

Contribuições à Estimativa das Características Elétricas e ao Tempo de Vida Útil de Baterias de Chumbo-Ácido

David Ciarlini Chagas Freitas

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Antonio Marcus Nogueira Lima
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
©David Ciarlini Chagas Freitas, Março de 2016

"CONTRIBUIÇÕES À ESTIMATIVA DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS E AO TEMPO DE VIDA ÚTIL DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO  "

DAVID CIARLINI CHAGAS FREITAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/03/2016


ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Orientador(a)


MARCOS RICARDO DE ALCÂNTARA MORAIS, D.Sc, UFCG
Orientador(a)


ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORRÊA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


GUTEMBERG GONÇALVES DOS SANTOS JÚNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- F866c Freitas, David Ciarlini Chagas.
Contribuições à estimativa das características elétricas e ao tempo de vida útil de baterias de chumbo-ácido / David Ciarlini Chagas Freitas. – Campina Grande, 2016.
69 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
"Orientação: Prof. D. Sc. Antonio Marcus Nogueira Lima".
Referências.
1. Bateria - Modelo. 2. Bateria – Chumbo-Ácido. 3. Identificação de Parâmetros. 4. Bateria - Vida Útil. I. Lima, Antonio Marcus Nogueira.
II. Título.

CDU 621.354(043)

Agradecimentos

Aos meus pais e ao meu irmão por fazerem parte da minha vida e valorizarem a educação como grande meio para o crescimento.

À Renata, minha querida noiva e futura esposa, pelo apoio e companheirismo incessantes.

Aos meus avós que sempre apoiaram meus estudos.

Ao professor Antonio Marcus por sua orientação, tantas vezes oportuna e precisa.

Ao professor Marcos Morais e ao amigo Marcos Ketzer, pelo auxílio em várias ocasiões.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Por fim, a todos os familiares e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Resumo

Na presente dissertação, são apresentadas contribuições ao modelo elétrico e ao modelo de vida útil de baterias de chumbo-ácido. Cinco contribuições são apresentadas: as quatro primeiras ao modelo elétrico e a quinta, e última, ao modelo de vida útil: I) escolha do ponto pós decaimento da curva de descarga para um caso específico. Mediante o uso desse método é possível obter uma estimativa de boa qualidade, comparada à que utiliza um método iterativo de otimização não-linear; II) escolha do ponto pós decaimento da curva de descarga com diferentes estados de carga. Com esse método é possível determinar a escolha do terceiro ponto baseado no perfil de corrente de carga e descarga, que varia o estado de carga, na qual a bateria é submetida; III) estimação da resistência CC pelas equações do modelo em estudo. A qualidade da estimação dessa medida é comparável ao método de cálculo de resistência dado por duas normas; IV) escolha da constante de tempo do filtro de corrente. Essa escolha varia para cada bateria de chumbo-ácido e não deve ser pré-estabelecida; V) generalização da equação de degradação do modelo de vida útil para contemplar qualquer bateria de chumbo-ácido. A alteração faz com que qualquer bateria de chumbo-ácido possa ter sua vida útil prevista, contanto que faça a determinação dos parâmetros necessária. Todas as abordagens foram testadas por meio de simulações computacionais e comprovadas por intermédio de experimentos. Os resultados obtidos serviram para mostrar a validade e aplicabilidade das contribuições desenvolvidas.

Abstract

The present dissertation presents contributions to the electrical and to the lead acid lifetime model. Five contributions are presented: the first four of the electric model and the fifth, and last, the lifetime model: I) the selection of the point after discharge decay curve for a specific case. By using this method is possible an estimate of good quality, compared to using an iterative non-linear optimization method. II) the selection of the point after decay of discharge curve for different state of charge values. With this method it is possible to determine the choice of the third point based on the charge and discharge current profile in which the battery is subjected; III) the estimation of the DC resistance by the model equations in the study. The estimation quality is compared to the given resistance calculation method for two standards. IV) the choice of the filtered current time constant. This choice varies for each lead-acid battery and should not be predetermined. V) the widespread degradation equation of lifetime model to contemplate any lead-acid battery. The change makes the lifetime of any lead-acid battery to be calculated, as long as they do obtain the necessary parameters. All approaches were tested by computer simulations and proven by experiments. The results served to show the validity and applicability of the developed contributions.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Justificativa	3
1.3	Objetivos	3
1.4	Organização do documento	3
2	Modelos de Baterias	5
2.1	Introdução	5
2.2	Revisão da literatura	5
2.3	Modelo para obtenção das características elétricas	6
2.3.1	Modelo de Shepherd	7
2.3.2	Modelo de Tremblay, Dessaint e Dekkiche	12
2.3.3	Modelo de Tremblay e Dessaint	14
2.4	Modelo para determinação do tempo de vida útil	15
2.4.1	Modelo de Schiffer	16
2.5	Síntese	22
3	Contribuições para determinação das características elétricas	24
3.1	Introdução	24
3.2	Escolha do terceiro ponto da curva de descarga	24
3.2.1	Introdução	24
3.2.2	Método 3P	25
3.2.3	Estimação de parâmetros	26
3.2.4	Validação	29
3.2.5	Conclusão	32
3.3	Escolha do terceiro ponto da curva de descarga com diferentes estados de carga	32
3.3.1	Método 3P	32
3.3.2	Estimação de parâmetros	33

3.3.3	Validação	33
3.3.4	Conclusão	34
3.4	Estimação da resistência	35
3.4.1	Métodos de determinação da resistência	36
3.4.2	Determinação da resistência	36
3.4.3	Validação	38
3.4.4	Conclusão	39
3.5	Escolha da constante de tempo	40
3.5.1	Algoritmo genético	40
3.5.2	Estimação da constante de tempo	41
3.5.3	Validação	43
3.5.4	Conclusão	43
4	Contribuição para determinação do tempo de vida útil	44
4.1	Introdução	44
4.2	Plataforma de testes	45
4.2.1	Tanque hidrotérmico	45
4.2.2	Quadro elétrico de comando e controle	45
4.2.3	Circuito para carga e descarga	46
4.2.4	Monitoramento e controle	46
4.3	Fluxograma do protocolo de coleta de dados	48
4.4	Testes e resultados	50
4.5	Conclusão	61
5	Considerações Finais	63
5.1	Conclusão	63
5.2	Continuação da pesquisa	64
	Referências Bibliográficas	66

Lista de Símbolos

i_{am} - Densidade de corrente do material ativo

M - Quantidade de material ativo por unidade de área disponível para descarga

M_1 - Quantidade de material ativo disponível por unidade de área usada até o tempo t

I_0 - Densidade de corrente aparente

i - Corrente da bateria

Q - Capacidade nominal da bateria

k_i - Constante da densidade de corrente

t - Tempo transcorrido

E - Tensão da célula

E_s - Tensão base da célula

K - Inclinação da curva de polarização

R - Resistência interna da célula

A - Constante empírica

B - Constante empírica

v - Tensão da bateria

E_0 - Tensão interna da bateria

i_T - Atual capacidade consumida da bateria

i_F - Corrente filtrada

D_d - Profundidade de descarga

S_c - Estado de carga

e - termo exponencial de tensão nos modelos em estudo

u - Variável para indicação de carga ou descarga no termo exponencial de tensão

τ - Constante de tempo do filtro de corrente

U - Tensão nos terminais da célula

U_0 - Tensão de circuito aberto da célula

g - Constante de proporcionalidade do eletrólito

$\rho_{c/d}$ - Resistência interna agregada de carga/descarga

I - Corrente da bateria para o modelo de Schiffer. Carga: $I(t) > 0$. Descarga: $I(t) \leq 0$

C_n - Capacidade nominal da bateria

- $M_{c/d}$ - Coeficiente de sobretensão de carga/descarga
 $C_{c/d}$ - Capacidade normalizada de carga/descarga
 U_c - Tensão de corrosão
 $U_{c,0}$ - Tensão de corrosão para uma bateria completamente carregada e sem fluxo de corrente
 I_g - Corrente de gaseificação
 $I_{g,0}$ - Corrente de gás normalizada para 100Ah
 $U_{g,0}$ - Tensão para gaseificação
 $T_{g,0}$ - Temperatura nominal para gaseificação
 c_u - Coeficiente de tensão
 c_T - Coeficiente de temperatura
 T - Temperatura da bateria
 ΔW - Espessura efetiva da camada de corrosão
 k_s - Função da velocidade de corrosão
 Δt - Duração do passo de simulação
 $k(U_c)$ - Função da curva de velocidade de corrosão \times tensão de corrosão
 $k_{s,T}$ - Fator de temperatura
 $T_{c,0}$ - Temperatura de referência equivalente a 298K
 ρ_c - Resistência da camada de corrosão
 $\rho_{c,l}$ - Resistência da camada de corrosão no final da vida útil da bateria
 ΔW_l - Espessura efetiva da camada de corrosão no final da vida útil da bateria
 C_c - Perda de capacidade por corrosão
 $C_{c,l}$ - Perda da capacidade por corrosão no final da vida útil
 L_s - Tempo de vida útil da bateria em flutuação
 $k_{s,l}$ - Parâmetro de velocidade de corrosão
 Z_N - Quantidade de ciclos nominais
 I_d - Corrente de descarga
 Z_W - Quantidade de ciclos nominais ponderados
 f_S - Fator para influência do SOC e o impacto da taxa de corrente
 f_{Ac} - Fator que representa a influência da estratificação do ácido
 C_{deg} - Perda de capacidade devido à degradação
 $C_{deg,l}$ - Perda de capacidade devido à degradação no final da vida útil
 c_z - Parâmetro da equação da perda por degradação
 Z_{IEC} - Número efetivo de ciclos sem corrosão $Z_{IEC} = 1,6 \times Z_N$
 $c_{S,0}$ - Parâmetro que representa o aumento de f_S com o tempo
 $c_{S,m}$ - Parâmetro que representa a influência do S_{cm}
 $S_{cm}(t)|_{t_0}^t$ - Menor valor de SOC desde a última carga completa

- f_I - Fator de corrente
- Δt_S - Tempo decorrido desde a última carga completa
- z - Altura dos eletrodos
- z_0 - Constante dos números de cristais
- I_r - Corrente de referência. Normalmente uma corrente para descarga em 10h
- f_e - Grau de estratificação do ácido
- f_{ma} - Aumento da estratificação do ácido
- f_{me} - Diminuição da estratificação do ácido
- c_{ma} - Constante da equação de f_{ma}
- $f_{me,g}$ - Redução da estratificação do ácido por gaseificação
- $f_{me,d}$ - Redução da estratificação do ácido por difusão
- c_{me} - Constante da equação de f_{me}
- D - Constante de difusão efetiva
- C_{re} - Capacidade restante da bateria
- V_{full} - Tensão de uma bateria completamente carregada
- Q_{exp} - Quantidade de carga retirada da bateria no final da zona exponencial da curva de descarga
- V_{exp} - Tensão da bateria no final da zona exponencial da curva de descarga
- α - Valor da derivada da tensão para a escolha do segundo ponto P2
- t_{exp} - Tempo do segundo ponto da curva de descarga
- t_{nom} - Tempo do terceiro ponto da curva de descarga
- \dot{v} - Derivada da tensão
- Q_{nom} - Quantidade de carga retirada da bateria no decaimento final da curva de descarga
- V_{nom} - Tensão de uma bateria no decaimento final da curva de descarga
- Γ_N - Função objetivo adotada para formulação do problema de estimação de tensão
- N - Quantidade de pontos medidos para validação na curva de descarga
- $\hat{v}(t, p_3)$ - Estimativa da tensão medida nos terminais da bateria
- t_X - Ponto final da curva de descarga (Final da curva de estimação)
- t_Y - Ponto inicial da curva de teste
- $P1$ - Primeiro ponto na escolha da curva de descarga para estimação
- $P2$ - Segundo ponto na escolha da curva de descarga para estimação
- $P3$ - Terceira ponto na escolha da curva de descarga para estimação
- I_{xh} - Corrente para uma descarga completa em x horas
- I_m - Corrente no instante m
- U_m - Tensão no instante m
- $R_{CC-Norma}$ - Resistência CC da bateria calculada pelas normas IEC
- $R_{CC-Equacao}$ - Resistência CC da bateria calculada pela equação do modelo em estudo

v_{est}^d - Tensão da bateria estimada com Algoritmo Genético durante a descarga

v_{est}^c - Tensão da bateria estimada com Algoritmo Genético durante a carga

U_{est}^d - Tensão da célula estimada com Algoritmo Genético durante a descarga

U_{est}^c - Tensão da célula estimada com Algoritmo Genético durante a carga

Abreviaturas

SOC - Estado de carga

DOD - Profundidade de descarga

CC - Corrente contínua

CA - Corrente alternada

Método 3P - Método dos três pontos

MIONL - Método Iterativo de Otimização não-Linear

SQP - Programação Quadrática Sequencial (Método Iterativo não-Linear)

MRCC - Método de medição de resistência de CC

MRCA - Método de medição de resistência de CA

HFM - Método de alta frequência

EIS - Espectroscopia eletroquímica de impedância

TCP - Teste de corrente pulsante

AG - Algoritmo genético

BAT1 - Bateria real 1 para realização dos testes de tempo de vida útil

BAT2 - Bateria real 2 para realização dos testes de tempo de vida útil

PEBCA - Plataforma para ensaio de baterias de chumbo-ácido

Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros dependentes da bateria	22
2.2	Parâmetros que podem ser adaptados	23
2.3	Parâmetros que não devem ser mudados	23
3.1	Valores estimados - Método 3P.	29
3.2	Valores estimados - MIONL.	31
3.3	Valores do erro médio quadrático usando os dois métodos.	32
3.4	Valores estimados anteriormente com o método MIONL.	42
4.1	Parâmetros estimados para modelo de Schiffer	55
4.2	Valores após estimação - BAT1 e BAT2	55
4.3	Parâmetros estimados para curva de Capacidade da equação (4.8)	60
4.4	Valores após estimação - BAT1 e BAT2	61

Lista de Figuras

2.1	Efeito linear da tensão de uma bateria durante a descarga representado pela linha contínua.	8
2.2	Curva de descarga de uma bateria representada pela linha contínua.	9
2.3	Pontos na curva de descarga para determinar os parâmetros E_s , K e Q da equação.	10
2.4	Pontos em duas curvas de descarga para correntes diferentes para determinar os parâmetros do termo exponencial da equação.	11
2.5	Modelo de bateria proposto por Tremblay (2007) com uma fonte de tensão controlada em série com uma resistência interna.	13
2.6	Curva de descarga típica de uma bateria apresentando os três pontos propostos no modelo de Tremblay para obter os parâmetros da equação (2.20).	13
2.7	Modelo de bateria com uma fonte de tensão controlada em série com uma resistência interna (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).	14
3.1	Tensão $v(t)$ (parte superior) do modelo de simulação para um ciclo de carga e descarga (parte inferior). A carga e a descarga são promovidas por fontes de corrente controladas.	26
3.2	Tensão da bateria quando um degrau de corrente é aplicado. A constante de tempo representada é de 30s	26
3.3	Curva de descarga indicando os pontos necessários para obtenção dos parâmetros.	27
3.4	Curva para escolha do segundo ponto baseada no valor da derivada da tensão ($\frac{dv(t)}{dt} < -0,2$).	27
3.5	Valores do erro médio quadrático. As 13 escolhas de P3 ensejam 13 vetores paramétricos diferentes.	28
3.6	Valores do erro médio quadrático. Nova escolha de 11 pontos P3, escolhidos entre 3000s e 5000s.	29
3.7	Valores de tensão comparando o Método 3P com o modelo de simulação, baseado no perfil de validação apresentado na Figura 3.18.	30

3.8	Valores de tensão obtidos com os dois métodos de estimação e com o modelo de simulação. O perfil de validação é apresentado na Figura 2.	32
3.9	Corrente aplicada na bateria.	33
3.10	Variação do SOC da bateria após aplicação do perfil de corrente da Figura 3.9.	34
3.11	Variação da tensão da bateria após aplicação do perfil de corrente da Figura 3.9.	34
3.12	Valores do erro médio quadrático para os treze níveis diferentes de tensão apresentados na Figura 3.11	35
3.13	Inicialmente a bateria é descarregada com uma corrente constante I_1 por 10s e, em seguida, por uma outra corrente $I_2 = 10I_1$ por 3s.	37
3.14	Perfil de corrente aplicado ao modelo de bateria. A corrente de descarga é 7,2A e a medição de resistência é calculada quando um par de corrente é aplicada: 3A por 667s e 30A por 200s.	38
3.15	Tensão e SOC do modelo de bateria com o perfil de corrente aplicada apresentado na Figura 3.14.	39
3.16	Resistência medida baseada na norma IEC 896-2 e IEC 61951-1 (equação (3.18)) e resistência medida baseada na equação (3.21).	39
3.17	O algoritmo genético inicia com a definição da função de ajustamento e geração inicial de uma população. Logo em seguida, há a avaliação da função de ajustamento da população. Assim, os melhores indivíduos são selecionados, há o cruzamento dos pares e uma taxa de mutação é aplicada. Se o critério de parada foi satisfeito, o algoritmo chega ao fim. Caso contrário, novamente será avaliada a função de ajustamento da população.	41
3.18	Tensão $v(t)$ (parte superior) do modelo de simulação para um ciclo de carga e descarga (parte inferior). A carga e a descarga são promovidas por fontes de corrente controladas.	42
3.19	Comparação entre a tensão do modelo de bateria chumbo-ácido e a tensão estimada da bateria.	43
4.1	Fotografia do tanque hidrotérmico empregado no isolamento e controle de temperatura	46
4.2	Fotografia do quadro elétrico do circuito hidrotérmico com dois inversores e um DataLogger	47
4.3	Diagrama elétrico do módulo de retificação trifásico controlado com fluxo bidirecional	47
4.4	Interface do usuário em software de interação remota	48

4.5	Fluxograma da contribuição para obter a capacidade das baterias BAT1 e BAT2	49
4.6	Corrente e tensão obtidas na BAT1 para os testes de cálculo de vida útil .	50
4.7	Corrente e tensão obtidas na BAT2 para os testes de cálculo de vida útil .	51
4.8	Capacidade da BAT1 medida em relação a primeira descarga posterior a carga completa de 24 horas	51
4.9	Capacidade da BAT2 medida em relação a primeira descarga posterior a carga completa de 24 horas	52
4.10	Capacidade da das baterias BAT1 e BAT2	52
4.11	Interpolação da curva de capacidade da BAT1	53
4.12	Interpolação da curva de capacidade da BAT2	53
4.13	Tensão do modelo de bateria chumbo-ácido e tensão estimada com o algoritmo genético para o modelo de Schiffer - BAT1.	56
4.14	Tensão do modelo de bateria chumbo-ácido e tensão estimada com o algoritmo genético para o modelo de Schiffer - BAT2	56
4.15	Tensão medida nos terminais da bateria e tensão calculada pelo modelo . .	57
4.16	Estado de carga SOC e profundidade de descarga DOD	58
4.17	Capacidade real da bateria e capacidade prevista pelo modelo	59
4.18	Degradação estimada com os novos parâmetros e a degradação real da bateria	61

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Devido a grande importância da energia para a humanidade, são incessantes as pesquisas que visam o desenvolvimento e aprimoramento de técnicas de obtenção e armazenamento de energia, com o objetivo principal de conciliar grande capacidade de geração, baixo custo e um mínimo impacto ao meio ambiente (ROSEMBACK, 2004).

Inventadas em 1859 pelo físico francês Gaston Planté, as baterias de chumbo-ácido foram as primeiras baterias usadas comercialmente em sistemas de armazenamento de energia (SOUSA, 2008). Esse tipo de bateria é um dos mais antigos, mas continua sendo empregado em diversas aplicações, pois mesmo com diversas tecnologias novas de baterias, como as de íons de lítio, ele é ainda preferida em muitas circunstâncias por possuir o custo mais baixo (LEAO; HARTMANN; CORREA; LIMA, 2010).

A sociedade tem se tornado cada vez mais dependente do consumo de energia. Essa dependência pode ser notada na produção de bens e serviços, na automação dos processos industriais, nos modernos sistemas de telecomunicações, no armazenamento e processamento de dados necessários a qualquer organização, na produção e transformação das diferentes formas de energia e na economia de um modo geral (CHAGAS, 2007).

Pode-se observar que não são mais toleradas falhas no fornecimento de energia elétrica que alimentam os sistemas vitais de empresas, hospitais, bancos, etc. A falha de alguns equipamentos pode causar graves prejuízos, com perdas econômicas, materiais e até humanas (CHAGAS, 2007).

Dessa forma, visando atender à necessidade de sistemas confiáveis de alimentação de energia estável são utilizados bancos de baterias. Esse equipamento é utilizado quando há a necessidade de suprir o consumo durante falhas no fornecimento do sistema de energia elétrica principal (CHAGAS, 2007).

Sistemas com banco de baterias operam com múltiplos ciclos de carga e descarga (KET-

ZER; LIMA; OLIVEIRA; JACOBINA, 2013). O problema da utilização de bancos de baterias está na necessidade de se avaliar periodicamente o seu SOC (do inglês, Estado de Carga) para a certificação de que as mesmas irão assumir a alimentação dos consumidores durante as faltas de energia, pois, como já citado, falhas nesse sistema acarretariam prejuízos (CHAGAS, 2007).

O rendimento de armazenadores de energia se deteriora com o tempo. Os mecanismos que mais danificam são corrosão e sulfatação seguido por degradação da massa ativa e perda de água. Esses mecanismos impactam diretamente os fatores de estresse. Os principais fatores de estresse são temperatura, profundidade de descarga (DOD), taxa de carga e descarga, tempo entre cargas completas e tempo em baixo estado de carga (SOC) (KAISER, 2003).

Os mecanismos de envelhecimento de baterias são os eventos químicos e mecânicos que causam falhas das mesmas. Estas falhas podem envolver processos longos de degradação ou eventos catastróficos curtos e, em algumas situações, a combinação dos dois (SOUSA, 2008).

O tempo de vida útil de uma bateria em um banco, dependendo da aplicação, é em torno de dois a três anos. Se uma bateria falhar em um banco, todo o banco será danificado e, assim, várias baterias deverão ser trocadas (PRAISUWANNA; KHOMFOI, 2013; JIRAMOREE; PAISUWANNA; KHOMFOI, 2011). Por isso, surge a necessidade de utilizar técnicas para prever as características reais e o tempo de vida útil de baterias.

Uma das formas de realizar a predição do tempo de vida da bateria é a partir da utilização de experimentos físicos. Porém, esta opção pode se tornar inviável pela grande quantidade de elementos sensores utilizados, além de possuir alto custo de implementação e gerenciamento. Outra forma, é a partir da utilização de modelos matemáticos que representam adequadamente o processo (SCHNEIDER, 2011).

Assim, modelos de baterias representam as características reais de operação destas e podem ser usados para prever os seus comportamentos sob várias condições de carga e descarga. Esses modelos são ferramentas úteis para o projeto de sistemas alimentados por baterias, porque possibilitam a análise do comportamento das mesmas sob diferentes especificações de projeto (SOUSA, 2008).

Representar baterias de um banco, por intermédio de modelos, é necessário, pois a incerteza associada ao seu tempo de vida afeta o custo da energia gerada por esse sistema. Por exemplo, caso possa ser realizada a troca de apenas uma bateria, em um banco, prestes a falhar, todo o banco não precisará ser trocado. Dessa forma, estimar essas características e o tempo de vida útil de baterias pode ajudar em possíveis ações preditivas (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005).

Sendo assim, o problema abordado neste trabalho é: “Dado um conjunto de dados

obtidos experimentalmente (tensão, corrente e temperatura), como determinar as características elétricas (tensão da bateria e estado de carga) e prever o tempo de vida útil da bateria”

1.2 Justificativa

A determinação das características elétricas e do tempo de vida útil de uma bateria é de vital importância, tanto economicamente quanto ecologicamente, para vários sistemas (e.g. empresas, hospitais e bancos).

Na presente dissertação, o interesse é melhorar as técnicas e os modelos de bateria para obtenção das características elétricas e do tempo de vida útil da bateria.

1.3 Objetivos

O objetivo principal é melhorar a estimativa das características elétricas e do tempo de vida útil das baterias de chumbo-ácido baseado em modelos já existentes na literatura. Para alcançar o objetivo principal, alguns objetivos específicos precisam ser contemplados:

- Revisar a literatura com o intuito de caracterizar os modelos existentes de bateria, principalmente os de chumbo-ácido;
- Definir o(s) modelo(s) que será(ão) utilizado(s) que estime(m) as características elétricas da bateria e sua vida útil;
- Realizar testes com os modelos escolhidos, comparando os resultados com os já existentes na literatura;
- Analisar os resultados do modelo com os resultados dos testes;
- Modificar parte dos modelos para generalizar o uso com qualquer bateria de chumbo-ácido.

1.4 Organização do documento

No Capítulo 2 apresenta-se a classificação dos modelos de baterias. Dessa forma, é apresentada uma revisão da literatura sobre o assunto. Em seguida, os modelos que estimam as características elétricas e determinam o tempo de vida útil são apresentados. O Capítulo 3 trata das contribuições ao modelo de obtenção das características elétricas. O Capítulo 4 apresenta uma contribuição ao modelo para determinação do tempo de vida útil, assim

como, os resultados de simulação e do experimento. Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão e discutidas as possíveis atividades para continuação da pesquisa.

Capítulo 2

Modelos de Baterias

2.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura dos modelos de baterias de chumbo-ácido com relação a complexidade e finalidade. Em seguida, os modelos para obtenção das características elétricas são detalhados (SHEPHERD, 1963; TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007; TREMBLAY; DESSAINT, 2009). Por fim, é apresentado o modelo para determinação do tempo de vida útil (SCHIFFER et al., 2007).

2.2 Revisão da literatura

Modelos de baterias representam as condições reais de trabalho destas e podem ser usados para prever o comportamento sob vários ciclos de carga e descarga (SOUSA, 2008).

Diversos modelos podem representar um mesmo fenômeno com variados níveis de complexidade, aproximação ou perspectiva. Modelos com aplicações diferentes tem sido propostos na literatura para a representação de baterias (HARTMANN, 2013).

Os modelos de baterias podem ser divididos, em relação à complexidade, em (SOUSA, 2008):

- **Modelos Eletroquímicos:** modelos que simulam as propriedades físico-químicas de uma bateria. Esses modelos incorporam as características de transporte de massa, propriedades termodinâmicas, mecânicas, térmicas e elétricas dos materiais (LIAW; BETHUNE; YANG, 2002);
- **Modelos Analíticos:** são modelos baseados na interpolação e extrapolação de dados obtidos de campo e em testes do fabricante. Apresentam complexidade reduzida quando comparados aos modelos eletroquímicos (ANDERSSON, 2006), (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005), (SHEPHERD, 1963), (SCHIFFER

et al., 2007), (TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007), (TREMBLAY; DESSAINT, 2009), (CERVONE; FALVO; SANTINI, 2012), (ACHAIBOU; HADDADI; MALEK, 2012), (KIM et al., 2014) e (G.; M.NIKDEL, 2014);

- **Modelos Análogos:** modelos baseados em circuitos elétricos equivalentes, por exemplo: fontes de tensão e de corrente, resistores, capacitores e indutores (DURR; CRUDEN; GAIR; MCDONALD, 2006), (CERAOLO, 2000), (KAISER, 2003), (JACKEY, 2007), (WIJEWARDANA, 2014), (SEAMAN; DAO; MCPHEE, 2014) e (REZVANIZANIANI; LIU; CHEN; LEE, 2014).

e, em relação à finalidade, em:

- **Modelos de Desempenho:** o primeiro tipo é o que modela o estado de carga, que é o principal parâmetro de um sistema de baterias. O segundo tipo, de tensão, modela a tensão nos terminais da bateria (DURR; CRUDEN; GAIR; MCDONALD, 2006), (GUASCH; SILVESTRE, 2003), (CERAOLO, 2000), (CHAN; SUTANTO, 2000), (ROSS; MARKVART; HE, 2000) e (CASACCA; SALAMEH, 1992). ;
- **Modelos de Tempo de Vida:** são utilizados para estimar o impacto de um esquema particular de operação no tempo de vida esperado para uma bateria. Leva em consideração a degradação da bateria (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005), (SCHIFFER et al., 2007) e (LANGELLA; TESTA; VENTRE, 2014);

2.3 Modelo para obtenção das características elétricas

Dentre os vários modelos vistos na classificação, foi o escolhido o modelo analítico proposto inicialmente por Shepherd, pois esse modelo pode ser utilizado tanto para carga quanto para descarga da bateria. Outra característica do modelo é a estimativa do SOC e da tensão da bateria. Os parâmetros característicos das equações de carga e descarga podem ser retirados da curva de descarga da bateria. Além disso, o modelo pode representar quatro tipos de tecnologias de bateria:

- Chumbo-Ácido;
- Íons de Lítio;
- Níquel-Cádmio;
- Níquel-Hidreto Metálico.

2.3.1 Modelo de Shepherd

As premissas básicas desse modelo analítico são:

- A temperatura é constante;
- A resistência interna é constante;
- A bateria é descarregada com corrente constante;
- A queda de tensão é dividida em três partes: momento inicial da descarga, resistência interna e polarização.

A densidade de corrente do material ativo i_{am} no tempo t durante a descarga é definida pelas duas seguintes condições:

- No começo da descarga, i_{am} é igual à densidade de corrente aparente i , pois nesse instante M_1 , que é a quantidade de material ativo disponível usada até o tempo t , é zero;
- Em qualquer tempo t durante a descarga, i_{am} é diretamente proporcional a ampère por grama do material ativo não utilizado.

As duas condições acima definem que a densidade de corrente do material ativo é dada pelas equações (2.1) à (2.3):

$$i_{am} = \frac{M}{M - M_1} I_0, \quad (2.1)$$

$$i_{am} = \frac{k_i M}{k_i M - k_i M_1} I_0 \text{ e} \quad (2.2)$$

$$i_{am} = \frac{Q}{Q - I_0 t} I_0, \quad (2.3)$$

na qual:

- M - quantidade de material ativo por unidade de área que está disponível para descarga;
- M_1 - quantidade de material ativo disponível por unidade de área usada até o tempo t . Consequentemente, $k_i M_1 = I_0 t$;
- I_0 - densidade de corrente aparente;
- Q - capacidade nominal da bateria. Pode ser calculada pela primeira lei da eletrólise para ser igual a $k_i M$, na qual k_i é uma constante.

A tensão durante a descarga é uma função linear da densidade de corrente do material ativo. Esta relação é apresentada na Figura 2.1. Se a função é extrapolada (linha tracejada) para $i_{am} = 0$ a tensão se torna a tensão de circuito aberto E_s . A inclinação do gráfico é dada pela variável K (SHEPHERD, 1963).

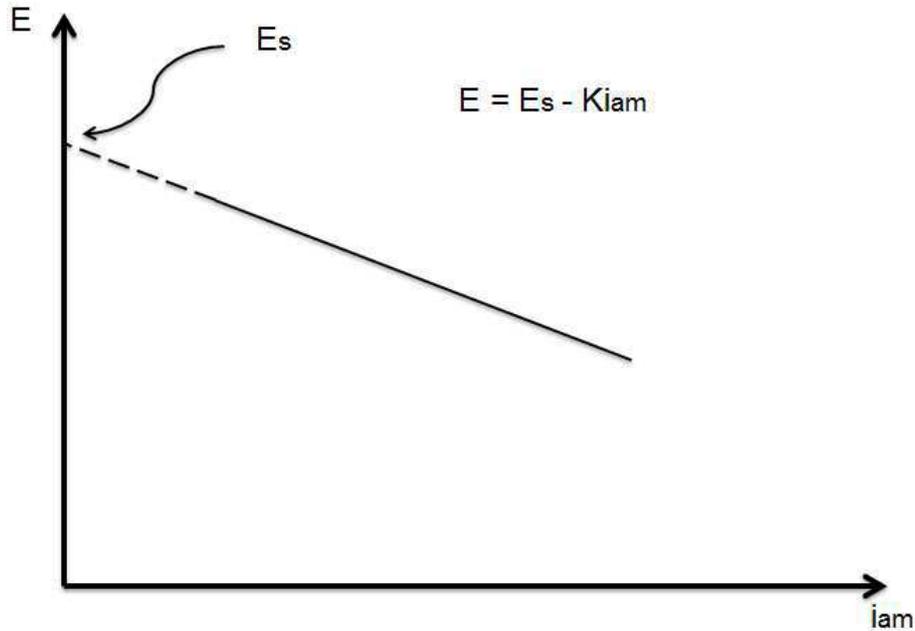


Figura 2.1: Efeito linear da tensão de uma bateria durante a descarga representado pela linha contínua.

Dessa maneira, a equação linear é dada pela equação (2.4).

$$E = E_s - K i_{am} \quad (2.4)$$

Substituindo a equação (2.3) na equação (2.4), obtém-se a equação (2.5).

$$E = E_s - K \frac{Q}{Q - I_0 t} I_0 \quad (2.5)$$

O termo relativo à resistência interna é, também, subtraído da equação (2.5), obtendo-se a equação (2.6) a seguir:

$$E = E_s - K \frac{Q}{Q - I_0 t} I_0 - R I_0, \quad (2.6)$$

na qual:

- E - tensão da célula durante a descarga;
- E_s - tensão base da célula;
- K - inclinação da curva de polarização;

- R - resistência interna da célula.

Quando a equação (2.6) é avaliada matematicamente um conjunto de curvas podem ser obtidas. A Figura 2.2 apresenta a curva de descarga de uma bateria por análise da equação (2.6). A curva obtida é a contínua. Porém, testes realizados em baterias apresentam que no início da descarga há uma taxa de decaimento maior que não é regido pela equação (2.6). Essa taxa é apresentada na figura 2.2 em linha tracejada até o ponto “a”.

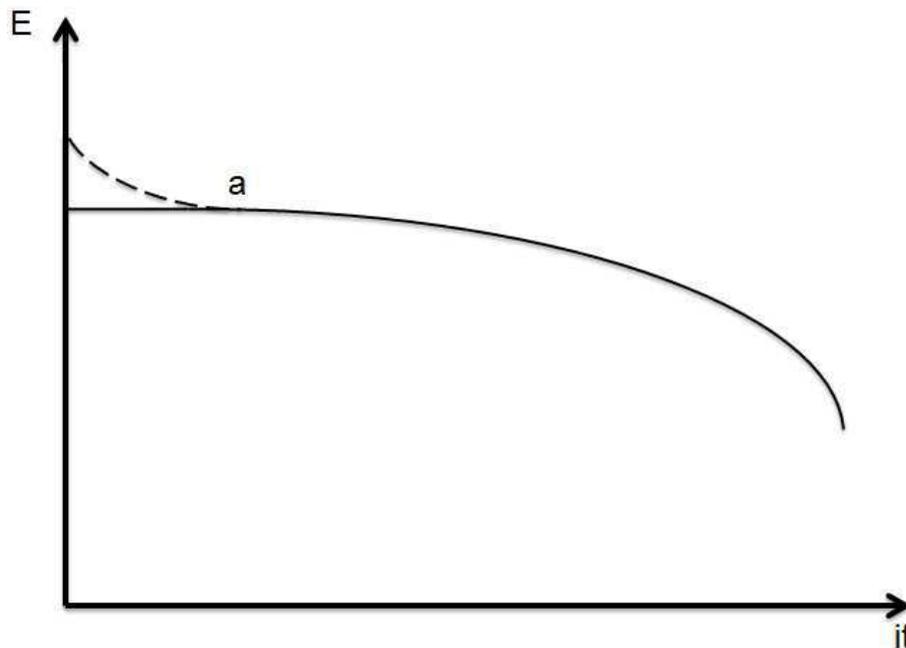


Figura 2.2: Curva de descarga de uma bateria representada pela linha contínua.

Portanto, um termo exponencial deve ser somado à equação (2.6) para representar a tensão durante a descarga. Esse termo foi encontrado experimentalmente (SHEPHERD, 1963).

Dessa maneira, a equação final de descarga é a apresentada na equação (2.7):

$$E = E_s - K \frac{Q}{Q - I_0 t} I_0 - RI_0 + Ae^{\frac{-BI_0 t}{Q}}, \quad (2.7)$$

na qual:

- A - constante empírica;
- B - constante empírica.

Na equação (2.7) a resistência R já é conhecida. Portanto, deve-se encontrar E_s , K , Q , A e B . Os três primeiros termos são encontrados avaliando a curva de descarga para uma corrente específica, como apresentado na Figura 2.3.

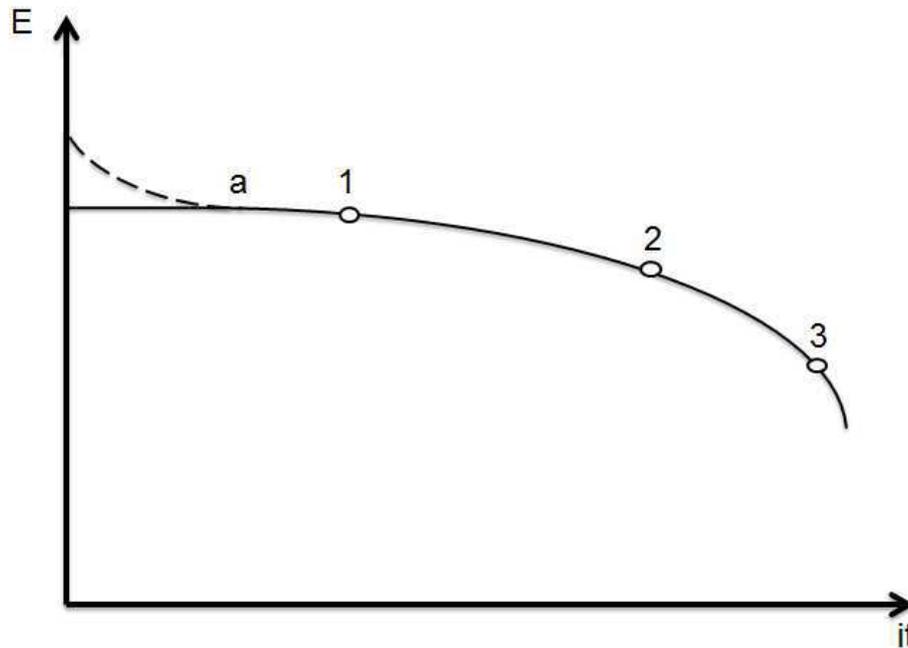


Figura 2.3: Pontos na curva de descarga para determinar os parâmetros E_s , K e Q da equação.

São escolhidos três pontos no gráfico da Figura 2.3. O ponto **1** é obtido logo após a curva inicial exponencial. Já os pontos **2** e **3** são, respectivamente, obtidos antes do decaimento final da curva e logo após esse decaimento.

Assim, com esses três pontos, as equações (2.8) à (2.10) determinam Q , K e E_s , como é visto a seguir:

$$E_1 = E_s - K \frac{Q}{Q - I_0 t_1} I_0 - R I_0 + A e^{-\frac{B I_0 t_1}{Q}}, \quad (2.8)$$

$$E_2 = E_s - K \frac{Q}{Q - I_0 t_2} I_0 - R I_0 + A e^{-\frac{B I_0 t_2}{Q}} \text{ e} \quad (2.9)$$

$$E_3 = E_s - K \frac{Q}{Q - I_0 t_3} I_0 - R I_0 + A e^{-\frac{B I_0 t_3}{Q}}. \quad (2.10)$$

Nesses três pontos, o valor numérico do termo exponencial já diminuiu rapidamente e é considerado zero.

Subtraindo a equação (2.9) da equação (2.8) e desconsiderando o termo exponencial, obtém-se:

$$E_1 - E_2 = K I_0 \frac{Q(I_0 t_2 - I_0 t_1)}{(Q - I_0 t_2)(Q - I_0 t_1)}. \quad (2.11)$$

Similarmente, a equação (2.10) é subtraída da equação (2.9):

$$E_2 - E_3 = K I_0 \frac{Q(I_0 t_3 - I_0 t_2)}{(Q - I_0 t_3)(Q - I_0 t_2)}. \quad (2.12)$$

Dividindo a equação (2.11) pela equação (2.12), obtém-se:

$$\frac{E_1 - E_2}{E_2 - E_3} = \frac{(I_0 t_2 - I_0 t_1)(Q - I_0 t_3)}{(I_0 t_3 - I_0 t_2)(Q - I_0 t_1)}. \quad (2.13)$$

Quando os valores numéricos de E e $I_0 t$ extraídos da curva de descarga são substituídos na equação (2.13), o valor numérico de Q é encontrado. Substituindo o valor de Q nas equações 2.11 e 2.12, obtém-se o valor de K . Quando os valores numéricos de Q e K são substituídos nas equações 2.8 e 2.9, o valor numérico de $E_s - RI_0$ é obtido. Quando os valores numéricos $E_s - RI_0$, K e Q são substituídos na equação (2.7), E é obtido como função de $I_0 t$.

O termo exponencial é calculado com base em duas curvas de descarga para duas correntes diferentes ($I_b > I_a$, I_b descarrega mais rápido a bateria), como apresentado na Figura 2.4. Os valores de correntes não são definidos no trabalho original (SHEPHERD, 1963).

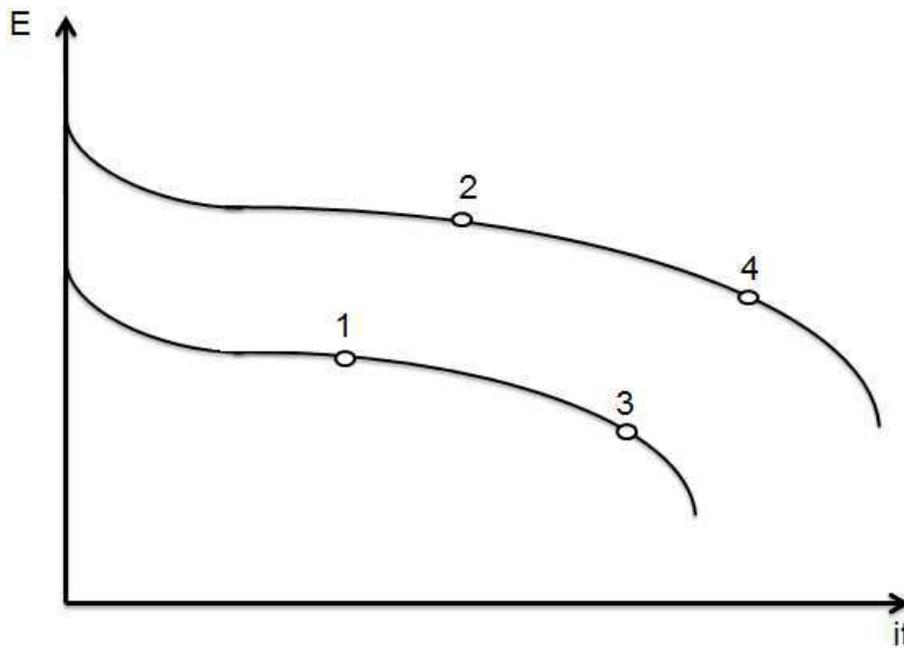


Figura 2.4: Pontos em duas curvas de descarga para correntes diferentes para determinar os parâmetros do termo exponencial da equação.

Dessa forma, a tensão no ponto 2 é:

$$E_2 = E_s - K \frac{Q}{Q - I_a t_2} I_a - RI_a. \quad (2.14)$$

Similarmente para o ponto 4, tem-se:

$$E_4 = E_s - K \frac{Q}{Q - I_a t_4} I_a - RI_a. \quad (2.15)$$

Subtraindo a equação (2.15) da equação (2.14), tem-se:

$$E_2 - E_4 = KI_a \frac{Q(I_a t_4 - I_a t_2)}{(Q - I_a t_4)(Q - I_a t_2)}. \quad (2.16)$$

Similarmente para os pontos 1 e 3:

$$E_1 - E_3 = KI_b \frac{Q(I_b t_3 - I_b t_1)}{(Q - I_b t_3)(Q - I_b t_1)}. \quad (2.17)$$

Dividindo a equação (2.16) pela equação (2.17), obtem-se:

$$\frac{E_2 - E_4}{E_1 - E_3} = \frac{I_a (I_a t_4 - I_a t_2)}{I_b (I_b t_3 - I_b t_1)} \frac{(Q - I_b t_3)(Q - I_b t_1)}{(Q - I_a t_4)(Q - I_a t_2)}. \quad (2.18)$$

Substituindo os pontos da Figura 2.4 na equação (2.18), os parâmetros do termo exponencial podem ser encontrados.

No caso da carga, a equação é dada por:

$$E = E_s + K \frac{Q}{Q - I_0 t} I_0 + RI_0 - Ae^{-\frac{BI_0 t}{Q}}. \quad (2.19)$$

A equação (2.19) pode ser obtida através da equação (2.7) revertendo os sinais dos três últimos termos.

Todos os detalhes da obtenção dos parâmetros são detalhados em (SHEPHERD, 1963).

2.3.2 Modelo de Tremblay, Dessaint e Dekkiche

Foram percebidos problemas durante sua simulação no segundo termo da equação (2.7) (TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007). O termo representa uma tensão não-linear que muda com a amplitude da corrente e da atual carga da bateria. Portanto, quando a bateria está próxima da descarga completa, a tensão da bateria se aproxima de E_0 (tensão de circuito aberto). Assim que a corrente volta a circular, a tensão cai rapidamente.

O modelo proposto por Tremblay, Dessaint e Dekkiche e apresentado na Figura 2.5 representa uma tensão não-linear que depende unicamente da atual carga da bateria. Isso significa que quando a bateria está completamente descarregada e não há circulação de corrente, a tensão será próxima de 0V. Dessa forma, a equação de descarga é dada por:

$$v = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_T} - Ri + Ae^{-Bi_T}, \quad (2.20)$$

na qual:

- v é a tensão da bateria calculada;

- E_0 é a tensão de circuito aberto;
- R é a resistência interna da bateria;
- i é a corrente da bateria.

Nas equação (2.20), todas as variáveis representadas em letras minúsculas, v , i_T e i são dependentes do tempo.

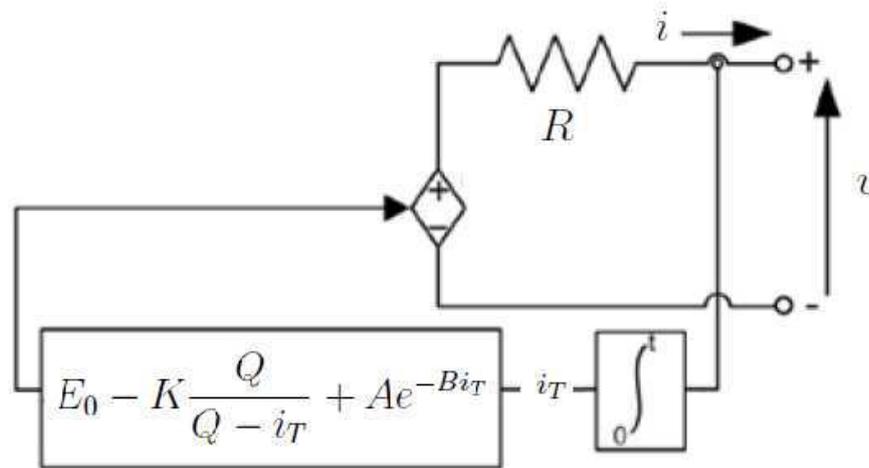


Figura 2.5: Modelo de bateria proposto por Tremblay (2007) com uma fonte de tensão controlada em série com uma resistência interna.

A extração dos parâmetros pode ser feita de uma forma diferente da proposta pelo modelo de Shepherd. São necessários três pontos da curva de descarga da Figura 2.6: tensão com carga completa, o final da zona exponencial e o decaimento final da curva de descarga.

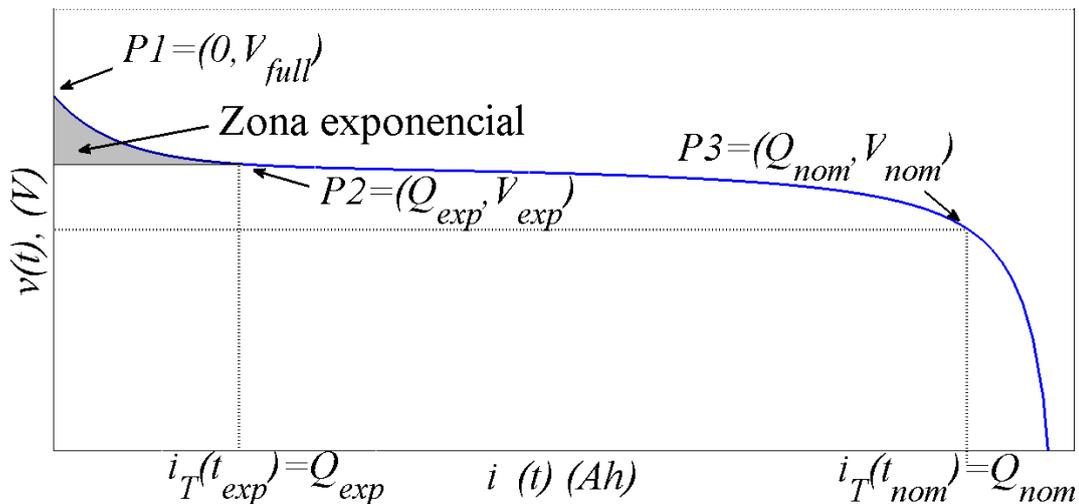


Figura 2.6: Curva de descarga típica de uma bateria apresentando os três pontos propostos no modelo de Tremblay para obter os parâmetros da equação (2.20).

Os parâmetros A , B , K e E_0 são obtidos como apresentado a seguir:

$$A = V_{full} - V_{exp}, \quad (2.21)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}}, \quad (2.22)$$

$$K = \frac{(V_{full} - V_{nom} + A(e^{-BQ_{nom}} - 1))(Q - Q_{nom})}{Q_{nom}} e \quad (2.23)$$

$$E_0 = V_{full} + K + Ri - A. \quad (2.24)$$

A obtenção dos parâmetros é detalhada em (TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007).

2.3.3 Modelo de Tremblay e Dessaint

Foi proposto um novo modelo diferente do de Tremblay, Dessaint e Dekkiche. Esse modelo pode representar a dinâmica de variação da corrente de carga e descarga (TREMBLAY; DESSAINT, 2009), conforme apresentado na Figura 2.7.

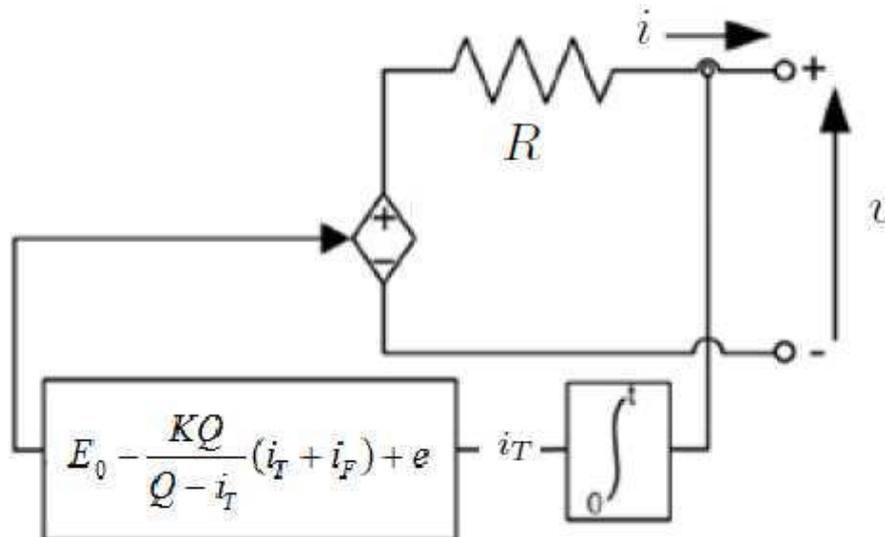


Figura 2.7: Modelo de bateria com uma fonte de tensão controlada em série com uma resistência interna (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

O segundo termo da equação (2.20), que provocou problemas, foi alterado. Um novo termo foi adicionado na mesma equação, representando a tensão de polarização para melhor representar o comportamento da tensão de circuito aberto. A equação (2.25)

$$v = E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - i_T} (i_T + i_F) + e \quad (2.25)$$

é usada quando a bateria está sendo descarregada. Quando a bateria está carregando, é usada a equação (2.26)

$$v = E_0 - Ri - K \frac{Q}{i_T - 0.1Q} i_F - K \frac{Q}{Q - i_T} i_T + e. \quad (2.26)$$

Nas equações (2.25) e (2.26), todas as variáveis representadas em letras minúsculas, v , i , i_F , i_T e e são dependentes do tempo. Os parâmetros usados nas duas equações são: $v(t)$ é a tensão da bateria, E_0 é a tensão interna da bateria, R é a resistência interna, $i(t)$ é a corrente de carga ou descarga, K é constante de polarização, Q é a capacidade nominal da bateria, i_T é a atual carga consumida, i_F é a corrente filtrada e $e(t)$ é o termo exponencial de tensão.

No caso das baterias de chumbo-ácido, o termo exponencial de tensão $e(t)$ é

$$\frac{de(t)}{dt} = B|i(t)|(e(t) + Au(t)), e(0) = 0. \quad (2.27)$$

em que $\frac{1}{B}$ é a constante de tempo da zona exponencial, A é a amplitude da zona exponencial e

$$u(t) = \begin{cases} 1, & i_F(t) < 0 \\ 0, & i_F(t) \geq 0. \end{cases} \quad (2.28)$$

A corrente filtrada para a bateria de chumbo-ácido é

$$\frac{di_F(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} (i(t) - i_F(t)), i_F(0) = i(0), \quad (2.29)$$

na qual τ é a constante de tempo do filtro de corrente.

Outro fator relevante foi a alteração das equações de carga e descarga para os quatro tipos de bateria. Isso se deve ao fato de que o comportamento de cada uma é diferente na zona exponencial e no decaimento final da curva de descarga. Por exemplo, a parte exponencial em uma bateria chumbo-ácido é bastante pequena, favorecendo a alteração do termo exponencial (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

O comportamento dinâmico foi validado para os quatro tipos de bateria em um sistema de simulação de carros elétricos (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

2.4 Modelo para determinação do tempo de vida útil

O modelo escolhido é o proposto por Schiffer (2007). Segundo esse último, ele combina um modelo que determina as características elétricas com um modelo de tempo de vida. O modelo de tempo de vida é atualizado durante a simulação tal que o desempenho da bateria é reduzido em função das condições de operação da mesma.

2.4.1 Modelo de Schiffer

A tensão de cada célula da bateria é calculada através da equação modificada do modelo de Shepherd. O estado de carga é calculado pela integração da diferença entre a corrente da bateria e a corrente de gaseificação. Com base na tensão e no estado de carga, os parâmetros relacionados com corrosão e degradação são determinados e usados para modificar os parâmetros da bateria e determinar a capacidade restante da bateria, principal informação fornecida pelo modelo (SCHIFFER et al., 2007).

Características de tensão e corrente

As equações de tensão para carga e descarga são apresentadas a seguir:

- Carga:

$$U(t) = U_0 - gD_d(t) + \rho_c(t) \frac{I(t)}{C_n} + \rho_c(t) M_c \frac{I(t)}{C_n} \frac{S_c(t)}{C_c - S_c(t)} \quad e \quad (2.30)$$

- Descarga:

$$U(t) = U_0 - gD_d(t) + \rho_d(t) \frac{I(t)}{C_n} + \rho_d(t) M_d \frac{I(t)}{C_n} \frac{D_d(t)}{C_d - D_d(t)}, \quad (2.31)$$

na qual:

- U - tensão nos terminais da célula;
- U_0 - tensão de circuito aberto da célula;
- g - constante de proporcionalidade do eletrólito;
- $S_c(t)$ - estado de carga (SOC). S_c varia entre 0, para uma bateria totalmente descarregada, e 1, para a uma bateria completamente carregada;
- $D_d(t)$ - profundidade de descarga (DOD). $D_d = 1 - S_c$;
- $\rho_c/\rho_d(t)$ - resistência interna agregada de carga/descarga;
- $I(t)$ - corrente da bateria, em A. Carga: $I(t) > 0$. Descarga: $I(t) \leq 0$;
- C_n - capacidade nominal da bateria, em Ah;
- M_c/M_d - coeficiente de sobretensão de carga/descarga; e
- C_c/C_d - capacidade normalizada de carga/descarga.

A corrosão afeta principalmente o eletrodo positivo (SCHIFFER et al., 2007). Portanto, somente o eletrodo positivo é considerado para o cálculo de corrosão através da utilização das equações modificadas (2.30) e (2.31):

- Carga:

$$U_c(t) = U_{c,0} - \frac{10}{13}gD_d(t) + \frac{1}{2}\rho_c(t)\frac{I(t)}{C_n} + \frac{1}{2}\rho_c(t)M_c\frac{I(t)}{C_n}\frac{S_c(t)}{C_c - S_c(t)} \quad \text{e} \quad (2.32)$$

- Descarga:

$$U_c(t) = U_{c,0} - \frac{10}{13}gD_d(t) + \frac{1}{2}\rho_d(t)\frac{I(t)}{C_n} + \frac{1}{2}\rho_d(t)M_d\frac{I(t)}{C_n}\frac{D_d(t)}{C_c - D_d(t)}, \quad (2.33)$$

na qual $U_{c,0}$ é a tensão de corrosão para uma bateria completamente carregada e sem fluxo de corrente, a qual é função da concentração de ácido. Por exemplo, $1,75V$ para uma concentração de 30% (SCHIFFER et al., 2007).

A contribuição das perdas ôhmicas e do fator de carga são considerados como igualmente distribuídos entre os eletrodos positivo e negativo. O fator $\frac{10}{13}$ para a influência do $S_c(t)$ foi derivada de que uma mudança típica na tensão de circuito aberto de completamente carregada para completamente descarregada é de $130mV$. Aproximadamente $100mV$ dessa mudança pode ser atribuída ao eletrodo positivo e $30mV$ ao eletrodo negativo (SCHIFFER et al., 2007).

Corrente de gaseificação e estado de carga

O estado de carga pode ser calculado pela integração da corrente menos a corrente de gaseificação dividido pela capacidade nominal, ou seja (SCHIFFER et al., 2007):

$$S_c(t) = S_c(0) + \int_0^t \frac{I(\tau) - I_g(\tau)}{C_n} d\tau. \quad (2.34)$$

A corrente de gaseificação pode ser calculada a partir da equação (2.35):

$$I_g = \frac{C_n}{100} I_{g,0} \exp(c_u(U - U_{g,0}) + c_T(T - T_{g,0})), \quad (2.35)$$

na qual:

- $I_{g,0}$ - corrente de gás normalizada para 100Ah;
- $U_{g,0}$ - tensão nominal para gaseificação;
- $T_{g,0}$ - temperatura nominal para gaseificação;

- c_u - coeficiente de tensão;
- c_T - coeficiente de temperatura;
- U - tensão da célula; e
- T - temperatura da bateria.

Corrosão da grade positiva

O modelo de corrosão baseia-se no conceito de uma camada de corrosão, a qual cresce ao longo da vida da bateria, com baixa condutividade. A espessura efetiva da camada de corrosão ΔW é calculada em cada passo de simulação, dependendo da tensão de corrosão U_c (SOUSA, 2008):

- $U_c < 1,74$:

$$\Delta W(t) = k_s x^{0,6}, x = \left(\frac{\Delta W(t - \Delta t)}{k_s} \right)^{\frac{1}{0,6}} + \Delta t \text{ e} \quad (2.36)$$

- $U_c \geq 1,74$:

$$\Delta W(t) = \Delta W(t - \Delta t) + k_s \Delta t, \quad (2.37)$$

na qual:

- Δt - duração do passo de simulação e
- k_s - função da velocidade de corrosão calculado a partir da Lei de Arrhenius (dependente de U_c e T):

$$k_s(U_c, T) = k(U_c) e^{(k_{s,T}(T - T_{c,0}))}. \quad (2.38)$$

na qual:

- $k(U_c)$ - função da curva de velocidade de corrosão \times tensão de corrosão, dependente de U_c (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005);
- $k_{s,T}$ - fator de temperatura; e
- $T_{c,0}$ - 298 K.

A resistência ρ_c da camada de corrosão e a perda de capacidade C_c , dependem de ΔW , ou seja:

$$\rho_c(t) = \rho_{c,l} \frac{\Delta W(t)}{\Delta W_l} \text{ e} \quad (2.39)$$

$$C_c(t) = C_{c,l} \frac{\Delta W(t)}{\Delta W_l}. \quad (2.40)$$

Todos os parâmetros com o índice “l” são os valores que correspondem ao resultado de manter a bateria em carga de flutuação até o fim da vida útil (limite). O cálculo dos parâmetros $\rho_{c,l}$ e $C_{c,l}$ baseia-se nas seguintes suposições (SOUSA, 2008):

- O decréscimo de 20% da capacidade no fim da vida da bateria é causado pelo aumento da resistência interna devido à corrosão;
- Os 80% restantes da capacidade diminuem devido à perda de material ativo pelo efeito da corrosão.

Para calcular ΔW_l , o tempo de vida em flutuação L_s é multiplicado pelo parâmetro velocidade de corrosão $k_{s,l}$, obtido da curva $k(U_c)$ para a tensão $U_c = U_{float}$, ou seja:

$$\Delta W_l = L_s k_{s,l}. \quad (2.41)$$

Degradação da massa ativa

A degradação representa a perda de capacidade causada pelos ciclos de carga e descarga da bateria. O tempo de vida, definido em ciclos, é fornecido pela folha de dados dos fabricantes e representa o estágio no qual a bateria tem uma capacidade restante igual a 80% de sua capacidade nominal.

O número efetivo de ciclos sem corrosão é definido como sendo 1,6 vezes o tempo de vida em ciclos. O número de ciclos nominais Z_N é calculado pela divisão da capacidade descarregada pela capacidade nominal da bateria, ou seja:

$$Z_N = \frac{1}{C_n} \int_0^t |I_d(\tau)| d\tau \quad (2.42)$$

Para o cálculo da perda de capacidade devido a degradação, o número de ciclos Z_w é ponderado com o impacto do S_c e da estratificação do ácido. O número de ciclos Z_W é calculado pela equação (2.43) (SCHIFFER et al., 2007):

$$Z_W = \frac{1}{C_n} \int_0^t |I_d(\tau)| f_S(\tau) f_{Ac}(\tau) d\tau, \quad (2.43)$$

na qual:

- f_S - fator para a influência do SOC e o impacto da taxa de corrente; e
- f_{Ac} - fator que representa a influência da estratificação do ácido.

A transferência de Ah é integrada e multiplicada pelos fatores f_S e f_{Ac} , os quais representam a degradação devido as condições atuais de operação. Estes fatores são representados nas próximas seções.

A perda de capacidade devido à degradação C_{deg} é calculada pela equação (2.44):

$$C_{deg}(t) = C_{deg,l} e^{(-c_z(1 - \frac{Z_W(t)}{1,6Z_{IEC}}))}. \quad (2.44)$$

$C_{deg,limite}$ é a capacidade no fim do tempo de vida, ou seja, 80% de C_n . O valor do parâmetro c_z é 5 e $Z_{IEC}=1,6Z_N$ (SCHIFFER et al., 2007).

Impacto do estado de carga

A degradação aumenta com a redução do S_c da bateria. Esta influência é modelada pelo fator f_S , o qual é definido como 1 em carga completa e é incrementado com o tempo desde a última carga completa em t_0 , ou seja, $\Delta t_S = t - t_0$. S_{cm} é o menor valor de S_c desde a última carga completa. f_S é calculado por:

$$f_S = 1 + (c_{S,0} + c_{S,m}(1 - S_{cm}(t)|_{t_0}^t))f_I(I, n)\Delta t_S(t). \quad (2.45)$$

Os parâmetros $c_{S,0}$ e $c_{S,m}$ representam o aumento de f_S com o tempo em $S_c(t) = 0$ e a influência do S_{cm} . O parâmetro $f_I(I, n)$ é o fator de corrente, descrito na seção a seguir.

Impacto da estrutura de cristais de sulfato

Em aplicações com tensão e tempo limitados durante a carga, esta não pode ser completada se os cristais de sulfato de chumbo são grandes. Então, esses cristais permanecem nos eletrodos e tendem a crescer em cada ciclo. A partir de certo tamanho, estes cristais tornam-se inativos. Portanto, existe uma relação entre a taxa de corrente e o envelhecimento. A dependência entre os números de cristais z e a corrente de descarga é dada pela função abaixo (SCHIFFER et al., 2007):

$$z = z_0 \left(\frac{I}{C_n}\right)^{1,5}, \quad z_0 = 2,961 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}. \quad (2.46)$$

Já que o número de cristais muda somente no início de uma descarga, ele não muda com o $D_d(t)$. Portanto, z é independente de $D_d(t)$. A influência da corrente está relacionada com a superfície do cristal de sulfato de chumbo, ou seja:

$$f_I(I) = \sqrt{\frac{I_{ref}}{I}}. \quad (2.47)$$

A variável I_{ref} é calculada para uma corrente que descarrega uma bateria completamente carregada em 10h.

Estratificação do ácido

O grau de estratificação do ácido é modelado pelo fator f_e :

$$f_e = \int_0^t (f_{ma}(\tau) - f_{me}(\tau))d\tau, f_e \geq 0, \quad (2.48)$$

na qual $f_{ma}(t)$ e $f_{me}(t)$ representam, respectivamente, um aumento e uma redução da estratificação do ácido.

O impacto total da estratificação do ácido na degradação do material ativo é modelado pelo fator f_{Ac} :

$$f_{Ac} = 1 + f_e \sqrt{\frac{I_r}{|I|}}. \quad (2.49)$$

O aumento da estratificação do ácido aumenta durante operações cíclicas. f_{ma} é calculada pela seguinte equação:

$$f_{ma} = c_{ma}(1 - S_{cm}|_{t_0}^t)exp(-3f_e(t))\frac{|I_d(t)|}{I_r}. \quad (2.50)$$

A estratificação do ácido pode ser reduzida por difusão ou por gaseificação. O fator para redução total da estratificação do ácido é:

$$f_{me} = f_{me,g} + f_{me,d}. \quad (2.51)$$

A redução da estratificação do ácido por gaseificação pode ser calculada como segue:

$$f_{me,g} = c_{me} \sqrt{\frac{100}{C_n}} \frac{I_{g,0}(t)}{I_{g,0}} exp(c_u(U_{cell} - U_r) + c_T(T - T_{g,0})) \quad (2.52)$$

A redução da estratificação do ácido por difusão pode ser calculada como segue:

$$f_{me,d} = \frac{8D}{z^2} f_e 2^{\frac{T-20^\circ C}{10K}}. \quad (2.53)$$

Os valores de z , altura dos eletrodos, e D , constante de difusão efetiva, são apresentados, respectivamente, na Tabela 2.1 e Tabela 2.2 (SCHIFFER et al., 2007).

Evolução no tempo dos parâmetros afetados pelo envelhecimento

No final de cada passo de simulação, os novos parâmetros de resistência e capacidade são calculados pelas seguintes equações:

$$\rho_c(t) = \rho_c(0) + \rho_{corr}(t) \text{ e} \quad (2.54)$$

$$\rho_d(t) = \rho_d(0) + \rho_{corr}(t). \quad (2.55)$$

A capacidade restante da bateria $C_{re}(t)$ é a capacidade inicial menos a perda de capacidade por corrosão e degradação, ou seja:

$$C_{re}(t) = C_d(0) - C_c(t) - C_{deg}(t). \quad (2.56)$$

Os parâmetros são divididos em três tabelas: parâmetros que dependem da bateria, parâmetros que podem ser adaptados se uma medida apropriada de tempo de vida é realizada e parâmetros que não devem ser mudados. Os valores obtidos nos testes de (SCHIFFER et al., 2007) são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 2.1: Parâmetros dependentes da bateria

Parâmetro	Valor
C_N	54Ah
Z_{IEC}	600
L	10anos
U_0	2,1V
g	0,076V
$\rho_{c,d}$	0,42ΩAh
$M_{c,d}$	0,888
$C_{c,d}$	1,001
I_r	-55A
z	20cm

2.5 Síntese

Neste capítulo, foi apresentada a revisão da literatura. Os modelos para determinação das características elétricas e de determinação do tempo de vida útil foram apresentados. Para determinação das características elétricas, três modelos foram detalhados: modelo de Shepherd, de Tremblay e Dessaint e de Tremblay, Dessaint e Dekkiche. Para determinação do tempo de vida útil, o modelo de Schiffer foi apresentado. Esses modelos podem ser utilizados para estimar os valores de tensão, estado de carga e capacidade de baterias de chumbo-ácido.

Tabela 2.2: Parâmetros que podem ser adaptados

Parâmetro	Valor
$U_{c,0}$	1,75V
$I_{g,0}$	0,02mA
c_u	$11V^{-1}$
c_T	$0,06K^{-1}$
$U_{g,0}$	2,23V
$T_{g,0}eT_{c,0}$	298K
$c_{S,0}$	$0,00006614h^{-1}$
$c_{S,m}$	$0,003307h^{-1}$
S_l	0,9
S_r	0,95
c_{ma}	$\frac{1}{30}$
c_{me}	0,1
U_r	2,5V
D	$20 \times 10^{-9}m^2s^{-1}$

Tabela 2.3: Parâmetros que não devem ser mudados

Parâmetro	Valor
c_z	5
z_0	$2,961 \times 10^{11}$

Capítulo 3

Contribuições para determinação das características elétricas

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas quatro contribuições ao modelo para obter as características elétricas. As contribuições contemplam a escolha da constante de tempo do filtro de corrente, estimação dos parâmetros pela curva de descarga e o cálculo da resistência CC pela equação do modelo de Tremblay e Dessaint, como mostrado abaixo.

- Escolha do terceiro ponto, para estimação dos parâmetros, da curva de descarga para um caso específico;
- Escolha do terceiro ponto, para estimação dos parâmetros, da curva de descarga para diferentes valores de corrente;
- Cálculo da resistência CC pela equação do modelo de Tremblay e Dessaint;
- Escolha da constante de tempo do filtro de corrente.

Em cada contribuição, os resultados são apresentados e discutidos.

3.2 Escolha do terceiro ponto da curva de descarga

3.2.1 Introdução

A representação da curva de tensão através Modelo de Tremblay (2009) é dependente da escolha dos três pontos obtidos durante a curva de descarga da bateria. A obtenção original dos três pontos não é definida matematicamente no trabalho de Tremblay (2009). Nesta seção serão definidos os pontos dois e três da curva de descarga. O primeiro ponto

já é definido como sendo o momento inicial da descarga para uma bateria totalmente carregada.

3.2.2 Método 3P

O método proposto, apresentado por (FREITAS; LIMA; SILVA; MORAIS, 2015), utiliza os três pontos da curva de descarga. O primeiro, de acordo com a Figura 2.6 é o ponto $(0, V_{\text{full}})$ que marca o início da descarga para uma bateria completamente carregada. O segundo ponto $(Q_{\text{exp}}, V_{\text{exp}})$ é escolhido no instante em que a derivada da tensão se torna menor que o módulo de α , $-1 < \alpha < 0$ representando o término da zona exponencial, ou seja:

$$t_{\text{exp}} = \arg \min_t (|\dot{v}(t) + \alpha|), t \in [0, \infty). \quad (3.1)$$

A derivada da tensão é obtida como apresentado na equação (3.2):

$$\dot{v}(t) \approx \frac{v(t) - v(t - \Delta t)}{\Delta t}. \quad (3.2)$$

Vale destacar o critério da escolha do segundo ponto não é especificado no trabalho de (TREMBLAY; DESSAINT, 2009). O terceiro ponto $(Q_{\text{nom}}, V_{\text{nom}})$, é escolhido de modo a minimizar:

$$\Gamma_N = \frac{1}{N} \sum_{t_1}^{t_2} [v(t) - \hat{v}(t, p_3)]^2. \quad (3.3)$$

$$\hat{p}_3 = \arg \min \Gamma_N. \quad (3.4)$$

$$p_3 \in \{v(t), i_T(t), t > t_{\text{exp}}, i_T(t) < 0.3Q\}, \quad (3.5)$$

em que Γ_N é a função objetivo, $\hat{v}(t, p_3)$ é uma estimativa de tensão medida nos terminais da bateria calculada a partir de uma escolha do terceiro ponto p_3 , N é a quantidade de pontos medidos entre t_1 e t_2 ($N = 3902$ neste trabalho), t_1 é o instante de tempo inicial da validação (t_Y da Figura 3.1) e t_2 é o instante de tempo final da validação (65000s).

Neste caso, o modelo considerado real é o representado com a tensão e a corrente apresentada na Figura 3.1, possuindo tensão nominal de 12V, capacidade nominal de 36Ah e resistência interna de 3,3m Ω . Um determinado ciclo de carga e descarga foi usado para estimação e teste.

A curva de tensão da Figura 3.1 será dividida para realização da estimação e validação. A primeira parte será utilizada para estimação e será feita até o fim da primeira descarga

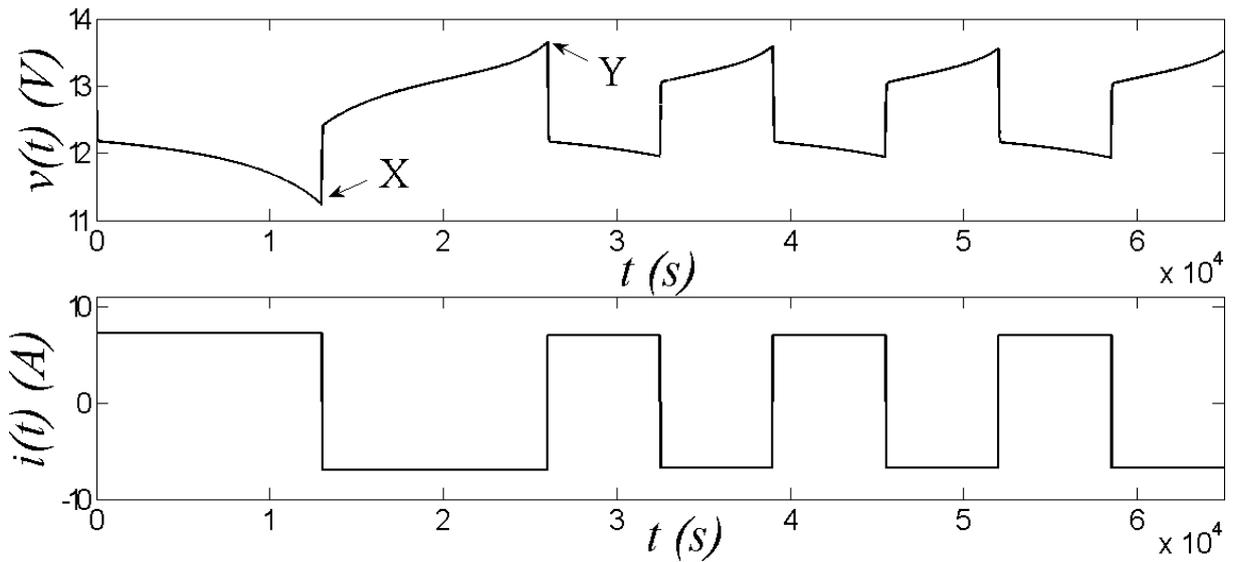


Figura 3.1: Tensão $v(t)$ (parte superior) do modelo de simulação para um ciclo de carga e descarga (parte inferior). A carga e a descarga são promovidas por fontes de corrente controladas.

($0 < t < t_X$). A validação será feita a partir do ponto Y até o final da simulação ($t_Y < t < 65000s$).

3.2.3 Estimação de parâmetros

A constante de tempo τ equivale a 30s, como apresentado na Figura 3.2.

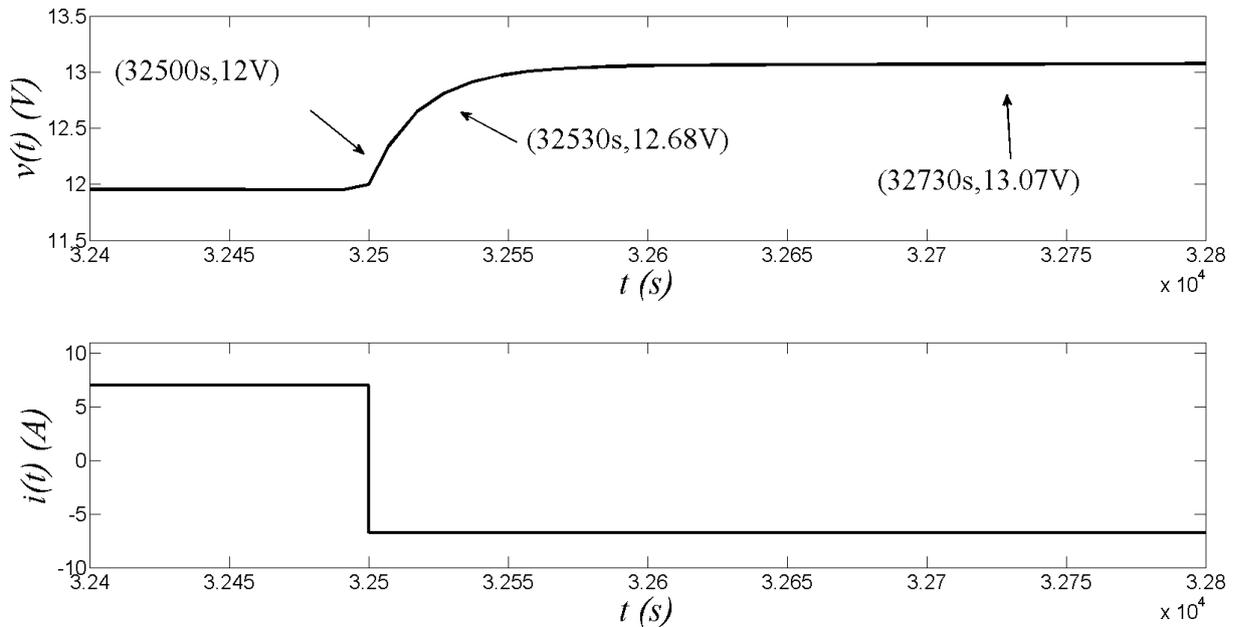


Figura 3.2: Tensão da bateria quando um degrau de corrente é aplicado. A constante de tempo representada é de 30s

A Figura 3.3 apresenta o primeiro ponto (P1), o segundo ponto (P2) e os possíveis terceiros pontos P3 da curva de descarga.

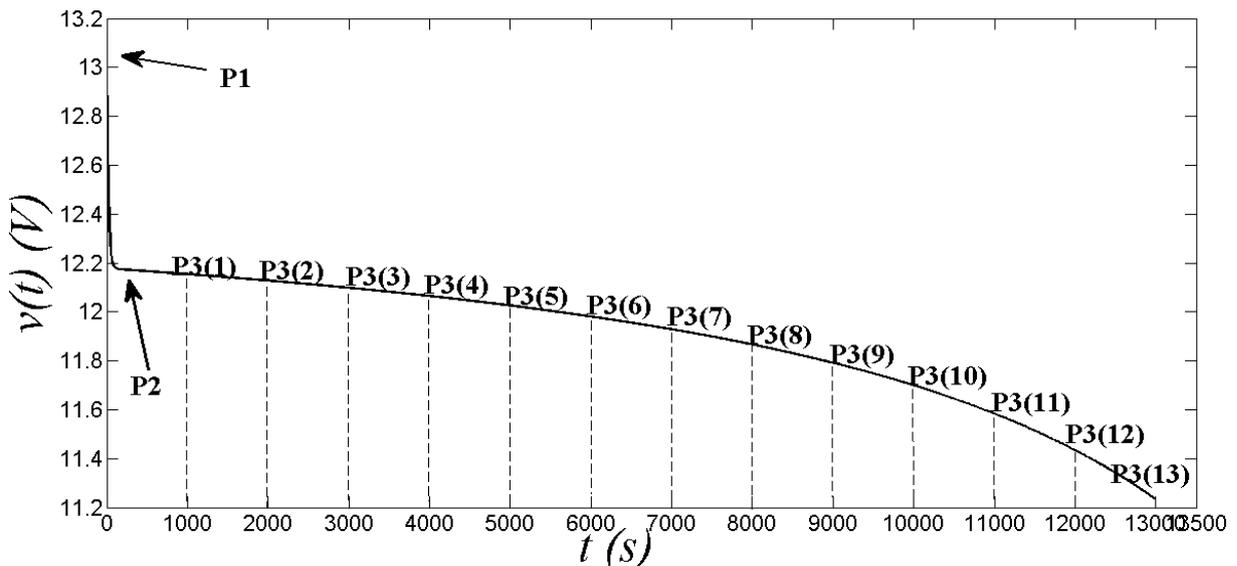


Figura 3.3: Curva de descarga indicando os pontos necessários para obtenção dos parâmetros.

O ponto P1 é o estado inicial da descarga para uma bateria completamente carregada (0Ah, 13,0658V). O ponto P2 é definido baseado na equação (3.1). Dessa maneira, o ponto P2 é escolhido no instante 159,6s, ou seja, $i_T(159,6)=0,3192\text{Ah}$, para uma corrente I_{5h} de 7,2A. (0,3192Ah, 12,17V), como apresentado na Figura 3.4.

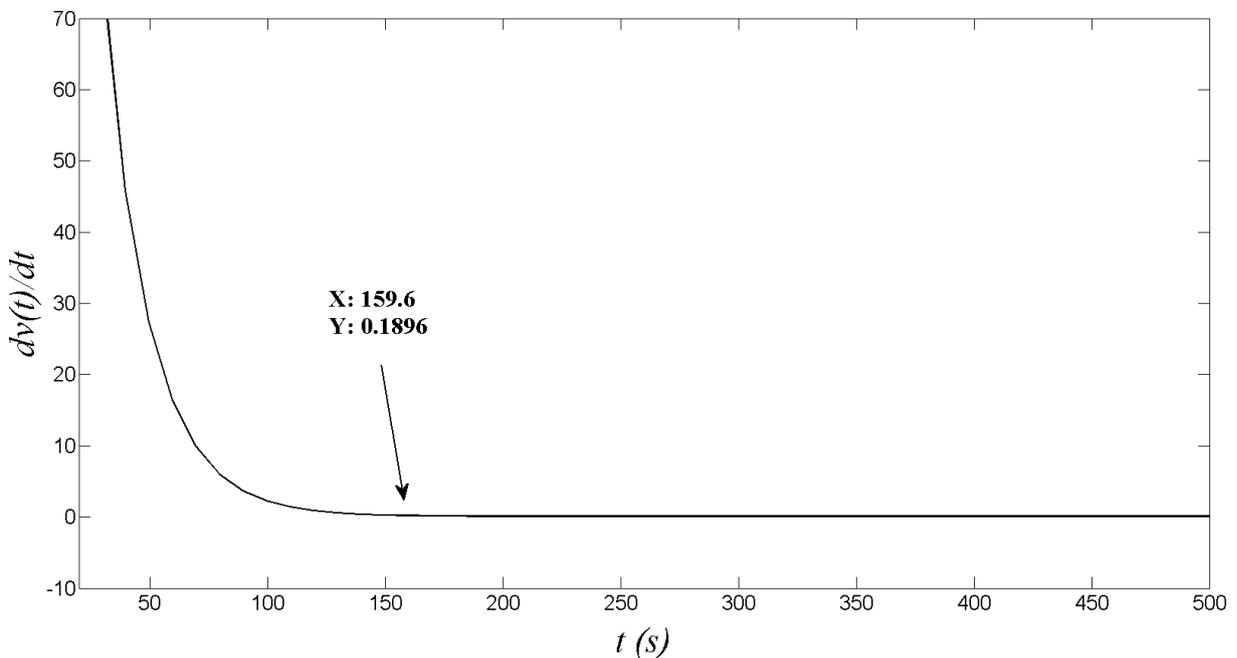


Figura 3.4: Curva para escolha do segundo ponto baseada no valor da derivada da tensão ($\frac{dv(t)}{dt} < -0,2$).

Por fim, e objetivo da contribuição, falta determinar o terceiro ponto P3 (Q_{nom} , V_{nom}). Inicialmente foram escolhidos treze pontos (t_{nom}) para possíveis P3 espaçados de 1000s (16 min e 40 s). Esses pontos, apresentados na Figura 3.3, serão utilizados para calcular o

parâmetro K da equação (2.25). Os outros valores desconhecidos (A , B e E_0) são obtidos utilizando os valores referentes aos pontos P1 e P2, como apresentado nas equações (3.6) à (3.8):

$$A = V_{\text{full}} - V_{\text{exp}}, \quad (3.6)$$

$$B = \frac{3}{Q_{\text{exp}}} e \quad (3.7)$$

$$E_0 = V_{\text{full}} + RI_{5h} - A, \quad (3.8)$$

em que I_{5h} equivale a uma corrente que descarrega uma bateria, completamente carregada, em 5h. Para o caso em estudo vale 7,2A, pois $Q = 36Ah$.

Mediante o uso da equação (3.9) determina-se o valor de K em função das ordenadas do ponto P3, ou seja, V_{nom} e Q_{nom} .

$$K = \frac{(E_0 - V_{\text{nom}} + RI_{5h}) + Ae^{\frac{3Q_{\text{nom}}}{Q_{\text{exp}}}}(Q - Q_{\text{nom}})}{Q(Q_{\text{nom}} - I_{5h})}. \quad (3.9)$$

Com os treze pontos possíveis para P3, como apresentado na Figura 3.3, obteremos 13 valores de K . Dessa forma, será usada a equação (3.3) para escolher o melhor terceiro ponto. Vale salientar que, para uma melhor caracterização do problema, podem ser utilizados todos os pontos da curva e não apenas os treze pontos espaçados de 1000s.

Na Figura 3.5, é apresentado o erro médio quadrático em cada um dos 13 pontos.

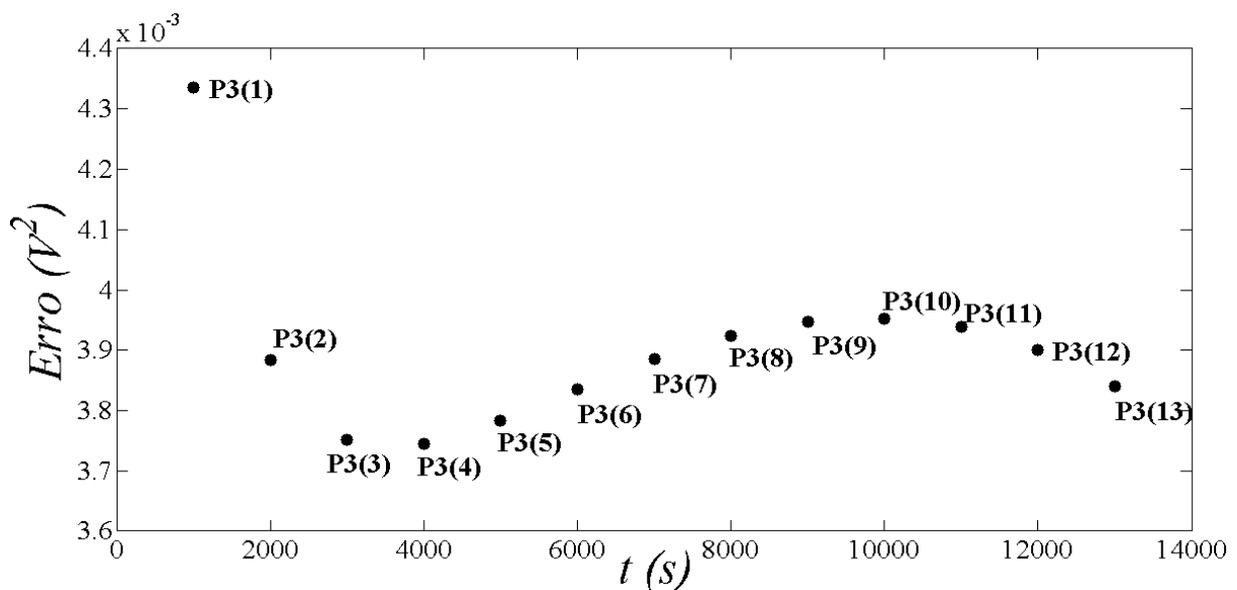


Figura 3.5: Valores do erro médio quadrático. As 13 escolhas de P3 ensejam 13 vetores paramétricos diferentes.

A Figura 3.5 apresenta o erro médio quadrático para cada um dos 13 pontos. Há uma

diminuição do erro na região entre 3000s e 5000. Dessa forma, novos 11 pontos espaçados de 200s (3 minutos e 20 segundos) escolhidos entre 3000s e 5000s serão avaliados, como apresentado na Figura 3.6.

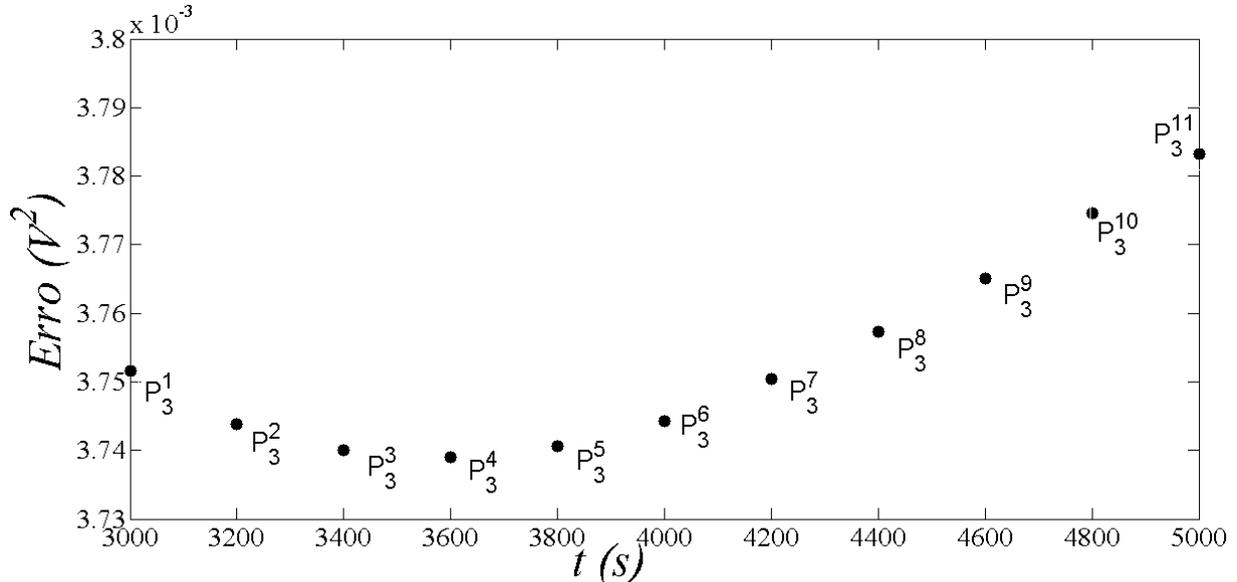


Figura 3.6: Valores do erro médio quadrático. Nova escolha de 11 pontos P₃, escolhidos entre 3000s e 5000s.

A Figura 3.6 apresenta o erro médio quadrático para cada um dos novos 11 pontos de medição. O modelo que apresenta o menor erro médio quadrático é $(i_T(3600), v(3600))$.

Desse modo o método de estimação proposto, consiste em escolher o ponto P1 segundo a recomendação e os pontos P2 e P3 conforme explicitado anteriormente (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

3.2.4 Validação

Com os pontos obtidos no item anterior: P1 (0Ah, 13,0658V), P2(0,3192Ah, 12,17V) e P3(7,2Ah, 12,0781V), os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores estimados - Método 3P.

Parâmetro	Método 3P
A	0,89580 V
B	$9,3985(Ah)^{-1}$
E_0	12,1940 V
K	$0,00777 \frac{V}{Ah} ou \Omega$

Com o padrão de carga e descarga apresentado na Figura 3.1 após o ponto Y (início da validação) e os parâmetros da Tabela 1, tem-se uma comparação na Figura 3.7.

A Figura 3.7 apresenta a tensão baseada nos parâmetros determinados com o Método 3P sendo comparada à tensão do modelo de simulação.

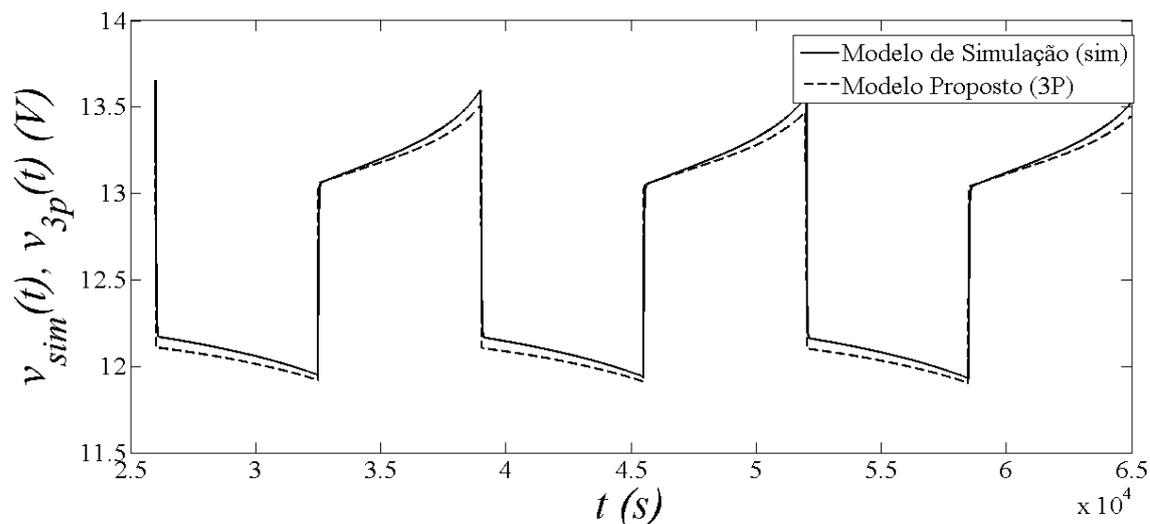


Figura 3.7: Valores de tensão comparando o Método 3P com o modelo de simulação, baseado no perfil de validação apresentado na Figura 3.18.

Na sequência, o Método 3P será comparado com um método de estimação baseado num método iterativo de otimização não-linear (MIONL). Esse método baseia-se nos trabalhos de (SCHIFFER et al., 2007) e (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005), que utilizam o método dos mínimos quadrados e o método SQP (Sequential Quadratic Programming), respectivamente. No trabalho de (SCHIFFER et al., 2007) estimam-se dez parâmetros independentes enquanto que no trabalho de (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005) o tamanho da população é quatro vezes o número de pontos do experimento. No MIONL implementado neste trabalho estima-se quatro parâmetros para carga e quatro para descarga, de modo a minimizar:

$$\Gamma_N = \frac{1}{N} \sum_{t_1}^{t_2} [v(t) - \hat{v}(t, \theta_N)]^2. \quad (3.10)$$

$$\hat{\theta}_N = \arg \min \Gamma_N. \quad (3.11)$$

$$\hat{\theta}_N = [\hat{E}_0^d \hat{K}_d \hat{A}_d \hat{B}_d \hat{E}_0^c \hat{K}_c \hat{A}_c \hat{B}_c], \quad (3.12)$$

$$\theta_N(\hat{i})^I < \theta_N(\hat{i}) < \theta_N(\hat{i})^S, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (3.13)$$

em que Γ_N é a função objetivo, $\hat{v}(t, \theta_N(t))$ é uma estimativa de tensão medida nos terminais da bateria calculada a partir de uma estimativa baseada no algoritmo genético e $\theta_N(\hat{i})^I$ e $\theta_N(\hat{i})^S$ são, respectivamente, os limites inferiores e superiores de $\theta_N(\hat{i})$. Esses limites são baseados nos trabalhos de (ANDERSSON, 2006), (BINDNER; CRONIN;

LUNDSAGER, 2005) e (SCHIFFER et al., 2007).

As equações são as mesmas baseadas no modelo de Tremblay e Dessaint:

$$v_d = \hat{E}_0^d - Ri - \hat{K}_d \frac{Q}{Q - i_T} (i_T + i_F) + e_d \quad (3.14)$$

$$v_c = \hat{E}_0^c - Ri - \hat{K}_c \frac{Q}{i_T - 0.1Q} i_F - \hat{K}_c \frac{Q}{Q - i_T} i_T + e_c, \quad (3.15)$$

na qual:

$$\frac{de_d(t)}{dt} = \hat{B}_d |i(t)| (e_d(t) + \hat{A}_d u(t)), e_d(0) = 0 \quad (3.16)$$

$$\frac{de_c(t)}{dt} = \hat{B}_c |i(t)| (e_c(t) + \hat{A}_c u(t)), e_c(0) = 0, \quad (3.17)$$

representam o termo exponencial de tensão, respectivamente, para descarga e carga.

Após estimação, os parâmetros obtidos com o MIONL são apresentados na Tabela 3.2. A comparação dos dois métodos com o modelo de simulação é apresentada na Figura 3.8.

Tabela 3.2: Valores estimados - MIONL.

Parâmetro	MIONL
\hat{E}_0^d	12,1426V
\hat{K}_d	0,0115 $\frac{V}{Ah} ou \Omega$
\hat{A}_d	3,1125V
\hat{B}_d	1,0701 $(Ah)^{-1}$
\hat{E}_0^c	12,9830
\hat{K}_c	0,0212 $\frac{V}{Ah} ou \Omega$
\hat{A}_c	5,2900V
\hat{B}_c	5,0154 $(Ah)^{-1}$

Os índices/expoentes c e d representam, respectivamente, carga e descarga.

Observando a Figura 3.8 percebe-se que o erro de aproximação usando os parâmetros obtidos com o MIONL é menor do que aquele obtido com o Método 3P. Entretanto, vale destacar que o erro de aproximação nos dois casos é da mesma ordem de grandeza, porém a complexidade do método proposto é, em termos computacionais, menor em muitas ordens de grandeza. No método MIONL é necessário um tempo decorrido de 20,41s em um sistema com núcleo *i7*, processador de 3,6GHz e sistema operacional de 32 bits. Já com o Método 3P, utilizando o mesmo sistema computacional, necessita-se de 0,021s. A Tabela 3.3 apresenta o erro médio quadrático para os dois métodos.

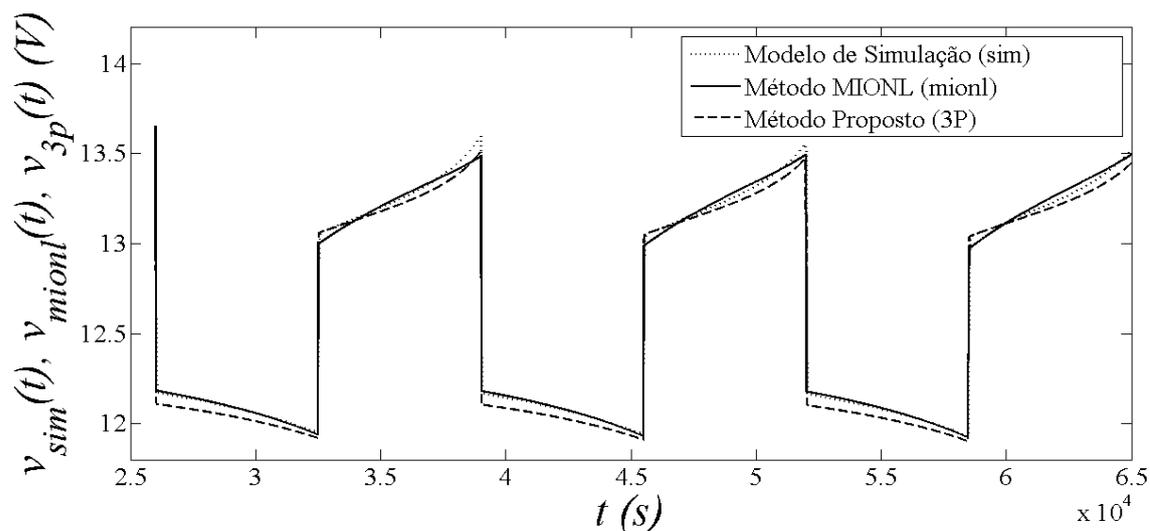


Figura 3.8: Valores de tensão obtidos com os dois métodos de estimação e com o modelo de simulação. O perfil de validação é apresentado na Figura 2.

Tabela 3.3: Valores do erro médio quadrático usando os dois métodos.

Método	Erro
Método 3P	$0,00374V^2$
MIONL	$0,00252V^2$

3.2.5 Conclusão

Usando as medições de corrente e tensão durante uma descarga a corrente constante e fazendo uma escolha adequada de três pontos de medição é possível obter uma estimativa dos parâmetros do modelo de Tremblay e Dessaint para baterias de chumbo-ácido. A qualidade dessa estimativa é comparável aquela obtida utilizando um método iterativo de otimização não-linear que processa todos os pontos de medição e requer a execução de um ciclo de descarga-carga. O Método 3P requer o conhecimento dos valores da constante de tempo do filtro de corrente e da resistência interna da bateria. A obtenção dessa constante de tempo pode ser realizada de modo relativamente simples provocando uma variação em degrau da corrente da bateria.

3.3 Escolha do terceiro ponto da curva de descarga com diferentes estados de carga

3.3.1 Método 3P

O método desta seção é o mesmo apresentado na anterior, que utiliza os três pontos da curva de descarga. O primeiro, de acordo com a Figura 2.6 é o ponto $(0, V_{full})$ que

marca o início da descarga para uma bateria completamente carregada. O segundo ponto ($Q_{\text{exp}}, V_{\text{exp}}$) é escolhido no instante que a derivada da tensão se torna menor que o módulo de α , $-1 < \alpha < 0$ representando o término da zona exponencial. O terceiro ponto ($Q_{\text{nom}}, V_{\text{nom}}$), é escolhido de modo a minimizar a função objetivo Γ_N apresentado na equação (3.3). A contribuição dessa seção resultou em um artigo aceito para publicação pelos autores (FREITAS; KETZER; LIMA, 2016).

3.3.2 Estimação de parâmetros

A estimação de parâmetros é baseada na seção anterior, que obtém o ponto P1 como estado inicial da descarga para uma bateria completamente carregada (0Ah, 13,0658V) e o ponto P2 definido baseado na equação (3.1). A escolha do terceiro ponto é baseado em treze pontos espaçados de 1000s.

3.3.3 Validação

A região de validação ($t_Y < t < 65000\text{s}$) leva em consideração sete níveis de corrente (1,85A até 13,1A), fazendo variar o SOC de 30% até 100% , como visto nas figuras 3.9 à 3.11 que apresentam, respectivamente, a corrente, a variação do SOC e a tensão da bateria.

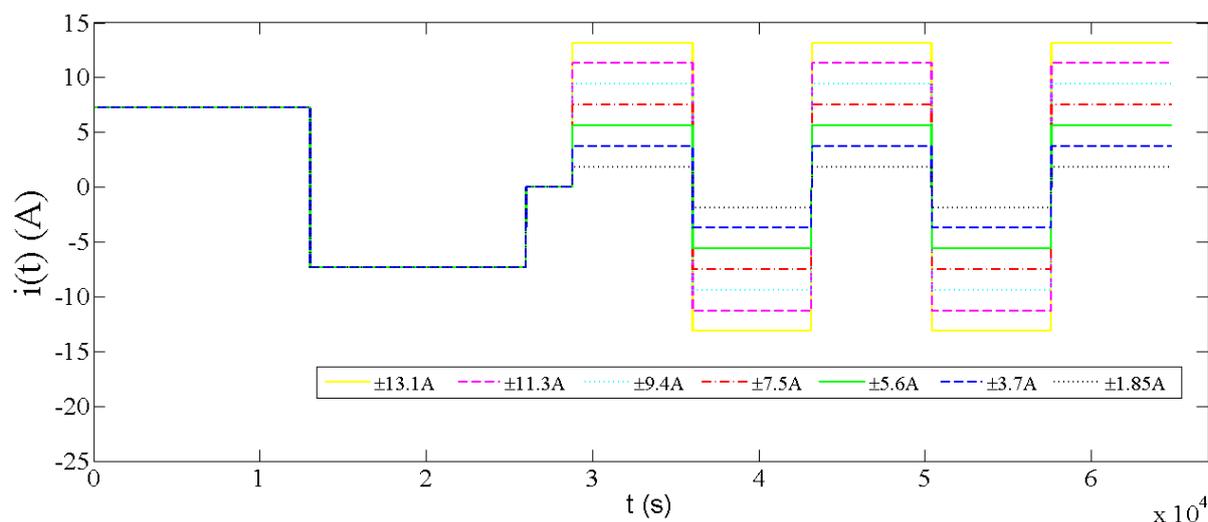


Figura 3.9: Corrente aplicada na bateria.

O método 3P é comparado com o mesmo método MIONL tratado anteriormente. Na Figura 3.12, o erro médio quadrático é apresentado para cada um dos treze pontos para cada perfil de carga/descarga.

Dessa forma, o terceiro ponto deve ser escolhido dependendo do perfil de carga e descarga. Para um perfil de carga e descarga que varia os valores do SOC entre 60% e

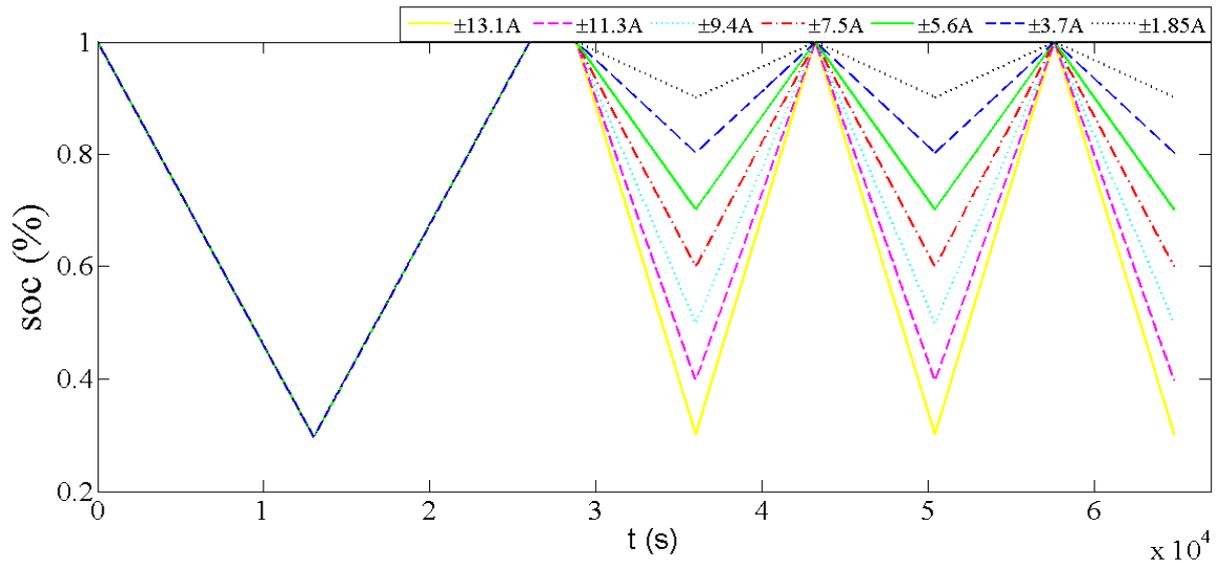


Figura 3.10: Variação do SOC da bateria após aplicação do perfil de corrente da Figura 3.9.

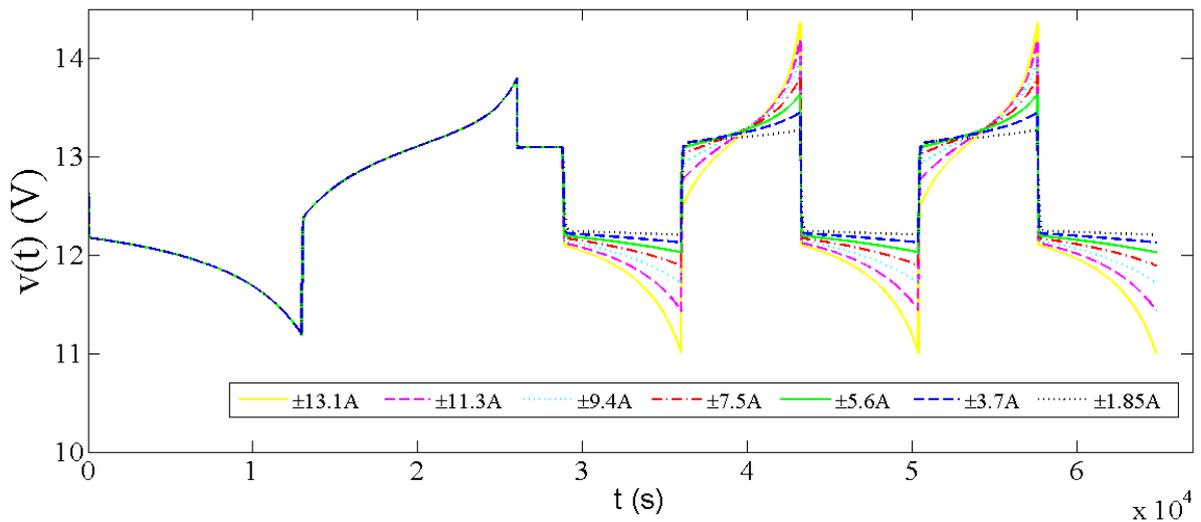


Figura 3.11: Variação da tensão da bateria após aplicação do perfil de corrente da Figura 3.9.

90%, equivalendo para o caso em estudo uma aplicação de valores de correntes entre 7,5A e 1,85A, o terceiro ponto deve ser escolhido em $t_{nom} = 2000s$. Para perfis com valores de SOC entre 30% e 50%, equivalendo para o caso em estudo uma aplicação de valores de correntes entre 9,4A e 13,1A, o terceiro ponto deve ser escolhido para $t_{nom} = 3000s$.

3.3.4 Conclusão

Da mesma forma que na seção anterior, a qualidade dessa estimativa é comparável àquela obtida utilizando o método MIONL. Entretanto, vale destacar que o erro de aproximação nos dois casos continua na mesma ordem de grandeza, porém a complexidade do método

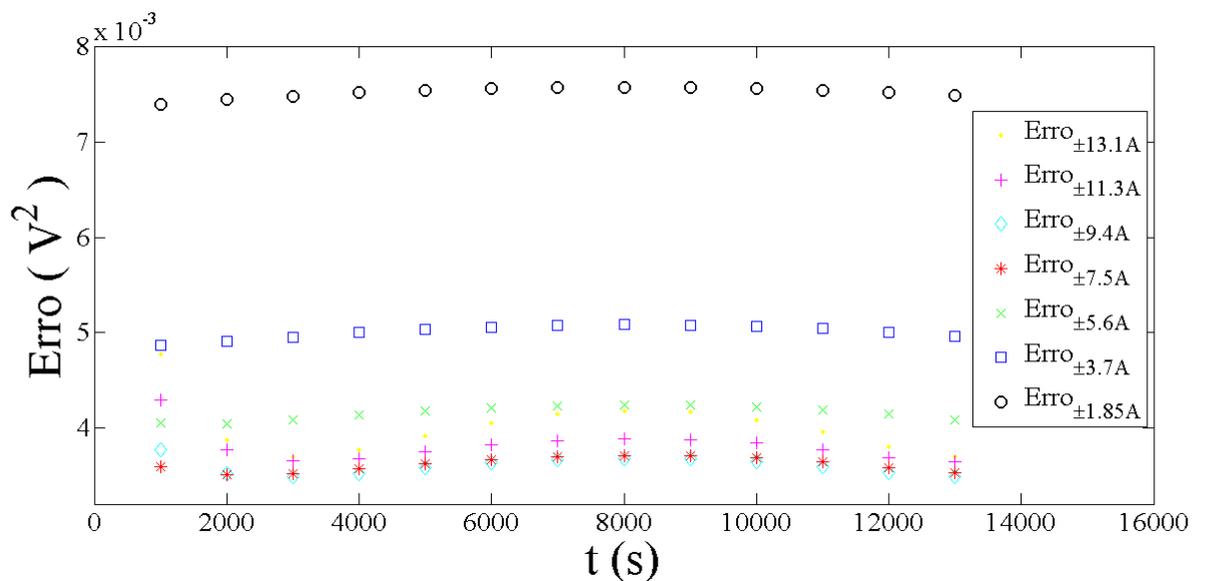


Figura 3.12: Valores do erro médio quadrático para os treze níveis diferentes de tensão apresentados na Figura 3.11

proposto é, em termos computacionais, menor em muitas ordens de grandeza.

3.4 Estimação da resistência

O modelo proposto por Tremblay e Dessaint considera a resistência interna da bateria R como um termo constante. Porém, à medida que uma bateria se carrega ou descarrega, alterando seu SOC, sua resistência interna varia. O propósito desta seção é obter, através dos termos da própria equação do modelo de Tremblay e Dessaint, os termos que representam essa variação.

Uma revisão da literatura tem sido conduzida e existem dois métodos de determinar a resistência interna de uma bateria: Método da resistência CC MRCC e Método da resistência CA MRCA (COOPER; SMITH, 2006), (DEPERNET; BA; BERTHON, 2012), (HOWEY; YUFIT; MITCHESON; OFFER; BRANDON, 2013), (RATNAKUMAR; SMART; WHITCANACK; EWELL, 2006), (SCHWEIGER et al., 2010) e (ZHANG; LU; ZHU; ZHAO, 2014).

Comparado com o MRCC, o MRCA tem as seguintes vantagens: (1) a medida da resistência interna é realizada durante o ciclo de trabalho da bateria, não precisando aplicação de níveis de correntes específicos; (2) a medição evita danos causados pela alta taxa de descarga que possui o MRCC (ZHANG; LU; ZHU; ZHAO, 2014). Citam-se mais dois tipos de MRCA: método de alta frequência (HFM, método da alta frequência) e método de espectroscopia eletroquímica de impedância (EIS, electrochemical impedance spectroscopy em inglês) (HOWEY; YUFIT; MITCHESON; OFFER; BRANDON, 2013), (DEPERNET; BA; BERTHON, 2012), (SCHWEIGER et al., 2010) e (COOPER; SMITH,

2006). Outro tipo de método para determinar a resistência interna da bateria, método das perdas térmicas, é citado (SCHWEIGER et al., 2010). Esse método leva em consideração o aquecimento devido a corrente de carga/descarga.

O método MRCC tem como vantagem a fácil interpretação e obtenção dos dados. Além disso, não há necessidade de equipamento adicional para realizar a medida (COOPER; SMITH, 2006).

3.4.1 Métodos de determinação da resistência

Um método é apresentado para calcular a resistência CC da bateria: o teste de corrente pulsante TCP. O TCP determina a resistência da bateria aplicando um pulso de corrente na bateria e avaliando o resultado da tensão. A resistência pode ser calculada usando a lei de Ohm (FLEISCHER; WAAG; HEYN; SAUER, 2014).

Neste trabalho, aceito para publicação pelos autores (FREITAS; LIMA; MORAIS, 2016), é usado o MRCC baseado em dois padrões IEC-896-2 e IEC 61951-1, porém, com algumas mudanças. No método original a célula deve ser descarregada com corrente constante I_1 . No final do período de descarga de 10s, a tensão U_1 deve ser medida. A corrente de descarga deve ser imediatamente aumentada para um valor I_2 ($I_2=10I_1$) e a tensão U_2 durante a descarga deve ser medida no final de um período de descarga de 3s, como apresentado na Figura 3.13. Os valores de I_1 e I_2 não são detalhados nos padrões IEC-896-2 e IEC 61951-1. Para o trabalho foram escolhidos os valores de 3A e 30A.

A resistência interna da bateria deve ser calculada usando a equação (3.18):

$$R_{CC-Norma} = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}, \quad (3.18)$$

na qual I_1 e I_2 são as correntes de descargas e U_1 e U_2 são as tensões após aplicação, respectivamente, das correntes I_1 e I_2 .

Para a análise do método MRCC, é necessário que o modelo, após aplicação de um degrau de corrente, esteja em estado estacionário. Isso acontece 200s (5τ) após aplicação do degrau de corrente, que significa cinco vezes o valor da constante de tempo do filtro de corrente. Para o caso em estudo foi estabelecido que o valor de τ é 40s. Para manter a mesma proporção entre os tempos, 3:10, o valor do segundo período de aplicação da corrente de descarga é 667s. Então, essa é a razão para a mudança dos tempos de 3s e 10s para 200s e 667s.

3.4.2 Determinação da resistência

A equação (2.25) será novamente apresentada, agora como (3.19):

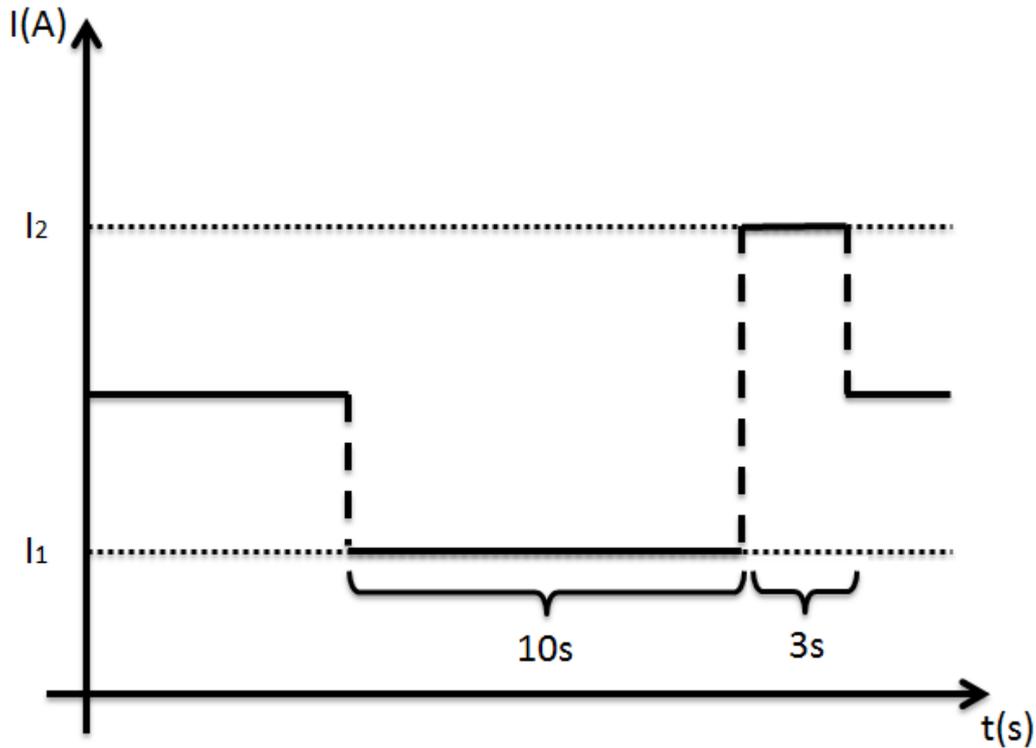


Figura 3.13: Inicialmente a bateria é descarregada com uma corrente constante I_1 por 10s e, em seguida, por uma outra corrente $I_2 = 10I_1$ por 3s.

$$v = E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - i_T} (i_T + i_F) + e. \quad (3.19)$$

Todos os termos na equação (3.19) são tensões. Usando análise dimensional para caracterizá-la, somente dois termos são Ri (Lei de Ohm). Expandindo a equação (3.19), tem-se:

$$v = E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - i_T} i_T - K \frac{Q}{Q - i_T} i_F + e, \quad (3.20)$$

na qual todos os seis termos tem dimensão [V].

Os dois termos representando Ri são: Ri e $K \frac{Q}{Q - i_T} i_T$. O termo $K \frac{Q}{Q - i_T} i_T$ não representa Ri , pois i_T (atual carga consumida) tem dimensão [Ah]. O parâmetro K possui duas dimensões, respectivamente: $[\frac{V}{Ah}]$ e $[\Omega]$ (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

Dessa forma, existem duas resistências na equação e sua soma é dada pela equação (3.21).

$$R_{CC-Equacao} = R + K \frac{Q}{Q - i_T}. \quad (3.21)$$

3.4.3 Validação

A resistência dada na equação (3.21) é comparada com a resistência calculada pelos métodos modificados das normas IEC 892-2 e IEC 61951-1. O perfil de corrente de descarga é apresentado na Figura 3.14.

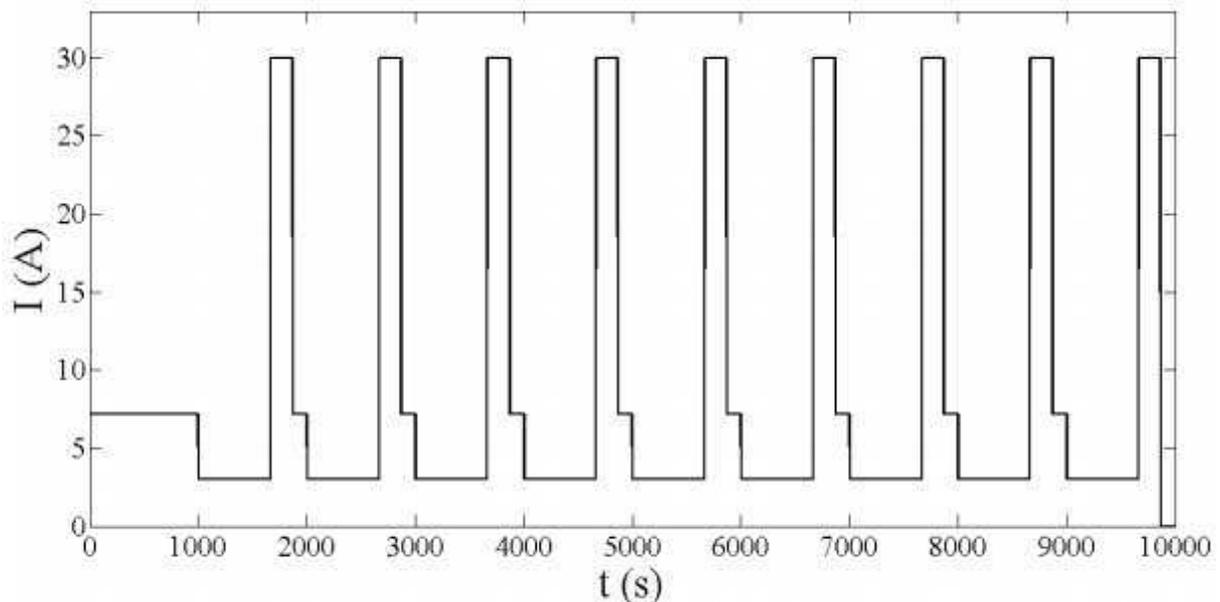


Figura 3.14: Perfil de corrente aplicado ao modelo de bateria. A corrente de descarga é 7,2A e a medição de resistência é calculada quando um par de corrente é aplicada: 3A por 667s e 30A por 200s.

Na Figura 3.14, o perfil de corrente aplicado ao modelo de bateria é apresentado. A bateria é descarregada com 7,2A e a resistência medida é calculada quando um par de correntes é aplicado: 3A por 667s e 30A por 200s.

Com esse perfil de corrente, tensão e SOC varia como apresentado na Figura 3.15.

Na Figura 3.15, a tensão e o SOC do modelo de bateria é apresentado. A bateria varia o SOC entre 100% e 30%. Esses valores são indicados para evitar danos à bateria (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

A comparação entre a resistência medida baseada nas normas IEC 892-2 e IEC 61951-1 e a resistência dada pela equação (3.21) é apresentada na Figura 3.16.

A Figura 3.16 apresenta a resistência medida por dois métodos: baseada na norma IEC 896-2 e IEC 61951-1 (equação (3.18)) e baseada na equação (3.21). Os valores estão entre $10m\Omega$ e $35m\Omega$ e possuem um erro máximo de 12,7%.

Portanto, se o valor da resistência interna da bateria é conhecido, e desconsiderando a degradação, pode-se conseguir o quanto de energia a bateria pode fornecer, baseado na equação de descarga do modelo de Tremblay e Dessaint.

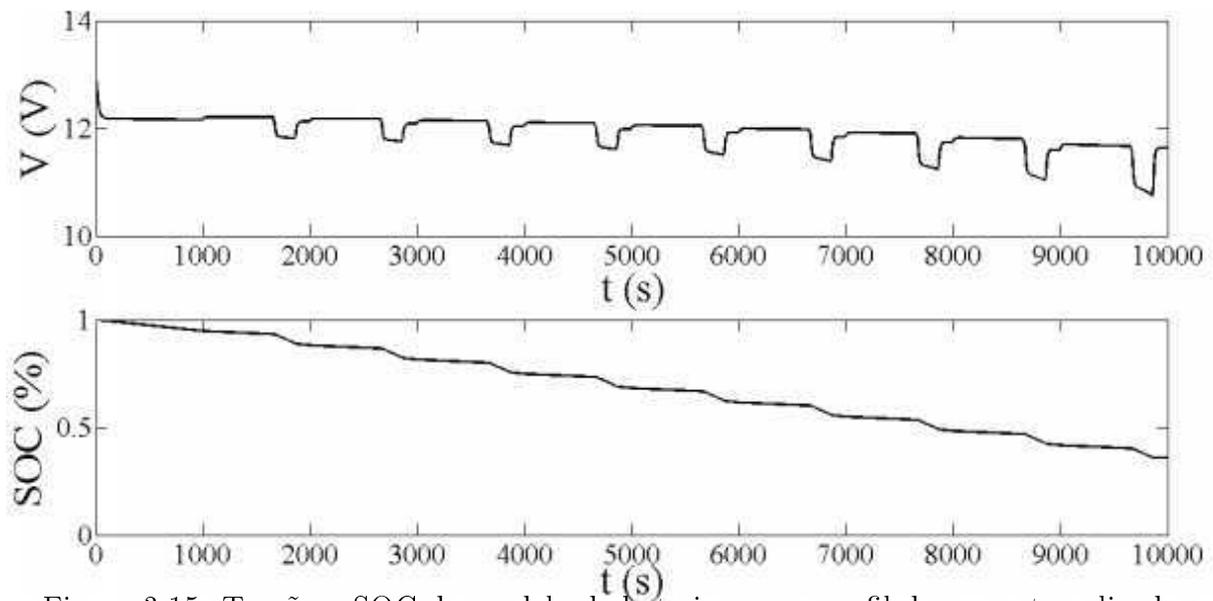


Figura 3.15: Tensão e SOC do modelo de bateria com o perfil de corrente aplicada apresentado na Figura 3.14.

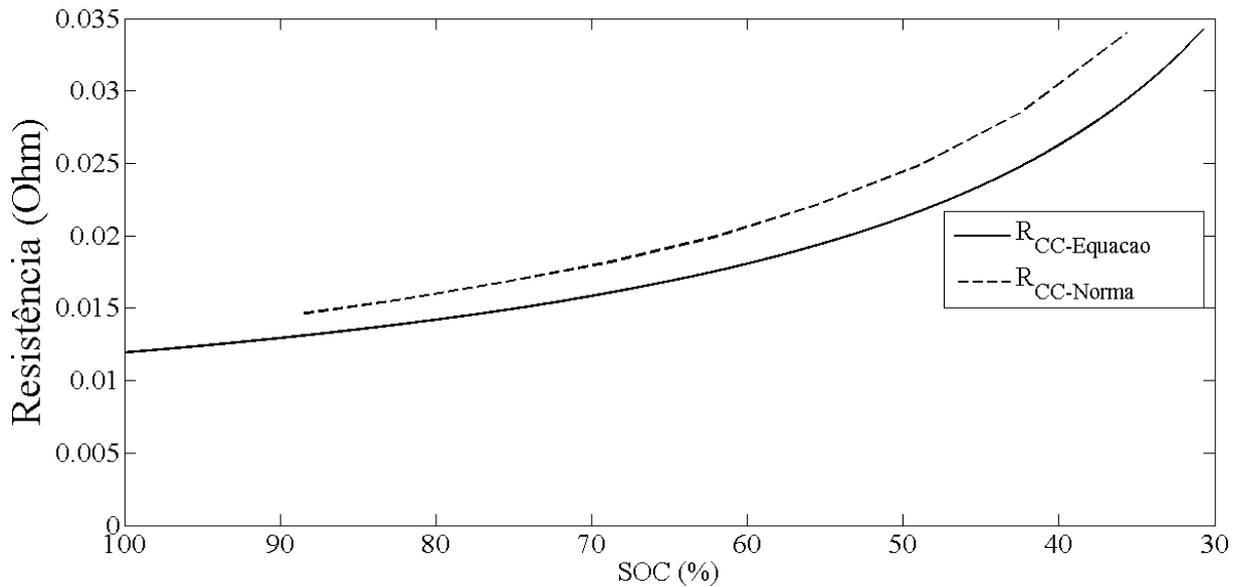


Figura 3.16: Resistência medida baseada na norma IEC 896-2 e IEC 61951-1 (equação (3.18)) e resistência medida baseada na equação (3.21).

3.4.4 Conclusão

O parâmetro R do modelo de Tremblay e Dessaint não representa a resistência CC. Usando dois termos da equação de descarga deste modelo é possível obter uma estimativa imprecisa da resistência CC da bateria e conseqüentemente uma estimativa imprecisa de quanto de energia ela ainda pode fornecer, baseado no SOC. O erro máximo entre os valores de resistência calculada pelo método modificado das normas IEC 896-2 e IEC 61951-1 e pela equação do modelo é de 12,7%. Esses resultados ensejam que o modelo

deve ser revisado para que expresse com precisão a resistência CC.

3.5 Escolha da constante de tempo

O modelo proposto por Tremblay e Dessaint, considera a constante de tempo do filtro de corrente como 30s. Esse valor não pode ser pré-estabelecido para as baterias de chumbo-ácido, pois mesmo as baterias de mesmo lote e de mesma tensão e capacidade nominais sofrem processos de degradação diferentes. Portanto, o objetivo desta seção é determinar essa constante de tempo para uma determinada bateria.

3.5.1 Algoritmo genético

O método utilizado é otimização com algoritmo genético (AG) (MITCHELL, 1998), (GOLDBERG, 1989) e (DAVIS, 1991). Os passos a seguir resumem como o algoritmo funciona.

- O algoritmo começa com a criação de uma população inicial aleatória;
- O algoritmo então cria uma sequência de novas populações. A cada passo, o algoritmo usa indivíduos da atual geração para criar a nova população. Para criar a nova população, o algoritmo realiza os seguintes passos:
 - pontua cada membro da atual população calculando seu valor de aptidão
 - seleciona membros, chamados de pais, com base nas melhores aptidões
 - alguns indivíduos da atual população são escolhidos como elite e passam para a próxima população
 - os pais produzem filhos. Filhos são produzidos de duas formas: realizando mudanças randômicas (mutação) ou combinando vetores dos pais (cruzamento).
 - a atual população é substituída pela nova (que possui os filhos produzidos)
- O algoritmo para quando um dos critérios de parada é satisfeito.

Dessa forma, a Figura 3.17, apresenta os passos de um algoritmo genético utilizado no trabalho.

O algoritmo genético inicia com a definição da função de ajustamento e geração inicial de uma população. Logo em seguida, há a avaliação da função de ajustamento da população. Assim, os melhores indivíduos são selecionados, há o cruzamento dos pares e uma taxa de mutação é aplicada. Se o critério de parada foi satisfeito, o algoritmo chega ao fim. Caso contrário, novamente será avaliada a função de ajustamento da população.

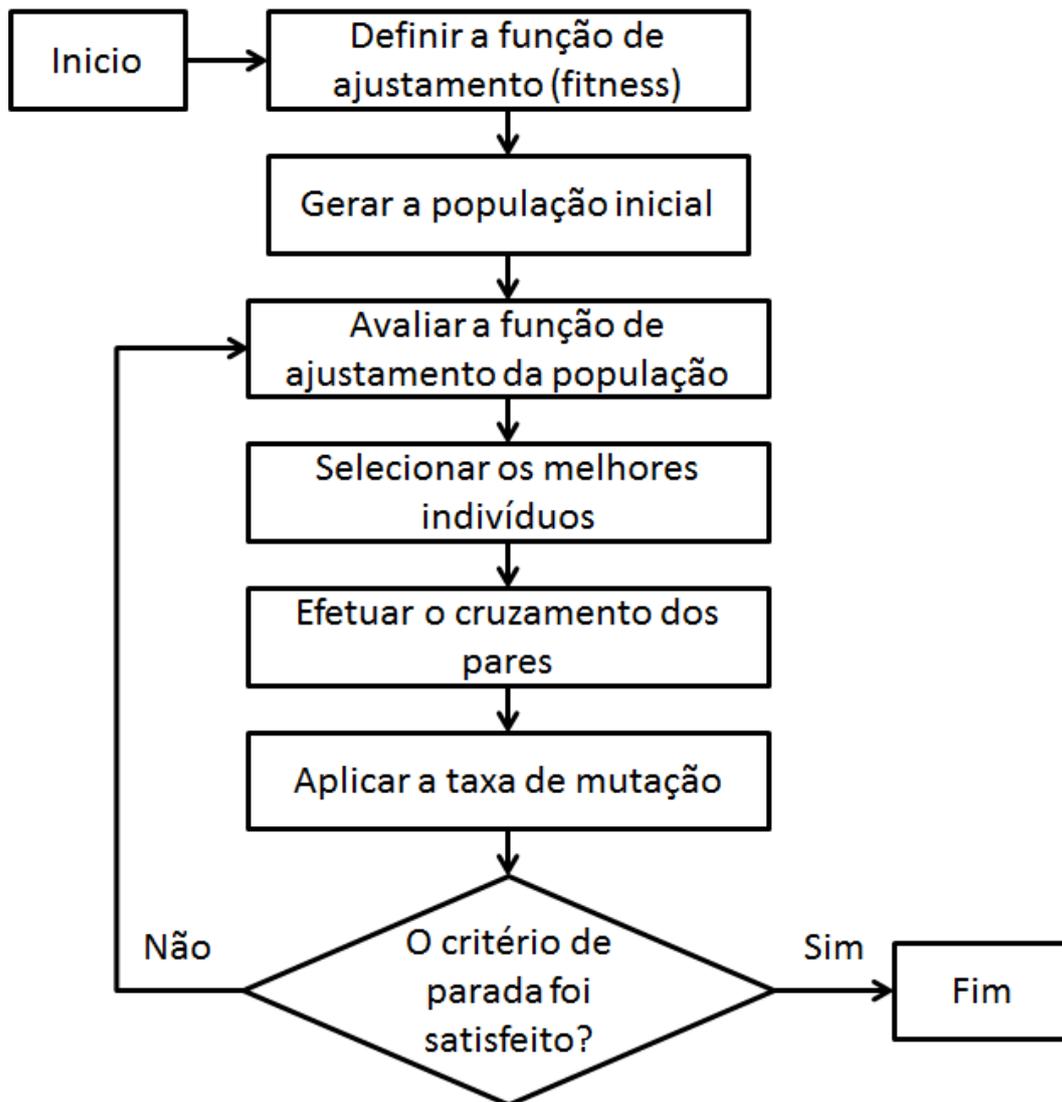


Figura 3.17: O algoritmo genético inicia com a definição da função de ajustamento e geração inicial de uma população. Logo em seguida, há a avaliação da função de ajustamento da população. Assim, os melhores indivíduos são selecionados, há o cruzamento dos pares e uma taxa de mutação é aplicada. Se o critério de parada foi satisfeito, o algoritmo chega ao fim. Caso contrário, novamente será avaliada a função de ajustamento da população.

3.5.2 Estimação da constante de tempo

A estimação de parâmetros está baseada no trabalho de (BINDNER; CRONIN; LUND-SAGER, 2005) e (ANDERSSON, 2006). Nesses trabalhos são estimados parâmetros tanto para carga e quanto para descarga. Nesta seção serão utilizados os parâmetros obtidos com o método MIONL, apresentados novamente na tabela 3.4. Em seguida será estimado o valor da constante de tempo τ .

Foi determinado um número máximo de 3000 gerações no algoritmo genético.

As equações são (2.25) e (2.26), porém expandidas no termo exponencial e e no termo da corrente filtrada i_F (TREMBLAY; DESSAINT, 2009). Usa-se:

Tabela 3.4: Valores estimados anteriormente com o método MIONL.

Parâmetro	MIONL
E_0^d	12,1426V
K_d	$0,0115 \frac{V}{Ah} ou \Omega$
A_d	3,1125V
B_d	$1,0701(Ah)^{-1}$
E_0^c	12,9830V
K_c	$0,0212 \frac{V}{Ah} ou \Omega$
A_c	5,2900V
B_c	$5,0154(Ah)^{-1}$

$$v_{est}^d = E_0^d - 0,00333i - K_d \frac{Q}{Q - i_T} \left(i_F + \frac{\Delta t(i - i_F)}{\hat{\tau}} + i_T \right) + \frac{e + A_d \times B_d u|i|\Delta t}{1 + B_d|i|\Delta t}, i \geq 0 \quad (3.22)$$

quando a bateria está sendo descarregada e

$$v_{est}^c = E_0^c - 0,00333i - K_d \frac{Q}{i_T + 0.1Q} \left(i_F + \frac{\Delta t(i - i_F)}{\hat{\tau}} + i_T \right) - \frac{K_c Q i_T}{Q - i_T} + \frac{e + A_c \times B_c u|i|\Delta t}{1 + B_c|i|\Delta t}, i < 0 \quad (3.23)$$

quando a bateria está sendo carregada.

Para estimação e validação da tensão, foram definidos dois intervalos, os mesmos da Figura 3.18, representados novamente a seguir.

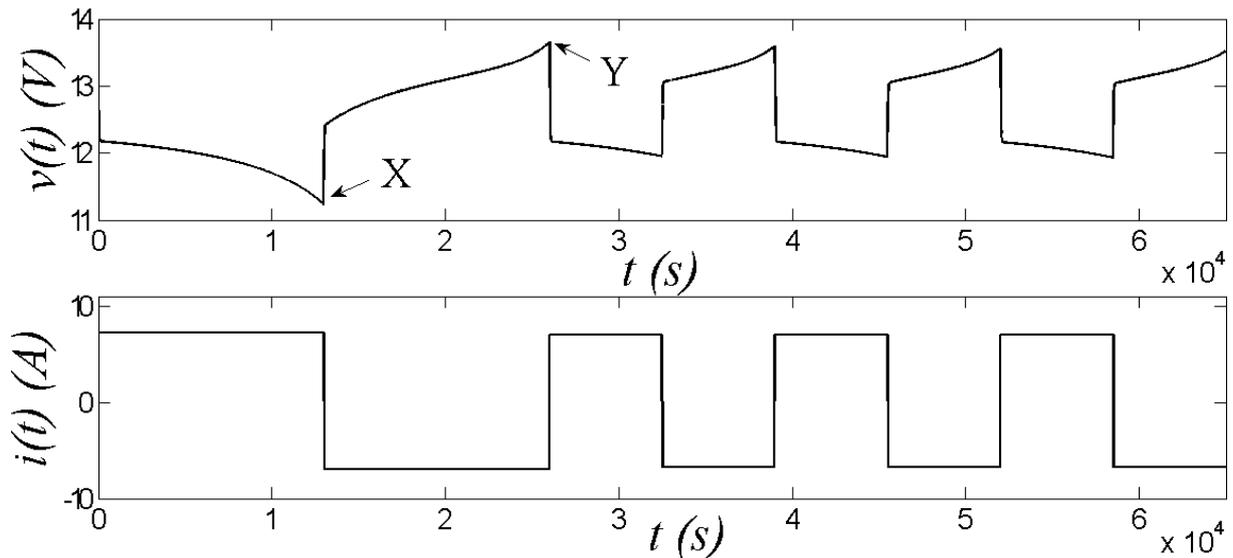


Figura 3.18: Tensão $v(t)$ (parte superior) do modelo de simulação para um ciclo de carga e descarga (parte inferior). A carga e a descarga são promovidas por fontes de corrente controladas.

t_1 é o instante de tempo inicial da validação (t_Y da Figura 3.18) e t_2 é o instante de

tempo final da validação (65000s).

3.5.3 Validação

Com o perfil de corrente da Figura 3.18, a tensão do modelo de bateria e a tensão estimada da bateria são apresentados na Figura 3.19.

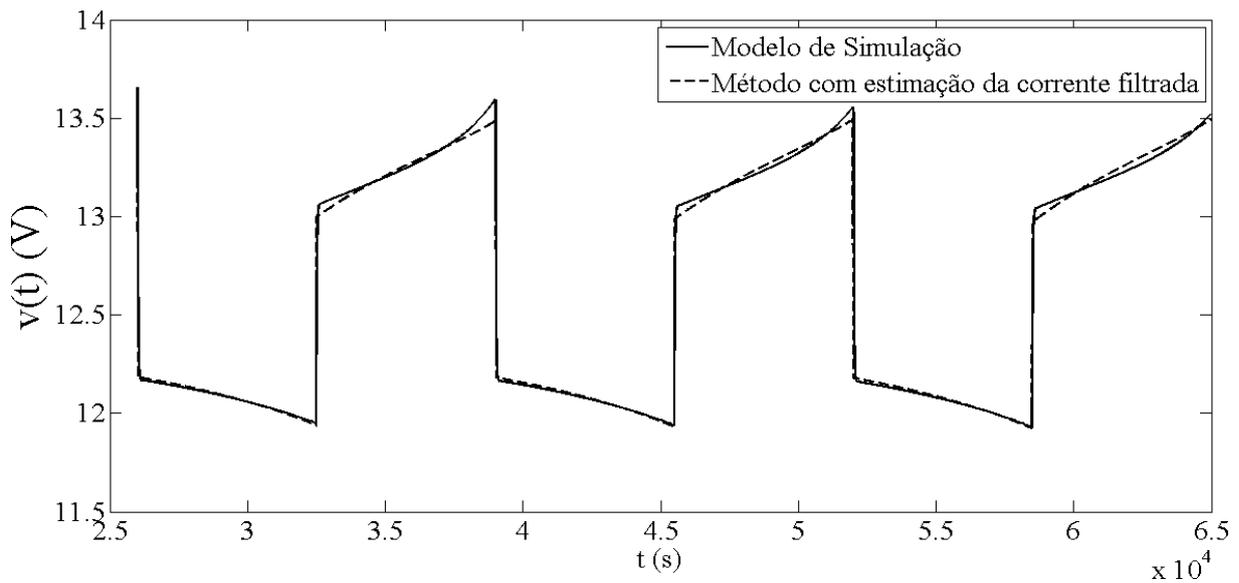


Figura 3.19: Comparação entre a tensão do modelo de bateria chumbo-ácido e a tensão estimada da bateria.

O algoritmo genético foi aplicado no gráfico de tensão da Figura 3.18. Após a estimação, foi encontrado um valor para a constante de tempo τ , para esta bateria, de 44,69s com um erro de $0,002265V^2$ entre a tensão estimada e a tensão do modelo de bateria.

3.5.4 Conclusão

Nessa contribuição, foi utilizado um algoritmo genético para estimar o valor da constante de tempo do filtro de corrente (presente tanto na curva de descarga quanto na de carga). As equações e os valores iniciais dos parâmetros a serem estimados são apresentados. Obtém-se um valor da constante de tempo diferente do valor fixo indicado no modelo de Tremblay e Dessaint. Um valor fixo de τ não representa uma classe de baterias, como baterias de chumbo-ácido, pois baterias de mesmo lote sofrem processos de degradação desiguais. Assim, o valor deve ser calculado e/ou estimado para representar melhor o parâmetro e a bateria.

Capítulo 4

Contribuição para determinação do tempo de vida útil

O modelo proposto por Schiffer considera um conjunto de equações para determinar o tempo de vida útil de baterias de chumbo-ácido. Porém, essas equações quando utilizadas para duas baterias de chumbo-ácido de tensão e capacidades nominais diferentes da utilizada por Schiffer, acarretaram em uma divergência entre os valores obtidos pelo experimento e os valores obtidos pelo modelo. O propósito desta seção é generalizar a equação de degradação para que o modelo possa ser utilizado para qualquer bateria de chumbo-ácido.

4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma contribuição ao modelo para determinação do tempo de vida útil. A contribuição contempla a alteração da equação da degradação da bateria, equação (2.56).

Inicialmente seriam usadas duas baterias com a mesma tensão (12V), a mesma capacidade (30Ah) e do mesmo fabricante. Porém, no início de cada teste foi observado que a capacidade inicial era diferente para as duas baterias. Dessa forma, dois testes foram feitos, considerando duas baterias distintas (BAT1 e BAT2).

Os valores iniciais de capacidade que foram encontrados foram baseados no ensaio de capacidade da portaria do INMETRO *n*º004/2011 (NBR/INMETRO, 2011), que diz:

- Controlar a temperatura entre 22°C e 28°C do local na qual a bateria está inserida;
- Condicionar a bateria a esta temperatura durante um período mínimo de 16 horas;
- Realizar quatro ciclos de carga e descarga;

- Repousar a bateria por mais 4 horas;
- Descarregar a bateria com uma corrente conhecida;
- Analisar os resultados.

Após a análise das duas baterias, foi verificado que a BAT1 possuía uma capacidade inicial de 22,98Ah e a BAT2, 20,33Ah.

4.2 Plataforma de testes

Em todos os testes de laboratório, foi utilizada a plataforma para ensaio de baterias de chumbo-ácido PEBCA, que se encontra no laboratório LEIAM da Universidade Federal de Campina Grande (KETZER; LIMA; CORREA; OLIVEIRA, 2015). Essa plataforma é composta por um tanque hidrotérmico, um quadro elétrico de comando e controle, um circuito para carga e descarga e um sistema para monitoramento e controle.

4.2.1 Tanque hidrotérmico

As baterias banhadas em água situam-se em um tanque inoxidável. Esse tanque apresenta tubulações para circulação da água com fluido refrigerante para troca de calor, sendo este último refrigerado pelo sistema compressor na parte inferior do equipamento, como apresentado na Figura 4.1.

Na parte inferior do tanque da Figura 4.1 há um reservatório de água associado à uma bomba. Dentro do reservatório há uma resistência que realiza o aquecimento da água no reservatório. O fluxo de água é gerado pela bomba, que troca a água no reservatório pela água do tanque, assim como cria um fluxo nas tubulações de troca de calor com o líquido refrigerante. Durante a operação do sistema, a fim de manter a temperatura do tanque homogênea, a bomba está sempre em operação. Os circuitos de aquecimento e refrigeração são ligados de forma independente através do quadro de comando, que será visto a seguir, permitindo o controle da temperatura.

4.2.2 Quadro elétrico de comando e controle

O sensoriamento é realizado a partir de termorresistências, tipo PT1000. A instrumentação de controle de temperatura é realizada por um DataLogger programado para tal função, associado à um quadro de comando com os inversores necessários para o acionamento do sistema. A Figura 4.2 apresenta o quadro desenvolvido. Há dois inversores: um para acionamento do circuito de resfriamento e outro para o controle da bomba.



Figura 4.1: Fotografia do tanque hidrotérmico empregado no isolamento e controle de temperatura

4.2.3 Circuito para carga e descarga

Para o circuito de carga e descarga, é utilizado um conversor composto por um retificador trifásico controlado bidirecional em corrente com comando PWM (q_1 , q_2 e q_3). Esse retificador tem por finalidade controlar o fator de potência da rede e a tensão do barramento, conforme apresenta a Figura 4.3.

A parte do conversor que é composta pelo braço formado pelas chaves q_a e \bar{q}_a tem por finalidade controlar a corrente da bateria e por sua vez controlar o fluxo de potência.

O algoritmo de controle do conversor é processado por um DSP da Texas Instruments®, a programação é realizada em $C++$ e é empregada memória flash, permitindo que após a energização do circuito, o controlador seja carregado adequando as saídas necessárias (KETZER; LIMA; CORREA; OLIVEIRA, 2015).

4.2.4 Monitoramento e controle

O monitor contém um software desenvolvido responsável pela automatização dos ensaios, assim como armazenamento dos dados e detecção de irregularidades durante a execução. Ainda, um software para interface e acompanhamento foi desenvolvido, o qual se comunica remotamente, empregando uma rede virtual privada. A partir das soluções empregadas é



Figura 4.2: Fotografia do quadro elétrico do circuito hidrotérmico com dois inversores e um DataLogger

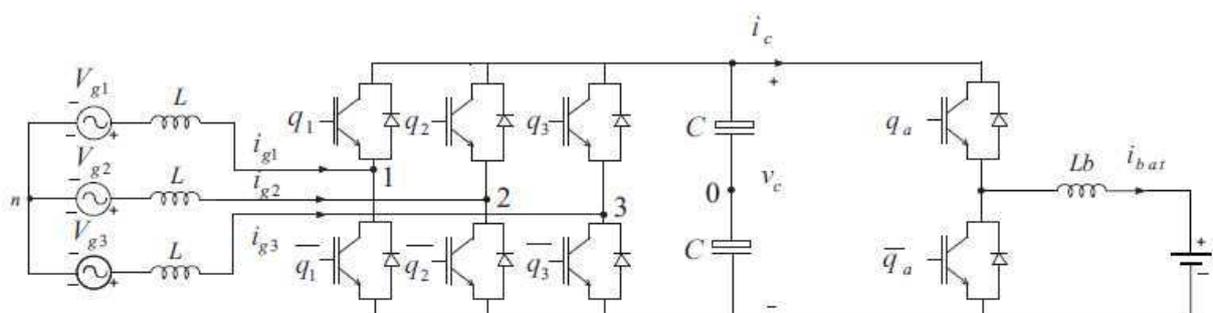


Figura 4.3: Diagrama elétrico do módulo de retificação trifásico controlado com fluxo bidirecional

possível não só acompanhar o ensaio remotamente, mas também interagir com a execução do mesmo (KETZER; LIMA; CORREA; OLIVEIRA, 2015).

Mediante o uso da PEBCA é possível realizar dois ensaios baseados na Portaria nº004/2011 (NBR/INMETRO, 2011). Para este trabalho foram definidos os limites de tensão durante os ensaios, correntes para carga e descarga e restrições de tempo, conforme será visto nas próximas seções.

O software de interação remota permite monitorar o estado do conversor, obter gráficos a partir dos dados adquiridos durante o experimento e realizar ações de controle, alterando a etapa ou o ensaio em processo. Uma das telas de interface com o usuário é apresentada na Figura 4.4. Nesta tela é definido o diretório da VPN, e o nome dado ao que se deseja obter os gráficos.



Figura 4.4: Interface do usuário em software de interação remota

Escolhendo a opção "Real Time" da Figura 4.4, o usuário terá acesso ao software de interação remota, visualizando tensão, corrente, potência e temperatura naquele instante.

4.3 Fluxograma do protocolo de coleta de dados

O fluxograma da Figura 4.5 apresenta os passos que devem ser seguidos. Inicialmente, são obtidos os pontos de capacidade de uma bateria conforme portaria do INMETRO

$n^{\circ}004/2011$ (NBR/INMETRO, 2011) de um lote de baterias de chumbo-ácido. Em seguida, uma interpolação desses pontos é realizada. Faz-se necessário a estimação dos parâmetros do modelo de Schiffer para que seja possível utilizar o modelo. Se o erro médio quadrático entre a curva de degradação calculada pelo modelo de Schiffer e a curva de degradação pós-interpolação for menor ou igual a $0,5V^2$, o modelo deve ser testado com outra bateria de chumbo-ácido de mesma tensão e capacidade nominais. Caso o erro médio quadrático ultrapasse os $0,5V^2$, os novos parâmetros α_1 , α_2 e α_3 devem ser estimados, para, em seguida, utilizar novamente o modelo de Schiffer para calcular a degradação.

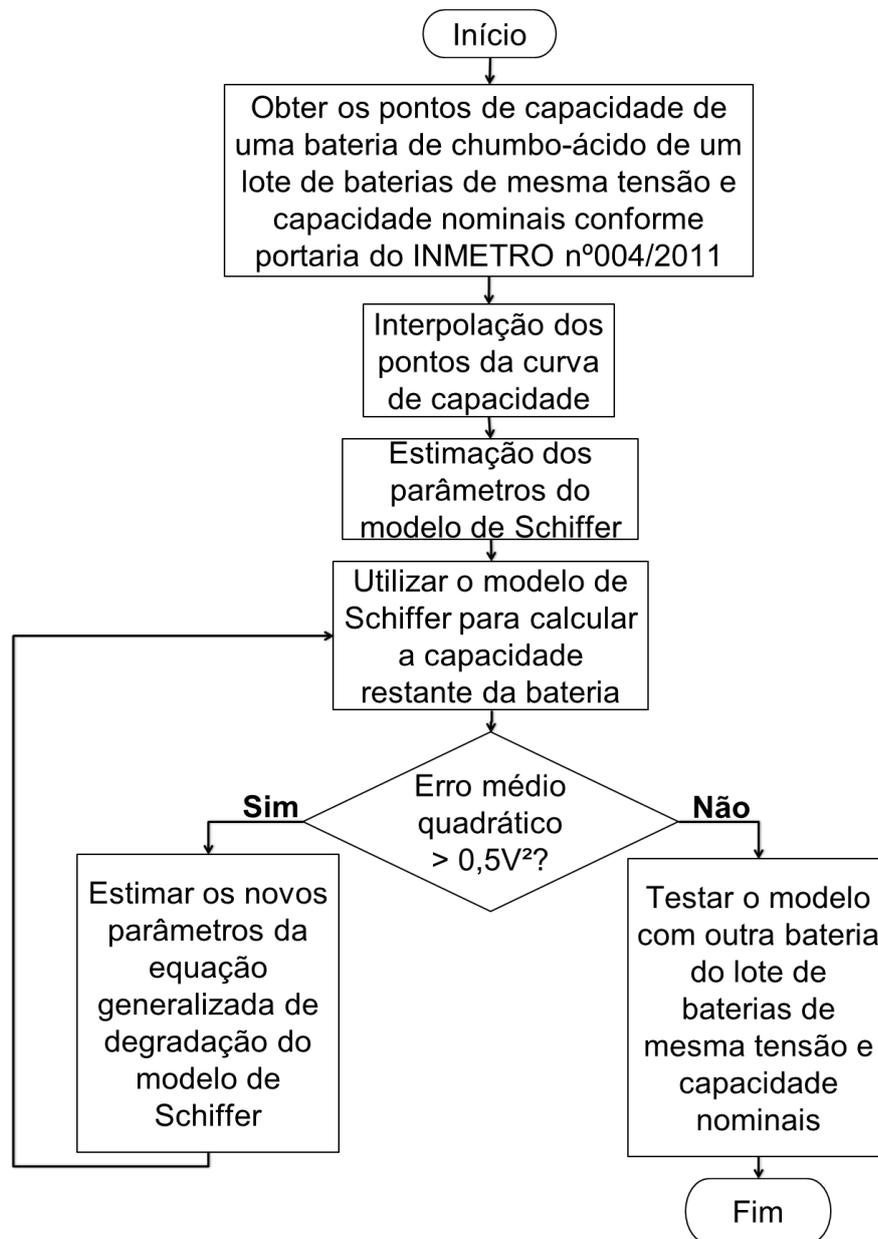


Figura 4.5: Fluxograma da contribuição para obter a capacidade das baterias BAT1 e BAT2

4.4 Testes e resultados

Testes realizados para caracterizar o gráfico da capacidade até o fim da vida útil

As baterias BAT1 e BAT2 têm as seguintes características:

- Modelo: 12MF30;
- Tensão: 12V;
- Capacidade: 30Ah;
- Fabricante: Acumuladores Moura.

Os testes das baterias BAT1 e BAT2 se basearam na Portaria nº004/2011 (NBR/INMETRO, 2011) e são apresentados nas Figuras 4.6 e 4.7.

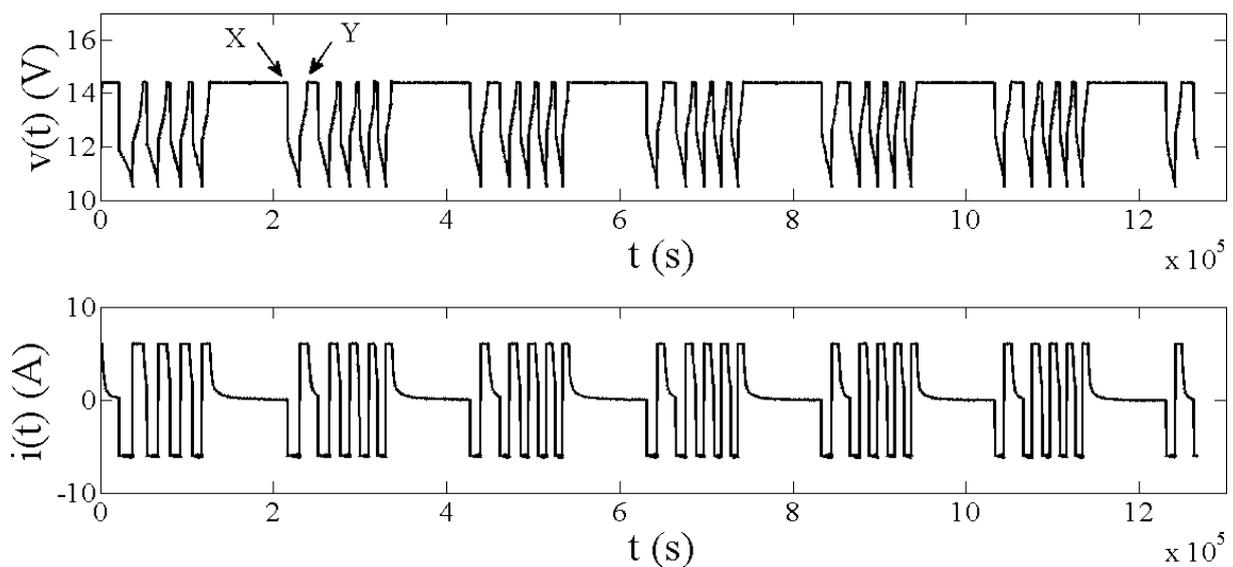


Figura 4.6: Corrente e tensão obtidas na BAT1 para os testes de cálculo de vida útil

Os testes se iniciam com uma carga a tensão constante (14,4V). Após isso, quatro ciclos de descarga e carga, com uma corrente de 6A, são aplicados. No final desse primeiro ciclo, uma carga completa de 24h a tensão constante (14,4V) é aplicada. A partir desse ponto (aproximadamente 200000s ou 56h), a próxima descarga indicará o valor real da capacidade da bateria, integrando a corrente (os limites são os instantes inicial e final dessa descarga).

Após o cálculo da capacidade inicial das duas baterias, ao final de cada carga de 24h, a capacidade da bateria será calculada baseada na próxima descarga. Dessa forma, temos os seguintes valores de capacidade para as duas baterias BAT1 e BAT2.

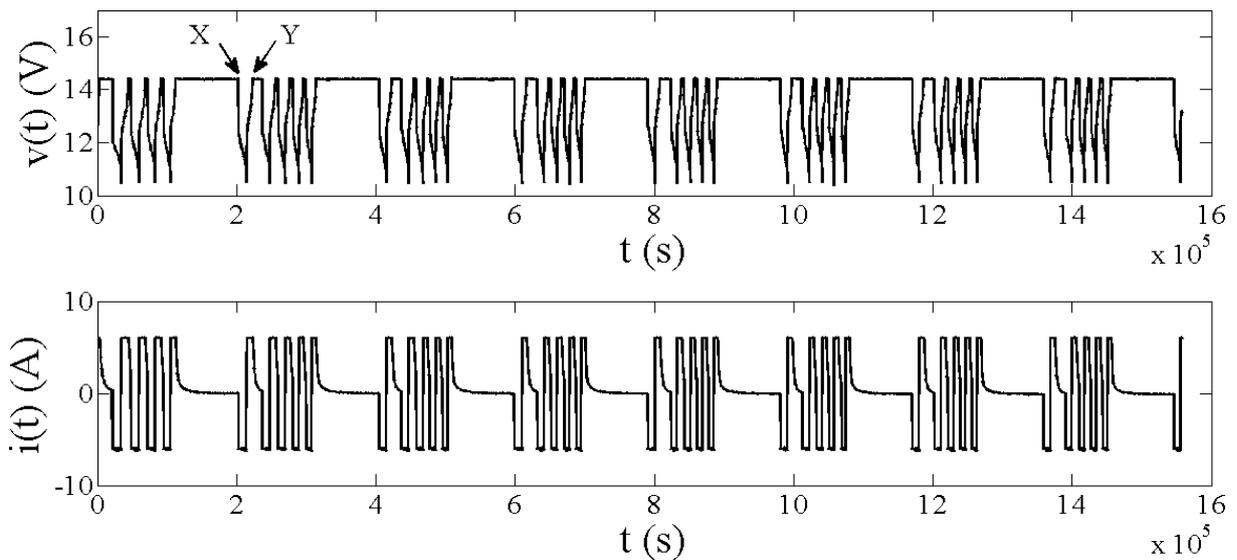


Figura 4.7: Corrente e tensão obtidas na BAT2 para os testes de cálculo de vida útil

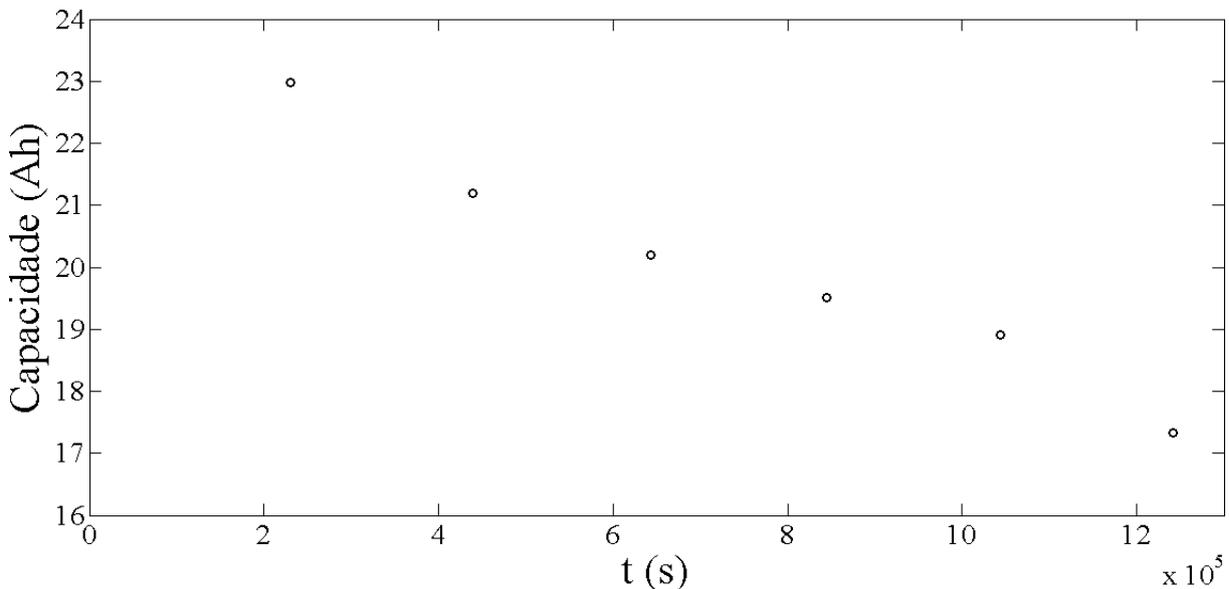


Figura 4.8: Capacidade da BAT1 medida em relação a primeira descarga posterior a carga completa de 24 horas

Foram realizados ciclos de carga e descarga até que a capacidade chegasse em 80% do valor inicial. Dessa forma, a BAT1 tem sua sexta medida de capacidade com o valor de 17,33Ah, enquanto que o último ponto da BAT2 tem 15,35Ah. A bateria chega ao final da sua vida útil quando alcança 80% da capacidade inicial (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005), (ANDERSSON, 2006) e (SCHIFFER et al., 2007) .

Como a BAT1 possuía uma capacidade inicial de 22,98Ah, chegaria no final da sua vida útil com uma capacidade de 18,38Ah (os dois últimos pontos calculados são 18,91Ah e 17,33Ah). Já a BAT2 possuía uma capacidade inicial de 20,33Ah, chegaria no final da sua vida útil com uma capacidade de 16,26Ah (os dois últimos pontos calculados são 16,1Ah e 15,35Ah). Nos experimentos da BAT2, o teste poderia ter parado no sétimo

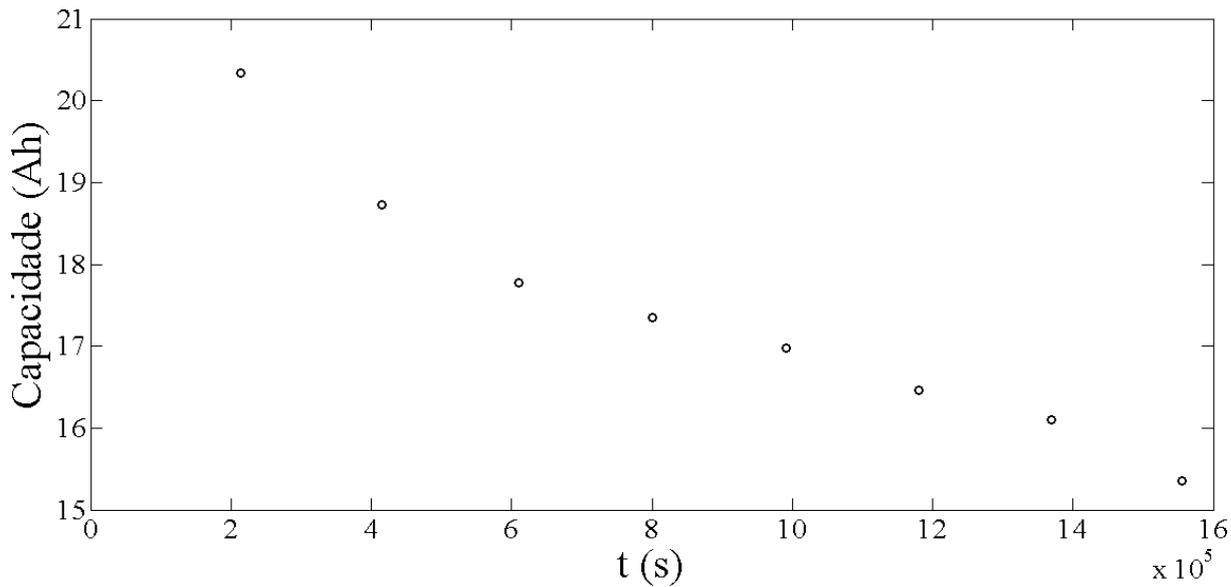


Figura 4.9: Capacidade da BAT2 medida em relação a primeira descarga posterior a carga completa de 24 horas

ponto. O autor queria saber se haveria ou não um decaimento mais rápido após chegar nos 80% da capacidade inicial (não houve, medindo apenas um ponto a mais em apenas uma bateria). Assim, não poderia usá-las como se fossem baterias iguais, pois os processos de degradação de cada bateria até o primeiro teste não eram conhecidos. A Figura 4.10 relaciona a capacidade da BAT1 e da BAT2.

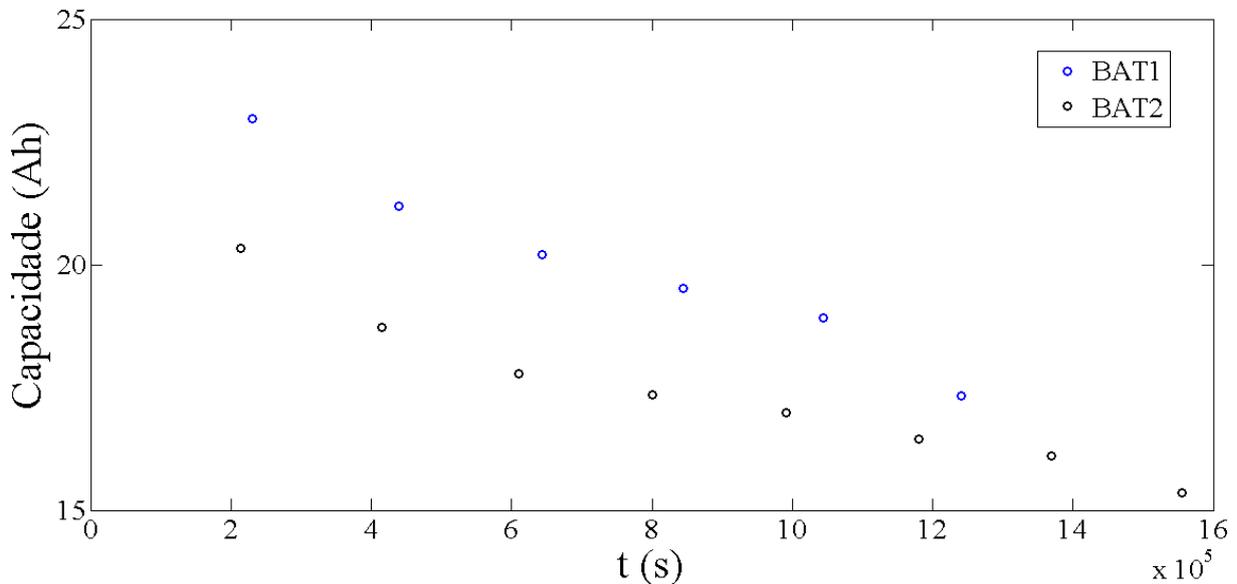


Figura 4.10: Capacidade da das baterias BAT1 e BAT2

Tendo em vista a divergência no comportamento da degradação das duas baterias BAT1 e BAT2, não será possível usar uma bateria para estimar e outra bateria para testar.

Interpolação da curva de capacidade

A curva de capacidade, conforme visto nas Figuras 4.8 e 4.9, tem sua interpolação apresentada nas Figuras 4.11 e 4.12.

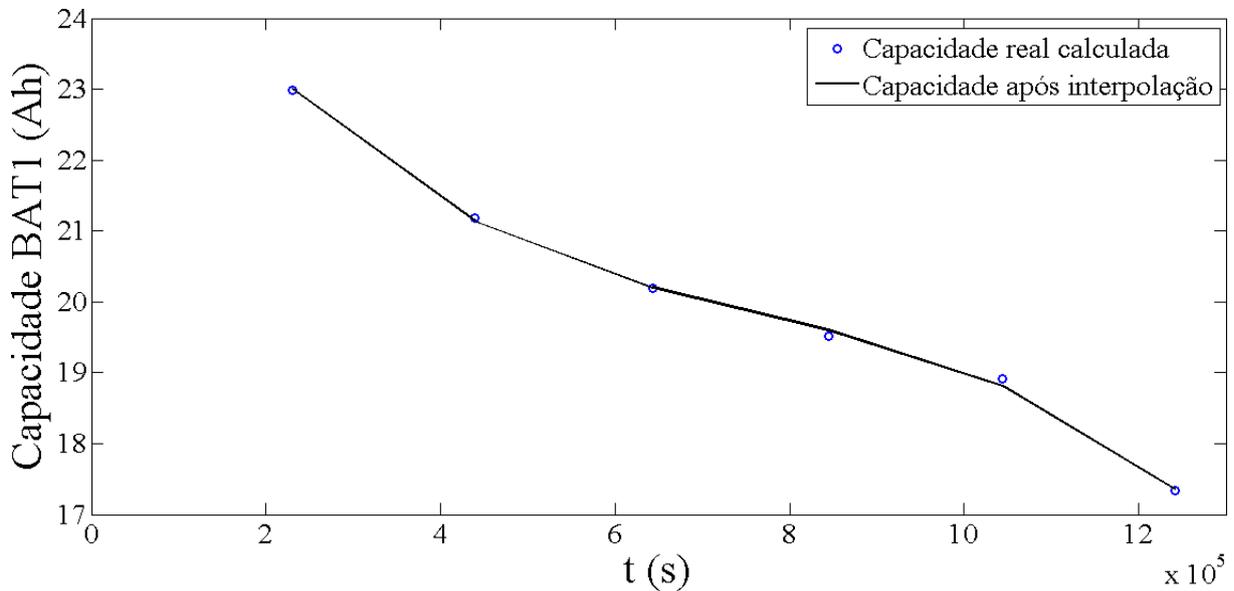


Figura 4.11: Interpolação da curva de capacidade da BAT1

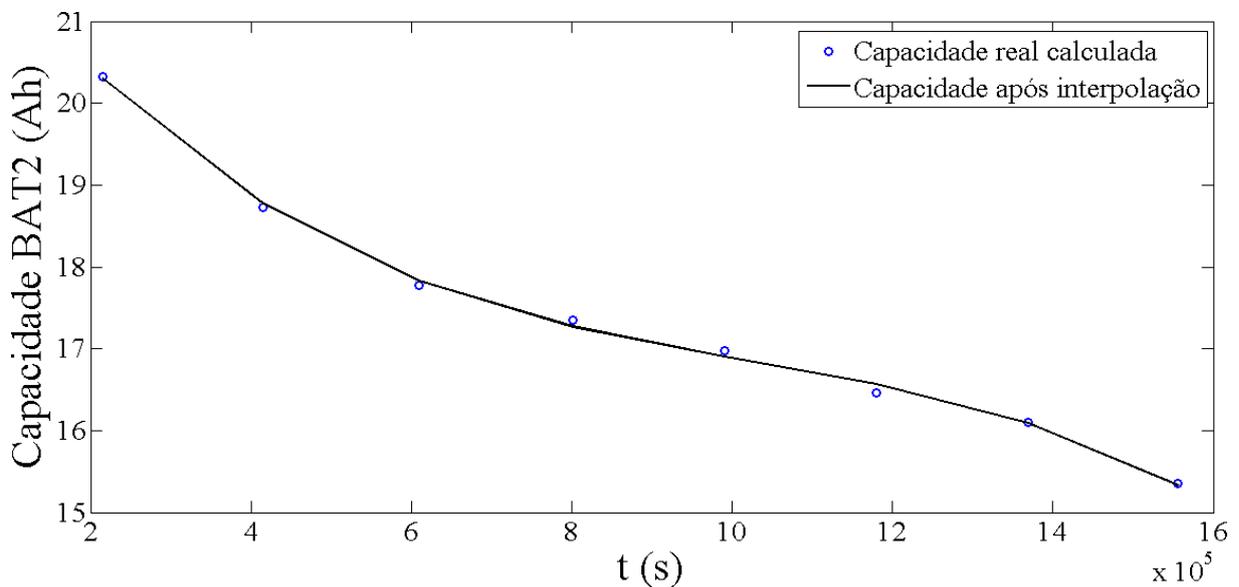


Figura 4.12: Interpolação da curva de capacidade da BAT2

Nas duas baterias, o método de interpolação foi polinomial de grau três, que calcula os coeficientes para um polinômio $p(t)$ de grau 3 que se baseia nos mínimos quadráticos. Os coeficientes de $p(t)$ são potências decrescentes. O polinômio é apresentado na equação (4.1):

$$p(t) = p_1 t^3 + p_2 t^2 + p_3 t + p_4, 2 \times 10^5 s < t < 16 \times 10^5 s, \quad (4.1)$$

na qual p_1, p_2, p_3 e p_4 são os coeficientes do polinômio e t é tempo transcorrido. O próximo passo a ser realizado é a estimação dos parâmetros do modelo de Schiffer.

Estimação dos parâmetros

O estimação de parâmetros está baseada no trabalho de (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005), (ANDERSSON, 2006) e (SCHIFFER et al., 2007). São estimados cinco parâmetros para carga e cinco para descarga para bateria (BAT1 e BAT2) de modo a minimizar:

$$\Gamma_N = \frac{1}{N} \sum_{t_1}^{t_2} [v(t) - \hat{v}(t, \theta_N)]^2. \quad (4.2)$$

$$\hat{\theta}_N = \arg \min \Gamma_N. \quad (4.3)$$

$$\hat{\theta}_N = [\hat{U}_{0c} \hat{g}_c \hat{\rho}_c \hat{M}_c \hat{C}_c \hat{U}_{0d} \hat{g}_d \hat{\rho}_d \hat{M}_d \hat{C}_d], \quad (4.4)$$

$$\theta_N(\hat{i})^I < \theta_N(\hat{i}) < \theta_N(\hat{i})^S, i = 1, 2, \dots, 10, \quad (4.5)$$

em que Γ_N é a função objetivo, $\hat{v}(t, \theta_N(t))$ é uma estimativa de tensão medida nos terminais da bateria calculada a partir de uma estimativa baseada no AG e $\theta_N(\hat{i})^I$ e $\theta_N(\hat{i})^S$ são, respectivamente, os limites inferiores e superiores de $\theta_N(\hat{i})$. Esses limites são baseados nos trabalhos de (ANDERSSON, 2006), (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005) e (SCHIFFER et al., 2007).

Foi determinado um número de 10000 gerações e um limite na mudança do valor da função objetivo, em um passo de simulação, de 10^{-18} no algoritmo genético.

As equações são as mesmas do modelo de Schiffer (equação (2.30) e 2.31). Usa-se:

$$U_{est}^c = \hat{U}_{0c} - \hat{g}_c D_d + \hat{\rho}_c \frac{i}{Q} + \hat{\rho}_c \frac{i}{Q} \hat{M}_c \frac{S_c}{\hat{C}_c - S_c}, i > 0 \quad (4.6)$$

quando a bateria está sendo carregada e

$$U_{est}^d = \hat{U}_{0d} - \hat{g}_d D_d + \hat{\rho}_d \frac{i}{Q} + \hat{\rho}_d \frac{i}{Q} \hat{M}_d \frac{D_d}{\hat{C}_d - D_d}, i \leq 0 \quad (4.7)$$

quando a bateria está sendo descarregada.

A Tabela 4.1 apresenta os limites inferiores e superiores iniciais dos parâmetros a serem estimados. Esses limites são baseados nos trabalhos de (TREMBLAY; DESSAINT, 2009), (BINDNER; CRONIN; LUNDSAGER, 2005) e (ANDERSSON, 2006).

As equações são baseadas em uma célula. Por isso os valores limites da U_d e U_c estão

Tabela 4.1: Parâmetros estimados para modelo de Schiffer

Parâmetros a serem estimados	Limites	
	inferior	superior
\hat{U}_{0c}	2	2,5
\hat{g}_c	0,001	1
$\hat{\rho}_c$	0,001	10
\hat{M}_c	1	50
\hat{C}_c	1	50
\hat{U}_{0d}	2	2,5
\hat{g}_d	0,0001	2
$\hat{\rho}_d$	0,0001	10
\hat{M}_d	0	50
\hat{C}_d	22,98/20,33	22,98/20,33

entre 2 e 2,5V (SCHIFFER et al., 2007). Os valores de C_d tanto para BAT1 quanto para BAT2 são os valores iniciais encontrados no teste de capacidade da seção anterior.

Para estimação e validação da tensão, foram definidos dois intervalos, como apresentado nas Figuras 4.6 e 4.7, respectivamente para BAT1 e BAT2. Para estimação dos parâmetros será utilizado o intervalo que compreende a primeira descarga e carga da bateria após os quatro ciclos iniciais definidos por norma ($t_X < t < t_Y$). A validação será feita a partir do ponto X até o final da simulação ($t > t_X$).

O algoritmo genético foi aplicado no intervalo de estimação para as duas baterias BAT1 e BAT2. Os valores dos 10 parâmetros de cada bateria estão relacionados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores após estimação - BAT1 e BAT2

Parâmetros	Valores BAT1	Valores BAT2
U_{0c}	2,3216 V	2,2095 V
g_c	0,4074 V	0,2844 V
ρ_c	0,4488 ΩAh	0,3215 ΩAh
M_c	4,1921	31,8596
C_c	31,8578	17,2199
U_{0d}	2,1002 V	2,1299 V
g_d	0,2591 V	0,2556 V
ρ_d	0,2461 ΩAh	0,2738 ΩAh
M_d	0,0027	1,8709
C_d	22,98 Ah	20,33 Ah

A curva de tensão do modelo da bateria utilizado e a estimação é apresentado, respectivamente, para BAT1 e BAT2, nas Figuras 4.13 e 4.14.

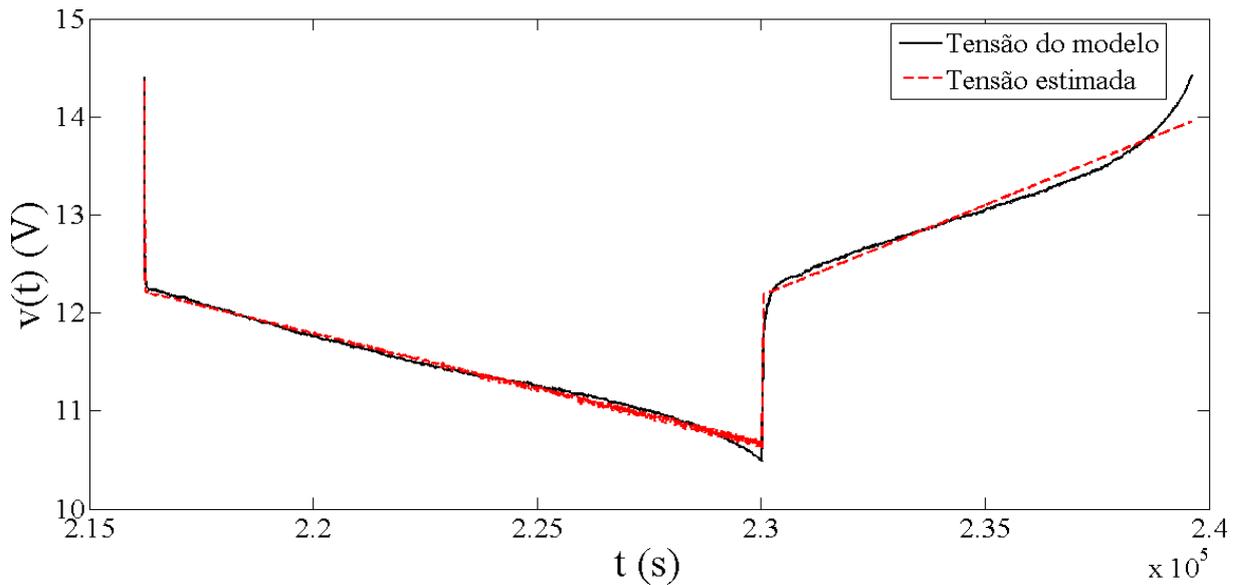


Figura 4.13: Tensão do modelo de bateria chumbo-ácido e tensão estimada com o algoritmo genético para o modelo de Schiffer - BAT1.

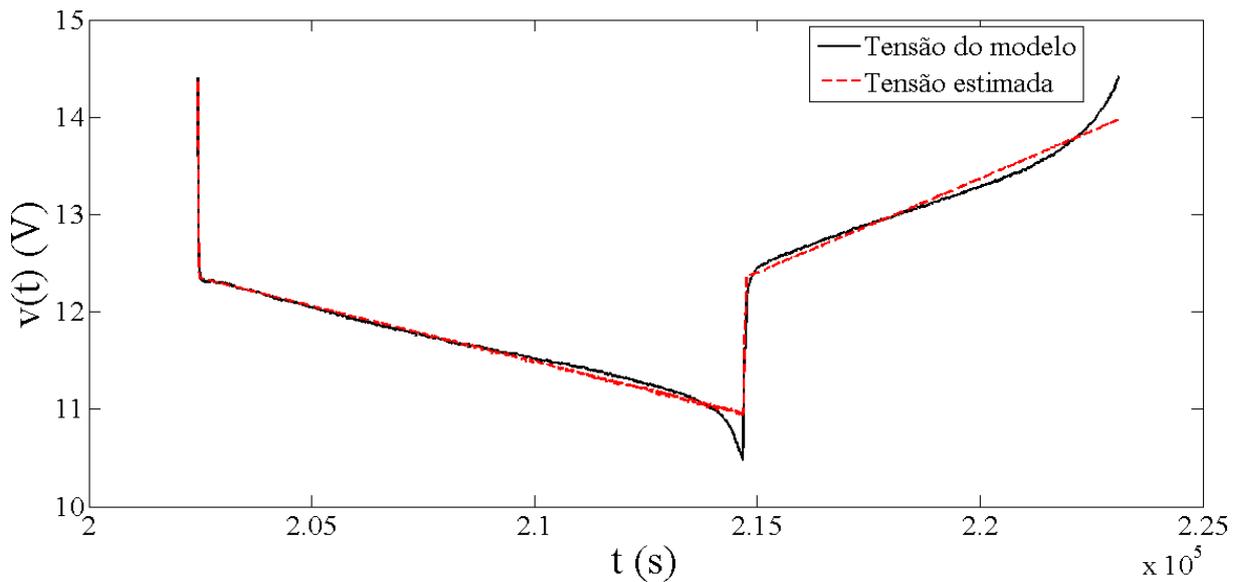


Figura 4.14: Tensão do modelo de bateria chumbo-ácido e tensão estimada com o algoritmo genético para o modelo de Schiffer - BAT2

No momento das 10000 gerações, o erro médio quadrático foi de $0,0001526V^2$ e $0,0001693V^2$ entre a tensão estimada e a tensão do modelo de bateria, respectivamente, para BAT1 e BAT2.

No final da descarga e final da carga, nas Figuras 4.13 e 4.14, os valores da tensão do modelo e da tensão estimada divergem tanto na BAT1 quanto na BAT2. Isto se deve ao fato que as equações de tensão são válidas para um SOC entre 30% e 100%, porém, para acelerar a degradação, o SOC nos testes foi variado de 0% a 100%, para diminuir o tempo de duração do teste (SCHIFFER et al., 2007).

Implementação do modelo de Schiffer

Nesta seção, o intervalo para $t > t_Y$, como apresentado nas figuras 4.6 e 4.7, é usado para a realização dos testes.

O modelo de Schiffer, da equação (2.30) até a equação (2.56), foi implementado para as baterias BAT1 e BAT2.

As figuras 4.15 à 4.17 apresentam a tensão real e simulada, SOC, DOD e as capacidades real e simulada das baterias BAT1 e BAT2.

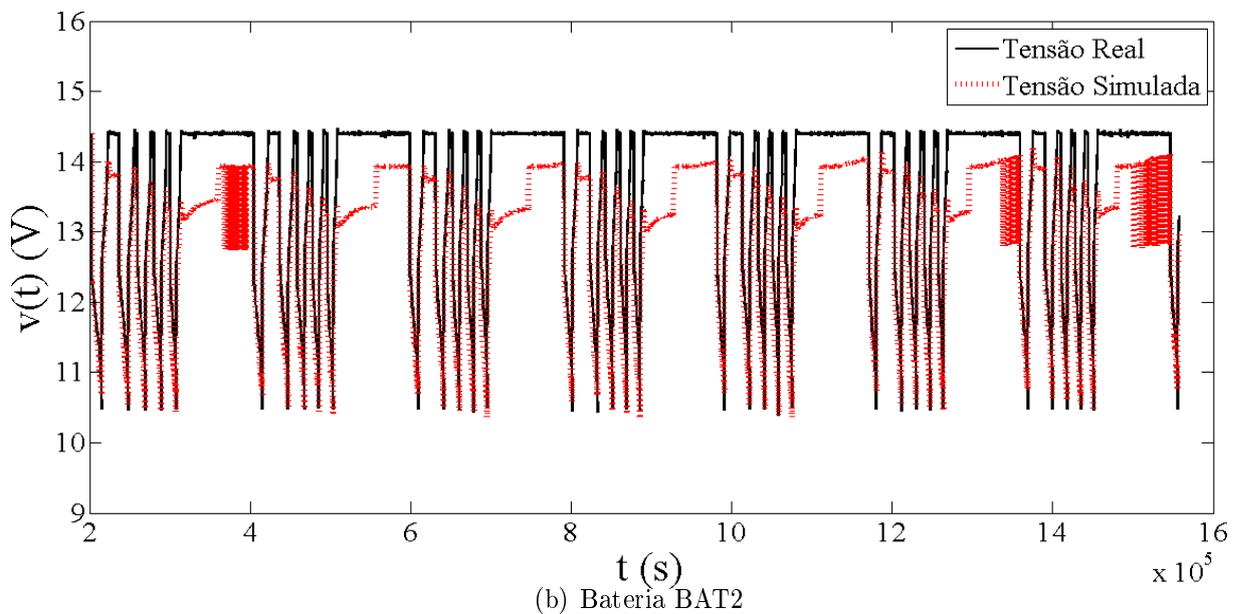
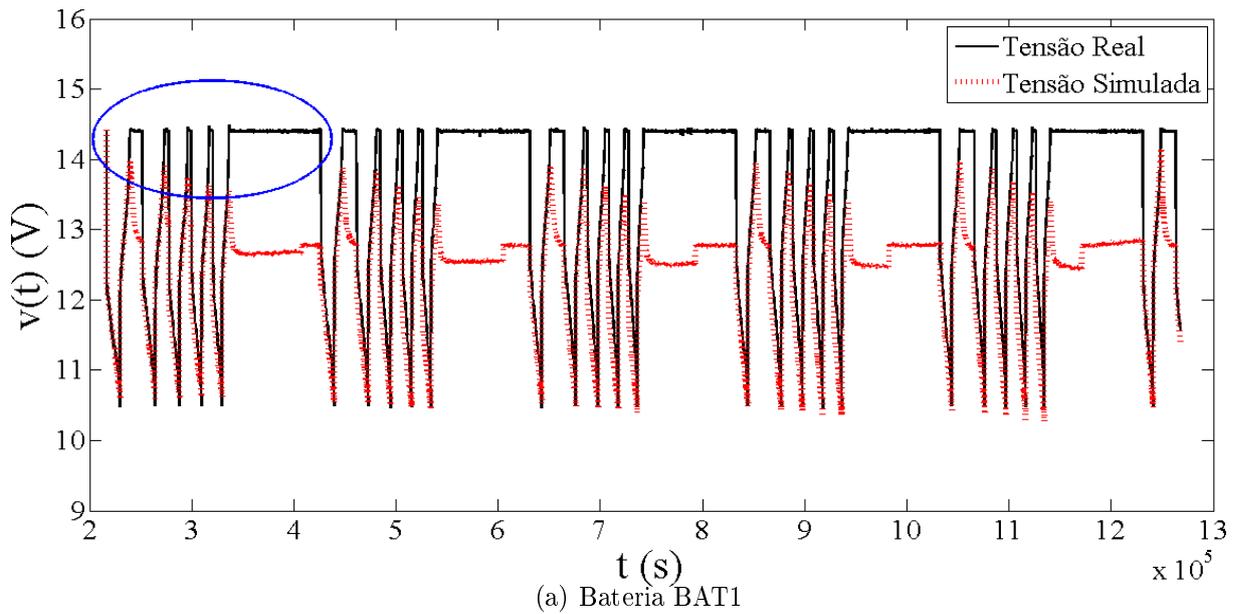
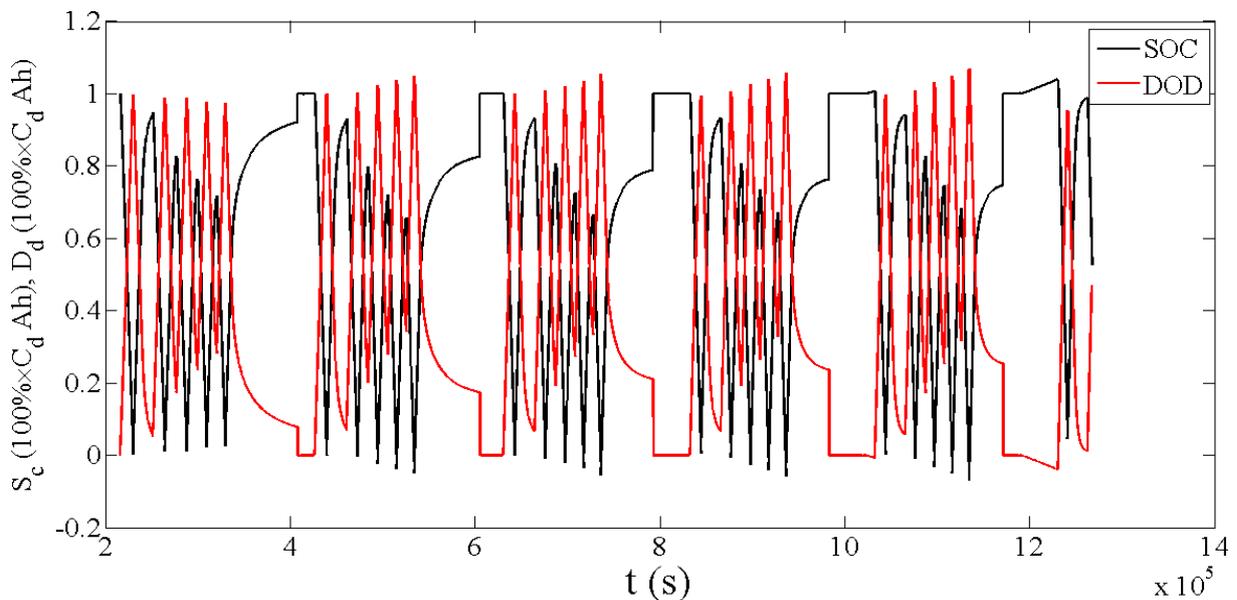


Figura 4.15: Tensão medida nos terminais da bateria e tensão calculada pelo modelo

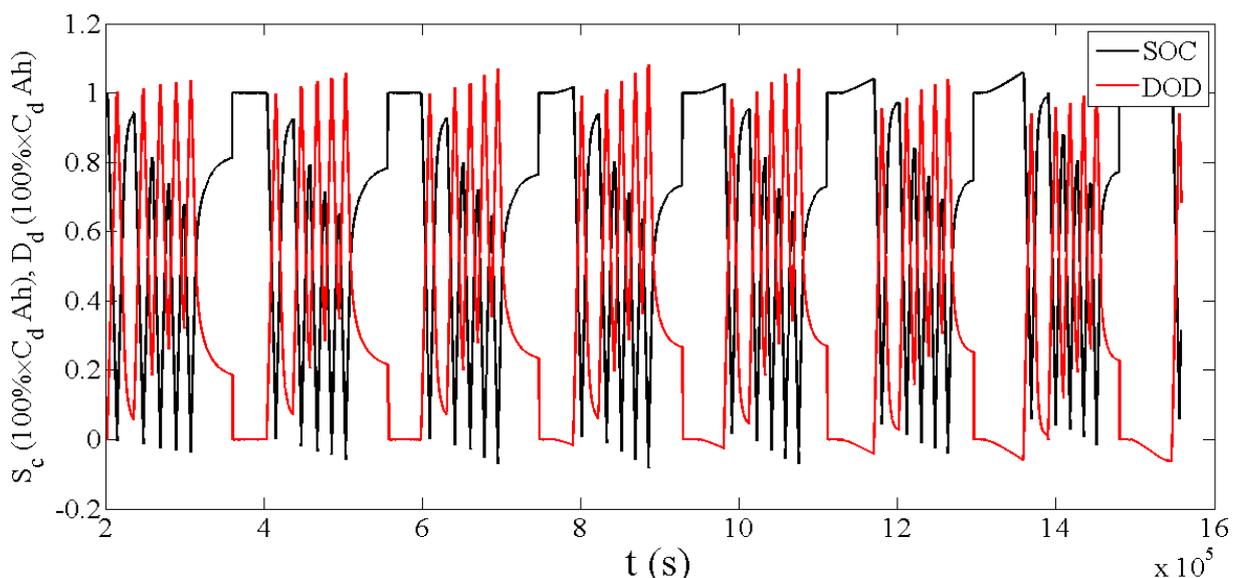
Na Figura 4.15, é apresentada a tensão medida nos terminais da bateria, em vermelho, e a tensão calculada pelo modelo, em preto, para a bateria BAT1 (a) e BAT2(b). Na região

circulada (vale para todos os ciclos de carga e descarga), há uma diferença entre o valor de tensão real e o valor de tensão do modelo. A representação do modelo é válida apenas para valores de corrente de carga ou descarga constante. Na área circulada em azul da figura, é o instante que o PEBCA funciona a tensão constante, fazendo a corrente diminuir até chegar a zero (corrente varia) (TREMBLAY; DESSAINT, 2009).

Na Figura 4.15(b), há uma perturbação, em três momentos, na curva da tensão simulada. Esses eventos ocorrem no momento que a corrente tende a zero. O valor de corrente nesses instantes, obtido através do PEBCA, não são sempre positivos, podendo ser valores negativos também (motivo das várias variações em um pequeno intervalo de tempo).



(a) Bateria BAT1



(b) Bateria BAT2

Figura 4.16: Estado de carga SOC e profundidade de descarga DOD

Na Figura 4.16, é apresentado o SOC, em preto, e o DOD, em vermelho, para a bateria

BAT1(a) e BAT2(b). Há uma descontinuidade da curva, por exemplo para BAT1, nos instantes 407900s e 605100s. Essa descontinuidade acontece devido ao fato que o SOC calculado pela equação (2.34) não leva em consideração a degradação da bateria (apenas a integral da corrente da bateria e da corrente de gaseificação). Portanto, sempre que acontece uma carga completa de 24 horas, a tensão constante, o SOC é considerado 100% e, conseqüentemente, o DOD é considerado 0%.

Ao final da implementação do modelo de Schiffer, a curva de capacidade real (após a interpolação) e a capacidade calculada pelo modelo (usando a equação (2.56)) são apresentadas na Figura 4.17 (a) e (b), respectivamente, para BAT1 e BAT2.

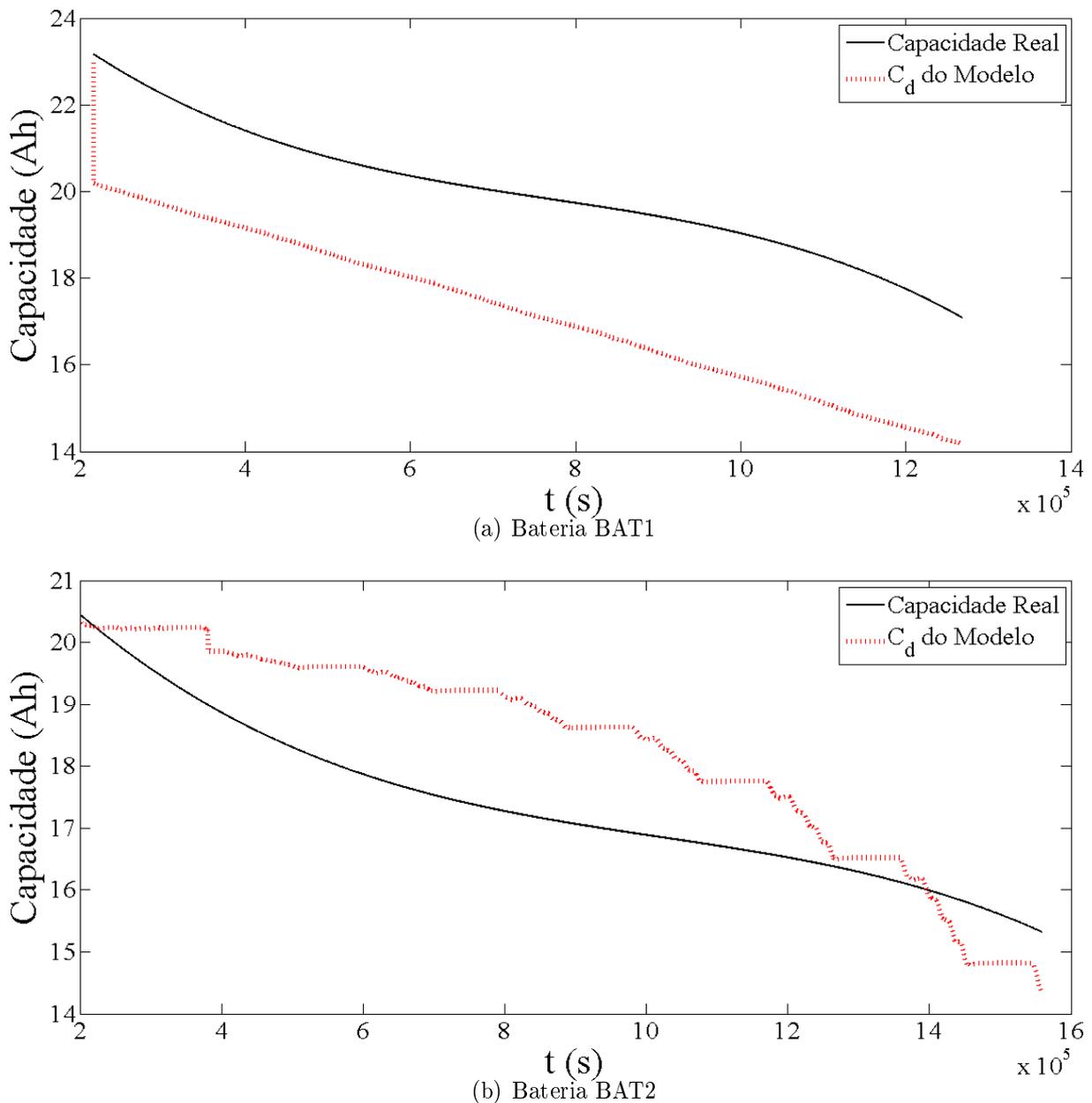


Figura 4.17: Capacidade real da bateria e capacidade prevista pelo modelo

O erro médio quadrático foi de $0,9842V^2$ e $0,6457V^2$ entre a curva de degradação

estimada pelo modelo e a curva de degradação após interpolação, respectivamente, para BAT1 e BAT2.

Estimação de parâmetros da curva de degradação

De acordo com a Figura 4.5, a estimação dos parâmetros da equação (2.56) modificada acontece quando há uma divergência (erro médio quadrático maior que $0,5V^2$) entre os valores reais de uma bateria de um lote de baterias de mesma tensão e capacidade nominais e os calculados pelo modelo.

Assim, são estimados três parâmetros para generalizar a equação (2.56). Foi determinado um número de 1000 gerações e um limite na mudança do valor da função objetivo de 10^{-18} no algoritmo genético. Com essa generalização, há uma expectativa de que os resultados obtidos para essa bateria seja representativo para todas as baterias desse lote.

A equação modificada foi obtida substituindo as equações (2.40) e (2.44) na equação (2.56) e acrescentando os parâmetros adimensionais que serão calculados (α_1 , α_2 e α_3), conforme apresentado a seguir:

$$C_r(t) = C_d(0) - \alpha_1 C_{c,t} \frac{\Delta W(t)}{\Delta W_l} - C_{deg,t} e^{(-\alpha_2 (1 - \frac{Z_W(t)}{1.6Z_{IEC}}))} + \alpha_3. \quad (4.8)$$

A Tabela 4.3 apresenta os limites inferiores e superiores iniciais dos parâmetros, α_1 , α_2 e α_3 , a serem estimados. Os limites inferiores e superiores, respectivamente, -10 e +100, foram escolhidos baseados no valor inicial de c_z que é -5.

Tabela 4.3: Parâmetros estimados para curva de Capacidade da equação (4.8)

Parâmetros	Limites	
	inferior	superior
α_1	-10	100
α_2	-10	100
α_3	-10	100

O critério de parada, na estimação, sempre acontece pelo número de gerações (instante que alcança 1000). Os valores dos três parâmetros para cada bateria BAT1 e BAT2 estão relacionados na Tabela 4.4.

A curva de degradação do modelo da bateria e a estimação com os novos parâmetros para BAT1 e BAT2 são apresentados na Figura 4.18.

No momento das 1000 gerações, o erro médio quadrático foi de $0,05805V^2$ e $0,133V^2$ entre a degradação estimada com os novos parâmetros e a degradação real da bateria, respectivamente, para BAT1 e BAT2.

Tabela 4.4: Valores após estimação - BAT1 e BAT2

Parâmetros	Valores BAT1	Valores BAT2
α_1	59,3291	-1,2756
α_2	-1,4305	-0,2126
α_3	-0,3407	13,9538

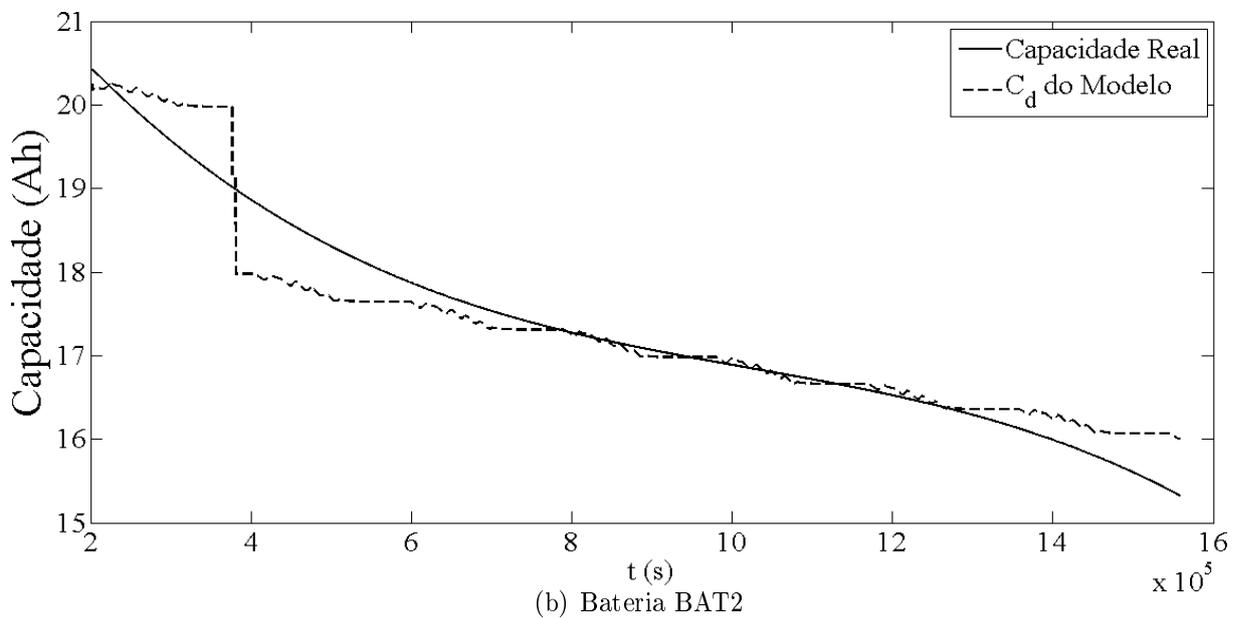
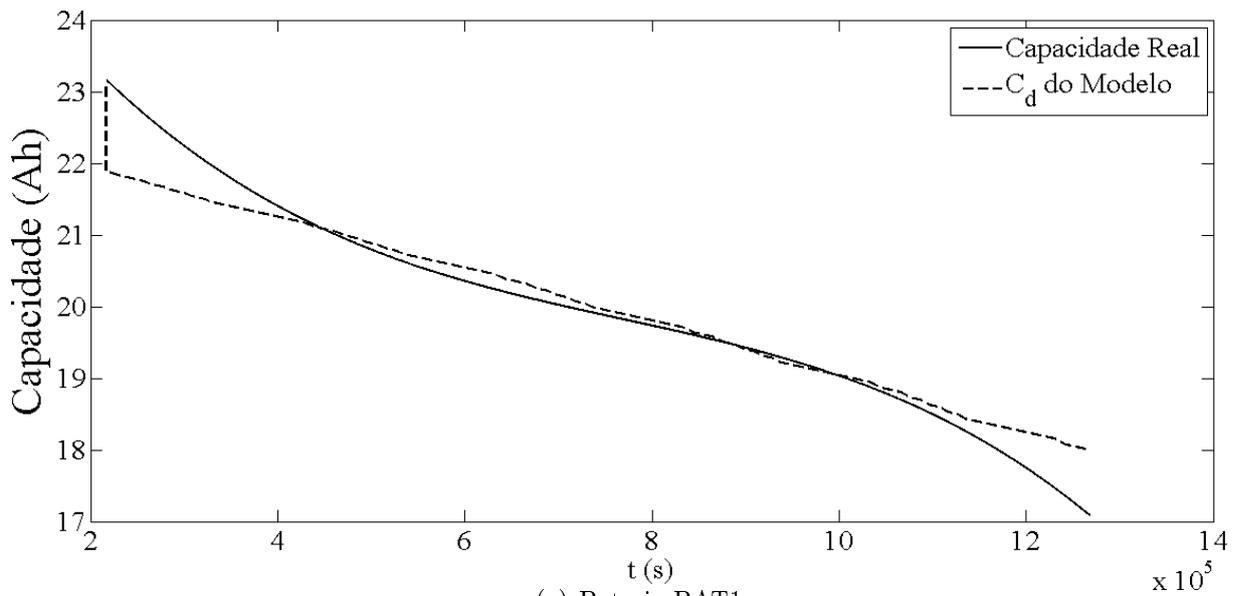


Figura 4.18: Degradação estimada com os novos parâmetros e a degradação real da bateria

4.5 Conclusão

Nessa contribuição, foram realizados testes no laboratório para determinar a curva de degradação de duas baterias: BAT1 e BAT2. Uma parte dessa curva foi utilizada para

teste e outra para validação. Foram estimados 10 parâmetros: 5 na curva de descarga e 5 na curva de carga, usando um algoritmo genético. A curva de degradação obtida com o modelo não representa a curva real de degradação. A equação de degradação foi alterada, acrescentando 3 parâmetros. Com a obtenção desses parâmetros e novamente com aplicação de um algoritmo genético, foi obtida uma nova curva de degradação que representa a degradação real das baterias BAT1 e BAT2. Dessa forma, para se determinar a curva de degradação para um conjunto de baterias de chumbo-ácido que sofreram, até aquele instante, da mesma degradação, faz-se necessário determinar a curva de degradação de uma das baterias e seguir o fluxograma apresentado na Figura 4.5.

Capítulo 5

Considerações Finais

Neste capítulo, são apresentadas as considerações finais do trabalho. Nas seções seguintes, é apresentada uma conclusão do trabalho desenvolvido, são levantadas algumas considerações importantes e apresentadas possíveis atividades para continuação da pesquisa.

5.1 Conclusão

Neste trabalho, foram apresentadas contribuições ao modelo elétrico e ao modelo de vida útil de baterias de chumbo-ácido. Quatro contribuições ao modelo elétrico característico e a quinta, e última, ao modelo de vida útil. Todas as abordagens foram testadas por meio de simulações computacionais e comprovadas por intermédio de experimentos.

Na primeira e segunda contribuições, usando as medições de corrente e tensão durante uma descarga a corrente constante e fazendo uma escolha adequada de três pontos de medição é possível obter uma estimativa dos parâmetros do modelo de Tremblay e Dessaint para baterias de chumbo-ácido. Dependendo em qual perfil de carga e descarga a bateria for submetida (o quanto que seu SOC variará), o terceiro ponto pode ser escolhido no intervalo de $2000s < t_{nom} < 3000s$. A qualidade dessa estimativa é comparável aquela obtida utilizando um método iterativo de otimização não-linear que processa todos os pontos de medição e requer a execução de um ciclo de descarga-carga.

O parâmetro R do modelo de Tremblay e Dessaint não representa a resistência CC. Usando dois termos da equação de descarga deste modelo é possível obter uma estimativa imprecisa da resistência CC da bateria e conseqüentemente uma estimativa imprecisa de quanto de energia ela ainda pode fornecer. O erro máximo entre os valores de resistência calculada pelo método modificado das normas IEC 896-2 e IEC 61951-1 e pela equação do modelo é de 12,7%. Esses resultados ensejam que o modelo deve ser revisado para que expresse com mais precisão a resistência CC.

O valor da constante de tempo do filtro de corrente deve ser estimado para cada

bateria de chumbo-ácido. Um valor fixo da constante de tempo τ não representa uma classe de baterias, pois baterias de mesmo lote sofrem processos de degradação desiguais. Assim, o valor deve ser calculado e/ou estimado para representar melhor o parâmetro e , conseqüentemente, a bateria.

A curva de degradação obtida com o modelo de Schiffer não representa a curva real de degradação. A equação de degradação foi generalizada, acrescentando três parâmetros. Com a obtenção desses parâmetros e novamente com aplicação de um algoritmo genético, foi obtida uma nova curva de degradação que representa a degradação real das baterias BAT1 e BAT2. Dessa forma, para se determinar a curva de degradação para um conjunto de baterias de chumbo-ácido de mesma tensão e capacidade nominais que sofreram, até aquele instante, da mesma degradação, é necessário determinar a curva de degradação de uma das baterias do lote. Os parâmetros encontrados para essa bateria vale para todas as baterias do lote.

Os modelos de Tremblay e Dessaint e Schiffer podem ser utilizados para baterias de chumbo-ácido de diferentes valores nominais de tensão e capacidade. Porém, é necessário considerar a estimação de alguns parâmetros que não eram considerados e a generalização de equações para tornar o modelo mais representativo. O modelo de Tremblay e Dessaint é utilizado para estimar a tensão da bateria com aplicação de diferentes ciclos de carga e descarga, enquanto que o modelo de Schiffer deve ser utilizado quando há a necessidade de estimar o tempo de vida útil de baterias de chumbo-ácido.

5.2 Continuação da pesquisa

Uma lista de possíveis trabalhos futuros, dando continuidade ou utilizando o presente trabalho, é apresentada a seguir:

- Comparar o erro médio quadrático nas estimação das características elétricas obtido por diferentes modelos de baterias de chumbo-ácido (modelo eletroquímico, analítico e análogo);
- Realizar os testes experimentais utilizando a plataforma PEBCA na contribuição da escolha do terceiro ponto da curva de descarga da bateria de chumbo-ácido;
- Calcular a resistência CA das baterias de chumbo-ácido utilizando o modelo de Tremblay e Dessaint;
- Determinar uma nova equação da curva de degradação do modelo de Schiffer que diminua o erro quadrático médio entre a degradação real e calculada pelo modelo;
- Realizar um estudo de sensibilidade para obtenção dos três pontos no Método 3P;

- Determinar um critério de escolha para quantidade de pontos na curva de descarga para validar a escolha do terceiro ponto no método 3P;
- Calcular valores diferentes para dois valores de K no modelo de Tremblay e Dessaint, já que nele é utilizado uma mesma variável K para representar duas dimensões.

Referências Bibliográficas

- ACHAIBOU, N.; HADDADI, M.; MALEK, A. Modeling of lead acid batteries in pc systems. *Energy Procedia*, v. 18, n. 18, p. 538–544, 2012.
- ANDERSSON, A. Simulation model for improved battery lifetime for renewable based energy systems for rural areas. *Denmark*, 2006.
- BINDNER, H.; CRONIN, T.; LUNDSAGER, P. Lifetime modelling of lead acid batteries. *Denmark*, 2005.
- CASACCA, M. A.; SALAMEH, Z. M. Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modeling techniques. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 7, n. 3, p. 442–446, 1992.
- CERAOLO, M. New dynamical models of lead-acid batteries. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1184–1190, 2000.
- CERVONE, A.; FALVO, M. C.; SANTINI, E. A fast and accurate battery model suitable for production profiling in smart grids. *8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MEDPOWER 2012*, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2012.
- CHAGAS, M. W. P. *Novas tecnologias para avaliação de baterias*. Tese (Mestrado Profissionalizante) — IEP/LACTEC, 2007.
- CHAN, H. L.; SUTANTO, D. A new battery model for use with battery energy storage systems and electrical vehicles power systems. *IEEE*, p. 470–475, 2000.
- COOPER, K.; SMITH, M. Electrical test methods for on-line fuel cell ohmic resistance measurement. *Journal of Power Sources*, v. 160, n. 2, p. 1088 – 1095, 2006.
- DAVIS, L. D. *Handbook of genetic algorithms*. Michigan: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- DEPERNET, D.; BA, O.; BERTHON, A. Online impedance spectroscopy of lead acid batteries for storage management of a standalone power plant. *Journal of Power Sources*, v. 219, p. 65 – 74, 2012.
- DURR, M.; CRUDEN, A.; GAIR, S.; MCDONALD, J. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, v. 161, n. 2, p. 1400–1411, 2006.
- FLEISCHER, C.; WAAG, W.; HEYN, H.; SAUER, D. U. On-line adaptive battery impedance parameter and state estimation considering physical principles in reduced order equivalent circuit battery models: Part 1. requirements, critical review of methods and modeling. *Journal of Power Sources*, v. 260, p. 276 – 291, 2014.

- FREITAS, D. C. C.; KETZER, M. B.; LIMA, A. M. N. Parameter optimization of a lead-acid battery model. *5 International Conference on Engineering Optimization - EngOpt 2016*, 2016.
- FREITAS, D. C. C.; LIMA, A. M. N.; MORAIS, M. R. A. Determining lead-acid battery dc resistance by tremblay battery model. *7 International Renewable Energy Congress - IREC 2016 (IEEE)*, 2016.
- FREITAS, D. C. C.; LIMA, A. M. N.; SILVA, H. S.; MORAIS, M. R. A. Otimização da escolha dos pontos de medição usados na estimação de parâmetros de modelos de baterias de chumbo-Ácido. *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*, 2015.
- G., S. M.; M.NIKDEL. Various battery models for various simulation studies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 32, n. 32, p. 477–485, 2014.
- GOLDBERG, D. E. *Genetic algorithm in search, optimization, and machine learning*. EUA: Addison-Wesley, 1989.
- GUASCH, D.; SILVESTRE, S. Dynamic battery model for photovoltaic applications. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 11, p. 193–206, 2003.
- HARTMANN, L. V. *Armazenamento e conversão de energia utilizando inversores fonte de impedância modificados em sistemas fotovoltaicos de iluminação*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2013.
- HOWEY, D.; YUFIT, V.; MITCHESON, P.; OFFER, G.; BRANDON, N. Impedance measurement for advanced battery management systems. *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, v. 27, n. 4, p. 17–20, nov 2013.
- JACKEY, R. A. A simple, effective lead-acid battery modeling process for electrical system component selection. 2007.
- JIRAMOREE, T.; PAISUWANNA, P.; KHOMFOI, S. A multilevel converter charger utilizing superimposed pulse frequency method for prolonging lead-acid battery lifetime. *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on*, p. 768–771, 2011.
- KAISER, R. Development of battery lifetime models for energy storage systems in renewable energy systems res. 2003.
- KETZER, M.; LIMA, A.; OLIVEIRA, A.; JACOBINA, C. Evaluating circuit topologies for battery charge equalization. *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, p. 743–748, 2013.
- KETZER, M. B.; LIMA, A. M. N.; CORREA, M. B. de R.; OLIVEIRA, A. C. *Plataforma para ensaio de bateria de chumbo-ácido - relatório técnico*. Universidade Federal de Campina Grande, 2015. 2015.
- KIM, J. H.; LEE, S. J.; KIM, E. S.; KIM, S. K.; KIM, C. H.; PRIKLER, L. Modeling of battery for ev using emtp/atpdram. *Journal of Electrical Engineering and Technology - JEET*, v. 9, n. 1, p. 98–105, 2014.

LANGELLA, R.; TESTA, A.; VENTRE, C. A new model of lead-acid batteries lifetime in smart grid scenario. *ENERGYCON 2014*, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2014.

LEAO, J. F. A.; HARTMANN, L. V.; CORREA, M.; LIMA, A. M. N. Lead-acid battery modeling and state of charge monitoring. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Twenty-Fifth Annual IEEE*, p. 239–243, 2010.

LIAW, B. Y.; BETHUNE, K. P.; YANG, X. G. Advanced integrated battery testing and simulation. *Journal of Power Sources*, v. 110, n. 2, p. 330–340, 2002.

MITCHELL, M. *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1998.

NBR/INMETRO. *Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (módulo, controlador de carga, inversor e bateria)*. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2011. 2011.

PRAISUWANNA, N.; KHOMFOI, S. A seal lead-acid battery charger for prolonging battery lifetime using superimposed pulse frequency technique. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*, p. 1603–1609, 2013.

RATNAKUMAR, B.; SMART, M.; WHITCANACK, L.; EWELL, R. The impedance characteristics of mars exploration rover li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, v. 159, n. 2, p. 1428 – 1439, 2006.

REZVANIZANIANI, S. M.; LIU, Z.; CHEN, Y.; LEE, J. Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (ev) safety and mobility. *Journal of Power Sources*, v. 256, n. 1, p. 110–122, 2014.

ROSEMBACK, R. H. *Conversor CC-CC bidirecional buck-boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico*. Tese (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.

ROSS, J. N.; MARKVART, T.; HE, W. Modelling battery charge regulation for stand-alone photovoltaic system. *Solar Energy*, v. 69, n. 3, p. 181–190, 2000.

SCHIFFER, J.; SAUER, D. U.; BINDNER, H.; CRONIN, T.; LUNDSAGER, P.; KAISER, R. Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems. *Journal of Power Sources*, v. 168, n. 1, p. 66 – 78, 2007.

SCHNEIDER, K. K. *Modelos analíticos na predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis*. Tese (Mestrado) — Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - Unijuí, 2011.

SCHWEIGER, H.; OBEIDI, O.; KOMESKER, O.; RASCHKE, A.; SCHIEMANN, M.; ZEHNER, C.; GEHNEN, M.; KELLER, M.; BIRKE, P. Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells. *Sensors 2010*, v. 10, p. 5604–5625, 2010.

SEAMAN, A.; DAO, T.-S.; MCPHEE, J. A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation. *Journal of Power Sources*, v. 256, n. 1, p. 410–423, 2014.

SHEPHERD, C. M. Theoretical design of primary and secondary cells - part 3 - battery discharge equation - technical report. *Washington D.C.*, 1963.

SOUSA, J. R. de B. *Modelagem e supervisão de bancos de baterias em sistemas de múltiplas fontes de energia utilizando redes de petri*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2008.

TREMBLAY, O.; DESSAINT, L. A. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World Electric Vehicle Journal*, 2009.

TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A.; DEKKICHE, A.-I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, p. 284–289, 2007.

WIJEWARDANA, S. New dynamic battery model for hybrid vehicles. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 4, n. 4, p. 622–631, 2014.

ZHANG, H.; LU, R.; ZHU, C.; ZHAO, Y. On-line measurement of internal resistance of lithium ion battery for ev and its application research. *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, v. 7, n. 4, p. 301–310, 2014.