

Modelagem e Extração Paramétrica de Baterias de Chumbo-Ácido para Desenvolvimento de Conversores

João Pedro S. Cipriani* Giancarlo C. Daros*
 Matheus F. Gonçalves* Lucas M. Ilha* Leandro Roggia*
 Adriano P. de Moraes* Fábio E. Bisogno* Álysson R. Seidel*
 Luciano F. da Rocha**

* Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos e Computacionais, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: jpcipriani@gmail.com, giancd98@gmail.com).

** CEEE Geração e Transmissão - GT, Passo Fundo, RS

Abstract: This paper presents a literature review of lead-acid battery modelling, focusing on equivalent circuit models. These models can be used in commercial simulation software and help optimize the development of power electronics used to charge and manage batteries, particularly in power station backup battery banks. Besides a general outlook on battery testing, the paper presents a survey on the data provided by Brazil's leading lead-acid manufacturers and presents parameter extraction methods based both on experimental testing and information contained in the datasheet. The connection between state of charge, voltage, current and internal resistance is highlighted. Finally, simulations of discharge curves for different current levels are carried out, validating the presented methods.

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais modelos para baterias de chumbo-ácido, dando foco aos modelos de circuito equivalente. Estes podem ser utilizados em simuladores comerciais e acelerar o desenvolvimento de eletrônica de potência voltada para carga e manutenção dessas baterias, especialmente em subestações de energia. Além de uma visão geral sobre ensaios com baterias, o artigo traz um levantamento dos dados fornecidos pelos principais fabricantes nacionais de baterias e apresenta métodos de extração paramétrica baseados em dados experimentais e fornecidos no manual. São ressaltadas a relação entre estado de carga, tensão, corrente e resistência interna da bateria. Por último, simulações de curva de descarga com diferentes correntes são realizadas, validando os métodos apresentados.

Keywords: Lead-acid, modelling, equivalent circuit, parameter extraction, internal resistance.

Palavras-chaves: Chumbo-ácido, modelagem, circuito equivalente, extração paramétrica, resistência interna.

1. INTRODUÇÃO

Bancos de bateria de chumbo-ácido são largamente utilizados em subestações de energia, onde possuem um papel essencial, permitindo a operação dos equipamentos de controle, proteção e comunicação da subestação em caso de falta do sistema elétrico. Como fontes de energia emergencial, esses elementos não passam por um grande número de ciclos de carga e descarga em sua vida útil e assim, mesmo comparadas a tecnologias mais recentes, baterias de chumbo-ácido apresentam um bom custo-benefício (Chen e Sen, 2016).

O uso de bancos de baterias em subestações é regulamentado no Brasil através de normas como NBR16109 e NBR16110, assim como pelos PRODIST - Procedimentos de Distribuição. Enquanto cada elemento individualmente possui em torno de 2 V, juntos, os múltiplos elementos

em série somam tensões entre 48 e 250 V para formar os barramentos DC da subestação. Embora a tensão total do banco seja mantida, ao longo do tempo elementos em série podem ser levados a condições de desbalanceamento, quando alguns elementos estão em sobrecarga e outros em sub carga – e isto é prejudicial à vida útil desses equipamentos (Figueiró, 2015). Os ensaios previstos em norma prometem monitorar esse dano e substituir elementos danificados, porém a realização desses ensaios é custosa quando os bancos dispõem de um grande número de elementos.

O problema de desbalanceamento, assim como outras diversas causas de desgastes das células, aparece em diferentes tecnologias de baterias e pode ser contornado com soluções automáticas. A literatura técnica apresenta diversas topologias e estratégias para Sistemas Gerenciadores de Baterias (SGB), que integram eletrônica de potência com microcontroladores (Liu et al., 2019) e permitem assim estender a vida útil dos elementos (Krein e Balog, 2002).

* Os autores agradecem à CEEE-GT que forneceu incentivo financeiro para realização deste trabalho

Porém, o desenvolvimento desses sistemas eletrônicos deve considerar as características específicas e os modelos elétricos das baterias de chumbo-ácido, assim como suas necessidades de carga e manutenção. O uso de um conversor chaveado é essencial para o controle preciso e eficiente de corrente e tensão, mantendo a corrente fixa em um primeiro estágio de carga e tensão fixa em um segundo estágio. Um possível perfil de carregamento de uma bateria chumbo-ácido é mostrado na Fig. 1, em que: I_{max} é a corrente de carga, I_{cond} é a corrente de pré-carga, I_{flut} é a corrente de flutuação, V_{eq} é a tensão constante de carga, V_{flut} é a tensão de flutuação e V_{min} é a tensão definida para terminar o processo de pré-carga.

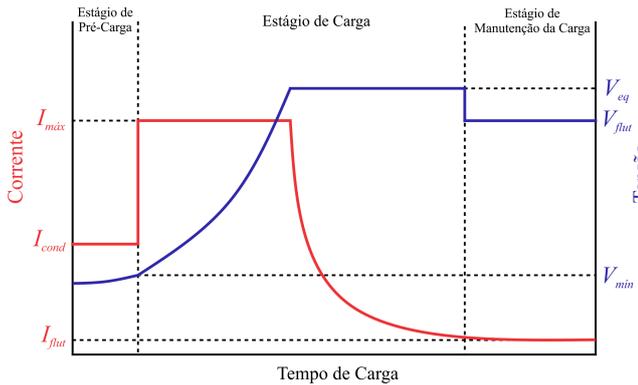


Figura 1. Perfil de carga de tensão constante com corrente limitada, recomendado para baterias chumbo-ácido.

Nos últimos anos, a literatura tem se voltado para tecnologias como íon de lítio, que possuem um grande potencial de aplicação no mercado de veículos elétricos e renováveis (Chen e Sen, 2016). Não obstante, existem oportunidades para implementação desses mesmos sistemas modernos de carga e gerenciamento nas baterias de chumbo-ácido. Ainda que projetos e controladores robustos permitam o controle da tensão e corrente nas baterias, bons modelos de baterias de chumbo-ácido são necessários para simulações que prevejam o desempenho de SGBs.

Nesse contexto, este artigo apresenta uma revisão sobre a extração de parâmetros, bem como a modelagem de baterias de chumbo-ácido, com ênfase nos modelos por circuito equivalente, mais adequados para estudos com conversores eletrônicos. A seção 2 apresenta uma revisão sobre o desenvolvimento de modelos de baterias enquanto a seção 3 se aprofunda em um modelo elétrico equivalente promissor para a realização de simulações. A seção 4 relaciona a extração de parâmetros com os procedimentos de testes normativos e recomendados, assim como as informações fornecidas pelos fabricantes de baterias nacionais, concluindo quais ensaios adicionais são necessários para sua caracterização apropriada. Por fim, na seção 5 o procedimento de extração de parâmetros é validado e na seção 6, conclusões sobre as limitações dos métodos e do modelo são feitas, resultando na proposta de novos ensaios.

2. MODELOS DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Diversas metodologias para modelagem de baterias estão disponíveis na literatura. Segundo Jongerden e Haverkort (2009), modelos de baterias eletroquímicas podem ser

separados em quatro categorias: modelos eletroquímicos, analíticos, estocásticos e por circuito equivalente.

Modelos eletroquímicos são descritos por equações diferenciais não lineares, capazes de representar com um alto grau de precisão o comportamento de cada célula eletroquímica. Em Shepherd (1965) foi desenvolvido um modelo capaz de descrever a dinâmica de tensão em uma célula com base na densidade de corrente e tempo de descarga, além do conhecimento *a priori* de parâmetros eletroquímicos obtidos experimentalmente. Similarmente, em Gu et al. (1987) é apresentado um modelo para estudo da dinâmica do SoC (estado de carga, do inglês *State of Charge*) a partir da geometria de cada célula e da temperatura no eletrólito. De uma maneira geral, a configuração deste tipo de modelo exige o conhecimento de uma série de parâmetros internos da bateria e a sua complexidade os torna limitados no projeto de conversores (Agarwal et al., 2010).

Modelos analíticos são obtidos a partir de abstrações de modelos eletroquímicos, possibilitando representar variáveis como SoC e capacidade sem conhecimento de parâmetros normalmente inacessíveis ao projetista. Nesta categoria de modelos, destacam-se a lei de Peukert (Rakhmatov e Vrudhula, 2001) e o modelo cinético (KiBaM, do inglês *Kinetic Battery Model*) (Manwell e McGowan, 1993). No entanto, os modelos mencionados não descrevem as características tensão-corrente ($V-I$) nos terminais da bateria, dificultando sua utilização no projeto de conversores para carregamento, equalização e recuperação de baterias de chumbo-ácido (Kim e Qiao, 2011).

Modelos estocásticos foram inicialmente concebidos para melhor descrever o efeito de recuperação da capacidade em baterias de íon de lítio, implementado por meio de cadeias de Markov discretas, conforme apresentado em Chiasserini e Rao (1999). Outro modelo proposto em Rao et al. (2005) é uma extensão do modelo KiBaM, o qual utiliza processos estocásticos para representar as dinâmicas não lineares de baterias níquel-hidreto metálico (NiMH). Em Lujano-Rojas et al. (2016) é proposto um modelo estocástico para estimação do estado e eficiência de carga em baterias de chumbo-ácido. Assim como os modelos analíticos, modelos estocásticos focam na representação de variáveis como SoC e capacidade, tornando-os desfavoráveis no projeto de conversores de potência (Kim e Qiao, 2011).

A representação de baterias de chumbo-ácido por circuitos elétricos equivalentes utiliza componentes elétricos passivos para representar as dinâmicas de tensão e corrente nos terminais da bateria (Devarakonda et al., 2014). O primeiro circuito equivalente para baterias de chumbo-ácido foi postulado em Randles (1947). Nesse trabalho, foram utilizados capacitores e resistores para representar as resistências e capacidades associadas as propriedades químicas de cada célula eletroquímica, possibilitando observar o comportamento $V-I$ nos terminais da bateria. Trabalhos posteriores focaram na extensão do circuito equivalente de Randles a fim de representar um maior conjunto de dinâmicas. Alguns dos modelos propostos também são capazes de rastrear o SoC e a capacidade através do sensoriamento de tensões e correntes nos elementos passivos.

Modelos por circuito equivalente tornam-se atrativos não somente para simulação e projeto de conversores, mas também para extração paramétrica, uma vez que os com-

ponentes passivos podem ser representados como funções do SoC, temperatura e corrente (Ceraolo, 2000). Tendo em vista a versatilidade deste tipo de modelo, demais abordagens por circuito equivalente serão exploradas em maior detalhe na subseção 2.1.

2.1 Representação de Baterias de Chumbo-Ácido por Circuito Equivalente

Uma bateria eletroquímica ideal pode ser representada pelo circuito equivalente ilustrado na Fig. 2. Nesta representação, os componentes passivos são considerados constantes e a eficiência de carga unitária, de forma que a carga armazenada na bateria é dada pela integral da corrente de carga i , sendo: v_b a tensão nos terminais, R_b a resistência série e v_{oc} a tensão de circuito aberto.

No entanto, esta abordagem é limitada, uma vez que não engloba as principais dinâmicas de uma bateria chumbo-ácido. Uma abordagem mais completa pode ser obtida através do circuito equivalente desenvolvido em Casacca e Salameh (1992), conforme ilustra a Fig. 3. Sob esta representação, a resposta dinâmica do sistema é regida por n constantes de tempo dadas por $\tau_n = R_n C_n$, R_n e C_n sendo funções não lineares de um conjunto de variáveis (SoC, temperatura do eletrólito, corrente e tempo). A resistência R_o representa uma parcela resistiva não associada às constantes de tempo.

O número de blocos RC escolhido dependerá do nível de precisão requerido pelo estudo, tanto na análise em frequência como em modelagem de resposta no tempo. O processo de identificação desses parâmetros é complexo, sendo proporcional ao número de blocos RC considerado. Assim, deve-se tentar minimizar a quantidade de blocos utilizados. Se a natureza da aplicação exigir apenas regimes específicos de carga e descarga, ou uma pequena gama de frequências, uma única constante de tempo é capaz de representar com um adequado grau de precisão a dinâmica dominante da bateria (Ceraolo, 2000).

A adição de um elemento Z_w à cada bloco RC (Fig. 4), permite que o fenômeno da difusão eletroquímica seja representado (Warburg, 1899). Esse elemento descreve a impedância de Warburg, caracterizado por fase constante ao longo de todo o espectro de frequências. A impedância de Warburg pode ser expressa através de (1), onde σ e ω são: coeficiente de Warburg e a frequência angular, respectivamente (Kularatna, 2014).

$$Z_w = \frac{\sigma}{\omega^{1/2}} - j \frac{\sigma}{\omega^{1/2}} \quad (1)$$

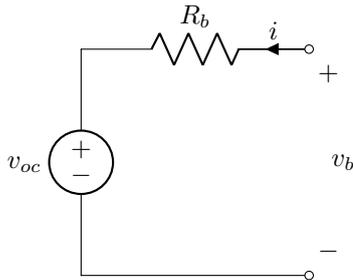


Figura 2. Equivalente DC de uma bateria de chumbo-ácido.

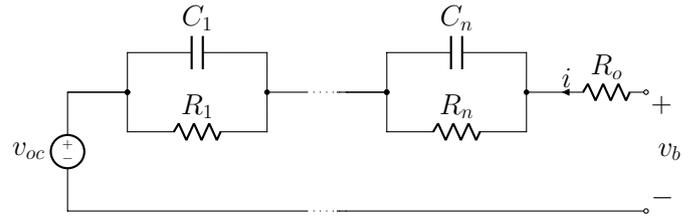


Figura 3. Circuito equivalente Thevenin de uma bateria chumbo-ácido com n constantes de tempo.

Esse efeito se torna aparente em frequências baixas e é evidenciado em um diagrama de Nyquist. Quando uma análise de IES (do inglês para Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, método experimental para análise em frequência de baterias) é aplicada a esse modelo completo, obtém-se a curva da Fig. 4.

A separação do diagrama de Nyquist em etapas permite uma análise da bateria do ponto de vista da frequência. Enquanto dinâmicas muito lentas aparecem à direita no diagrama, dinâmicas mais rápidas aparecem próximas do eixo imaginário. As dinâmicas dos capacitores e da impedância de Warburg dominam as baixas frequências. A resistência série R_o que aparece no modelo se torna uma boa aproximação da impedância total para frequências mais altas.

Uma vez estabelecida a estrutura dos diferentes modelos de baterias e detalhes do modelo elétrico equivalente de baterias de chumbo ácido, o tópico pode ser explorado no âmbito de uma aplicação. Assim, a seção seguinte trata das vantagens e limitações da aplicação desse conhecimento em eletrônica de potência.

3. MODELO PREFERIDO PARA USO COM CONVERSORES ELETRÔNICOS

Com simplicidade, modelos de circuito equivalente resultantes podem ser adequadamente conectados a outros modelos elétricos e eletrônicos, ou mesmo convertidos para funções de transferência que representam o comportamento do modelo. A seção anterior se aprofundou nos detalhes desses modelos e apresentou como complexas dinâmicas internas da bateria se transformam em com-

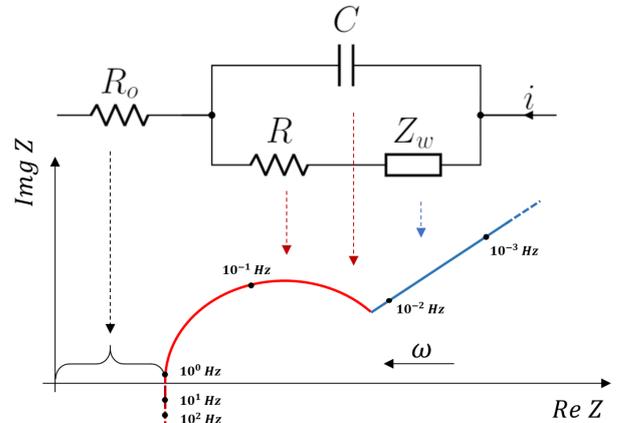


Figura 4. Diagrama de Nyquist com resultados padrão de um teste de Espectroscopia aplicado a baterias de Chumbo-Ácido.

ponentes concentrados. Uma vez que as vantagens desse tipo de modelo estejam claras, o foco desse trabalho passa a ser o entendimento dos mesmos dentro do contexto de conversores eletrônicos.

Apesar da relativa simplicidade em relação às alternativas, o modelo elétrico apresentado na Fig. 3 ainda possui uma série de complexidades que acrescentam pouco à compreensão dentro da aplicação de eletrônica de potência. Assim, o modelo elétrico definido para a realização desse trabalho é apresentado na Fig. 5.

Neste modelo, através da combinação de elementos lineares de circuito com elementos não lineares, características eletroquímicas da bateria são interpretados como variações paramétricas. Essas variações são, por sua vez, modeladas como alterações no ponto de operação a partir do qual o circuito é linearizado.

O valor não linear das fontes, capacitâncias e resistências desse modelo é dependente de dois principais fatores: o SoC e a corrente (Devarakonda et al., 2014). Ainda, para fins de estudo de carga e descarga com eletrônica de potência, a pequena corrente de flutuação e auto-descarga desses elementos, duas ordens de magnitude abaixo da corrente nominal (EnerSystem, 2017) pode ser negligenciada.

O modelo decomposto em uma equação de espaço de estados não linear em (2) estabelece o próprio SoC (integrado a partir de $1/Q$ - a carga máxima da bateria) como um dos estados. As tensões $V_1 \dots V_n$ representam as tensões em cada um dos conjuntos RC da bateria.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \vdots \\ \dot{V}_n \\ \dot{SoC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{R_n C_n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \\ SoC \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \vdots \\ \frac{1}{C_n} \\ \frac{1}{Q} \end{bmatrix} I_t \quad (2)$$

Uma equação geral para a tensão nos terminais (3) inclui a parcela não linear relativa a tensão de circuito aberto dependendo do SoC (Kiehne, 2003) e a dependência dos parâmetros R e C com a variação do SoC e corrente.

$$v_b(t) = v_{oc}(SoC) + \sum_{n=1}^k V_n(SoC, I_t) \quad (3)$$

Além da linearização, a separação de um modelo na escala do tempo permite que, para efeitos de análise e projeto, nem todas as não-linearidades sejam consideradas simultaneamente (Khalil (2002)). O SoC, que acontece em escala de horas, não interfere com as dinâmicas dos capacitores, dada em minutos, e os dois efeitos podem ser observados separadamente. O mesmo ocorre para os efeitos da corrente, se esta variar de forma suficientemente lenta.

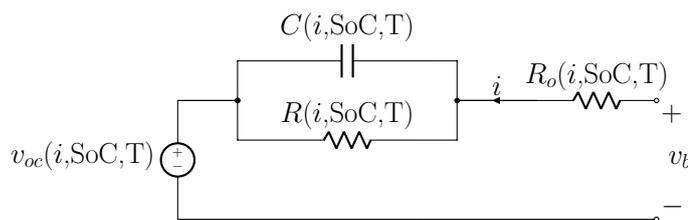


Figura 5. Circuito equivalente considerando a não linearidade dos componentes.

Essa separabilidade é interessante para a extração dos parâmetros através de ensaios simples que serão discutidos na seção seguinte.

O prosseguimento da modelagem envolve a determinação dos valores para os elementos do modelo elétrico. Dentre essas variáveis, são essenciais para a modelagem as seguintes informações.

- Comportamento da tensão de circuito aberto da bateria como função do SoC;
- A resistência interna total da bateria como função de SoC e da corrente I_t ;
- Obtenção das constantes de tempo relacionadas aos pares RC, como função de SoC e I_t

Os processos para extração desses parâmetros serão discutidos na próxima seção.

4. NORMAS E EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE BATERIAS

As principais formas para se conhecer os parâmetros de uma bateria se dão através de ensaios normativos e manuais dos fabricantes. Existem rotinas e equipamentos específicos para a realização de ensaios com baterias de chumbo-ácido. Estes são elencados a partir de normas nacionais e recomendações internacionais, cujo conteúdo, brevemente discutido nesse capítulo, permite melhor compreensão a respeito dos métodos utilizados para ensaiar baterias. É proveitoso que o projeto considere esses ensaios, cujos resultados são padronizados, e que demandam grande investimento de tempo, para definição dos parâmetros do modelo.

Por meio dos manuais disponibilizados pelos fabricantes é possível se adquirir uma série de parâmetros para a elaboração do modelo elétrico equivalente dos elementos. Estes manuais, geralmente voltados para a instalação e manutenção de bancos de baterias, não apresentam diretamente o modelo discutido de chumbo-ácido e se faz necessária a elucidação de alguns conceitos para permitir a transcrição dos dados. Além disso, os tipos de dados fornecidos (tabelas e curvas características) podem ser diferentes, de acordo com fabricante e modelo de bateria, dificultando ainda mais o entendimento.

Portanto, nesta seção são apresentados os métodos para extração de parâmetros. Por um levantamento dos manuais de modelos brasileiros, se mostra que a extração dos principais parâmetros necessários para a modelagem pode ser realizada através do manual disponibilizado pelo fabricante de baterias ou a partir dos dados de ensaios padrões. No entanto, algumas características dinâmicas do modelo, como as capacitâncias, exigem novos ensaios e considerações são realizadas nesse sentido.

4.1 Recomendações Nacionais e Internacionais

As recomendações internacionais IEEE 450 e IEEE 1188 têm como objetivo fornecer ao usuário informações e recomendações relativas à manutenção, testes e substituição de baterias de chumbo-ácido estacionárias ventiladas e reguladas por válvula. As normas nacionais para baterias são equivalentes em função e forma às recomendações

internacionais e especificam os requisitos para a execução dos ensaios em acumuladores chumbo-ácidos estacionários ventilados (NBR 14199) e regulados por válvula (NBR 14205), com especificidades para aplicação.

Dentro das normativas, destacam-se as inspeções periódicas determinadas nos itens abaixo, e os testes associados a estas como principal método para avaliar, de maneira segura, o estado dos elementos de um banco de baterias. Testes periódicos permitem, por análises comparativas, informar ao usuário sobre o SoC, estado de saúde e vida útil de um banco de baterias.

- Mensais:
 - Determinar tensão de flutuação;
 - Verificar aparência geral, vazamentos e oxidações;
 - Verificar corrente e tensão de saída no carregador;
 - Verificar nível de eletrólito.
- Trimestrais:
 - Medir resistência interna da bateria;
 - Verificar temperatura do terminal negativo de cada elemento;
 - Verificar tensão em cada elemento.
- Anuais:
 - Verificar conexões entre os terminais;
 - Verificar forma de onda da corrente no carregador.

Os ensaios de capacidade, de longa duração e realizados com pouca frequência, exigem a carga completa das baterias e a manutenção de uma tensão de flutuação por até 24 horas para garantir as condições de teste, conforme a NBR 14199. Em seguida é realizada a descarga completa das baterias até o mínimo de tensão estabelecido pelo fabricante, com a corrente constante de descarga nominal da bateria. O teste exige o acompanhamento da medida de tensão, idealmente durante todo o ensaio, e o controle da temperatura ambiente em $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Não são permitidas interrupções durante esse teste, o que limita a quantidade de parâmetros a serem extraídos.

Embora o ensaio seja projetado para avaliar a capacidade da bateria, a manutenção de uma corrente constante durante a descarga permite estabelecer uma relação direta entre a tensão nos terminais e o SoC. Ainda, se as medições de tensão e corrente forem igualmente realizadas durante a carga, se obtém desse ensaio duas curvas de tensão v_b nos terminais: uma da carga e outra da descarga. Com corrente constante, o valor médio entre as duas curvas é a tensão de circuito aberto $v_{oc}(SoC)$.

A partir da comparação entre a curva de circuito aberto com uma curva da tensão nos terminais, se obtém a queda de tensão interna no circuito. Conforme mencionado na seção anterior, a dinâmica de carga é lenta o suficiente para que possam ser ignorados os efeitos das constantes de tempo RC nesse ensaio. Com uma corrente e uma tensão, se obtém a resistência interna total da bateria.

4.2 Parâmetros Disponibilizados Através dos Manuais de Fabricantes

Conforme tratado anteriormente, os manuais de fabricantes disponibilizam uma série de curvas contendo características das baterias produzidas. A correta interpretação dos dados disponibilizados é de fundamental importância

na síntese de um modelo elétrico equivalente, uma vez que erros durante este processo podem gerar em modelos que não representem o comportamento da bateria.

A Tabela 1 apresenta os resultados dessa análise. A pesquisa foi realizada com os os manuais de seis fabricantes. Os manuais são genéricos e incluem uma variedade de modelos do catálogo, dentre baterias ventiladas (OPzS, do alemão *Ortsfest PanZERplatte Flußig*) e seladas (OPzV - do alemão *Ortsfest PanZERplatte Verschlossen*).

O levantamento demonstra que não há padronização nos manuais das diferentes fabricantes. As únicas curvas presentes em todos os manuais são as curvas de carga com corrente e tensão constante e a curva de fator K.

O fator K é um fator definido a partir da relação entre a capacidade de corrente da bateria (em A/h) e a corrente de descarga da bateria. Podemos definir a expressão que calcula o fator K em (4).

$$K = \frac{I_{capacidade}}{I_{descarga}/t_{descarga}} \quad (4)$$

Em que: $I_{capacidade}$ é a capacidade nominal de corrente da bateria em A/h, $I_{descarga}$ é a corrente de descarga da bateria em Ámpere e $t_{descarga}$ é o tempo que a bateria leva para descarregar com a corrente $I_{descarga}$, em horas.

Por mais que o fator K esteja relacionado à Lei de Peukert e seja um parâmetro interessante para análise do comportamento de baterias de chumbo-ácido, esse fator está ligado aos modelos analíticos discutidos na seção 2, não sendo suficiente para determinação de parâmetros em modelos de bateria.

Uma das curvas mostradas em todos os manuais é a curva de carga com tensão e corrente constante. A representação do perfil de carga é, comumente, semelhante ao perfil da curva mostrada na Fig. 1, em que a bateria é carregada com corrente constante e, posteriormente, com tensão constante. Um exemplo dessa curva é retirado do manual (EnerSystem, 2017) e ilustrado na Fig. 6.

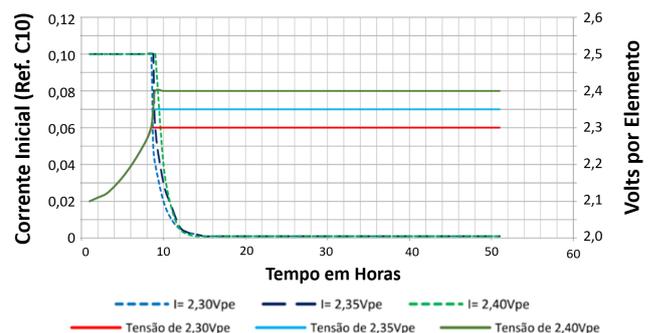


Figura 6. Curva de carga com perfis em tensão e corrente constante em 10% do valor nominal (C10)(EnerSystem, 2017).

A curva de circuito aberto costuma não ser dependente do modelo de bateria, pois resulta diretamente da soma dos potenciais de oxidação e redução. O potencial pode ser aproximado uma vez que se conheça a densidade do eletrólito e a temperatura da célula. Conforme ocorre a saturação do eletrólito - atingindo sua concentração máxima de ácido (Kischkel, 2019), a tensão de circuito

Tabela 1. Curvas Mostradas em Manuais de Fabricantes

Curva mostrada no manual	(EnerSystem, 2017)	(Fulguris, 2018)	(Newmax, 2011)	(Lorica, 2009)	(Saturnia, 2006)	(Unipower, 2017)
Carga com $V_{constante}$	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Carga com $I_{constante}$	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Capacidade vs Tempo de Descarga	-	Sim	-	-	Sim	Sim
Temperatura vs Capacidade	Sim	-	Sim	Sim	Sim	Sim
Tensão interna vs SoC	Sim	-	Sim	-	-	-
Vida Útil vs Capacidade	-	-	-	Sim	Sim	-
SoC vs Capacidade	Sim	-	Sim	-	-	-
SoC vs Tempo de Descarga	-	-	-	Sim	-	Sim
$R_{interna}$ vs SoC	-	-	Sim	Sim	-	-
Temperatura vs Densidade	Sim	-	-	-	Sim	-
Tensão nos Terminais vs $t_{descarga}$	-	Sim	-	-	Sim	-
Tensão nos Terminais vs t_{carga}	-	Sim	-	-	Sim	-
Tensão nos Terminais vs SoC	-	-	-	Sim	Sim	-
Fator K	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
$I_{flutuacao}$ vs Tempo de Operação	-	Sim	Sim	-	-	Sim
$V_{flutuacao}$ vs Temperatura	-	-	Sim	-	-	-
Autodescarga	-	-	Sim	Sim	-	Sim

aberto se estabiliza. Alguns fabricantes disponibilizam a curva (EnerSystem, 2017), enquanto os demais consideram que a curva é linearmente dependente da densidade do eletrólito (Saturnia, 2006). Essa aproximação é prevista na literatura (Kiehne, 2003).

Ainda, todos os manuais apresentam algum trecho de curvas do processo de carga ou descarga com corrente constante. A aferição dessa curva, quando comparada à curva de tensão interna, facilita a obtenção da curva de resistência interna da bateria. Um exemplo da curva de tensão nos terminais em descarga é mostrada na Fig. 7.

4.3 Dados Extraídos dos Manuais

Conforme verificado anteriormente, os fabricantes de baterias dispõem algumas informações sobre a bateria produzida. No entanto, alguns fabricantes podem disponibilizar poucas informações sobre a bateria, fazendo com que a obtenção dos parâmetros para um circuito equivalente não seja direta, exigindo uma análise menos superficial. Dessa forma, propõe-se obter parâmetros não disponibilizados por fabricantes a partir da coleta de dados de curvas e tabelas inseridas no manual.

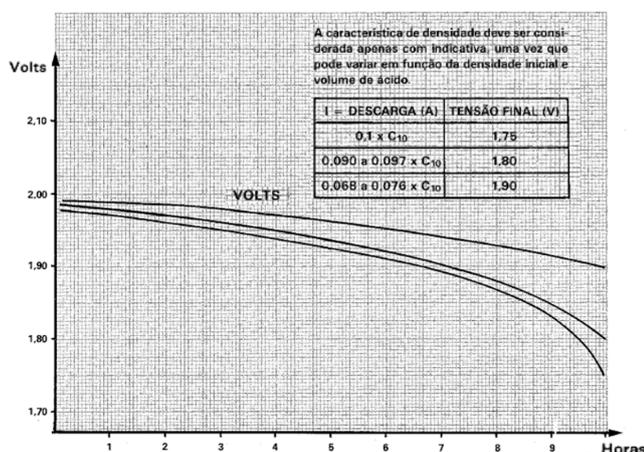


Figura 7. Tensão nos terminais vs Tempo de Descarga para o processo de descarga (Saturnia, 2006).

A curva de tensão interna da bateria pode ser definida através do manual. No entanto, como mencionado, essa curva pode ser também aproximada por uma relação linear entre a tensão e a densidade do eletrólito e, por consequência, linear com o SoC. A curva precisa ser corrigida pela temperatura, conforme detalhado em (Saturnia, 2006).

Uma vez definida a tensão interna da bateria em função do SoC, o próximo passo se baseia na obtenção da tensão nos terminais. Conforme averiguado em manuais, a tensão nos terminais nos processos de descarga dependem fortemente do tempo de descarga, ou seja, dependem da corrente de descarga em que a bateria é submetida. Extraindo os dados de tensão nos terminais para diferentes curvas de descarga (Saturnia, 2006) e calculando-os em função de SoC, obtêm-se a tensão nos terminais em função de SoC. A Fig. 8 mostra o comportamento da tensão nos terminais para diferentes correntes de descarga.

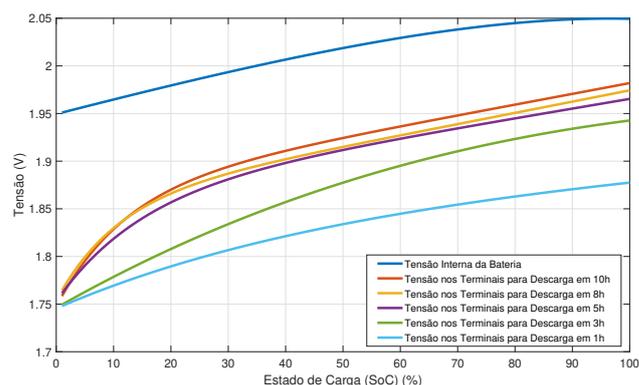


Figura 8. Tensão nos terminais para diferentes correntes de descarga.

Considerando descarga com corrente constante definida como a relação entre a capacidade nominal da bateria e o tempo de descarga, é possível calcular a queda de tensão interna e determina-se a resistência interna da bateria. A resistência interna é dependente, assim, do SoC e da corrente de descarga. A Fig. 9 mostra um gráfico representando as relações entre as variáveis.

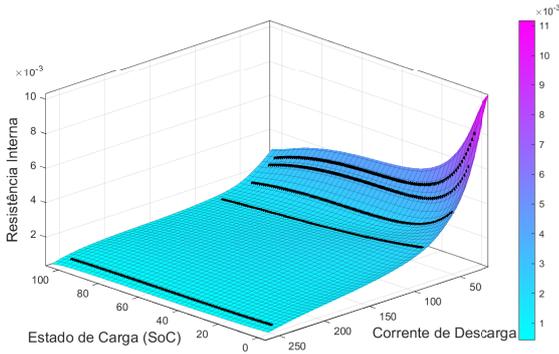


Figura 9. Resistência interna em função de SoC e $I_{descarga}$.

Comparando as curvas obtidas na Fig. 9 com as curvas disponibilizadas em (Lorica, 2009), verifica-se o comportamento exponencial de ambas, em que a resistência interna aumenta com a redução do SoC e de $I_{descarga}$.

4.4 Dados Extraídos dos Ensaios

Alguns parâmetros e curvas não estão explícitos na documentação de todos os manuais, exigindo manipulação das curvas fornecidas. Outros parâmetros não estão presentes de modo nenhum, e, com isso, surge a necessidade de realizar ensaios práticos para a extração de dados.

Na subseção 2.1 foram demonstrados múltiplos circuitos equivalentes para representação de baterias de chumbo-ácido. Levando em consideração que os componentes passivos que compõem esses modelos dependem de uma série de fatores — como SoC, corrente de carga e temperatura — esta seção será dedicada ao estudo de diferentes metodologias para extração desses parâmetros experimentalmente.

Os parâmetros do circuito equivalente Thevenin apresentado na Fig. 3 podem ser computados através da interpolação de dados experimentais (Devarakonda et al., 2014), podendo ser obtidos por meio de diferentes ensaios.

Ensaio de Degrau de Corrente Este ensaio consiste na aplicação de um degrau de corrente — com duração na faixa de minutos — e na observação da evolução da tensão de circuito aberto $v_{oc}(t)$ (Peng, 2011; Kischkel, 2019). Conhecida a magnitude da corrente e a variação de tensão de circuito aberto resultante, calcula-se a resistência série R_o a partir de

$$R_o(SoC, I_{step}, T) = \frac{\Delta v_{oc}}{I_{step}} \quad (5)$$

Similarmente, o cálculo de R e C , considerando um circuito equivalente Thevenin de primeira ordem, pode ser realizado através da análise da constante de tempo τ associada ao tempo de subida da tensão. Cabe ressaltar que os parâmetros extraídos por meio deste ensaio dependerão do ponto de operação da bateria, definido pelo SoC, corrente e temperatura. Modelos mais precisos exigem, portanto, uma sequência de ensaios com degraus distintos.

Espectroscopia de Impedância Eletroquímica IES tem sido amplamente empregada na caracterização de baterias eletroquímicas, devido a sua robustez e eficácia na estimação de dinâmicas ocorrentes em frequências mais bai-

xas em comparação às demais metodologias (Alao, 2020). Esta técnica de caracterização, na sua forma mais básica, fundamenta-se na aplicação de pequenos sinais senoidais de perturbação e subsequente observação da resposta associada (tensão ou corrente, dependendo da grandeza física do sinal aplicado) (Macdonald e Barsoukov, 2005). Esse procedimento é repetido para diferentes frequências e a impedância pode ser calculada através de (6), possibilitando a obtenção do diagrama de impedâncias previamente apresentado na Fig. 4.

$$Z(\omega) = \frac{v_{oc}(\omega)}{i(\omega)} \quad (6)$$

Ainda, para garantir a validade das medições, deve-se certificar de que a amplitude dos sinais senoidais seja pequena o bastante, permitindo que a impedância do sistema seja analisada em uma região linear (Macdonald e Barsoukov, 2005; Alao, 2020).

5. VALIDAÇÃO DE UM MODELO DE BATERIA

Uma vez que tenham sido estabelecidos métodos para a extração de parâmetros das baterias, é possível se implementar em um software de simulação o modelo desenvolvido. Nesse trabalho, a implementação é realizada utilizando o software PSIM[®], voltado para eletrônica de potência. O modelo inteiro pode ser implementado como uma fonte de tensão variável, cujo valor é calculado a partir da corrente em seus terminais. A lógica do algoritmo replica a dinâmica mostrada em (2) e (3). A Fig. 10 e 11 são resultados de simulação das curvas de resistência e tensão das baterias durante as descargas para diversos valores de corrente. A simulação inclui valores interpolados que não estão disponíveis nos manuais, validando o uso do modelo.

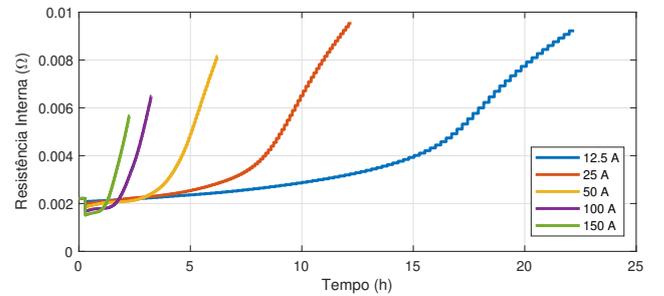


Figura 10. Resultado de simulação da resistência interna.

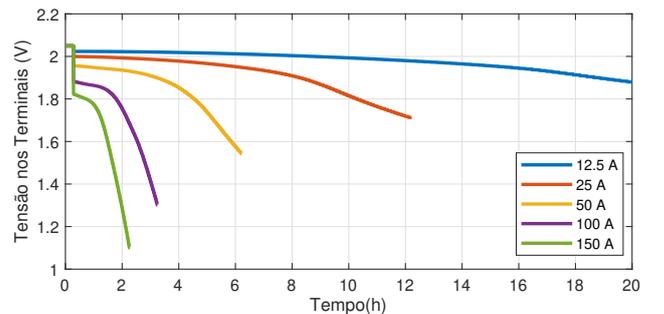


Figura 11. Resultado de simulação da tensão dos terminais.

6. CONCLUSÃO

Esse artigo apresentou uma série de informações sobre modelagem e extração de parâmetros para baterias chumbo-ácido. A extração paramétrica de variáveis como funções de SoC e corrente de descarga foi desenvolvida. A metodologia de extração de parâmetros (resistência interna e tensão interna da bateria) mostrou perfis de curvas similares aos encontrados na literatura. Denota-se que as curvas de tensão nos terminais obtidas em ambiente de simulação são curvas características de descarga de baterias, validando a extração de parâmetros supracitada. Ensaio experimentais a fim de extrair os parâmetros referentes aos pares RC do modelo da bateria são necessários para constituir um modelo completo. Na versão final do artigo serão apresentados testes experimentais para validar a extração paramétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CEEE-GT que, através do projeto intitulado "Projeto e Desenvolvimento do Carregador de Banco de Baterias para Emprego em Subestação de Energia Elétrica", forneceu incentivo financeiro para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Agarwal, V., Uthaichana, K., DeCarlo, R.A., e Tsoukalas, L.H. (2010). Development and validation of a battery model useful for discharging and charging power control and lifetime estimation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 25(3), 821–835.
- Aiao, O. (2020). Online impedance estimation of sealed lead acid & lithium nickel-cobalt-manganese oxide batteries using a rapid excitation signal.
- Casacca, M.A. e Salameh, Z.M. (1992). Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modeling techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7(3), 442–446.
- Ceraolo, M. (2000). New dynamical models of lead-acid batteries. *IEEE transactions on Power Systems*, 15(4), 1184–1190.
- Chen, A. e Sen, P.K. (2016). Advancement in battery technology: A state-of-the-art review. *IEEE Industry Application Society, 52nd Annual Meeting: IAS 2016*, 1–10. doi:10.1109/IAS.2016.7731812.
- Chiasserini, C.F. e Rao, R.R. (1999). A model for battery pulsed discharge with recovery effect. In *WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat. No. 99TH8466)*, volume 2, 636–639. IEEE.
- Devarakonda, L., Wang, H., e Hu, T. (2014). Parameter identification of circuit models for lead-acid batteries under non-zero initial conditions. *Proceedings of the American Control Conference*, 4360–4365. doi:10.1109/ACC.2014.6858706.
- EnerSystem (2017). Acumulador Chumbo-Ácido Power-Safe OPzS. 1–43.
- Figueiró, A.A. (2015). *Controle do Balanceamento de Bateria e Estimação de Estado de Carga*. Ph.D. thesis.
- Fulguris (2018). Bateria Estacionária Regulada por Válvula - Manual de Operação e Instalação. 1–46.
- Gu, H., Nguyen, T., e White, R.E. (1987). A mathematical model of a lead-acid cell: Discharge, rest, and charge. *Journal of The Electrochemical Society*, 134(12), 2953.
- Jongerden, M.R. e Haverkort, B.R. (2009). Which battery model to use? *IET software*, 3(6), 445–457.
- Khalil, H.K. (2002). *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, New Jersey, third edition.
- Kiehne, H.A. (2003). *Battery Technology Handbook*. Marcel Dekker, New York, second edition.
- Kim, T. e Qiao, W. (2011). A hybrid battery model capable of capturing dynamic circuit characteristics and nonlinear capacity effects. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(4), 1172–1180.
- Kischkel, J. (2019). Vrla - lead acid battery and its internal resistance. *Panasonic*.
- Krein, P.T. e Balog, R.S. (2002). Life extension through charge equalization of lead-acid batteries. In *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference*, 516–523. doi:10.1109/intlec.2002.1048705.
- Kularatna, N. (2014). Dynamics and modeling of rechargeable batteries: What electrochemists? work tells the electronic engineers. *IEEE Power Electronics Magazine*, 1(4), 23–33.
- Liu, K., Li, K., Peng, Q., e Zhang, C. (2019). A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), 47–64. doi:10.1007/s11465-018-0516-8.
- Lorica, N. (2009). Manual De Operação e Manutenção de Baterias Ácidas. 1–118.
- Lujano-Rojas, J., Osorio, G., Mendes, T., e Catalao, J. (2016). Stochastic modeling of lead-acid battery parameters. In *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1–5. IEEE.
- Macdonald, J.R. e Barsoukov, E. (2005). Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications. *History*, 1(8), 1–13.
- Manwell, J.F. e McGowan, J.G. (1993). Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. *Solar Energy*, 50(5), 399–405.
- Newmax, B.V. (2011). Manual Técnico. 1–62.
- Peng, W. (2011). Accurate circuit model for predicting the performance of lead-acid agm batteries.
- Rakhmatov, D.N. e Vrudhula, S.B. (2001). An analytical high-level battery model for use in energy management of portable electronic systems. In *IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Design. ICCAD 2001*, 488–493. IEEE.
- Randles, J.E.B. (1947). Kinetics of rapid electrode reactions. *Discussions of the faraday society*, 1, 11–19.
- Rao, V., Singhal, G., Kumar, A., e Navet, N. (2005). Battery model for embedded systems. In *18th International Conference on VLSI Design - 4th International Conference on Embedded Systems Design*, 105–110. IEEE.
- Saturnia (2006). Manual Técnico para Baterias Chumbo-Ácidas. 1–117.
- Shepherd, C.M. (1965). Design of primary and secondary cells: II. an equation describing battery discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 112(7), 657.
- Unipower (2017). Manual Técnico Acumulador Chumbo-Ácido Estacionário Regulado por Válvula AGM. 1–50.
- Warburg, E. (1899). Ueber das verhalten sogenannter unpolarisirbarer elektroden gegen wechselstrom. *Annalen der Physik*, 303(3), 493–499.