) varia com a temperatura e com os regimes de carga e descarga da bateria.

A maior problemática foi encontrada devido ao fato de este artigo ser direcionado à baterias de Ions de Lítio, as quais apresentam consideráveis diferenças de comportamento, carga, e descarga, além de alterações no estado de vida distintas das baterias de chumbo ácido. Por isso, devido ao artigo se referir à outro esilo de construção de bateria, não apresentou dados convergentes com o esperado para o equipamento deste trabalho [4].

C. Circuito par de RC Série ($R_1C_1 R_2D_1$)

O próximo modelo analisado consiste em um desenvolvimento simplificado do modelo, que apresentava o equacionamento dos parâmetros do circuito, focado em baterias de chumbo ácido [6]. O modelo utilizado pelo autor, como visto na figura 7, é composto por uma resistência de terminal e duas resistências paralelas aos capacitores, um padrão observado em todas referências do assunto, porém, diferente do que havia se encontrado anteriormente, este considera o segundo capacitor como um diodo, devido ao fato da resistência R_2 se tornar desprezível durante a descarga da bateria.

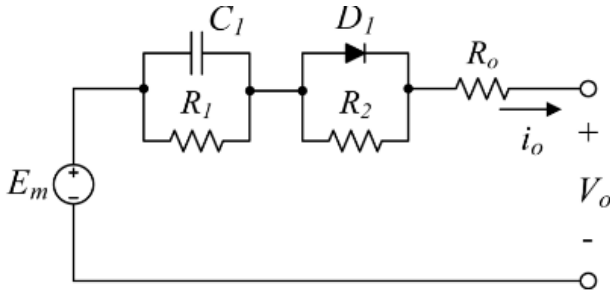


Figura 7. Modelo elétrico equivalente para baterias de Chumbo ácido. FONTE: [6]

Segundo [6] os valores de parametrização do modelo foram obtidos através de ensaios práticos com a bateria selecionada pelo autor. Este estipula o equacionamento dos parâmetros como mostrado abaixo:

$$E_m = E_{m0} - K_E \cdot (273 + T) \cdot (1 - SOC) \quad (24)$$

Onde:

- E_{m0} é a tensão de circuito aberto considerando a bateria em sua carga máxima ($SOC = 1$);
- K_E constante de valor típico de $0,004027V/^\circ C$;
- T é a temperatura do eletrólito em $^\circ C$;
- SOC é o estado de carga da bateria.

$$R_0 = R_{00} \cdot [1 + A_0(1 - SOC)] \quad (25)$$

Onde os parâmetros seguem as mesma definições da equação 14.

$$R_1 = R_{10} \cdot e^{(1-K \cdot SOC)} \quad (26)$$

Onde:

- R_{10} vale tipicamente $0,1\Omega$;
- K é uma constante que vale 10.

$$R_2 = R_{20} \cdot \frac{e^{A_{21}} \cdot (1 - SOC)}{1 + e^{A_{22}i_m/I^*}} \quad (27)$$

Onde:

- R_{20} tem valor típico de $0,015\Omega$;
- A_{21} vale -8;
- A_{22} vale -8,45;
- i_m é a corrente nos terminais da bateria;
- I^* é a corrente nominal em A.

$$C_1 = \frac{E_n \cdot 3600 \cdot 1000}{0,5 \cdot (V_{oc,max}^2 - V_{oc,min}^2)} \quad (28)$$

Onde:

- $V_{oc,max}$ é a tensão de circuito aberto com carga completa;
- $V_{oc,min}$ é a tensão de circuito aberto com descarga completa;

Após a análise do equacionamento de parametrização do modelo, notou-se alguns pontos duvidosos para o projeto. Como por exemplo a tensão da bateria com descarga completa, algo não recomendado, como mencionado anteriormente. A partir disto tentou-se encontrar os valores porém, sem os testes com descarga completa da bateria, os resultados se distanciaram consideravelmente dos resultados do autor, que utilizou uma bateria com características semelhantes, como mostrado na figura 9. De forma geral, as resistências apresentaram valores na casa de $1 \cdot 10^{-5}$, enquanto a capacitância resultou em $10 \cdot 10^6$. A tensão de flutuação obtida nos testes com a bateria da Figura 5, está representada no gráfico da Figura 8. A partir destes resultados, foi realizado a parametrização conforme indicado porém sem êxito, resultando em valores incoerentes para este modelo de bateria.

Na Figura 8 foi realizado uma carga na bateria sob um regime de corrente de 4 amperes durante duas horas. Após a retirada da corrente e a espera da flutuação da tensão, resulta em um soc aproximado de 0.42.

D. Circuito com 3 Pares de RC em Série

Segundo [8], para modelos com mais de dois pares de RC paralelos, há uma falta de métodos sistemáticos para identificação de parâmetros. Levando em consideração suas colocações foi buscado parametrizar o modelo equivalente do autor, sendo este um modelo de terceira ordem. A grande vantagem deste modelo é o fato de que o autor já disponibilizara em seu artigo, além do equacionamento de parametrização, Equação 2, o código de simulação e de aquisição dos valores para os parâmetros do circuito, Apêndice A.

Ao simular o código do autor, foi desenvolvido um código próprio, Apêndice B para adequar o modelo à bateria utilizada como referência neste trabalho, Freedom 2500. Neste

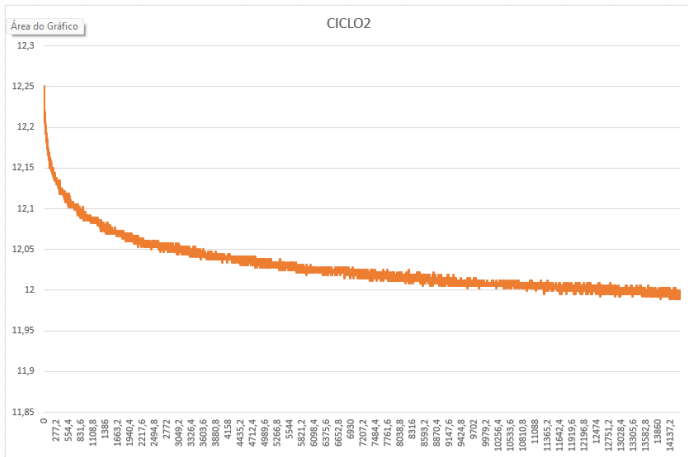


Figura 8. Resultados para tensão de flutuação da bateria de chumbo ácido. Onde o eixo "x" representa o tempo em segundos e o eixo "y" representa a tensão da bateria em V. FONTE: Autor

Parâmetros	Valor
Q	63 Ah
E_{mo}	12,7 V
I^*	5 A
K_E	0,004027 V/°C
R_{10}	0,1 Ω
K	10
R_{00}	0,01 Ω
A_0	0,1
C_1	100000 F
R_{20}	0,015 Ω
A_{21}	-8
A_{22}	-8,45

Figura 9. Resultados para modelo elétrico equivalente para baterias de Chumbo ácido. FONTE: [6]

código, além de alimentá-lo com as informações pertinentes da bateria em questão, também foi analisado 6 pontos, igualmente espaçados no tempo, das curvas de tensão em processos de descarga da bateria, para encontrar os valores de R_1, R_2, R_3, C_1, C_2 e C_3 . Dentro da teoria analisada em [8], este seria o método mais simples pois o software iria realizar os cálculos e retornar os valores para cada elemento. Porém, após a simulação, a convergência resultou em números imaginários, para as resistências e capacitâncias, devido principalmente às taxas de amostragem dos testes práticos realizados, ou seja a taxa de amostragem deveria ser bastante específica para que houvesse convergência de resultados reais.

Os valores de tensão retirados dos testes práticos realizados na bateria foram:

- 1) 12.1438
- 2) 12.1084
- 3) 12.1052
- 4) 12.0924
- 5) 12.0859
- 6) 12.0698

Os resultados dos valores dos componentes internos R_1, C_1, R_2, C_2, R_3 e C_3 foram:

- $R_1 = -0,0011$
- $C_1 = -2,3849e + 00 - 2,8654e + 02i$
- $R_2 = -0.0151$
- $C_2 = 403.5555$
- $R_3 = -3.0801$
- $C_3 = -0.0444 - 0.0253i$

O teste seguiu conforme realizado pelo autor, selecionando 6 pontos igualmente espaçados no tempo para que se pudesse encontrar os valores de tensão para alimentar o algoritmo e encontrar os parâmetros resistivos e capacitivos da bateria. Para isto, foi utilizado a curva de queda de tensão em regime de descarga da Figura 8.

E. Circuito RC Único Paralelo com Ramo Parasita

Com os resultados imaginários do algoritmo de [8], decidiu-se que este não serviria para o estudo em questão pois não houve convergência numérica do algoritmo para os tempos de amostragem usados no caso prático. Logo, foi selecionado outra referência, [3], que provém da empresa desenvolvedora do software utilizado no projeto, *Matlab*. Neste artigo, o autor procura um modelo equivalente simples e eficaz para sistemas elétricos, e faz uso de ferramentas para simplificar o trabalho, como o próprio *Matlab* e o *Simulink*. Este propõe um modelo de primeira ordem, adicionando um ramo parasita na malha principal, como mostra a Figura 4, e usa as equações 13 a 19 para parametrizar o modelo.

A partir dos dados recolhidos de [3], desenvolveu-se um código, Apêndice C para *Matlab* com o intuito de parametrizar o modelo obtido do artigo. Neste código aplica-se as resoluções matemáticas obtidas em [3] e em seguida determina-se o modelo em espaço de estados e simula as curvas de SOC, Figura 10, tensão terminal, tensão em circuito aberto, Figura 11, e a variação devido à capacitância e resistência R_1 do circuito, Figura 12. Com este modelo, foi possível convergir valores reais e próximos do esperado para o modelo da bateria, que, ao comparar as curvas de SOC e OCV (*Open Circuit Voltage* - Tensão de Circuito Aberto) foi possível notar semelhanças acentuadas com as mesmas curvas presentes no manual do equipamento [2].

A Figura 12, resultado da simulação do algoritmo escolhido, ao comparado com a Figura 8, resultante dos testes práticos com a Freedom 2500, nota-se duas curvas muito semelhantes, logo, pode-se assumir tal modelo simulado no *Matlab* como o ideal entre os estudados para representar matematicamente o comportamento da bateria adotada no projeto.

Para melhor visualização, na Figura 8, toma-se os dados da curva a partir de aproximadamente 1500 segundos, onde

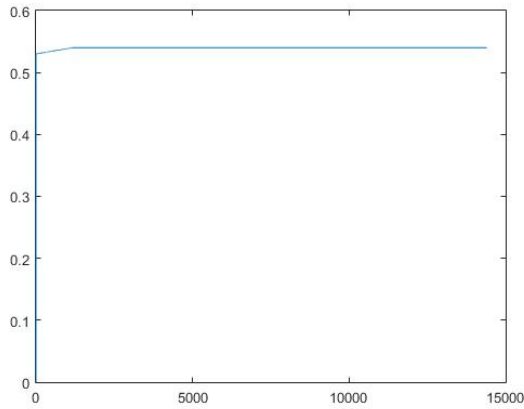


Figura 10. Resultado do SOC para o algoritmo realizado. Onde o eixo "x" representa o tempo em segundos e o eixo "y" corresponde o valor de SOC. FONTE: Autor

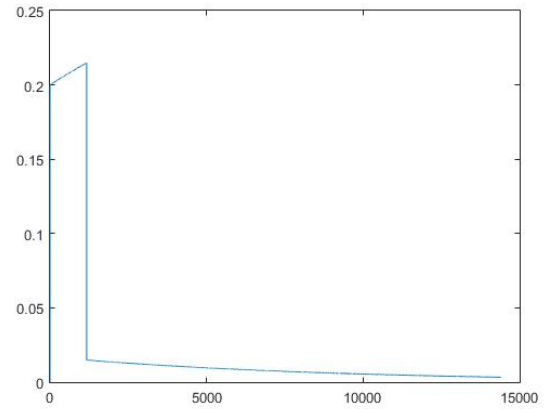


Figura 12. Resultado da variação devido capacitância e resistência R_1 para o algoritmo realizado. Onde o eixo "x" representa o tempo em segundos e o eixo "y" corresponde à tensão em V na Capacitância C_1 e Resistência R_1 . FONTE: Autor

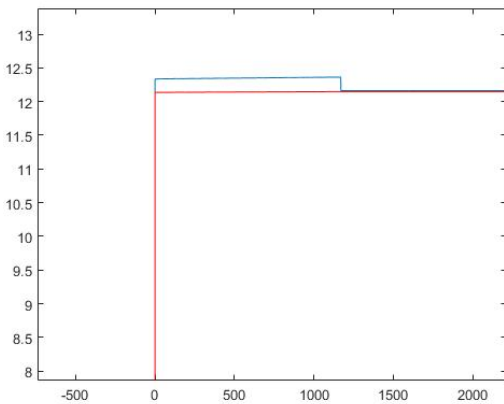


Figura 11. Resultado da tensão terminal e de circuito aberto para o algoritmo realizado. Onde o eixo "x" corresponde ao tempo em segundos, e o eixo "y" corresponde à tensão da bateria em V. FONTE: Autor

modelo em espaço de estados, utilizado no filtro de Kalman. Estas variáveis foram definidas como o SOC e v_1 , a tensão nos terminais "OCV". Como entrada do sistema em espaço de estados, foi utilizado a corrente da bateria, e a saída do sistema seria apenas o SOC. O tempo de simulação considerado foi de 2 horas, e o algoritmo considerou a tensão terminal em regime de carga da bateria, como pode ser visto na Figura 10.

IV. CONCLUSÕES

Desde o início do Trabalho de Conclusão de Curso I, tinha-se como objetivo estudar e se aprofundar nos algoritmos de previsão de estado de baterias, com foco no filtro de Kalman, devido a confiabilidade de seus resultados. O modelo de bateria, de chumbo ácido, foi determinado pela disponibilidade do equipamento para testes nos laboratórios da faculdade, podendo realizar os processos de carga e descarga na mesma.

Os estudos voltados à aplicação do filtro de Kalman resultaram em vários requisitos necessários para aplicar o algoritmo na bateria, diferente de métodos estudados no TCC I, como a Integral da Corrente, por exemplo, este necessitava que fosse parametrizado um modelo elétrico equivalente para que se pudesse prever seus estados. Diante disso, foi encontrado a grande dificuldade deste trabalho, ou seja, encontrar uma solução que fosse coerente ao modelo de bateria disponível para testes. Pode-se dizer que a aplicação do filtro de Kalman não seja um problema para sistemas que possuam seu modelo em espaço de estados bem definido, pois o algoritmo depende especificamente dele. A dificuldade maior de aplicação de Kalman é dada na parametrização deste modelo, que no caso da bateria, em todas as referências abordadas, é representado por um circuito equivalente de Thevenin. Aumenta-se a dificuldade, uma vez que a bateria, diferente de um circuito elétrico convencional, não possui componentes eletrônicos, apenas as células que realizam seu processo químico. Logo, para que se encontre os valores destes componentes elétricos representativos, é preciso realizar diversos equacionamentos

há o assentamento de tensão. A partir deste ponto, compare-se com a Figura 12, tomando os dados a partir de mais ou menos 1500 segundos também, devido ao período de assentamento da curva. O comportamento da curva da Figura 12, principalmente antes do assentamento da curva, mostra-se mais abrupto devido à análise de um modelo equivalente com apenas um circuito RC, enquanto o comportamento real da bateria corresponderia a mais circuitos RC. Mesmo com a diferença da queda abrupta de tensão logo após a parada de carregamento na simulação, o decorrer do comportamento mostra-se semelhante com a curva dos dados práticos da bateria.

A aplicação de Kalman foi o último passo a ser realizado, isto porque o desafio maior do trabalho foi conseguir parametrizar o modelo elétrico equivalente que traduzisse de forma coerente o comportamento da bateria utilizada. Depois de encontrar um modelo que se adequasse mais à esta bateria, [3], foi separado as variáveis de estado para composição do

com base nos valores de capacidade, corrente e tensão da bateria.

O estudo proposto acabou enfrentando diversos desafios, mas foi possível se chegar à um modelo que se adequasse à bateria estudada. Sugere-se a um futuro trabalho, o monitoramento por mais tempo do resultado de SOC pelo filtro de Kalman, comparando com os dados do manual da bateria, sua tensão em circuito aberto e outros métodos como por exemplo a Integral da Corrente, sendo possível se aproximar ainda mais da realidade da bateria, ajustando o modelo elétrico para que se comporte ainda mais semelhante ao comportamento da bateria que se deseja analisar.

REFERÊNCIAS

- [1] Chris Bikramjit Bikramjit Bhangu. Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pages 3 – 10, 2005.
- [2] Jonhson Controls PS do Brasil. Manual técnico freedom. pages 1–53, 2017.
- [3] Robyn A. Jackey. A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection. *The MathWorks, Inc.*, pages 1 – 9, 2007.
- [4] Peng Wu Jie Xing. State of charge estimation of lithium-ion battery based on improved adaptive unscented kalman filter. *MDPI*, pages 2 – 3, 2021.
- [5] Tingsu Hu Lalitha Devarakonda, Haifeng Wang. Parameter identification of circuit models for lead-acid batteries under non-zero initial conditions. *Americal Control Conference*, pages 2 – 6, 2014.
- [6] Caio Moraes. Uma revisão sobre baterias: Parte iii - <https://eletronicadepotencia.com/modelo-eletrico-da-bateria/>, 2020.
- [7] Vanessa Gomes Cruz Ogawa. Proposta de identificação dos parâmetros do modelo de bateria para uso na modelagem de sistemas de partidas de veículos automotivos. pages 3 – 6, 2011.
- [8] Jianping Zhao Tingshu Hu, Brian Zanchi. Simple analytical method for determining parameters of discharging batteries. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(3):1 – 9, 2011.
- [9] Ana Carolina Silveira Veloso. Estudo de técnicas de estimativa de carga para baterias de Íons de Lítio. pages 22 – 31, 2015.

APÊNDICE

A. Código Matlab para Computação de [8]

```

1      % Step 1: form b1,...,b6,
2      %v(k) stands for v(kT)
3      b1=E-R0*I- v(1); b2=v(1)- v(2);
4      b3=v(2)- v(3); b4=v(3)- v(4);
5      b5=v(4)- v(5); b6=v(5)- v(6);
6      % Step 2: Compute u=[u1;u2;u3];
7      A=[b3 - b2 b1;b4 - b3 b2;b5 - b4 b3];
8      u=inv(A)*[b4;b5;b6];
9      % Step 3: Compute d1, d2, d3
10     c=[1 - 2*u(1) (u(1)^2 +u(2))];
11     c=[c (u(3)- u(1)*u(2))];
12     q=roots(c);
13     dd=inv([0 1 1;1 0 1;1 1 0])*q;
14     d1=dd(1);d2=dd(2);d3=dd(3);
15     % Step 4: Compute R1,C1,R2,C2,R3,C3
16     Q=[1 1 1;d1 d2 d3;d1^2 d2^2 d3^2];
17     x=inv(Q)*[b1;b2;b3];
18     R1=x(1)/I/(1-d1); C1=-T/R1/log(d1);
19     R2=x(2)/I/(1-d2); C2=-T/R2/log(d2);
20     R3=x(3)/I/(1-d3); C3=-T/R3/log(d3);
21     To verify the main result and the algorithm, one may generate
22     v(kT) from a model with arbitrary parameters. For instance,
23     E=6; R0=0.02;I=2;
24     Re1=0.02;Re2=0.014;Re3=0.05;
25     Ce1=10;Ce2=100;Ce3=20;
26     T=1;
27     de1=exp(- T/Re1/Ce1);
28     de2=exp(- T/Re2/Ce2);
29     de3=exp(- T/Re3/Ce3);
30     v=zeros(6,1);
31     for i=1:6
32         v(i)=E- R0*I- Re1*I*(1- de1^i);
33         v(i)=v(i)- Re2*I*(1- de2^i);
34         v(i)=v(i)- Re3*I*(1- de3^i);
35     end

```

B. Código de aquisição de parâmetros para o modelo de [8]

```

1     E=6; R0=0.02;I=2;
2     Re1=0.02;Re2=0.014;Re3=0.05;
3     Ce1=10;Ce2=100;Ce3=20;
4     T=1;
5     de1=exp(- T/Re1/Ce1);
6     de2=exp(- T/Re2/Ce2);
7     de3=exp(- T/Re3/Ce3);
8     v=zeros(6,1);
9     for i=1:6
10        v(i)=E- R0*I- Re1*I*(1- de1^i);
11        v(i)=v(i)- Re2*I*(1- de2^i);
12        v(i)=v(i)- Re3*I*(1- de3^i);
13    end
14    % obter uma curva de flutua o da bateria
15    % pegar 6 pontos igualmente espa ados no tempo que ele ir estimar os
16    % valores das resist ncias e capacit ncias.
17
18    % Step 1: form b1,...,b6,
19    %v(k) stands for v(kT)
20    b1=E-R0*I-v(1); b2=v(1)-v(2);
21    b3=v(2)-v(3); b4=v(3)-v(4);
22    b5=v(4)-v(5); b6=v(5)-v(6);
23    % Step 2: Compute u=[u1;u2;u3];
24    A=[b3 -b2 b1;b4 -b3 b2;b5 -b4 b3];
25    u=inv(A)*[b4;b5;b6];
26    % Step 3: Compute d1, d2, d3
27    c=[1 -2*u(1) (u(1)^2+u(2))];
28    c=[c (u(3)-u(1)*u(2))];
29    q=roots(c);

```

```

30 dd=inv([0 1 1;1 0 1;1 1 0])*q;
31 d1=dd(1);d2=dd(2);d3=dd(3);
32 % Step 4: Compute R1,C1,R2,C2,R3,C3
33 Q=[1 1 1;d1 d2 d3;d1^2 d2^2 d3^2];
34 x=inv(Q)*[b1;b2;b3];
35 R1=x(1)/I/(1-d1); C1=-T/R1/log(d1);
36 R2=x(2)/I/(1-d2); C2=-T/R2/log(d2);
37 R3=x(3)/I/(1-d3); C3=-T/R3/log(d3);

```

C. Algoritmo desenvolvido para bateria Freedom 2500 com base em [3]

```

1 close all
2 clear all
3 s=tf('s');
4 %parametros da bateria
5 Cn=130;
6 Em0=12.7;
7 Ke=0.004027;
8 R10=0.1;
9 K=10;
10 R00=0.04;
11 A0=0.1;
12 soc=0.4;
13 Vmax=12.7;
14 Vmin=11.7;
15 R20=0.015;
16 T=25;
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18 C1=(1*3600*1000)/(0.5*(Vmax^2-Vmin^2))
19 neta=1;% %eficiencia de coulomb
20
21 Ts=1;%taxa de amostragem
22 A=[1 0 ; 0 exp(-Ts/(R10*C1)) ];%variaveis de estado sao o soc, v1
23 B=[(neta*Ts)/(3600*Cn) R10*(1-exp(-Ts/(R10*C1))) ]';%entrada e a corrente da bateria
24 %equacao interpolada que relaciona ocv e soc
25 C=[1 0 ];%saida e considerado apenas o soc
26 D=0;
27 sys=ss(A,B,C,D);
28 [Gd,Hd,Cd,Dd,Ts] = ssdata(c2d(ss(A,B,C,D),Ts));%planta na frequencia digital
29 sysd=ss(Gd,Hd,Cd,Dd,Ts);
30 t_final = 7200*10; % Tempo total de simulacao(segundos)
31 i = 0; % Contador do tempo total (clk)
32 t = 0:Ts:t_final; % Tempo de simulacao (considerando as interrupcoes)
33 ii=0;
34 k=1;
35 x1=zeros(1,length(t));
36 x2=zeros(1,length(t));
37 u=zeros(1,length(t));
38 uo=zeros(1,length(t));
39 y=zeros(1,length(t));
40 x1(2)=0.4;
41 for i=1:length(t)
42 k=k+1;
43 u(k)=1.5;%corrente positiva e carga
44 if x1(k)>=0.45
45 u(k)=0;
46 end
47 x1(k+1)=A(1,1)*x1(k)+A(1,2)*x2(k)+B(1,1)*u(k);
48 x2(k+1)=A(2,1)*x1(k)+A(2,2)*x2(k)+B(2,1)*u(k);
49 uo(k)=Em0-Ke*(273+T)*(1-x1(k));%tensao de circuito aberto dependente do soc
50 % y(k)=uo(k)-x2(k)-R00*u(k)-R20*u(k); %tensao terminal da bateria em descarga
51 y(k)=uo(k)+x2(k)+R00*u(k)+R20*u(k);%tensao terminal da bateria sob carga
52
53 end
54 figure
55 plot(t,x1(1:length(t))) %soc
56 figure
57 plot(t,y(1:length(t)))%tensao terminal
58 hold on
59 plot(t,uo(1:length(t)),'r')%tensao de circuito aberto
60 figure
61 plot(t,x2(1:length(t))) %varia o devido a capacitancia e resistencia r1

```