



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

---

**RELATÓRIO DE PROJETO DE  
CONCLUSÃO DE CURSO**

**Título: Estudo de modelagem de baterias de Chumbo – Ácido.**  
**Aluno: Joab Flavio Araujo Leão**  
**Matricula: 20411252**  
**Orientador: Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa**

Agradeço a toda a equipe do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM) que estiveram envolvidos na realização deste trabalho de pesquisa.

## Sumário

Lista de Siglas .....	06
1. Considerações Iniciais .....	07
2. Modelagem de baterias de Chumbo-ácido .....	11
2.1 Modelo dinâmicos de baterias de chumbo- ácido .....	12
2.2 Modelo da bateria por aproximação de quarta ordem .....	12
2.3 Modelo da bateria por aproximação de terceira ordem com ramo de perdas .....	12
2.4 Modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem .....	14
2.5 Modelo para cargas e descargas de curta e longa duração .....	15
2.6 Modelo para carga e descarga de curta duração .....	17
2.7 Síntese dos modelos de bateria de Chumbo-ácido .....	19
3. Determinação das Constantes dos Modelos de Bateria de Chumbo-Ácido.....	20
3.1 Determinação dos parâmetros do modelo por aproximação de terceira ordem com ramo de perdas .....	20
3.1.1 Determinação das constantes do modelo por pontos de medição .....	21
3.1.1.1 Modelo de descarga da bateria .....	21
3.1.1.2 Modelo de carga da bateria .....	24
3.1.2 Determinação das constantes do modelo de descarga por mínimos quadrados ...	27
3.1.3 Determinação das constantes do modelo por mínimos quadrados a partir do ensaio a pulsos de corrente .....	30
3.2 Determinação dos parâmetros do modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem .....	33
3.3 Determinação dos parâmetros do modelo de cargas e descargas de curta e longa duração .....	33
3.4 Síntese da determinação dos parâmetros .....	34
4. Método de Determinação do Estado de Carga (SOC) para Baterias de Chumbo-Ácido .....	35
4.1 Estimação do SOC pela contagem de Ah .....	35
4.2 Estimação do SOC pela tensão de circuito aberto da bateria .....	36
4.3 Estimação do SOC por rede neural artificial (RNA) .....	37
4.3.1 Construção da rede .....	38
4.3.2 Treinamento da RNA .....	39

4.3.3 Modelo da RNA para estimação do SOC da bateria de Chumbo-ácido .....	39
4.3.3.1 Interpolação dos dados de temperatura .....	40
4.3.3.2 Ajuste de curvas para diferentes correntes de descarga .....	42
4.3.3.3 Formação da RNA .....	43
4.4 Síntese dos métodos de estimação do SOC .....	44
4.5 Comparação de desempenho dos métodos de estimação do SOC .....	45
4.6 Considerações finais .....	48
5. Simulação dos Modelos de Bateria de Chumbo-Ácido .....	49
5.1 Estrutura dos ensaios de carga e descarga da bateria .....	49
5.2 Simulações do modelo de baterias por aproximação de terceira ordem .....	50
5.3 Simulações do modelo de baterias para cargas e descargas de curta e longa duração	54
5.4 Simulações do modelo de baterias melhorado a partir da aproximação de quarta ordem .....	56
5.5 Implementação do modelo de baterias em <i>Simulink</i> <sup>®</sup> .....	59
5.6 Considerações finais .....	61
6. Conclusão .....	64
7. Referências Bibliográficas .....	65
8. Anexos .....	67
Anexo I .....	68
9. Apêndices .....	72
Apêndice I .....	73
Apêndice II .....	75
Apêndice III .....	76
Apêndice IV .....	77
Apêndice V .....	79
Apêndice VI .....	81
Apêndice VII .....	83
Apêndice VIII .....	85
Apêndice IX .....	87
Apêndice X .....	89

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Histórico do desenvolvimento das baterias .....	07
Figura 1.2 – Componentes da bateria de Chumbo-ácido .....	09
Figura 2.1 – Modelo Global de baterias .....	12
Figura 2.2 – Modelo da bateria por aproximação de quarta ordem .....	12
Figura 2.3 – Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas .....	13
Figura 2.4 – Modelo de descarga da bateria .....	13
Figura 2.5 – Modelo da bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem .....	14
Figura 2.6 – Modelo para descargas de curta duração .....	15
Figura 2.7 – Modelo para cargas e descargas de longa duração .....	16
Figura 2.8 – Modelo para cargas e descargas de curta duração .....	17
Figura 3.1 – Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas .....	21
Figura 3.2 – Curva de descarga para um ensaio a descarga completa .....	22
Figura 3.3 – Comportamento de $R_2$ no tempo .....	25
Figura 3.4 – Ramo de reação parasitária .....	26
Figura 3.5 – Corrente parasita quando a bateria está no estado completamente carregada ( $SOC >= 1$ ), $I_p = I_b \rightarrow I_m = 0$ .....	27
Figura 3.6 – Ensaio de descarga a pulsos de corrente .....	30
Figura 3.7 – Ensaio de carga a pulsos de corrente .....	31
Figura 3.8 – Modelo da bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem .....	33
Figura 3.9 – Modelo para cargas e descargas de longa duração .....	34
Figura 4.1 – Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas .....	37
Figura 4.2 – Estrutura da rede neural artificial .....	39
Figura 4.3 – Tensão terminal para ensaios de descarga a corrente constante .....	41
Figura 4.4 – Resultado do ajuste de curva .....	42
Figura 4.5 – Estimativa do SOC por RNA .....	44
Figura 4.6 – Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado no LEIAM .....	46
Figura 4.7 – Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado na MOURA ( $I_b = 1.80 A$ ) .....	47
Figura 4.8 – Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado na MOURA ( $I_b = 1.47 A$ ) .....	47
Figura 4.9 – Estimativa do SOC a partir de ensaios realizados no LEIAM com pulsos de corrente .....	48

Figura 5.1 – Estrutura de ensaio de carga e descarga das baterias – LEIAM .....	50
Figura 5.2 – Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas .....	51
Figura 5.3 – Resultados de simulação para o período de descarga .....	52
Figura 5.4 – Resultados de simulação para o período de carga .....	53
Figura 5.5 – Resultados de simulação para o período de descarga .....	53
Figura 5.6 – Modelo da bateria de Chumbo-ácido .....	54
Figura 5.7 – Resultados de simulação para o período de descarga .....	55
Figura 5.8 – Resultados de simulação para o período de carga .....	56
Figura 5.9 – Resultados de simulação para o período de descarga .....	56
Figura 5.10 – Modelo da bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem .....	57
Figura 5.11 – Resultados de simulação para o período de descarga .....	58
Figura 5.12 – Resultados de simulação para o período de carga .....	58
Figura 5.13 – Resultados de simulação para o período de descarga .....	59
Figura 5.14 – Modelo de bateria implementado em Simulink® .....	60
Figura 5.15 – Simulações para o período de descarga .....	61
Figura 5.16 – Simulações para o período de carga .....	62
Figura 5.17 – Simulações para o período de descarga .....	62

## Lista de Quadros e Tabelas

Quadro 2.1 – Síntese da modelagem de baterias de Chumbo-ácido .....	19
Tabela 4.1 – Descrição do procedimento de descarga .....	40
Tabela 4.2 – Balanço dos métodos de estimação do SOC .....	45
Tabela 5.1 – Parâmetros determinados para o modelo de bateria por aproximação de terceira ordem .....	51
Tabela 5.2 – Parâmetros determinados para o modelo de bateria para cargas e descargas de longa duração .....	54
Tabela 5.3 – Balanço dos modelos aplicados a baterias de Chumbo-ácido com capacidade de 150 Ah .....	63

## Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ah	Ampère-hora
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
DOC	Depth of Charge
LEIAM	Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de
Máquinas	
NBR	Norma Brasileira
RNA	Redes Neurais Artificiais
SOC	State of Charge
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

# 1. Considerações Iniciais

Baterias são conjuntos de acumuladores elétricos recarregáveis, interligados convenientemente, construídos e utilizados para receber, armazenar e liberar energia elétrica por meio de reações químicas, quando das baterias de chumbo ácido esta reação envolve chumbo e ácido sulfúrico (ABNT, 1987).

Hoje, há vários tipos de baterias disponíveis no mercado cujas composições químicas variam de acordo com as aplicações.

## 1.1 Evolução das baterias

O primeiro acumulador elétrico foi desenvolvido em 1800 pelo italiano Alessandro Volta, que criou a pilha não recarregável. Esta importante descoberta deu início a uma série de descobertas e estudos que desenvolveram as baterias atuais.

Em 1836 o inglês Frederic Daniell inventou a pilha de Daniell. Em 1859 o francês Gaston Plantê desenvolveu a pilha ácida de chumbo. Em 1899 o sueco Waldmar Junger inventou a bateria recarregável níquel – cádmio.

Na primeira metade do século XX, os grandes destaques no desenvolvimento das baterias foram o desenvolvimento das baterias aplicadas a ignição de automóveis (1912), que mais tarde tornou-se responsável pelo gerenciamento eletrônico do veículo e a descoberta da pilha em pastilha pelos alemães Schlecht e Ackermann (1932).

Na segunda metade do século XX, foi desenvolvida a popular bateria alcalina, pelo americano Lewis Urry em 1960, e com o desenvolvimento da indústria de bens duráveis, as baterias ganharam grande ênfase comercial. Estima-se que entre os anos de 1998 e 1999, a produção de baterias, passou a ter abrangência mundial, onde os Estados Unidos respondem por 40%, a Europa 30% e o Japão 12,5%.

Nos últimos anos, o desenvolvimento dos mecanismos de controle do estado de carga e descarga da bateria, recarga, bem como uma razoável vida útil, permitiram o aparecimento de inúmeros aparelhos eletrônicos portáteis (celulares, MP3, MP4, câmeras digitais, computadores), que despontam atualmente como um mercado altamente rentável e em expansão. Assim como, as



baterias têm sido largamente utilizadas em novos sistemas de conversão de energia elétrica a partir de diferentes fontes energéticas (solar, eólica).

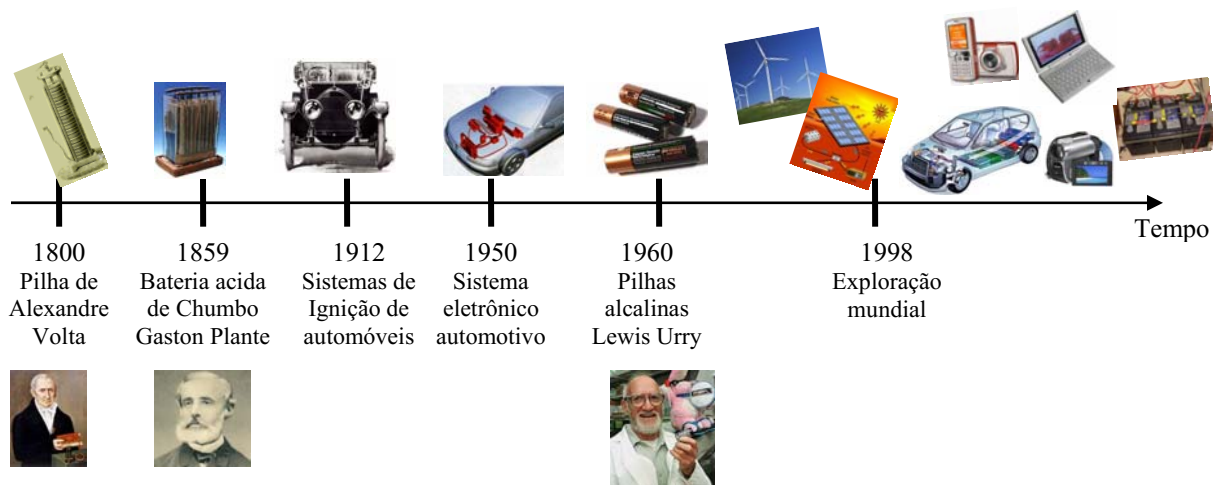


Figura 1.1. Histórico do desenvolvimento das baterias.

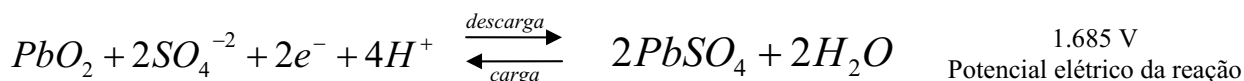
## 1.2 As baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são acumuladores elétricos recarregáveis cuja composição básica é essencialmente, chumbo, ácido sulfúrico e materiais plásticos. O chumbo está presente na forma de chumbo metálico, ligas de chumbo, dióxido de chumbo e sulfato de chumbo. O ácido sulfúrico se encontra na forma de solução aquosa com concentrações variando de 27% a 37% em volume. O funcionamento da bateria se baseia na seguinte reação:

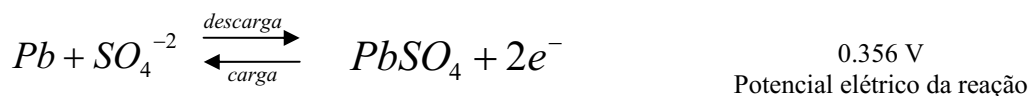
Reação total



Reação no eletrodo positivo



Reação no eletrodo negativo



Sendo assim, na bateria existe um ânodo de chumbo e um cátodo de dióxido de chumbo. Durante a descarga tanto o ânodo quanto o cátodo são convertidos em sulfato de chumbo. No

processo de recarga o sulfato de chumbo é convertido em chumbo e dióxido de chumbo, regenerando o ânodo e o cátodo, respectivamente.

O dióxido de chumbo ( $PbO_2$ ) é uma substância que possui grande tendência de receber elétrons, enquanto que o chumbo metálico ( $Pb$ ) tem uma grande tendência de doar elétrons, esse comportamento é chamado diferença de potencial. O meio utilizado para transferência de elétrons no caso das baterias automotivas é a solução de ácido sulfúrico, devido a boa estabilidade térmica, alta condutividade iônica, baixo nível de impurezas e baixo custo.

### 1.3 Componentes das baterias a chumbo-ácido

Os componentes básicos de uma bateria de chumbo-ácido são:

- Placas positivas e negativas: São grades produzidas com uma liga onde são aplicadas uma massa de  $PbO$  (óxido de chumbo) adicionada de outras substâncias que responderão por determinadas reações. Estão diferenciadas em placas positivas e negativas e são responsáveis pelo acúmulo e condução da corrente elétrica.
- Separadores: Construídos em polietileno, são envelopes que evitam o contato direto entre as placas positivas e negativas.
- Caixas: Servem para condicionamento dos elementos da solução eletrolítica.
- Conectores: Servem para a interligação dos elementos da bateria para formação do circuito.
- Terminais: Pólos positivos e negativos da bateria.
- Solução: Composta por 35% de ácido sulfúrico e 65% de água destilada. Essa solução é indispensável às reações químicas que poderão ocorrer.

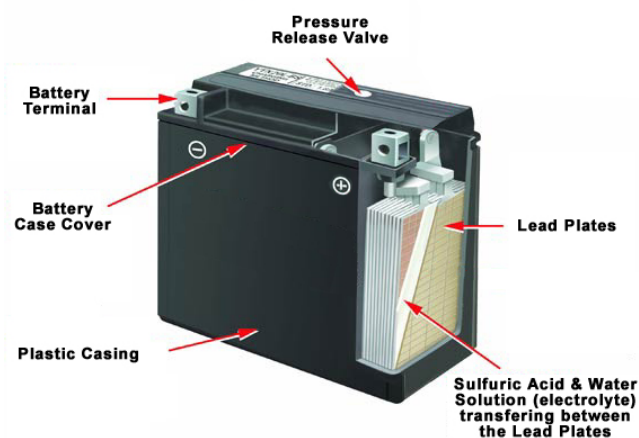


Figura 1.2. Componentes da bateria a chumbo ácido.

#### 1.4 Cuidados e inconvenientes

Conforme exposto, as baterias de modo geral, apresentam em sua composição metais pesados. Os metais pesados apresentam forte potencial de agressão ao meio ambiente, quando expelidos livremente contaminam o solo, lençóis freáticos e em contato com o homem causa sérios problemas de saúde, tais como câncer, má formação de fetos. Para resguardar a saúde pública face a utilização de baterias, a resolução do CONAMA nº 257/99, regulamente critérios para o transporte, armazenamento e destinação das baterias usadas (Anexo I).

O processo de reciclagem de bateria é dividido em trituração da sucata de bateria com separação do plástico; reciclagem propriamente dita deste plástico e recuperação de grelhas de chumbo ligado. O chumbo segue o processo de: separação, fundição, refino, lingotamento até a fabricação de novas baterias. O plástico é recuperado e reutilizado na produção de caixas e tampa de novas baterias. A solução ácida é estocada e neutralizada (mistura de cal para iniciar processo de destilação), filtrado para recuperação dos óxidos e a solução retorna para reutilização.

No senso prático, a reciclagem de um metal deve considerar: a quantidade e a pureza do material recuperado; os mercados para o reciclado; o valor unitário do metal; os custos de coleta, entrepostagem e transporte; a quantidade, a periculosidade e os custos de tratamento e disposição dos resíduos do reprocessamento; custo final da operação como um todo.

No programa de coleta, todos os estabelecimentos que comercializam baterias automotivas são obrigados a receber as baterias usadas de qualquer marca, preservar a solução ácida (não jogando em esgotos, nem adicionando água). Cuidar para que o manuseio seja efetuado de forma adequada, evitando o tombamento das baterias em qualquer situação de armazenagem ou transporte para que não haja vazamento da solução ácida. Assim, o inconveniente na utilização de baterias está associado a obrigatoriedade de recuperação e reciclagem das baterias usadas, este processo inclui ônus financeiros (custos de reciclagem), bem como a necessidade constante de programas de conscientização da indústria, vendedores e população em geral.

## 2. Modelagem de Baterias de Chumbo-Ácido

A utilização comercial de baterias de chumbo ácido tem sido cada vez mais significativa em diversas aplicações tais como: armazenamento de energia elétrica proveniente da conversão energia solar em elétrica, automóveis, aparelhos portáteis. Esta aceitação das baterias pelo mercado consumidor tem motivado estudos no sentido de conceber um modelo que permita estimar com precisão o comportamento da bateria (estimar o tempo de carga, tempo de descarga em determinadas condições de temperatura, corrente), e o estado de carga da bateria.

Os modelos de baterias propostos na literatura tentam, em sua maioria, modelar a tensão terminal da bateria considerando as quedas de tensões internas associadas a elementos resistivos não lineares, bem como a tensão interna que representaria uma bateria ideal. Estes modelos não lineares assumem que os elementos resistivos e a tensão interna são funções da temperatura e do estado de carga da bateria.

Entre estes modelos destacam-se os modelos baseados numa fonte de tensão DC em série com blocos RC (resistor-capacitor) – paralelos – ligados em cascata. A quantidade elevada de blocos RC do modelo propicia precisão, todavia proporciona uma complexidade significativa na determinação das constantes do modelo.

Um modelo complexo e bastante referenciado na literatura é modelo por aproximação de quarta ordem proposto no início da década de 90 por Giglioli [1]. Neste modelo as magnitudes dos elementos resistivos e capacitivos e da fonte de tensão, dependem das características de funcionamento da bateria, tais como: estado de carga, temperatura da bateria, corrente de carga e descarga e constantes empíricas e determinadas a partir de ensaios.

Este modelo por aproximação de quarta ordem fora utilizado como base em diversos outros trabalhos [2]-[5]. Uma inovação introduzida foi à adição de um ramo não-linear representando as perdas durante o período de carga da bateria [3]-[4]. Neste modelo o ramo de perdas é ligado em paralelo ao modelo tradicional e terá efeito notável quando a bateria está submetida ao período de carga com estado de carga elevado.

## 2.1 Modelo dinâmico de baterias de Chumbo-ácido

O modelo dinâmico global de baterias considerando  $n$  blocos RC – paralelo, cujos elementos de circuitos são não lineares é representado na figura 2.1, neste modelo a tensão terminal no ciclo de carga ou descarga dependerá das condições de funcionamento da bateria.

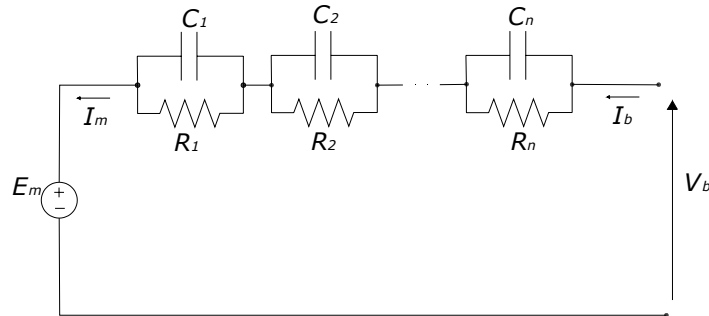


Figura 2.1. Modelo Global de baterias.

## 2.2 Modelo da bateria por aproximação de quarta ordem

O modelo dinâmico pode ser aproximado por modelos de diversas ordens, um modelo de aproximação de quarta ordem [1] é verificado na figura 2.2. Este modelo fornece uma boa representação do comportamento dinâmico associado ao estado de carga, entretanto a elevada quantidade de parâmetros requeridos bem como complexidade do modelo são inconvenientes.

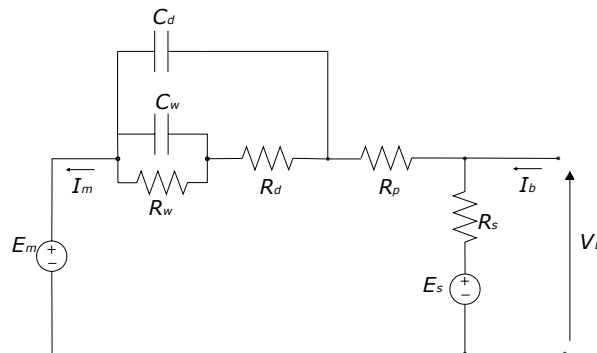


Figura 2.2. Modelo da bateria por aproximação de quarta ordem.

## 2.3 Modelo da bateria por aproximação de terceira ordem com ramo de perdas

Em particular, uma boa interpolação dos resultados experimentais é obtida ao fazer o  $n$ -ésimo bloco RC-paralelo sendo  $C_n = 0$  e  $R_n = f(SOC)$ , o qual tenderá a infinito quando a bateria tender ao estado completamente carregado (SOC=1). O modelo da bateria de terceira ordem, verificado na figura 2.3, foi proposto em [3]-[4]. O ramo parasita é inserido paralelamente ao modelo global da bateria. Esta reação parasita é de caráter reversível, pois se origina da energia absorvida ao fim do processo de carga.

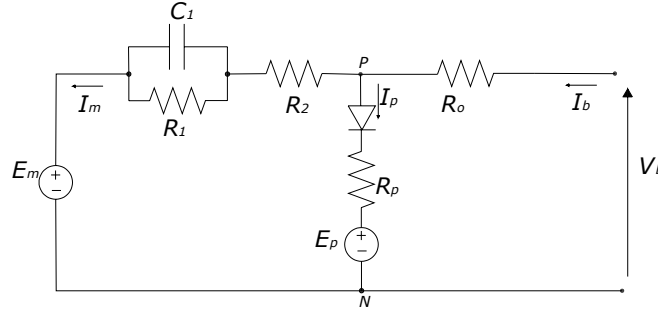


Figura 2.3. Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas.

Para o período de descarga a resistência  $R_2$  e o ramo parasita não ofereceram barreiras à retirada de carga da bateria, assim o modelo de descarga, figura 2.4, é reduzido apresentando alguns elementos de circuito, também chamado de modelo equivalente de Thevenin.

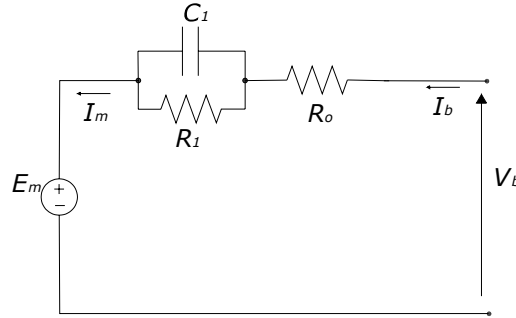


Figura 2.4. Modelo de descarga da bateria.

Os elementos são escritos como sendo:

$$R_0 = R_{00} [1 + A(1 - SOC)] \quad (2.1)$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (2.2)$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad (2.3)$$

$$E_m = E_{m0} - k_e (273 + \theta)(1 - SOC) \quad (2.4)$$

$$R_2 = R_{21} \frac{e^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1 + e^{\frac{A_{22} I_m}{I^*}}} \quad (2.5)$$

$$I_p = V_{PN} G_{po} e^{\left[ \frac{V_{PN}}{V_{po} + A_p \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right)} \right]} \quad (2.5)$$

Sendo:

–  $R_{00}, R_{10}, E_{m0}, k_e, R_{21}, A_{22}, A_{21}, I^*, V_{po}, A_p, \theta_f, G_{po}, \tau_1$  constantes a serem determinadas a partir de ensaios de carga e descarga.

– SOC é o estado de carga, DOC é a profundidade de carga.

- $\theta$  é a temperatura da bateria em °C
- $I_m$  corrente no ramo interno quando do estado de carga.

#### 2.4 Modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem

Neste modelo proposto em [2] e verificado na figura 2.5, o modelo da bateria de quarta ordem é simplificado, mantendo as características não-lineares e a dependência do estado de carga. Todos os elementos de circuito são função do estado de carga e da tensão de circuito aberto<sup>1</sup>.

- A resistência de descarga  $R_p$  é função da tensão de circuito aberto, e representa a resistência que cruza os terminais da tensão interna, devido à eletrólise aquosa em tensão elevada.
- As resistências de carga e descarga ( $R_c$  e  $R_d$ ) são resistências associadas com a resistência dos eletrólitos, das placas e do fluido. Essas resistências podem ser diferentes.
- As resistências de sobrecarga e sobredescarga ( $R_{co}$  e  $R_{do}$ ), quando o estado de carga é próximo a 100%, a resistência será incrementada significativamente devido à difusão do eletrólito.
- Capacidade da bateria ( $C_b$ ), a bateria entrega ou armazena energia comportando-se como um capacitor. Entretanto, é modelado como uma fonte de tensão  $V_{cb}$  que é função do estado de carga.

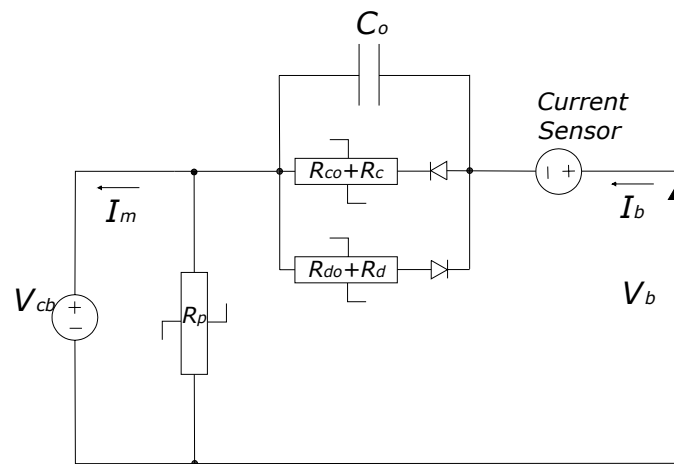


Figura 2.5. Modelo da bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem.

Estes parâmetros são modelados de acordo com modelo proposto em [6], sendo:

$$BE = Ke^{(wf(V_m - V_{co}))^g} \quad (2.6)$$

<sup>1</sup>Entende-se por tensão de circuito aberto a tensão terminal da bateria quando a corrente de carga ou descarga é nula e a bateria está em descanso de sorte que a tensão terminal é assumida idêntica a tensão interna da bateria.

$BE$  representa o elemento a ser modelado;  $K$  é ganho multiplicador;  $w_f$  é fator de multiplicação;  $V_m$  é o nível médio de tensão;  $ff$  fator de multiplicação.

O ganho e fatores de multiplicação são obtidos, de acordo com o artigo de origem, a partir de ensaios de carga e descarga e dados de manufatura. A compensação dos efeitos térmicos é realizada a partir da multiplicação da amplitude dos elementos de circuito pelo coeficiente térmico modelado com exponenciais.

$$TC = \frac{R}{R_{ref}} e^{\frac{T_{ref}-T}{T_{ref}}} \quad (2.7)$$

$TC$  compensação da temperatura;  $T$  temperatura do ambiente;  $T_{ref}$  temperatura de referência;  $R$  resistência a temperatura  $T$  e  $R_{ref}$  resistência a temperatura  $T_{ref}$ .

## 2.5 Modelos para cargas e descargas de curta e longa duração

Modelo da bateria proposto em [5], assume que em descargas de curta duração o modelo equivalente da bateria é representado pelo equivalente de Thevenin, figura 2.6, cujos parâmetros representam a resistência de polarização  $R_p$ , resistência de sobredescarga  $R_o$  associada a perdas na transferência da carga, Capacitância de sobretensão  $C_o$  e o potencial eletroquímico de circuito aberto  $E_p$ .

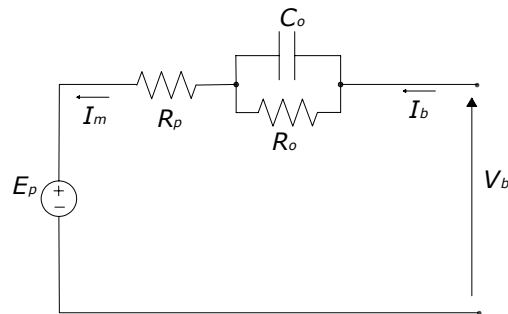


Figura 2.6. Modelo para descargas de curta duração

Neste modelo a descarga é assumida a temperatura constante, o estado de carga inicial próximo a 100%, e os parâmetros podem ser obtidos a partir de ensaios de descargas de curta duração<sup>2</sup>. O decréscimo inicial da tensão terminal é assumido pela resistência de polarização, o tempo de estabilização após a descarga é associado à constante de tempo  $\tau = R_o C_o$ . A resposta dinâmica ao degrau de corrente, típica da bateria de chumbo-ácido pode ser descrita pela equação 2.8.

<sup>2</sup>As descargas e cargas de curta duração são associadas a ensaios de curto período de tempo (poucos minutos) cujo estado de carga sofrerá pequenas variações (não superiores a 5%). Assim como, os ensaios de longa duração são associados a ensaios cujo estado de carga da bateria sofrerá grandes variações.



$$V_{bat} = E_p - I_{bat}(R_p + R_o) + I_{bat}R_o e^{-\frac{t}{R_o C}} \quad (2.8)$$

Baseado no modelo de aproximação de quarta ordem, o modelo elétrico é verificado na figura 2.7, combina os coeficientes de difusão e polarização ativa. Os elementos associados são:  $R_p$  resistência de polarização;  $R_d$  a resistência de carga transferida representando a polarização ativa;  $R_w$  a resistência de difusão devido ao eletrólito de difusão;  $C_o$  a capacitância integrada;  $E_p$  o potencial eletroquímico de circuito aberto,  $G_s$  a condutância que representa as perdas por gaseificação;  $E_s$  potencial de gaseificação.

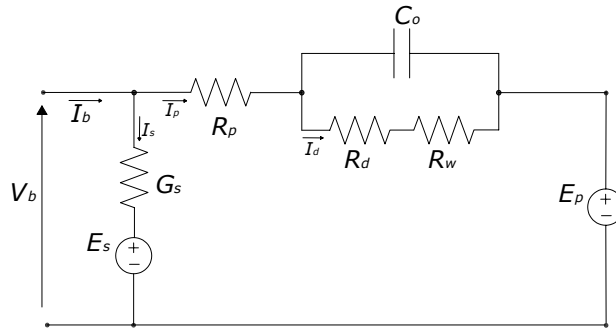


Figura 2.7. Modelo para cargas e descargas de longa duração.

A determinação dos parâmetros se divide em três partes: Parâmetros empíricos, parâmetros de fabricação da bateria e os parâmetros obtidos a partir de ensaios de carga e descarga. O modelo dos parâmetros do circuito é:

$$E_p = E_{po} + k_e (273 + T_b) \ln(SOC)$$

$$R_p = R_{po} (1 - \beta T_b) - R_{cp} \ln(SOC)$$

$$R_d = R_{do} \left[ \frac{\frac{A_{d1}}{1 - SOC} + e^{A_{d2}(I_{bat} SOC)}}{1 + e^{\frac{A_{d3} I_d}{I^*}}} \right]$$

$$R_w = -R_{wo} \ln(1 - (1 - SOC) / SOC(k_c - 1) \left| \frac{I_d}{I^*} \right|^\delta)$$

$$G_s = G_{so} e^{(A_{SO} V_{bat} + A_{SO} (T_b - T_f))}$$

$$\tau = (R_d + R_w) C$$

Características da bateria:

$$c_n = 100 Ah, I_n = 10 A, \theta_n = 25^\circ C$$

Parâmetros empíricos propostos na referência bibliográfica para uma bateria de 100 Ah:

$$k_e = 1.9, \delta = 0.4, \varepsilon = 0.6, \beta = -0.006, G_{s0} = 0.4 pS, k_e = 0.54 mV/C, \theta_p = 1.2 ^\circ C/W, A_{d1} = 0.0085, \\ A_{d2} = -15, A_{d3} = -8.45, A_{s0} = 9.95 V^{-1}, A_{sv} = 0.07 ^\circ C^{-1}$$

Neste modelo apenas os valores  $R_{po}, R_{wo}, R_{do}, R_{cp}$  são determinados a partir de ensaios de carga e descarga. No artigo de origem é proposta uma tabela com os valores desta resistência para diferentes valores de corrente. Segundo o artigo, estas resistências sofrem variações de acordo com a corrente aplicada à bateria.

## 2.6 Modelo para carga e descarga de curta duração

O modelo proposto em [7] e verificado na figura 2.8, compreende quatro modos de operação: (a) carregamento, quando a bateria recebe corrente, (b) período de descanso após carga, (c) descarga, quando a bateria entrega corrente a uma carga ligada aos seus terminais, (d) período de descanso após descarga. Nos períodos de descanso após carga e descarga não há circulação de corrente nos terminais da bateria.

Em cada um dos quatro modos de operação, a tensão terminal da bateria pode ser aproximada pela soma de duas exponenciais cujas constantes de tempo são diferentes para cada modo de operação.

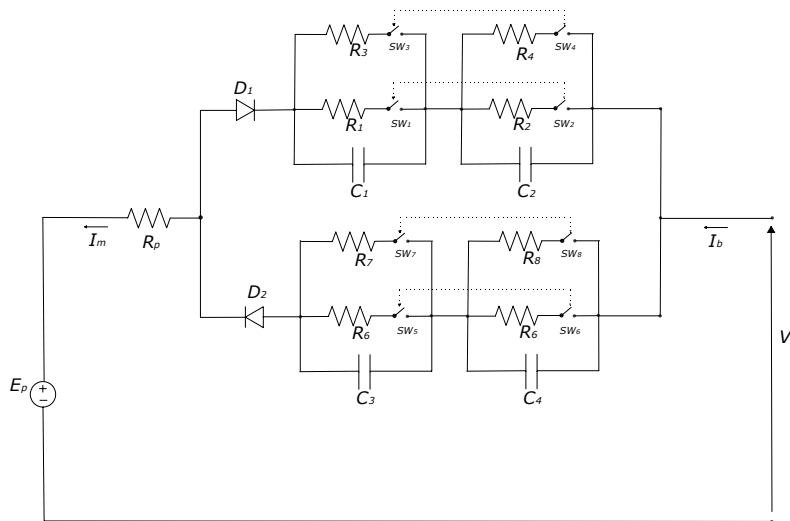


Figura 2.8. Modelo para cargas e descargas de curta duração

No estado de descarga as chaves  $SW_1, SW_2$  estarão fechadas e considerando a carga conectada aos terminais da bateria sendo  $R_{ext}$ , a tensão terminal da bateria, conforme demonstrado em [7], será:

$$u(t) = \frac{U_o R_{ext}}{\underbrace{R + R_{ext} + R_1 + R_2}_{U_{min}}} \left( 1 + \frac{R_1}{R + R_{ext}} e^{-\frac{t}{\tau_{1p}}} + \frac{R_2}{R + R_{ext}} e^{-\frac{t}{\tau_{2p}}} \right);$$

$$\tau_{1p} = C_1 \frac{R_1 (R + R_{ext})}{R_1 + R + R_{ext}}, \tau_{2p} = C_2 \frac{R_2 (R + R_{ext})}{R_2 + R + R_{ext}}$$

No estado permanente  $e^{-\frac{t}{\tau_{1p}}} \approx 0, e^{-\frac{t}{\tau_{2p}}} \approx 0 : u(t) = U_{min}$

No período de pósdescarga, as resistências  $R_1$  e  $R_2$  serão substituídas por  $R_3$  e  $R_4$ , a tensão terminal da bateria será:

$$u(t) = U_o - \frac{U_{min}}{R_{ext}} R_1 e^{-\frac{t}{\tau_{1s}}} - \frac{U_{min}}{R_{ext}} R_2 e^{-\frac{t}{\tau_{2s}}};$$

$$\tau_{1s} = R_3 C_1, \tau_{2s} = R_4 C_2$$

No estado de carregamento é aplicada aos terminais da bateria uma fonte de tensão, as chaves  $Sw_5$  e  $Sw_6$  são fechadas e a tensão terminal será escrita como:

$$u(t) = U_s - \frac{(U_s - U_o) R_{ext}}{\underbrace{R + R_{ext} + R_5 + R_6}_{U_{max}}} - (U_s - U_{max}) \frac{R_5}{R + R_{ext}} e^{-\frac{t}{\tau_{3p}}} - (U_s - U_{max}) \frac{R_6}{R + R_{ext}} e^{-\frac{t}{\tau_{4p}}};$$

$$\tau_{3p} = \tau_{1p}, \tau_{4p} = \tau_{2p}$$

De modo semelhante no período de resto de carga as resistências  $R_5$  e  $R_6$  são substituídas por  $R_7$  e  $R_8$ , a tensão terminal será:

$$u(t) = U_o + \frac{U_{min}}{R_{ext}} R_7 e^{-\frac{t}{\tau_{3s}}} + \frac{U_{min}}{R_{ext}} R_8 e^{-\frac{t}{\tau_{4s}}};$$

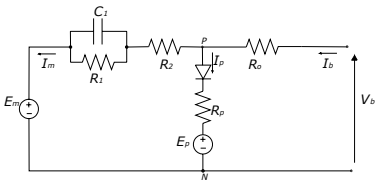
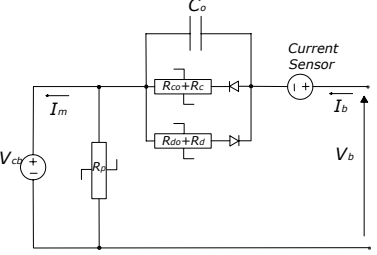
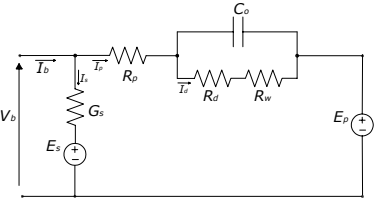
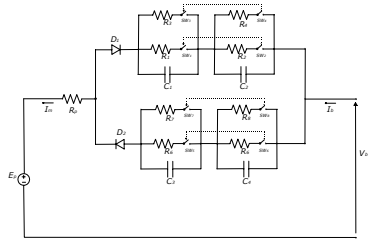
$$\tau_{3s} = \tau_{1s}, \tau_{4s} = \tau_{2s}$$

A determinação dos parâmetros é realizada a partir de determinação experimental por inspeção dos resultados dos pontos de máximo e mínimo de cada período. O modelo é limitado à aplicação a SOC constante próximos a 100%, ou seja, apenas para cargas e descargas de curta duração, não sendo aplicável em aplicações que visam a modelar a bateria para um ensaio completo de carga e ou descarga.

2.7 Síntese dos modelos de bateria de Chumbo ácido

A modelagem descrita é sintetizada no quadro 2.1, os quais se enumeram as equações e constantes necessárias para determinar a identificação dos elementos de circuito e estimação do comportamento dinâmico.

Quadro 2.1. Síntese da modelização de baterias de chumbo-ácido.

	<i>Equações</i>	<i>Dados determinados experimentalmente</i>
Modelo da bateria por aproximação de terceira ordem com ramo de perdas	 $R_0 = R_{00} [1 + A(1 - SOC)]$ $E_m = E_{m0} - k_e (273 + \theta)(1 - SOC)$ $R_1 = -R_{10} \ln(DOC)$ $C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}$ $R_2 = R_{21} \frac{e^{(A_{21}(1-SOC))}}{1 + e^{\frac{A_{22}I_m}{I}}}$ $I_p = V_{PN} G_{po} e^{\left( \frac{V_{PN}}{V_{po}} + A_p \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right) \right)}$	$R_{00}, R_{10}, A, \tau_1, E_{m0}, k_e$ $R_{21}, A_{21}, A_{22}$ $G_{po}, V_{po}, A_o$
Modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem	 $R_p, R_c, R_d, R_{co}, R_{do}$ <p><i>Modelados por:</i></p> $BE = Ke^{(w_f(V_m - V_{co}))^{ff}}$ $TC = \frac{R}{R_{ref}} e^{\frac{T_{ref} - T}{T_{ref}}}$	$ff, K, w_f, V_m, TC, T,$ $T_{ref}, R_{ref}, R$
Modelos para cargas e descargas de curta e longa duração	 $E_p = E_{po} + k_e (273 + T_b) \ln(SOC)$ $R_p = R_{po} (1 - \beta T_b) - R_{cp} \ln(SOC)$ $R_d = R_{do} \left[ \frac{\frac{A_{d1}}{1 - SOC} + e^{A_{d2}(I_{lim} SOC)}}{1 + e^{\frac{A_{d3} I_d}{I}}} \right]$ $R_w = -R_{wo} \ln(1 - (1 - SOC) / SOC(k_c - 1) \left  \frac{I_d}{I^*} \right ^\delta)$ $G_s = G_{so} e^{(A_{so} V_{lim} + A_{so}(T_b - T_f))}$ $\tau = (R_d + R_w) C$	$R_{po}, R_{wo}, R_{do}, R_{cp}$
Modelo para carga e descarga de curta duração	 $\tau_{1p} = C_1 \frac{R_1 (R + R_{ext})}{R_1 + R + R_{ext}}$ $\tau_{2p} = C_2 \frac{R_2 (R + R_{ext})}{R_2 + R + R_{ext}}$ $\tau_{3s} = \tau_{1s}, \tau_{4s} = \tau_{2s}$ $\tau_{1s} = R_3 C_1, \tau_{2s} = R_4 C_2$	$R_1, R_2, R_3, R_4$ $R_5, R_6, R_7, R_8$ $C_1, C_2, C_3, C_4$

### 3. Determinação das Constantes dos Modelos de Bateria de Chumbo-Ácido

Na determinação das constantes de cada modelo são necessárias algumas condições de contorno que propiciarão a simplificação do circuito, este procedimento considera que os ensaios de descarga e carga da bateria obedecem aos seguintes critérios:

- Ensaio de descarga completo: Com a bateria completamente carregada (após uma carga com equalização), a descarga é realizada a corrente constante e idealmente a temperatura da bateria constante, até atingir a tensão terminal limiar inferior (10.5 V), em seguida a bateria é submetida ao descanso à corrente nula, chamado período de estabilização, neste período a tensão terminal tenderá a elevar-se a um valor constante superior a 10.5 V.
- Ensaio de carga completa: Após um ensaio de descarga da bateria, é aplicada uma corrente de carga constante e idealmente mantendo a temperatura da bateria constante. A corrente constante é aplicada a bateria até ser atingida a tensão terminal limiar superior (14.3 V), em seguida a tensão terminal será mantida constante e a corrente será paulatinamente reduzida até ser anulada, este período é chamado período de equalização. Depois de anulada a corrente, a tensão terminal tenderá a assumir um valor inferior a 14.3 V.

#### 3.1 Determinação dos parâmetros do modelo por aproximação de terceira ordem com ramo de perdas

O modelo da bateria de terceira ordem, retomado na figura 3.1, foi proposto em [3]-[4], convencionou-se que a corrente sendo aplicada a bateria é dita positiva.

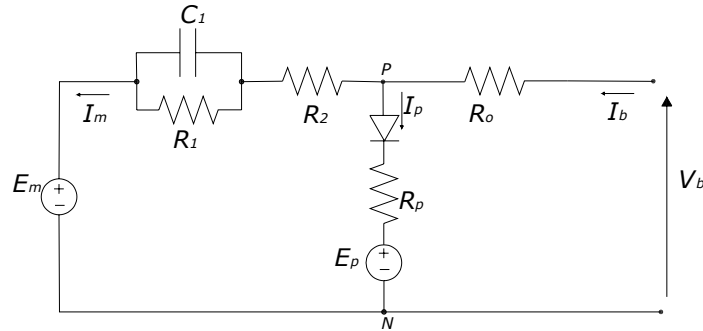


Figura 3.1 Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas.

### 3.1.1 Determinação das constantes do modelo por pontos de medição

#### 3.1.1.1 Modelo de descarga da bateria

No modelo de descarga o ramo de perdas a resistência  $R_2$  são desprezadas, assim a tensão terminal da bateria será:

$$V_t = E_m + R_0 I_b + R_1 I_1$$

$$V_t = E_{mo} - k_e (273 + \theta)(1 - SOC) + R_{00} (1 + A(1 - SOC)) I_b + (-R_{10} \ln(DOC)) I_1$$

Os parâmetros a serem determinados a partir de ensaios de descarga da bateria são:

$$E_{mo}, k_e, R_{00}, R_{10}, A, \tau_1.$$

Num ensaio de descarga total da bateria, figura 3.2, a curva da tensão terminal de descarga apresenta cinco níveis de tensão que correspondem a condições particulares da bateria, nestes pontos o circuito equivalente da bateria é simplificado, permitindo a determinação das constantes. Neste ensaio, a corrente de descarga é constante, porém a temperatura da bateria varia entre 26°C e 27°C.

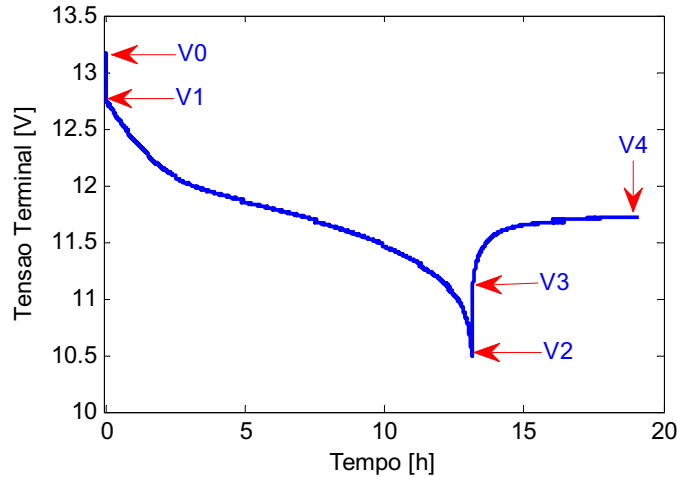


Figura 3.2. Curva de descarga para um ensaio a descarga completa.

### 3.1.1.1.1 Determinação das constantes $E_{mo}$ , $R_{00}$

A partir das tensões terminais medidas em  $V_0, V_1$ , são consideradas as seguintes condições:

- Condição inicial ( $t = 0^-$ ):  $I_b = 0$  e SOC (estado de carga) = 100%

$$V_t = V_0 = E_{mo}, \text{ ou seja, } V_0 = E_{mo}.$$

- Condição de aplicação da corrente de descarga ( $t = 0^+$ ):  $I_b = -I A$  e SOC = 100%

$$V_t = V_1 = E_{mo} + R_{00} I_b, \text{ ou seja, } R_{00} = \frac{V_1 - V_0}{I_b}$$

### 3.1.1.1.2 Determinação da constante $A$

A partir das tensões terminais medidas em  $V_2, V_3$  são consideradas as seguintes condições:

- Condição do fim de descarga ( $t = t_{final}^-$ ):  $I_b = -I A$  e SOC = 0% (bateria descarregada)

$$V_t = V_2 = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC) + R_{00} (1 + A(1 - SOC)) I_b + R_1 I_1$$

- Condição do fim de descarga ( $t = t_{final}^+$ ):  $I_b = 0 A$

$$V_t = V_3 = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC) + R_1 I_1$$

Logo, a diferença entre as tensões terminais será:

$$R_{00} (1 + A(1 - SOC)) I_b = V_2 - V_3, \text{ ou seja, } A = \left[ \frac{V_2 - V_3}{R_{00} I_b} - 1 \right] \frac{1}{(1 - SOC)}$$

3.1.1.1.3 Determinação da constante  $k_e$ 

A partir da tensão terminal medida em  $V_4$ , é considerada a seguinte condição:

- Condição do período de estabilização da tensão terminal: SOC=0% (bateria descarregada)

$$V_4 = V_t = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC), \text{ ou seja, } k_e = \frac{E_{mo} - V_4}{(273 + T)(1 - SOC)}$$

3.1.1.1.4 Determinação das constantes  $R_{10}, \tau_1$ 

A partir das tensões terminais medidas em  $V_3, V_4$ , são consideradas as seguintes condições:

- Quando a corrente de descarga é aplicada:  $I_b = -I_A$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C_1}(I_b - I_1), \text{ ou seja, } V_c = R_1 I_1 \rightarrow I_1 = \frac{V_c}{R_1}$$

Obtemos assim uma equação diferencial de primeira ordem:

$$\frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{C_1 R_1} V_c = \frac{1}{C_1} I$$

A solução desta equação para a condição inicial:  $V_c(0) = 0$

$$V_c = R_1 I_b \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \right), \tau_1 = R_1 C_1 \quad (3.1)$$

- Quando a corrente de descarga é anulada:

$$\begin{aligned} \frac{dV_c}{dt} &= \frac{1}{C_1}(0 - I_1) \\ \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{C_1 R_1} V_c &= 0 \end{aligned}$$

A equação diferencial terá apenas a resposta natural. Então, para a condição inicial  $V_c(\tilde{t}) = R_1 I = -R_{10} \ln(DOC(\tilde{t})) I_b$ , ( $I_b$  é a corrente de descarga):

$$V_c(t) = R_1 I_b e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (3.2)$$



- No ponto de medição da tensão terminal  $V_3$ , a tensão terminal será:  $I_b=0 A$ ,  $SOC=0\%$  (bateria descarregada)

$$V_3 = V_t = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC) + V_c$$

Sendo  $V_c$  a tensão no bloco RC. Neste caso a corrente é nula e a tensão  $V_c$  representa a descarga da tensão do capacitor  $C_1$  sobre o resistor  $R_1$  (Equação 3.2).

$$V_3 = V_t = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC) + R_1 I_b e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

- No ponto de medição da tensão terminal  $V_4$ , a tensão terminal será:

$$V_4 = V_t = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC)$$

Assim a diferença entre as duas tensões será:

$$V_3 - V_4 = R_1 I_b e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

$$V_3 - V_4 = -R_{10} \ln(DOC) I_b e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

Logo, a partir de uma aproximação exponencial obtêm-se  $\tau_1$ , e para  $t=0$  (considerando apenas este trecho,  $V_t = V_3 \rightarrow t = 0$ ) temos:  $R_{10} = \frac{V_3 - V_4}{\ln(DOC) I_b}$ .

A vantagem deste método consiste na simplicidade de determinação das constantes a partir de alguns pontos de medição da tensão terminal, entretanto a estimação negligencia a região de descarga propriamente dita. O valor de tensão assumido em  $V_3$  é uma possível fonte de erro para determinação da constante  $R_{10}$ . Bem como, esta determinação considera confiável o modelo de estimação do estado de carga, pois caso não seja atendidas estas condições o desvio na estimação da tensão terminal prejudicarão a modelização.

### 3.1.1.2 Modelo de carga da bateria

O modelo de carga da bateria por aproximação de terceira ordem, figura 3.1, apresenta o ramo parasita e a resistência  $R_2$ , que estão associados à dissociação aquosa observada em altos níveis

de tensão. A determinação das constantes do modelo de carga é mais complexa, e requer considerar inicialmente que os valores do modelo de descarga seriam válidos também para o modelo de carga. A tensão terminal é escrita como:

$$V_t = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC) + R_0 I_b + R_1 I_1 + R_2 I_m$$

$$\text{Sendo: } I_m = I_b - I_p$$

Assumindo que os valores dos parâmetros do modelo de descarga são aplicáveis ao modelo de carga, as constantes a serem determinadas são:

$$R_{21}, A_{22}, A_{21}, I^*$$

### 3.1.1.2.1 Determinação das constantes $R_{21}$ , $A_{21}$ e $A_{22}$

Considerando que a corrente do ramo parasita pode ser desconsiderada para  $V_{PN} < E_{mo}(E_{po})$ , então  $I_m = I_b$ .

Podemos escrever a equação:

$$R_2(SOC, I_m) = \frac{V_t - B}{I_m}, I_m \neq 0 \quad (3.3)$$

$$B = E_{mo} - k_e (273 + T)(1 - SOC) + R_0 I_b + R_1 I_1$$

Utilizando esta relação juntamente com resultado do ensaio de carga, obtêm-se o comportamento de  $R_2$  no tempo, verificado na figura 3.3.

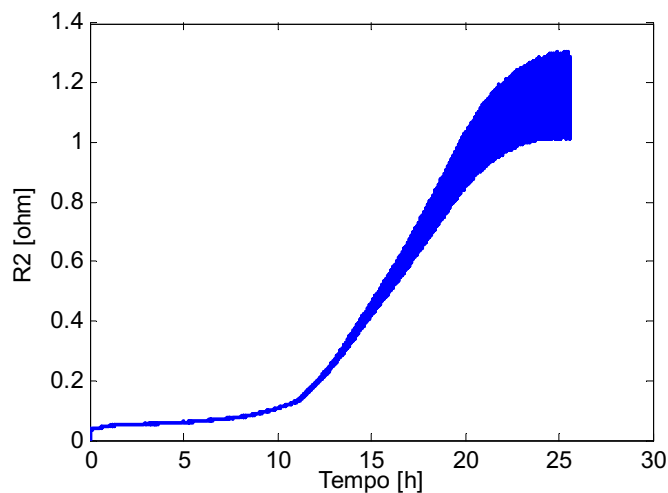


Figura 3.3 Comportamento de  $R_2$  no tempo.

A partir destes dados estimam-se as constantes  $R_{21}, A_{22}, A_{21}, I^*$ , realizando uma interpolação com diferentes pontos da curva<sup>3</sup>.  $I^*$  é o valor médio da corrente aplicada na bateria, neste caso assume-se  $I^* = 10$ .

### 3.1.1.2.2 Modelo do Ramo de perdas

Os efeitos do ramo parasita serão observados quando a bateria apresentar estado de carga elevado, tensão elevada que propicia a dissolução aquosa [3]. No ramo da reação parasitária, figura 3.4, a corrente parasita  $I_p$  existirá quando a diferença de potencial  $V_{PN}$  tornar-se superior a tensão  $E_p$ .

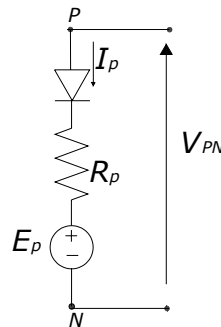


Figura 3.4. Ramo de reação parasitária.

A corrente parasitária é escrita como sendo:

$$I_p = V_{PN} G_{po} e^{\left( \frac{V_{PN} + A_p}{V_{po}} \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right) \right)}$$

As constantes a serem determinadas são:  $V_{po}, A_p, \theta_f = -40^\circ\text{C}, G_{po}$

- O efeito térmico sobre a corrente parasitária implica num aumento de dez vezes a cada elevação de  $10^\circ\text{C}$  da temperatura da bateria [3].  $I_p(30^\circ\text{C}) = 10I_p(20^\circ\text{C})$ . Assim tem-se:

$$I_p(30^\circ\text{C}) = V_{PN} G_{po} e^{\left( \frac{V_{pn} + A_p}{V_{po}} \left( 1 + \frac{30}{40} \right) \right)} = 10I_p(20^\circ\text{C})$$

$$V_{PN} G_{po} e^{\left( \frac{V_{pn} + A_p}{V_{po}} \left( 1 + \frac{30}{40} \right) \right)} = 10V_{PN} G_{po} e^{\left( \frac{V_{pn} + A_p}{V_{po}} \left( 1 + \frac{20}{40} \right) \right)}$$

$$\frac{V_{pn}}{V_{po}} + A_p \left( 1 + \frac{30}{40} \right) = \ln(10) + \frac{V_{pn}}{V_{po}} + A_p \left( 1 + \frac{20}{40} \right) \rightarrow A_p = 9.21$$

<sup>3</sup>Considerando, em paralelo, a execução de um algoritmo de estimação do estado de carga, que forneça nos pontos escolhidos o valor real do SOC.

- Considera-se que a corrente parasita representara 100% da corrente injetada na bateria quando o estado de carga é 100%.

$$I_p = I_b \rightarrow I_m = 0.$$

Nestas condições, a corrente parasita é verificada na figura 3.5.

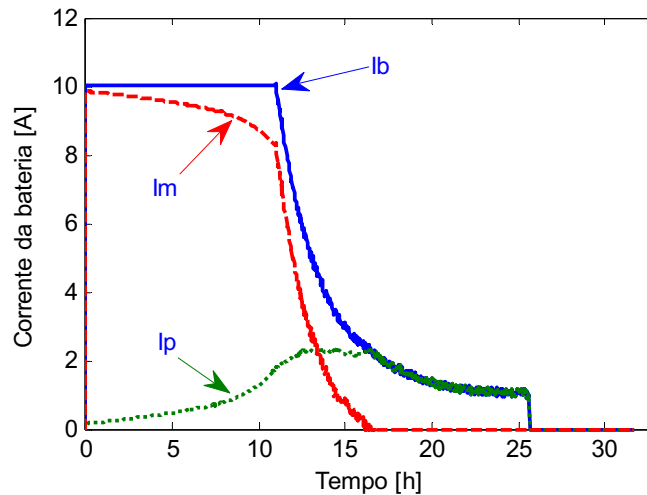


Figura 3.5. Corrente parasita quando a bateria está no estado completamente carregada ( $SOC \geq 1$ ),  $I_p = I_b \rightarrow I_m = 0$ .

A condutância  $G_{po}$  é da ordem de  $10^{-12}$  [5], assumindo esta premissa determina-se  $V_{po}$ .

No que diz respeito à tensão  $E_p$ , considerando-a igual à tensão  $E_{mo}$  assume-se que a existência da corrente parasita ocorre durante todo período de carga.

### 3.1.2 Determinação das constantes do modelo de descarga por mínimos quadrados

O método de regressão por mínimos quadrados destina-se estimar as constantes que permitam minimizar o erro quadrado. Neste caso, o modelo de regressão divide-se em 4 etapas. Nas mesmas condições anteriormente estabelecidas (**Considerando que no início do processo de descarga a bateria esteja 100% carregada ( $SOC=1$ ) e que a corrente de descarga seja constante ( $I=constante$ )**).

- *Etapa 1:* Determinação das constantes  $E_{mo}, R_{00}$ , considerando o comportamento inicial da bateria.

$$V_t(0) = E_{mo} - k_e(273 + T)\overbrace{(1 - SOC)}^0 + R_0\overbrace{I_b(0)}^0 + R_1\overbrace{I_1(0)}^0$$

$$V_t(0) = E_{mo}$$

No instante no qual a corrente é diferente de zero ( $I_b(0^+) = I$ ) a tensão terminal sofrerá uma pequena queda, esta variação é justificada pela queda de tensão sobre a resistência  $R_0$ .

$$V_t(0^+) = E_{mo} - k_e(273 + T)\overbrace{(1 - SOC)}^0 + R_0\overbrace{I_b(0^+)}^0 + R_1\overbrace{I_1(0^+)}^0$$

$$V_t(0^+) = E_{mo} + R_0I_b(0^+)$$

$$R_0 = R_{00}(1 + A\overbrace{(1 - SOC)}^0) = R_{00}$$

Os valores de  $E_{mo}$ ,  $V_t(0^+)$ ,  $I_b(0^+)$  são conhecidos assim teremos:  $R_{00} = \frac{V_t(0^+) - E_{mo}}{I_b(0^+)}$

- *Etapa 2:* Determinação da constante  $k_e$ . Considerando a tensão terminal da bateria obtida no fim do período de estabilização.

$$V_4 = V_t = E_{mo} - k_e(273 + T)(1 - SOC)$$

Assim, o valor da constante  $k_e$  será:

$$k_e = \frac{E_{mo} - V_4}{(273 + T)(1 - SOC)}$$

- *Etapa 3:* Determinação da constante de tempo do bloco RC – paralelo, a determinação é realizada de acordo com o método anterior, ou seja, pela aproximação exponencial do trecho  $V_3 - V_4$ .
- *Etapa 4:* Determinação das constantes ( $A, R_{10}$ ). Utilizando o **método dos mínimos quadrados**:

$$V_t(t) = E_{mo} - k_e(273 + T)(1 - SOC) + R_0I_b(t) + R_1I_1(t)$$

$$V_t(t) = E_{mo} - k_e(273 + T)(1 - SOC) + R_{00}I(t) + R_{00}A(1 - SOC)I_b(t) - R_{10} \ln(DOC)I_b(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)$$

Sendo a corrente de descarga constante ( $I$ =constante) e  $E_{mo}$ ,  $R_{00}$  constantes conhecidas:

$$V_t(t) = \overbrace{E_{mo}}^{\text{constante}} - \overbrace{k_e(273+T)(1-SOC)}^{\text{Conhecido}} + \overbrace{R_{00}I_b(t)}^{\text{constante}} + R_{00}A(1-SOC)I_b(t) - R_{10} \ln(DOC)I_b(t) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)$$

$$\underbrace{V_t(t) - E_{mo} - R_{00}I_b + k_e(273+T)(1-SOC)}_{\text{Saída}} = R_{00}A(1-SOC)I_b - R_{10} \ln(DOC)I_b \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} R_{00}I_b(1-SOC) & -\ln(DOC) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ R_{10} \end{bmatrix}$$

Pelo método dos mínimos quadrados temos:

$$[\varphi]_{M \times N} [Y]_{N \times 1} = [X]_{M \times 1}$$

$$[Y]_{N \times 1} = \underbrace{\text{Inv}([\varphi]^t [\varphi])}_{[\varphi]_{N \times N}^{-1}} [\varphi]^t [X]_{M \times 1}$$

Este método é válido para sistemas com  $n$  variáveis e no mínimo  $n$  equações linearmente independentes de sorte que a inversa do produto  $[\varphi]^t [\varphi]$  exista.

$$\text{Sendo: } \begin{cases} \varphi = \begin{bmatrix} R_{00}I_b(1-SOC) & -\ln(DOC) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \end{bmatrix} \\ Y = \begin{bmatrix} A \\ R_{10} \end{bmatrix} \end{cases}$$

Para implementar este método, a partir dos vetores de dados dos ensaios é necessários reescrever os vetores como sendo:

- Vetor de saída:

$$Y(t) = V_t(t) - E_{mo} - R_{00}I_b + k_e(273+T)(1-SOC)$$

- Vetor de entrada 1 :

$$\varphi_1(t) = R_{00}I_b(1-SOC), \text{ Sendo } R_{00}I_b \text{ constantes e o vetor SOC conhecido.}$$

- Vetor de entrada 2:

$$\varphi_2(t) = -\ln(DOC)I_b \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right), \text{ Sendo } I_b, \tau_1 \text{ constantes e } DOC=SOC.$$

Este método pode ser aplicado para duas regiões distintas, a região de descarga ou a região de estabilização. Nestes dois casos, os valores estimados serão distintos e podem representar diferentes performances. Para estimação utilizando a região de estabilização, os resultados estimados podem ser comparados ao método anteriormente proposto, pois neste caso a escolha de  $V_3$  torna-se desnecessária. Para implementar este método é **necessário** que os modelos do SOC e ou DOC estejam bem definidos e a temperatura da bateria seja conhecida.

### 3.1.3 Determinação das constantes do modelo por mínimos quadrados a partir do ensaio a pulsos de corrente

A determinação das constantes pelo método dos mínimos quadrados tem desempenho limitado pelo SOC estimado. Um algoritmo de estimação do SOC impreciso propiciará erros significativos na determinação das constantes. Um aprimoramento desta técnica, com intuito de minimizar a incerteza na determinação do SOC, consiste em realizar ensaios de carga e descarga a pulsos de corrente. Pois, demonstrou-se que o SOC mantém uma relação linear com a tensão de circuito aberto [8]. Assim, é possível determinar o SOC a partir da tensão de circuito aberto medida em cada estabilização da tensão terminal. A tensão terminal medida neste ensaio de carga e descarga a pulsos de corrente é verificada na figura 3.6 e 3.7.

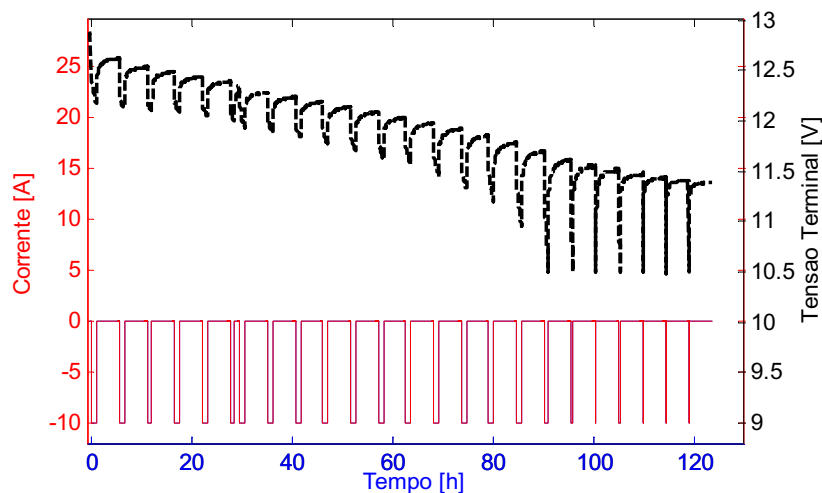


Figura 3.6. Ensaio de descarga a pulsos de corrente.

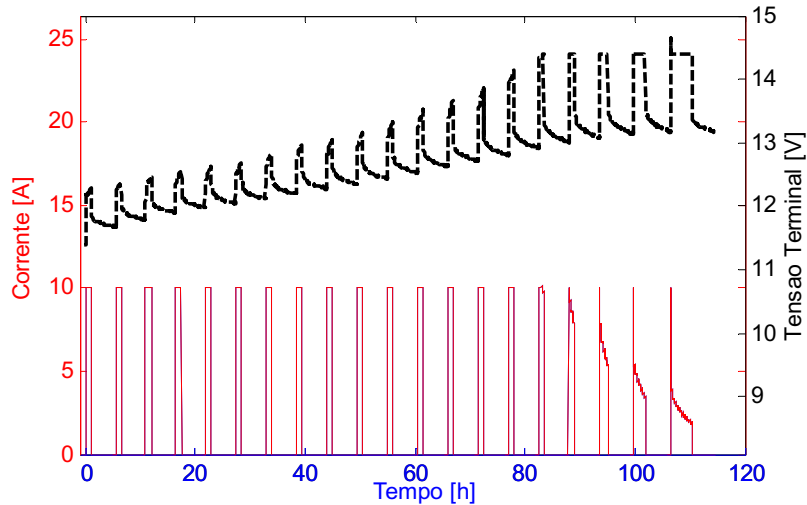


Figura 3.7. Ensaio de carga a pulsos de corrente.

O procedimento de determinação das constantes do modelo de descarga:

- Modelo da tensão interna:

$$E_m = E_{mo} - k_C(273 + T_b)(1 - SOC)$$

$E_{mo}$  é determinado para a condição de SOC=1;

$k_C$  é determinado para a condição de SOC=0;

- Modelo da resistência  $R_0$ :

$$R_0 = R_{00} + R_{00}A(1 - SOC)$$

A tensão sobre a resistência é medida através da queda brusca da tensão terminal quando da aplicação da corrente de descarga. O valor do SOC neste instante é calculado a partir da tensão de circuito aberto que antecede a aplicação do pulso de corrente de descarga. Para um tempo de aplicação do pulso de corrente  $t_o$ .

$$\underbrace{V_b(t_o^-) - V_b(t_o^+)}_{V_{R_0}} = \underbrace{(R_{00} + R_{00}A(1 - SOC))}_{R_0} I_b$$

$$\underbrace{\left[ \frac{V_b(t_o^-) - V_b(t_o^+)}{I_b} \right]}_Y = \underbrace{\left[ 1 \quad (1 - SOC) \right]}_{\varphi} \underbrace{\begin{bmatrix} R_{00} \\ R_{00}A \end{bmatrix}}_X$$

Aplicando o método de regressão por mínimos quadrados, obtêm-se o valor das constantes  $R_{00}$  e  $A$ .

$$[X] = inv([\varphi]^T [\varphi]) [\varphi]^T [Y]$$



Então,  $X(1) = R_{00}$ ,  $A = \frac{X(2)}{X(1)}$ .

- Modelo da resistência  $R_l$ :

$$R_l = -R_{l0} \ln(DOC)$$

Determinadas as constantes do modelo de  $R_0$  e  $E_m$ , a determinação da resistência  $R_l$  e a constante de tempo  $\tau$ , dar-se-á a partir da tensão terminal medida durante a aplicação do pulso de corrente. Neste caso, o SOC em tempo real<sup>4</sup> pode ser aproximado pela contagem de ampère-hora, devido a curta duração do pulso de corrente que induzirá a considerar a temperatura da bateria constante durante a aplicação do pulso de corrente. Em poder do vetor de SOC, pode-se assumir SOC=DOC, pois a profundidade de carga tem o mesmo comportamento do SOC, tem-se:

$$V_c = V_b - E_m - R_0 I_b$$

$$V_c = V_{R_l} = -R_{l0} \ln(DOC)(I_b - I_c)$$

Considerando:  $I_c = C \frac{dV_c}{dt}$ ,  $C = \tau/R_l$

$$V_c = R_l \left( I_b - \frac{\tau}{R_l} \frac{dV_c}{dt} \right)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} V_c \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} -\ln(SOC)I_b & -\frac{dV_c}{dt} \end{bmatrix}}_\phi \underbrace{\begin{bmatrix} R_{l0} \\ \tau \end{bmatrix}}_X$$

Aplicando o método de regressão por mínimos quadrados, obtêm-se o valor das constantes  $R_{l0}$  e  $\tau$ .

$$[X] = \text{inv}([\phi]^t [\phi]) [\phi]^t [Y]$$

Então,  $X(1) = R_{l0}$ ,  $X(2) = \tau$  (segundos).

<sup>4</sup>A estimativa do SOC em tempo real pela contagem de ampère-hora apresenta boa performance apenas quando a temperatura da bateria é mantida constante durante todo ensaio e a curtos períodos de tempo. Em ensaios de descarga e carga completas com a bateria exposta a temperatura ambiente, a contagem de ampère-horas tem apresentado grandes desvios na estimação do SOC em tempo real, não apenas pela variação da temperatura, mais também pela imprecisão da medição da corrente da bateria pelos sensores que num tempo elevado a soma desta imprecisão ao longo do tempo correspondera a erros significativos [9]-[10].

### 3.2 Determinação dos parâmetros do modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem

O modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem, retomado na figura 3.8, foi proposto em [2].

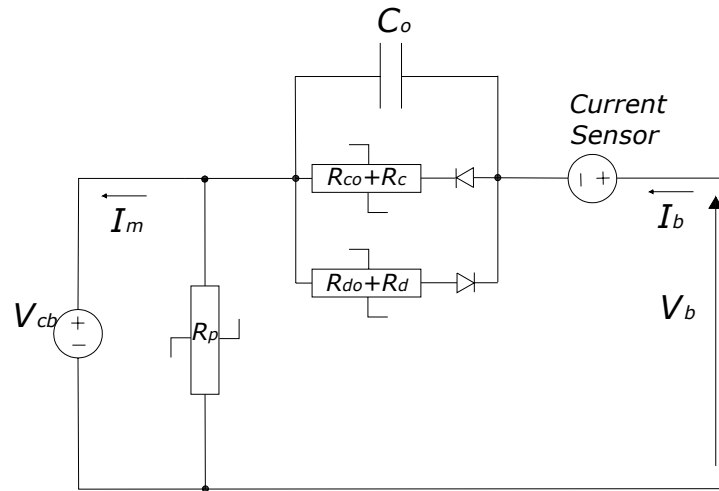


Figura 3.8. Modelo da bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem.

A equação característica de cada elemento do circuito em função do SOC e da tensão de circuito aberto é obtida através de aproximações polinomiais. Fornecido um banco de dados com valores do SOC, tensão de circuito aberto e resistência [2], os dados são aproximados no Matlab a polinômios característicos. Uma tabela de valores são fornecidos na referência bibliográfica de origem, porém, o procedimento para obtê-la não é apresentado.

### 3.3 Determinação dos parâmetros do modelo de cargas e descargas de curta e longa duração

Modelo proposto em [5], considera modelos distintos para curtos ensaios e longos ensaios. Considerando o modelo para longos ensaios, retomado na figura 3.9.

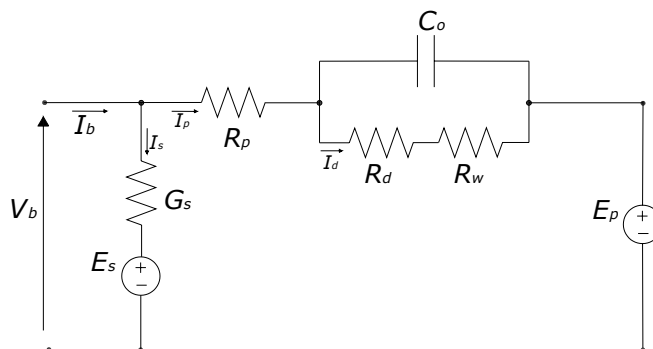


Figura 3.9 Modelo para cargas e descargas de longa duração

Neste modelo os valores  $R_{po}$ ,  $R_{wo}$ ,  $R_{do}$ ,  $R_{cp}$  são determinados através de uma tabela de dados contendo os valores destas resistências para diferentes valores de corrente. A referência bibliográfica não especifica o procedimento de obtenção destes valores. Bem como há um elevado número de constantes empíricas propostas.

### 3.4 Síntese da determinação dos parâmetros

Dentre os modelos apresentados, o modelo com aproximação de terceira ordem, com ramo de perdas tem apresentado maior facilidade na determinação das constantes, bem como tem um modelo claramente apresentado. Portanto, este modelo pode ser utilizado na estimativa do tempo de carga e descarga da bateria para diferentes condições de temperatura e corrente, e estimar o comportamento da bateria quando da ocorrência de problemas (condições não habituais).

## 4. Métodos de Determinação do Estado de Carga (SOC) para Baterias de Chumbo-Ácido

O estado de carga da bateria é um indicador do grau de preenchimento da bateria face à máxima capacidade de carga que a bateria é capaz de disponibilizar em seus terminais [3]. O estado de carga da bateria está associado a reações químicas internas, estas reações são a sulfatação do Chumbo quando da descarga da bateria e oxidação do Chumbo quando da carga. Matematicamente, o SOC é adimensional e escrito como uma função de múltiplas variáveis: temperatura interna da bateria -  $T_b$ , corrente média extraída ou injetada na bateria -  $I_b$ , tempo de vida da bateria -  $\tau_{vida}$ , e tensão terminal -  $V_b$ . Os valores típicos do SOC estão entre [0, 1].

$$SOC = f(T_b, I_b, V_b, \tau_{vida})$$

A estimação do SOC da bateria, em tempo real ou em descanso, é uma atividade complexa e de expressiva importância, pois, o SOC é a informação mais precisa fornecida ao utilizador, da capacidade de operacionalidade da bateria nas condições atuais de utilização. Assim, o desenvolvimento de novos métodos de estimação do SOC tem sido alvo de várias pesquisas no mundo [8]. Dentre os métodos de estimação figuram-se o tradicional método de contagem de ampère-hora, bem como os métodos mais complexos utilizando Lógica Fuzzi, Redes Neurais artificiais, tensão de circuito aberto, filtro de Kalman [8]-[14]. Neste estudo são avaliados três métodos de estimação: o balanço de Ah, a estimativa pela tensão de circuito aberto e a estimativa a partir de uma rede neural desenvolvida.

### 4.1. Estimação do SOC pela contagem de Ah

O balanço de Ampère-hora (Ah) da bateria é o método mais simples e popular de estimação do SOC. Considerando uma bateria com capacidade máxima de ampère-hora  $C_{max}$  (Ah), o SOC é obtido pela razão de ampère-hora extraída da bateria face à máxima capacidade de fornecimento da bateria.

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_{\max}} \int_{t_0}^t I_b dt \quad (4.1)$$

É necessário ressaltar que a capacidade máxima da bateria depende da temperatura de operação e da corrente da bateria. Logo, a capacidade máxima pode ser obtida a partir de uma tabela de dados que a relacione com a temperatura e com a corrente da bateria, tabela esta obtida experimentalmente o que fatalmente pode requerer vários ensaios de carga e descarga. Uma alternativa é realizar uma descarga completa da bateria e em seguida realizar uma carga completa e durante o período de carga realiza-se a contagem da quantidade de Ah que foram injetados na bateria. O resultado desta contagem será a estimativa da capacidade máxima da bateria para ensaios que venha a ser realizados em seguida.

Todavia, vários questionamentos são realizados com relação a esta técnica:

- Os valores da capacidade máxima assumidos até então não consideram uma possível oxidação do Chumbo que possa vir a acontecer com a elevação da temperatura da bateria;
- A corrente injetada na bateria durante o período de carga não é totalmente convertida em Ah, existe uma corrente parasita que circula na bateria devido à dissolução aquosa dos eletrólitos quando a tensão terminal da bateria assume níveis elevados [3];
- A estimativa do  $SOC_0$  é normalmente um chute inicial, que pode conter um desvio justificado pelos argumentos anteriores.
- A presença da imprecisão na medição da corrente da bateria é o maior problema desta técnica, pois, ocasiona a propagação de erros na estimação do SOC, principalmente devido ao termo integrador. A solução é investir em sensores confiáveis para medição precisa da corrente da bateria.

#### 4.2. Estimação do SOC pela tensão de circuito aberto da bateria

A tensão de circuito aberto da bateria é verificada quando a corrente circulante na bateria é nula, ou seja, no período de descanso da bateria. Na figura 4.1, o circuito equivalente da bateria por aproximação de terceira ordem [3]-[4] é retomado. Considerando a condição de circuito aberto:

$$\begin{aligned}
 V_b &= E_m \\
 V_b &= E_{mo} - ke(273 + T)(1 - SOC) \\
 V_b &= \underbrace{E_{mo} - ke(273 + T)}_a - \underbrace{ke(273 + T)}_b SOC
 \end{aligned}$$

<sup>5</sup>A corrente da bateria é considerada positiva quando injetada na bateria, ao passo que a corrente retirada da bateria é considerada negativa.

$$V_b = a - bSOC \quad (4.2)$$

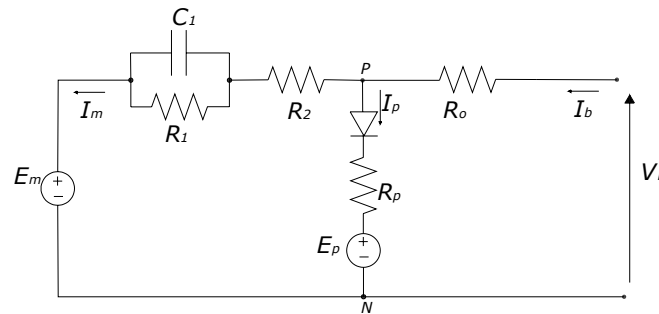


Figura 4.1. Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas.

O resultado da equação 4.2, evidencia a existência de uma relação linear entre a tensão de circuito aberto e o SOC. Esta técnica é simples, porém limitada a aplicações apenas no estado de repouso da bateria, bem como pode vir a apresentar resultados não confiáveis quando a bateria apresenta alta sulfatação devido à falta de equalização da bateria. Uma aplicação desta técnica é a estimação do SOC a partir da combinação deste método com o método anterior de contagem de Ah [9]-[10].

As constantes  $a$  e  $b$  podem ser facilmente obtidas, tomando dois valores distintos da tensão de circuito aberto cujo SOC seja conhecido, normalmente são utilizados os valores para  $V_b|_{SOC=1}$  e  $V_b|_{SOC=0}$ .

#### 4.3. Estimação do SOC por rede neural artificial (RNA)

O modelo do neurônio utilizado atualmente é uma generalização do modelo de McCulloch e Pitts, que estabelece uma função de ativação objetivando a ativação do neurônio e uma função de transferência que possui características não lineares de sorte que se o efeito produzido pelo neurônio for abaixo do valor mínimo de ativação, o impulso não produzirá efeito sobre a saída (princípio do "tudo ou nada").

A rede neural artificial é uma rede massivamente paralela interconectada de elementos e suas organizações hierárquicas que estão intencionadas para interagir com objetos do mundo real do mesmo modo que um sistema nervoso biológico faz. A solução de problemas com redes neurais são atrativas em contextos que: Existe a capacidade de "aprendizado" e generalização deste aprendizado para outras condições similares; Tarefas mal definidas, onde falta o conhecimento explícito sobre como encontrar a solução [15].

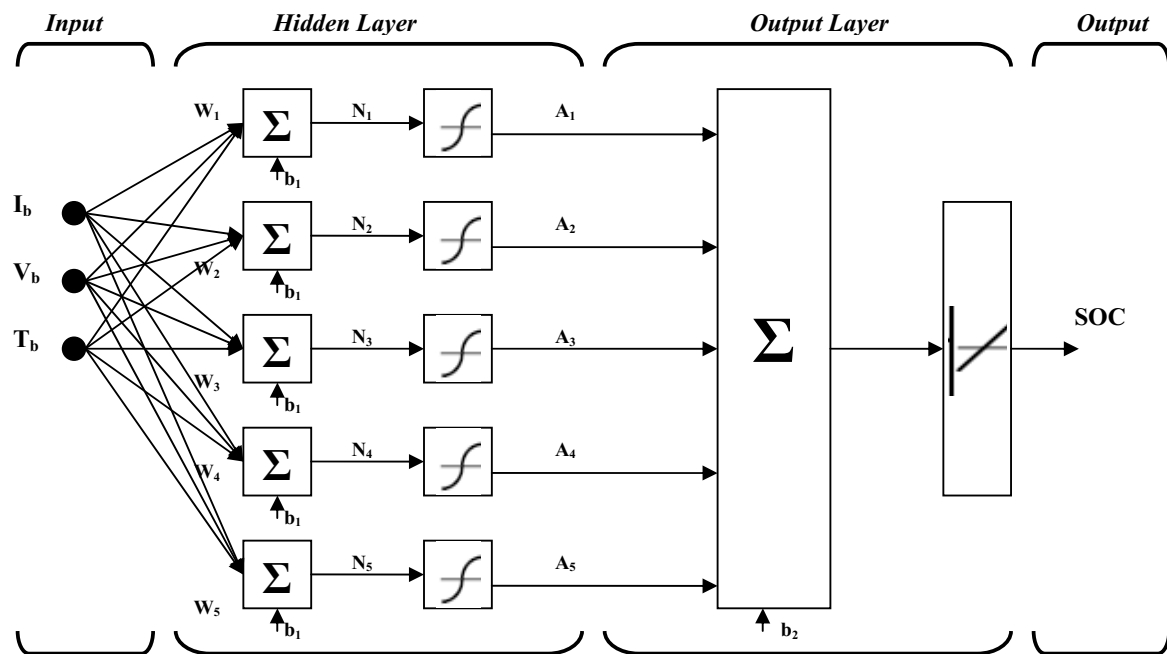
Existem na literatura diversos modelos de redes neurais, dentre estes, o modelo de *Back-propagation* é o modelo de rede neural mais utilizado, devido à simplicidade e eficiência, contudo requer um treinamento supervisionado da rede.

Treinar uma rede significa ajustar sua matriz de pesos de forma que a saída coincida com certo valor desejado para uma dada excitação de entrada da rede. O treinamento supervisionado exige a disponibilidade de um conjunto de treinamento formado por pares de vetores de entrada e de saída, chamados pares de treinamento.

#### 4.3.1. Construção da rede neural

No ambiente do Matlab<sup>®</sup>, a rede neural artificial é construída a partir da função *newfit* ou *newpr* presente no *toolbox neural network*. Esta função constrói a rede baseada na aproximação de função e no conhecimento do modelo.

A estrutura do neurônio assume duas camadas, figura 4.2. Na primeira camada é utilizada a função inversa da tangente (função de ativação) e na segunda camada uma função linear (função de transferência), considerando uma implementação com *feed-forward network – newfit* [16], outra possibilidade de construção da rede consiste em utilizar nas duas camadas a função arco tangente como função de transferência, construção utilizando a *pattern recognition network – newpr*.



(a)

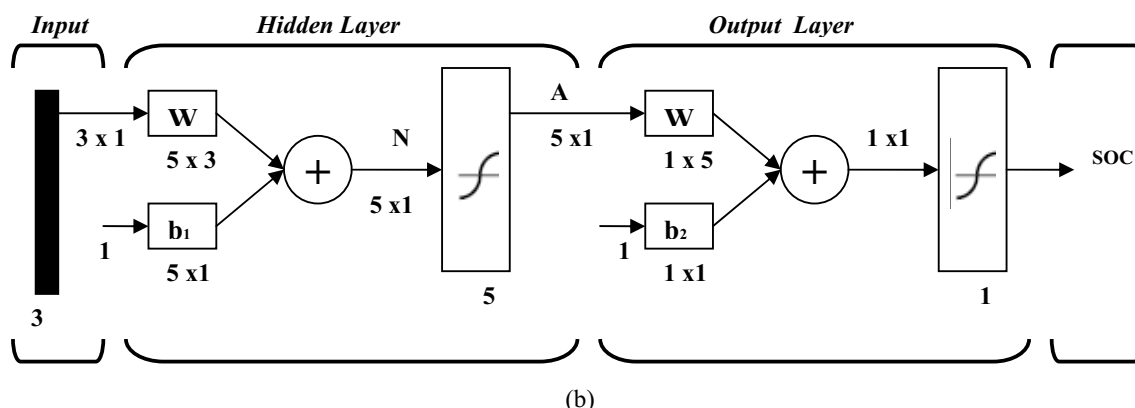


Figura 4.2. Estrutura da rede neural artificial; (a) Estrutura geral; (b) Estrutura compacta.

A construção da rede necessita de três parâmetros básicos: o vetor ou matriz de dados de entrada, o vetor de dados de saída que corresponde a saída desejada e o número de neurônios. O número de neurônios influencia no desempenho da rede, bem como no custo computacional de implementá-la. A utilização de RNA para estimação do SOC tem sido uma saída utilizada para calcular o estado de carga da bateria considerando as condições de operação da bateria (temperatura, corrente e tensão terminal) [12]-[13]. Adotando-se cinco neurônios na composição da RNA, os resultados de simulação têm evidenciado um bom compromisso entre a estimativa do SOC e o tempo computacional. Esta quantidade é superior aos quatro neurônios da rede de estimação da capacidade estudados em [13].

#### 4.3.2. Treinamento da RNA

O processo de treinamento da RNA é realizado pela função *train* disponível no *toolbox neural network*. No processo de treinamento supervisionado utiliza o algoritmo de aprendizado de Levenberg-Marquardt [16]. Neste processo dividem-se aleatoriamente as entradas e saídas desejadas em:

- 60% das entradas e saídas desejadas são utilizadas no processo de treinamento da rede.
- 20% são utilizadas no processo de validação, finalizando o treinamento.
- 20% são utilizadas em testes independentes da rede para generalização.

#### 4.3.3. Modelo da RNA para estimação do estado de carga de baterias a chumbo-ácido

O estado de carga da bateria é função de quatro variáveis de estado da bateria: Temperatura da bateria, Tensão terminal, Corrente de descarga ou carga da bateria e Tempo de uso da bateria<sup>6</sup>.

<sup>6</sup>O contribuição do tempo de vida da bateria ao SOC é pronunciável quando a bateria tem um elevado número de ciclos de carga e descarga, ou seja, a variação do estado de carga no tempo tende a aumentar representado o descarregamento e carregamento rápido da bateria. Este efeito é ponderado por um fator de multiplicação do SOC. Neste estudo o tempo de vida da bateria é desconsiderado, tomando como base uma bateria com poucos ciclos de carga e descarga.



$$SOC = f(T_b, I_b, V_b, \tau_{vida})$$

Na implementação da RNA são assumidas entradas (sensibilidade dos neurônios) a temperatura, a corrente e a tensão terminal da bateria, uma vez que para a análise de curto prazo o efeito do tempo uso da bateria pode ser negligenciado. Bem como é assumido como saída o valor do estado de carga atual da bateria.

Os dados para construção e treinamento da rede são obtidos a partir de ensaios de descarga completa, mantendo a temperatura e corrente constantes. Este ensaio foi realizado para diferentes temperaturas e correntes. O estado de carga desejado é determinado a partir da contagem de ampère – horas para temperatura de 27 °C (próxima a temperatura ambiente 25 °C), apesar das críticas a este método, nestas condições de ensaio o balanço de Ah é uma boa referência para o SOC de saída.

Os vetores de entrada para treinamento da rede foram obtidos em ensaios de descarga com a bateria submersa a temperatura constante, realizados pela Moura (fabricante das baterias). O procedimento dos ensaios é descrito na tabela 4.1:

Tabela 4.1. Descrição do procedimento de descarga

Ensaio de descarga da bateria de Chumbo-ácido		
Corrente [A]	Temperatura [°C]	Tempo do ensaio [horas]
2.32	27	68h20'
	40	71h19'
	50	73h22'
1.80	27	92h29'
	50	95h28'
1.47	27	113h14'
	40	118h14'
	50	120h04'

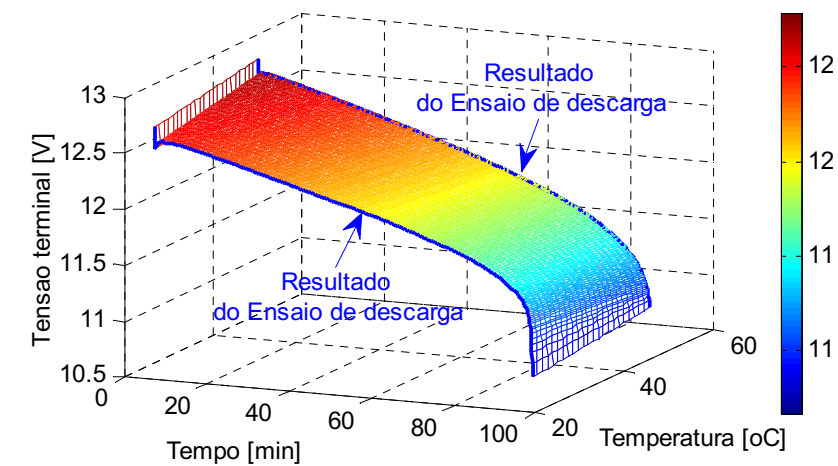
#### 4.3.3.1. Interpolação dos dados de temperatura

Estes resultados são limitados a alguns valores de temperatura. Assim, a generalização destes resultados para temperaturas intermediárias é obtida através de uma rotina de interpolação. Esta rotina, apresentada no apêndice I, utiliza funções do Matlab<sup>®</sup> para estender os resultados do ensaio com três valores de temperatura para toda a faixa de temperatura entre 27 °C e 50 °C.

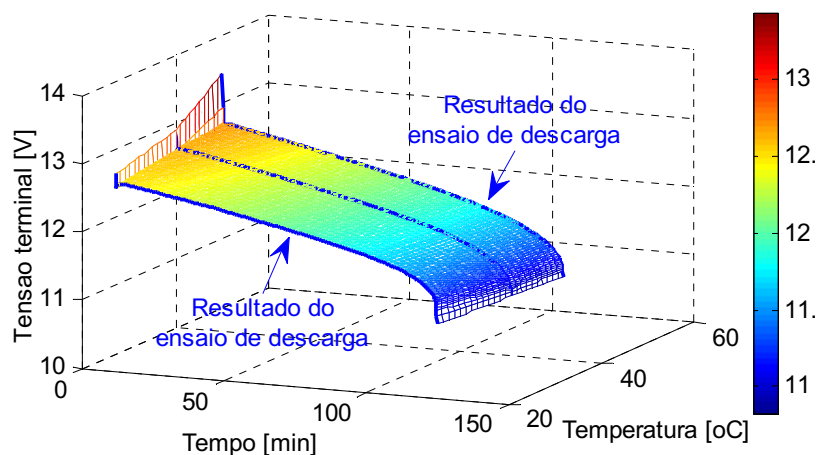
Considerando a corrente constante, o comportamento da tensão terminal para uma faixa de temperatura é representado por uma superfície verificada na figura 4.3. Assim:

$$V_b \Big|_{I_b = \text{Constante}} = f(t, T_b)$$

O principal efeito da elevação da temperatura é a elevação da capacidade de fornecimento de carga (Ah) pela bateria, este fenômeno é quimicamente justificado pelo aumento da velocidade de oxidação do Chumbo em temperaturas elevadas. Este fenômeno é caracterizado fisicamente pelo aumento da quantidade de Ah retirado da bateria, bem como aumento do tempo de descarga quando considerada uma mesma corrente de descarga.



(a)



(b)

Figura 4.3. Tensão terminal para ensaios de descarga a corrente constante. (a)  $I = -1.8A$ ; (b)  $I = -1.47A$ .

#### 4.3.3.2. Ajuste de curvas para diferentes correntes de descarga

Nestas condições de ensaio, a interpolação da tensão terminal e temperatura são satisfatórias. Contudo, o intervalo de corrente dos ensaios, entre 2.37-1.47 A, são insuficientes para treinar a RNA, pois não contempla a faixa de corrente utilizada em ensaios no LEIAM. Nas condições de ensaio do LEIAM a corrente de descarga da bateria é de 10 A.

A técnica de interpolação limita-se a estipular o comportamento da tensão terminal para valores de corrente no interior do intervalo de medição. Assim, não se adapta para avaliar o comportamento da tensão terminal face à corrente de descarga.

A técnica utilizada para obter dados referentes a descargas com 10 A, assumindo a temperatura da bateria constante, é realizar um ajuste de curvas. O ajuste de curvas é realizado utilizando as funções *fitype*, *fit* do Matlab<sup>®</sup>.

Assumindo que a curva da tensão terminal da bateria durante o período de descarga pode ser aproximada pela função:

$$V_b = 12.46 - a(1 - SOC) + b \ln(SOC) \quad (4.3)$$

As funções *fitype*, *fit*, podem ser utilizadas para determinar os valores das variáveis a e b.

```
fun = fitype('12.46-a*(1-x)+b*log(x)');
[c2,gof2] = fit(SOCaj,Vaj,fun);
```

A rotina, verificada no apêndice II, deverá fornecer os valores das constantes que melhor se ajustam a função desejada, e partir do resultado de ajuste e utilizando um ensaio de descarga da MOURA, são comparados os resultados de medição e ajuste (figura 4.4).

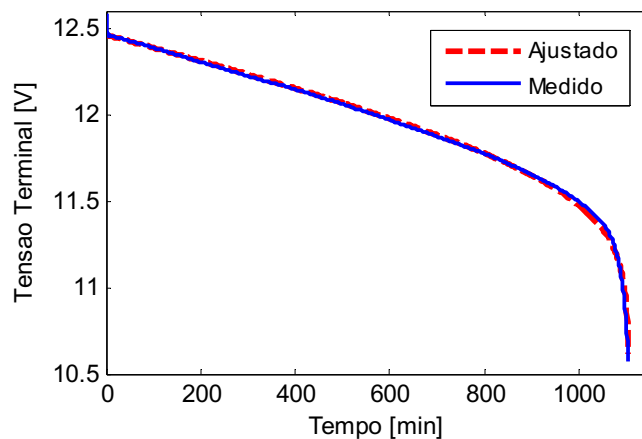


Figura 4.4. Resultado do ajuste de curva

O resultado de ajuste de curva permitiu obter uma função que descrevesse a tensão terminal da bateria para uma corrente de descarga quando a temperatura é mantida constante.

Utilizando a equação de ajuste da tensão recém obtida, é possível estimar o comportamento da tensão terminal da bateria para uma corrente de descarga de 10 A assumindo a temperatura constante (neste caso a 27 °C). Esta estimativa soluciona o problema de limitação dos dados de corrente do ensaio da MOURA, pois fornecerá um resultado de descarga a temperatura constante para um intervalo de corrente que contempla os ensaios de descarga realizados no LEIAM.

#### 4.3.3.3. Formação da RNA

Considerando os dados obtidos a partir do ensaio de descarga, interpolação e ajuste de curvas é obtido o vetor de dados de entrada para formação da RNA. O vetor de saída é obtido pela estimativa do SOC pelo método do balanço de Ah, este método, apesar das críticas, apresenta bons resultados para as condições de descarga a temperatura e corrente constantes.

A RNA terá três entradas (corrente da bateria, temperatura da bateria e tensão terminal) e uma saída (SOC), formadas por um conjunto de cinco neurônios, de acordo com a rotina da função *newfit*.

$$net=newfit(DADOS\_IN,OUT\_DADOS,5);$$

Sendo:

$$[DADOS\_IN]_{3 \times N} = [I_b; T_b; V_b]$$

$$[OUT\_DADOS]_{1 \times N} = [SOC]$$

O treinamento supervisionado da rede é realizado pela função *train*, utilizando os mesmos vetores de dados de entrada e saída.

$$net=train(net,DADOS\_IN,OUT\_DADOS);$$

A rotina completa de concepção da RNA é verificada no apêndice III. O critério de avaliação da rede é o erro de quadrático entre o SOC de entrada e o SOC gerado pela rede após o treinamento. O comparativo entre os SOCs e o erro quadrático da estimativa é verificado na figura 4.5.

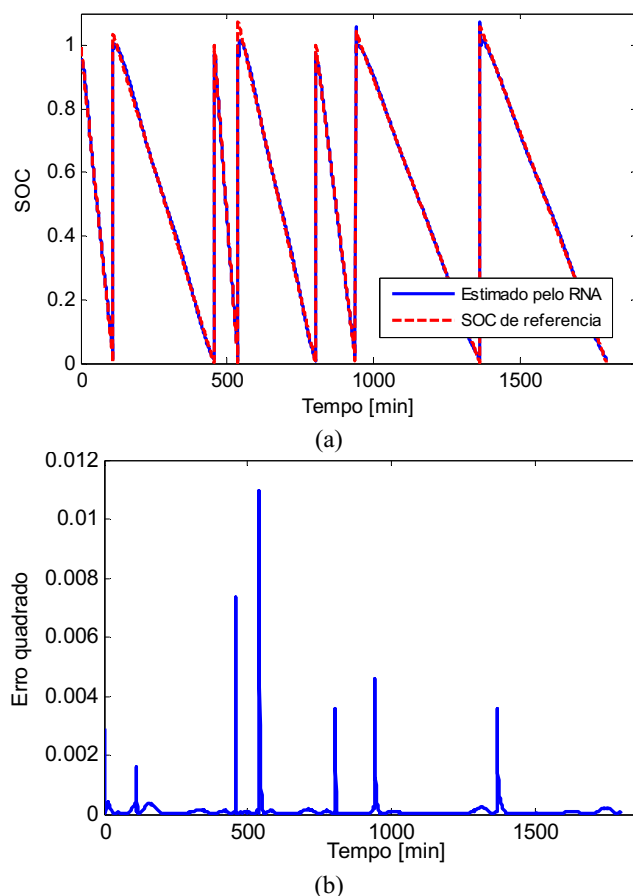


Figura 4.5. Estimativa do SOC por RNA. (a) Comparativo do SOC; (b) Erro quadrático.

A estimativa do estado de carga por RNA permite o monitoramento em tempo real do SOC para condições de temperatura variável, dentro da faixa de treinamento ( $27^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ ), bem como corrente variável, ou seja, este método é mais robusto. O inconveniente é a necessidade de um grande banco de dados para o treinamento da rede neural.

#### 4.4 Síntese dos métodos de estimação do SOC

Os métodos apresentados para estimação do SOC apresentam vantagens e desvantagens. O melhor método de estimação do SOC dependerá do nicho de aplicação almejado. O balanço comparativo dos três métodos expostos é verificado na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Balanço dos métodos de estimação do SOC.

Método	Aplicação	Vantagens	Desvantagens
Estimação pela Contagem de Ah	Estimação do SOC em tempo real	Simples Não requer grande esforço computacional	Necessita do conhecimento da capacidade atual da bateria Resultados incoerentes quando há variação da temperatura da corrente ou medição imprecisa da corrente na bateria
Estimação pela tensão de circuito aberto	Estimação do SOC quando a bateria esta em repouso	Simples Não necessita largo conhecimento da quantidade de carga injetada ou retirada da bateria	Aplicação limitada ao período de descanso da bateria. Resultados incoerentes quando há sulfatação excessiva da solução, devido à falta de equalização
Estimação por RNA	Estimação do SOC em tempo real	Método robusto comparado aos demais Não necessita largo conhecimento da quantidade de carga injetada ou retirada da bateria	Requer um banco de dados significativo para treinamento da rede Resultados incoerentes quando a RNA é submetida a condições além das condições de treinamento

#### 4.5. Comparação de desempenho dos métodos de estimação do SOC

Os ensaios de descarga da bateria foram realizados no LEIAM, com temperatura da bateria variável, e na MOURA com a bateria imersa de modo a manter constante a temperatura. Nestes ensaios são medidos: a tensão terminal, a corrente da bateria, a temperatura da bateria. O intervalo entre duas medições consecutivas é de um segundo para os ensaios realizados no LEIAM (taxa de medição de 60 medições por minuto), e de cinco segundos para os ensaios realizados na MOURA (taxa de medição de 6 medições por minuto).

A avaliação de desempenho da estimação do SOC das técnicas apresentadas para as duas condições de teste são verificados na figura 4.6 e 4.9 cuja rotina encontra-se no apêndice IV.

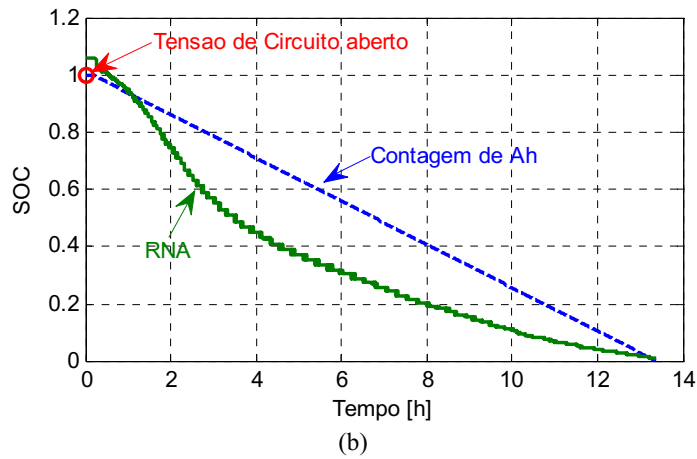
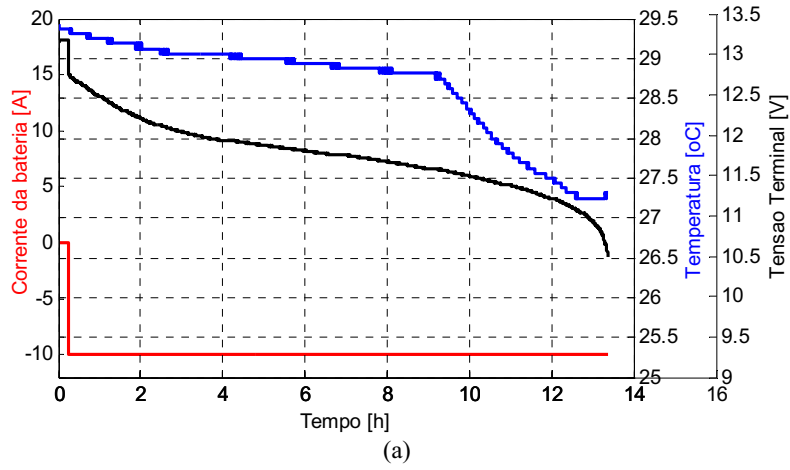
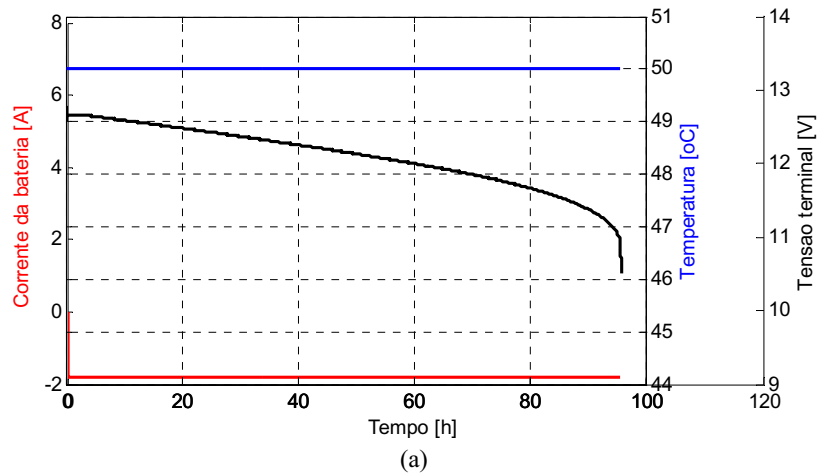


Figura 4.6. Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado no LEIAM; (a) Dados de ensaio; (b) Resultado de estimação.



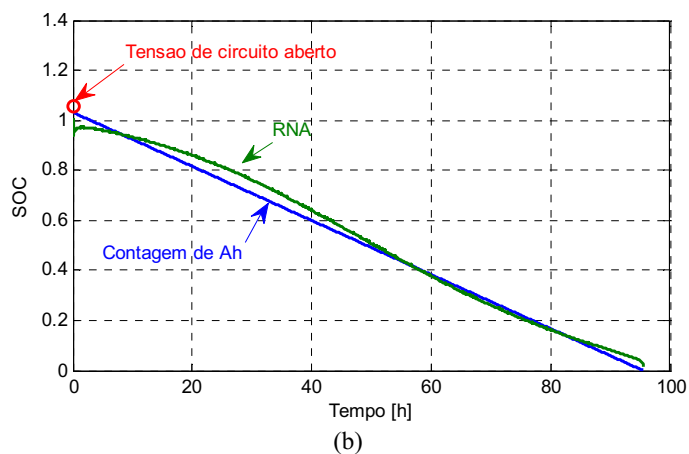


Figura 4.7. Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado na MOURA ( $I_b=1.80$  A); (a) Dados de ensaio; (b) Resultado de estimação.

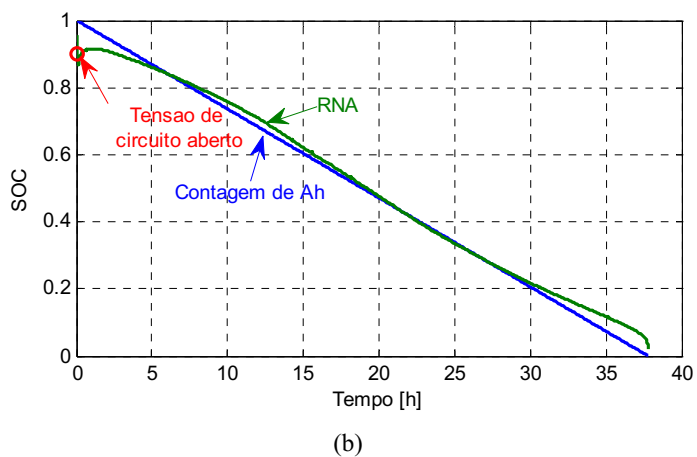
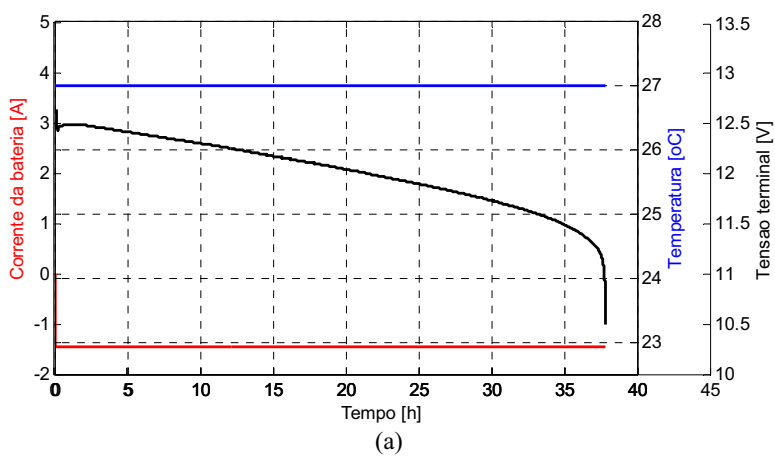


Figura 4.8. Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado na MOURA ( $I_b=1.47$  A); (a) Dados de ensaio; (b) Resultado de estimação.



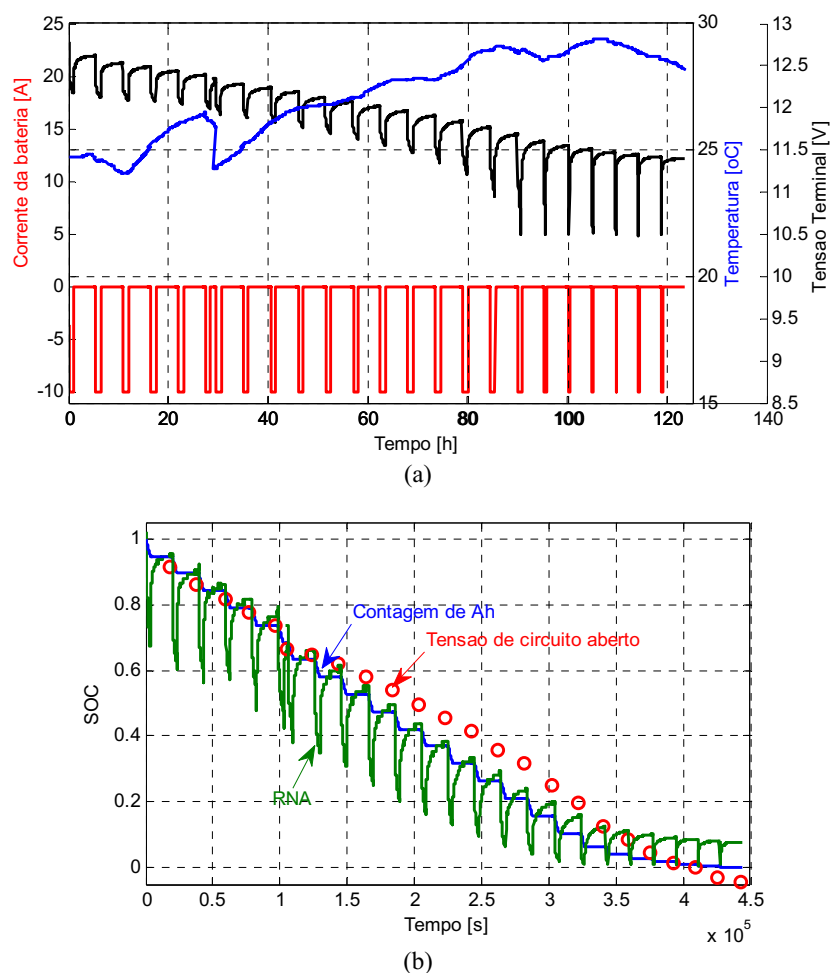


Figura 4.9. Estimativa do SOC a partir de ensaio realizado no LEIAM com pulsos de corrente; (a) Dados de ensaio; (b) Resultado de estimação.

#### 4.6 Considerações finais

Os desempenhos dos métodos são satisfatórios para análise em tempo real do SOC, nas condições de temperatura e corrente constantes. Contudo, os métodos requerem confiabilidade dos dados medidos, assim, a imprecisão na informação destes pode representar, sem dúvida, uma estimativa falsa do SOC real da bateria.

A estimação do SOC utilizando RNA tem apresentado resultados bastante interessantes, assumindo então uma grande expectativa na utilização deste método para utilizações futuras. Desde que cada vez mais seja estabelecido um amplo banco de dados que possa contemplar praticamente toda a faixa de temperatura e corrente de aplicação da bateria.

## 5. Simulação dos Modelos de Baterias de Chumbo-Ácido

A modelização de sistemas físicos é uma área de pesquisa cada vez mais difundida em diversos estudos, pois, os modelos de simulação permitem estipular o comportamento do sistema físico em condições adversas, evitando custos de ensaios e possíveis utilizações inapropriadas do sistema.

Na modelização das baterias de Chumbo-ácido vários modelos foram desenvolvidos e verificados anteriormente [1]-[7], para simulação destes modelos considera-se o procedimento de determinação dos parâmetros propostos no capítulo dois e a estimação do estado de carga a partir da RNA desenvolvida anteriormente. As simulações foram desenvolvidas no Matlab<sup>®</sup> - R2008a e os resultados são comparados aos ensaios realizados no LEIAM e na MOURA.

No Brasil, a fabricação, os ensaios técnicos e as terminologias associadas às baterias de chumbo-ácido são normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através das NBRs:

- **NBR 14204**, *Acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula – Especificação*;
- **NBR 14205**, *Acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula – Ensaios*;
- **NBR 14206**, *Acumulador chumbo-ácido estacionário regulado por válvula – Terminologia*;

### 5.1 Estrutura dos ensaios de carga e descarga da bateria

Os resultados de ensaios das baterias, em sua maioria, utilizam a estrutura desenvolvida no LEIAM e verificada na figura 5.1. Nesta montagem uma fonte de corrente controlada aplica a bateria uma corrente constante ajustada de acordo com o objetivo do ensaio e são medidas nos ensaios: a temperatura ambiente, a temperatura interna da bateria, a tensão terminal e a corrente da bateria. Todos os dados medidos, bem como o acompanhamento do ensaio em tempo real estão disponíveis no sitio desenvolvido pelo responsável por gerir os ensaios e a estrutura de simulação.



Figura 5.1. Estrutura de ensaios de carga e descarga das baterias – LEIAM.

O ensaio padrão desenvolvido no LEIAM consiste em:

- Num ensaio de descarga a bateria, inicialmente em repouso (cerca de 15 minutos), é submetida a uma corrente de descarga constante. Durante este processo a tensão terminal da bateria é monitorada e o fim do período de descarga será atingido quando a tensão terminal tornar-se inferior ou igual a 10.5 V. Este limite é o valor seguro indicado pelo fabricante, à negligência deste limite pode causar avarias irreversíveis a bateria. Depois de retirada a corrente de descarga, a bateria é submetida a um longo período de descanso chamado estabilização (cerca de 6 h).
- Num ensaio de carga a bateria, inicialmente em repouso (cerca de 15 minutos), é submetida a uma corrente de carga constante. Durante este processo a tensão terminal da bateria é monitorada até tornar-se superior ou igual a 14.403 V. A partir deste limite, a tensão terminal é mantida constante e a corrente de carga da bateria é reduzida paulatinamente até tornar-se nula. Este período é chamado de equalização. Depois de equalizada, a bateria é submetida a um longo período de descanso (cerca de 6 h).

Os resultados de ensaios fornecidos pela MOURA foram realizados com a bateria sob banho de imersão para manutenção da temperatura constante durante todo ensaio. Os dados fornecidos limita-se aos ensaios de descarga sem o período de descanso.

## 5.2 Simulações do modelo de bateria por aproximação de terceira ordem

O modelo de bateria de chumbo ácido por aproximação de terceira ordem [3]-[4], retomado na figura 5.2. A determinação dos parâmetros deste modelo foi demonstrada anteriormente considerando três métodos: Determinação por pontos da curva de descarga; regressão por mínimos quadrados e regressão do método de mínimos quadrados a partir de ensaios a pulsos de corrente.

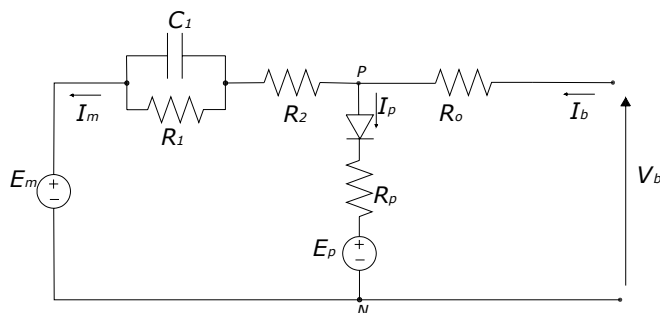


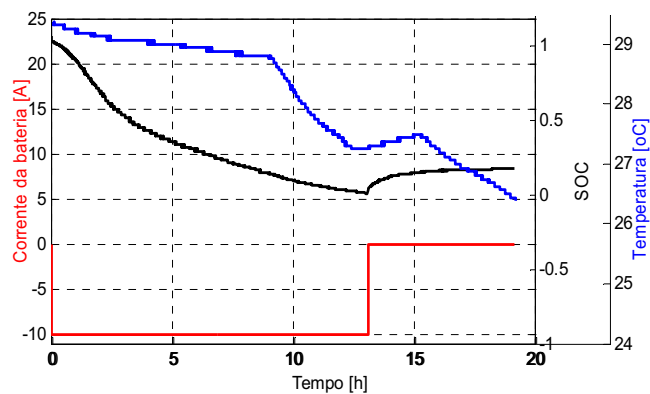
Figura 5.2. Modelo da bateria de terceira ordem com ramo de perdas.

A determinação dos parâmetros, e a simulação do modelo no período de descarga utilizam o SOC estimado a partir da RNA. Porém, para o estado de carga o SOC foi determinado pela contagem de ampère-hora. A estimação do SOC a partir da rede neural não é indicada neste período, devido aos dados de treinamento da rede limitar-se aos ensaios de descarga. Logo, caso aplicada a rede neural para o estado de carga nestas condições, os resultados não serão confiáveis.

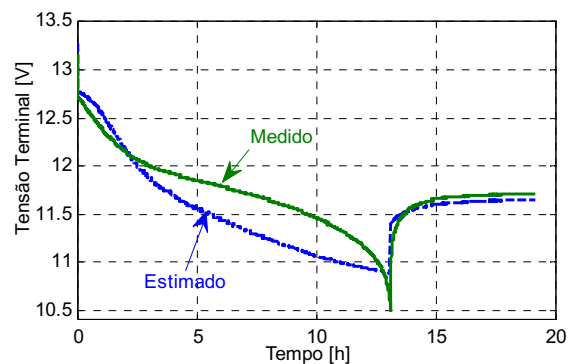
Os valores das constantes determinadas são verificados na tabela 5.1. A comparação de desempenho do modelo para as constantes determinadas são observadas nas figuras 5.3 - 5.5. As rotinas de simulação são verificadas nos apêndices V-VI.

Tabela 5.1. Parâmetros determinados para o modelo de bateria por aproximação de terceira ordem.

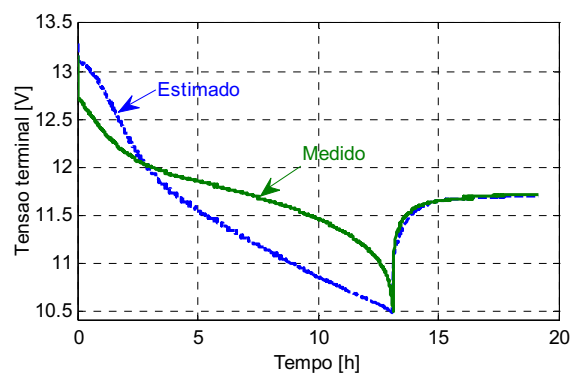
Parâmetro \ Técnica de determinação	Pontos da curva de descarga	Regressão por mínimos quadrados a partir do ensaio a pulsos de corrente
$E_{mo}$	13.172 V	13.172 V
$k_c$	0.0059 $V/k$	0.0059 $V/k$
$R_{00}$	0.042 $\Omega$	0.0118 $\Omega$
$A$	0.985	3.4068
$R_{10}$	0.0106 $\Omega$	0.00103 $\Omega$
$R_{21}$	1.5 $\Omega$	-
$G_{po}$	1e-12 S	-
$V_{po}$	1.484 V	-
$A_{22}$	3	-
$A_{21}$	-3.513	-
$A_p$	9.21	-
$\tau_1$	4000 s	4000 s



(a)

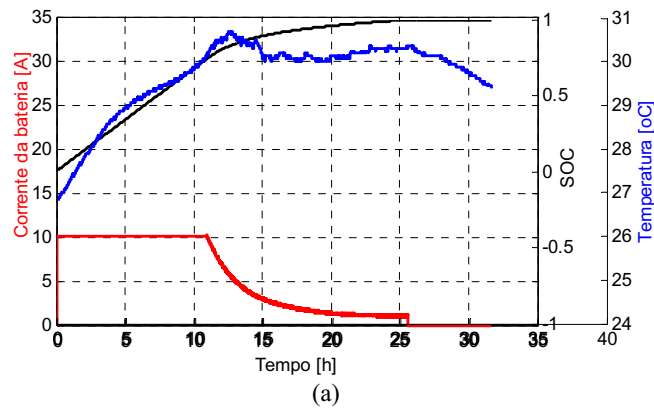


(b)

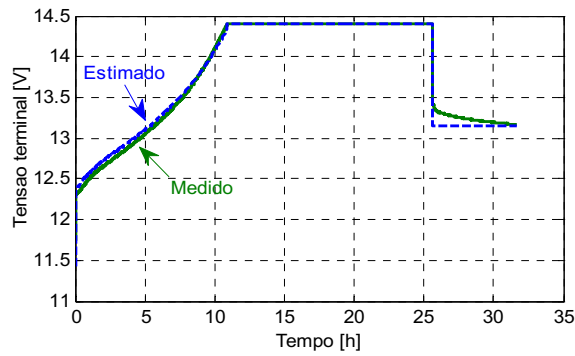


(c)

Figura 5.3. Resultados de simulação para o período de descarga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada (determinação dos parâmetros por pontos da curva); (c) Tensão terminal medida e estimada (determinação dos parâmetros por regressão a partir de ensaio a pulso de corrente).

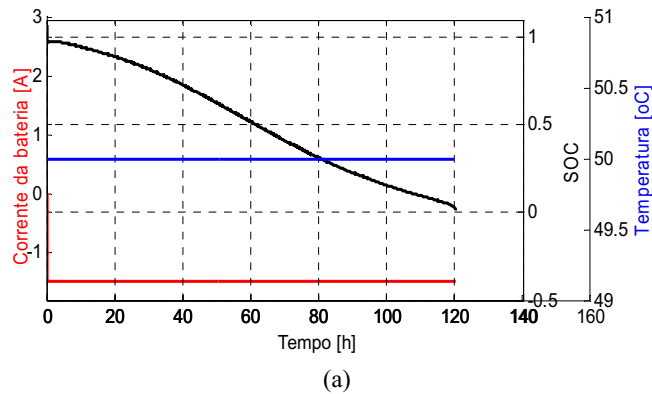


(a)

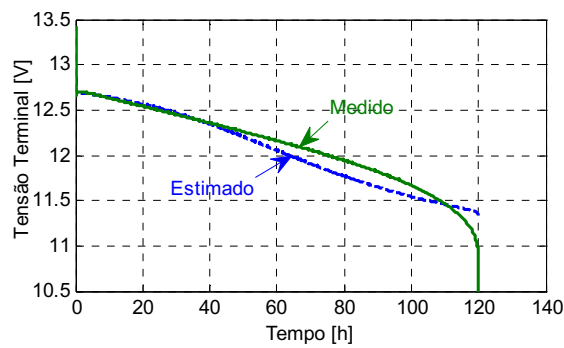


(b)

Figura 5.4. Resultados de simulação para o período de carga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada (determinação dos parâmetros por pontos da curva).



(a)



(b)

Figura 5.5. Resultados de simulação para o período de descarga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada

### 5.3 Simulações do modelo de bateria para cargas e descargas de curta e longa duração

O modelo de bateria de chumbo ácido para curtas e longas cargas e descargas [5], retomado na figura 5.6, a determinação dos parâmetros se divide em três partes: Parâmetros empíricos; parâmetros de fabricação da bateria e os parâmetros obtidos a partir de ensaios de carga e descarga.

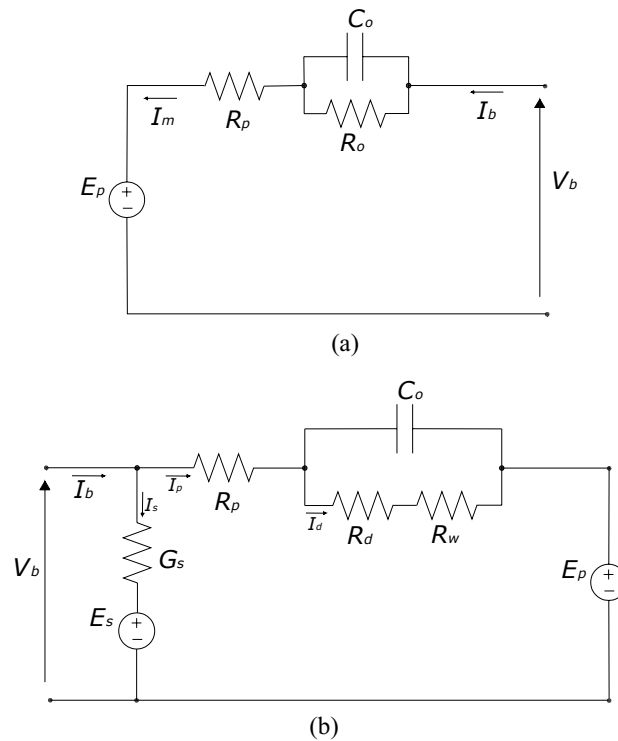
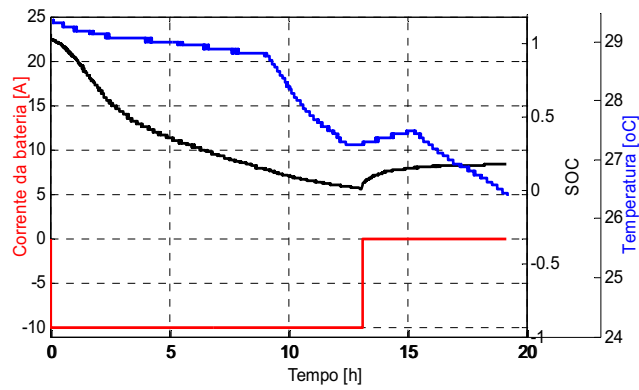


Figura 5.6. Modelo da bateria de Chumbo ácido. (a) Modelo para descargas de curta duração; (b) Modelo para cargas e descargas de longa duração.

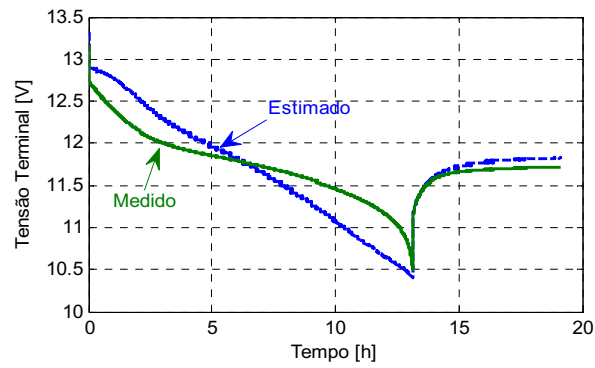
Os valores das constantes determinadas são verificados na tabela 5.2. A comparação de desempenho do modelo para as constantes determinadas são observadas nas figuras 5.7 - 5.9, neste experimento é utilizado apenas o modelo para longas cargas e descargas. As rotinas de simulação são verificadas nos apêndices VII-VIII.

Tabela 5.2. Parâmetros determinados para o modelo de bateria para cargas e descargas para longa duração

Parâmetros Empíricos			Constantes experimentais
$k_c = 1.05$	$G_{so} = 0.4 \text{ pS}$	$A_{d2} = 15$	$R_{po} = 1e-5 \text{ } \Omega$
$S = 0.2$	$k_e = 0.4 \text{ mV}/^\circ\text{C}$	$A_{d3} = -8.45$	$R_{wo} = 0.03 \text{ } \Omega$
$E = 0.6$	$\theta_p = 1.2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$	$A_{s\theta} = 9.95 \text{ } 1/\text{V}$	$R_{do} = 50e-3 \text{ } \Omega$
$B = -0.006$	$Ad1 = 8.5 \text{ e-3}$	$Aso = 0.07 \text{ oC-1}$	$R_{cp} = 1.1e-3 \text{ } \Omega$

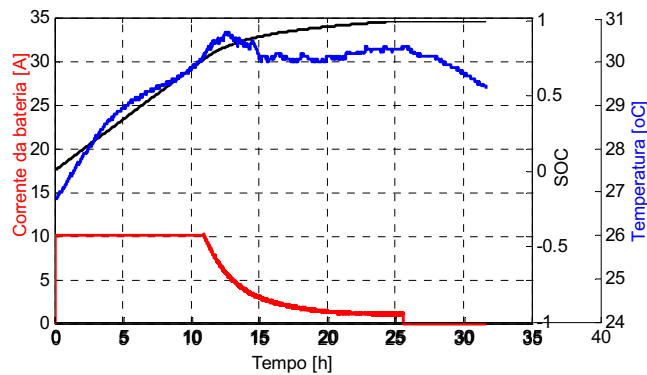


(a)



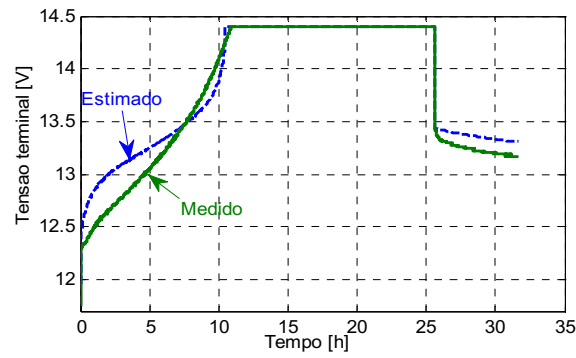
(b)

Figura 5.7. Resultados de simulação para o período de descarga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada.



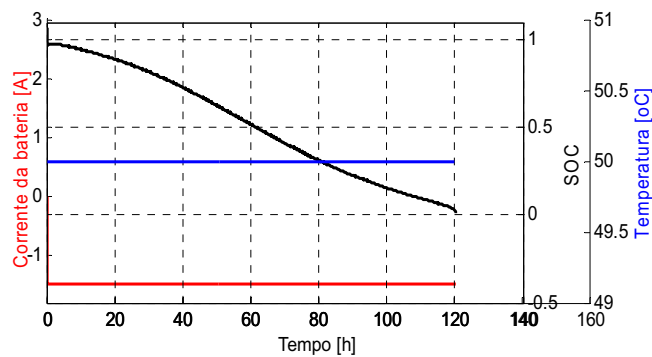
(a)



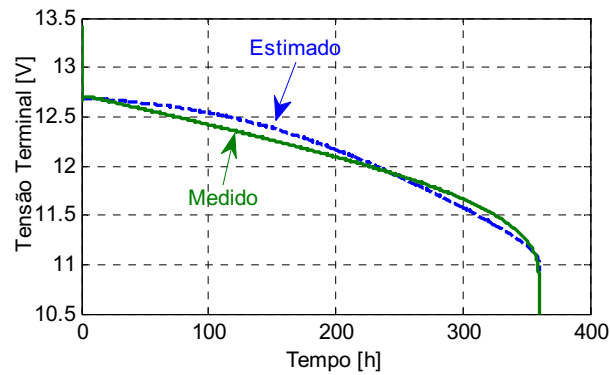


(b)

Figura 5.8. Resultados de simulação para o período de carga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada.



(a)



(b)

Figura 5.9. Resultados de simulação para o período de descarga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada.

#### 5.4 Simulações do modelo de bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem

O modelo de bateria de chumbo ácido melhorado a partir da aproximação de quarta ordem [5], retomado na figura 5.10. Os parâmetros aproximados por uma função de exponencial,

discutidos em 2.4, cujos ganhos e fatores de multiplicação são determinados a partir de ensaios de carga, descarga e dados de manufatura.

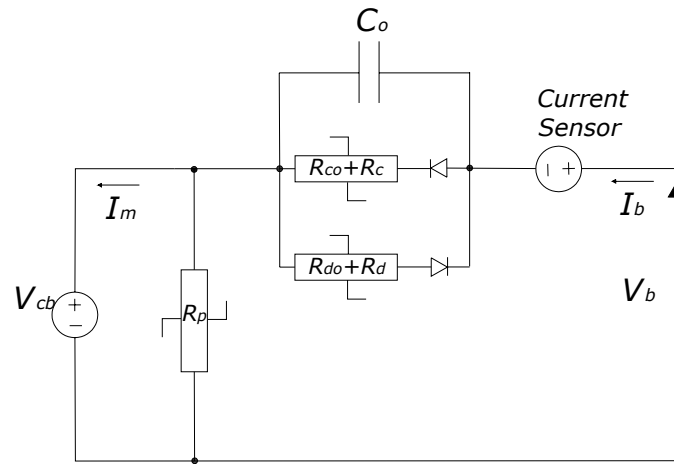
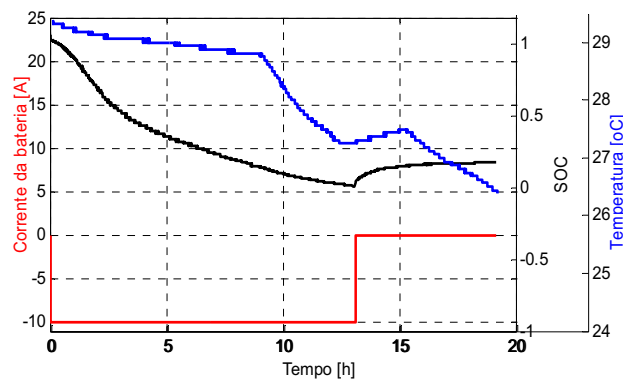


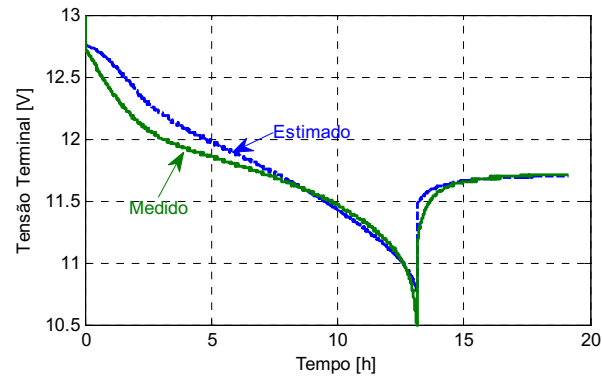
Figura 5.10. Modelo da bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem.

Os valores dos parâmetros do circuito são determinados por ajuste polinomial dos valores medidos destas resistências em ensaios de carga e descarga. Na referência bibliográfica é apresentada uma tabela com valores dos parâmetros para diferentes tensões de circuito aberto e estados de carga. A partir desta tabela realiza-se uma aproximação polinomial, utilizando as funções *polyfit* e *polyval*, obtém-se a equação característica da cada parâmetro em função da tensão interna ou do SOC. As rotinas de simulação são verificadas nos apêndices IX-X.

A comparação de desempenho do modelo para os parâmetros aproximados por ajuste polinomial é observada nas figuras 5.11 - 5.13.

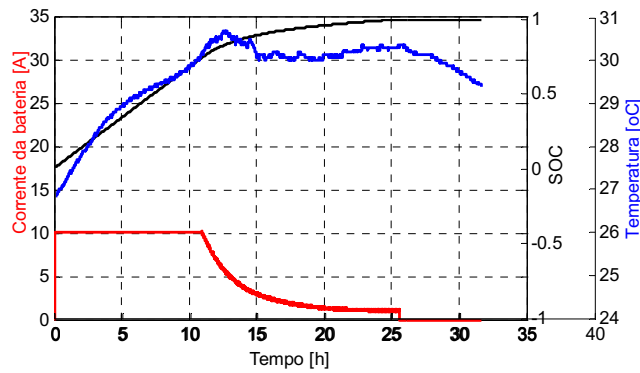


(a)

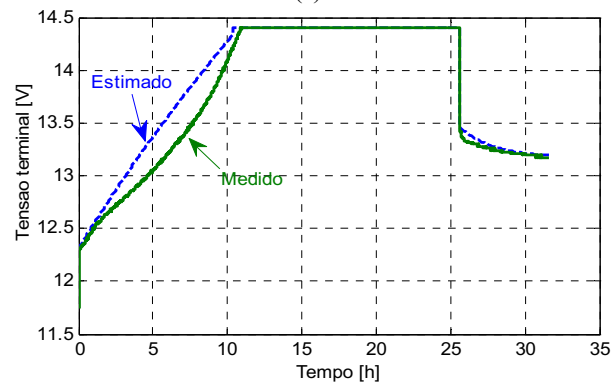


(b)

Figura 5.11. Resultados de simulação para o período de descarga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada.

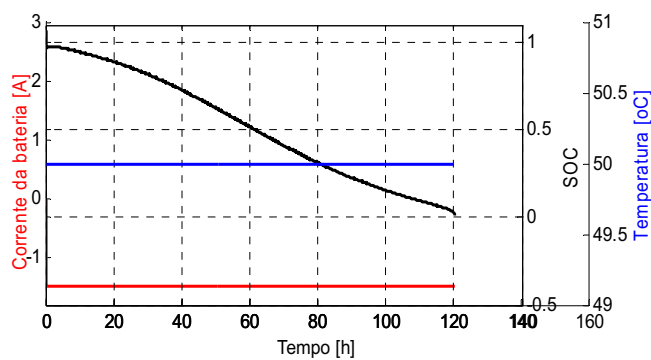


(a)

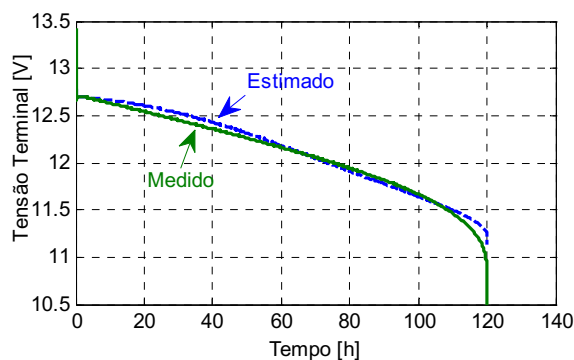


(b)

Figura 5.12. Resultados de simulação para o período de carga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada.



(a)



(b)

Figura 5.13. Resultados de simulação para o período de descarga. (a) Características do ensaio; (b) Tensão terminal medida e estimada.

### 5.5 Implementação do modelo de baterias em *simulink*<sup>®</sup>

A utilização do *simulink*<sup>®</sup> para simulação dos modelos de baterias permite construir uma rotina de simulação simples e compreensível utilizando apenas blocos gráficos. A descrição do modelo de simulação de baterias com *simulink*<sup>®</sup> foi proposto em [17], fazendo uso do modelo de bateria por aproximação de terceira ordem [3]-[4].

Em aplicações com as baterias do LEIAM, a construção do modelo de aproximação de terceira ordem com estimação do SOC a partir de RNA no *simulink*<sup>®</sup> é verificada na figura 5.14. Este modelo foi implementado e avaliado para uma sequência de testes de carga e descarga, nestes testes considera-se que o SOC na descarga é determinado com RNA e no período de carga com a contagem de Ah.

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande  
 Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
 Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
 Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Maquinas

Orientador : Mauricio  
 Aluno : Joab Leão  
 Modelo de Bateria por aproximacao de terceira ordem

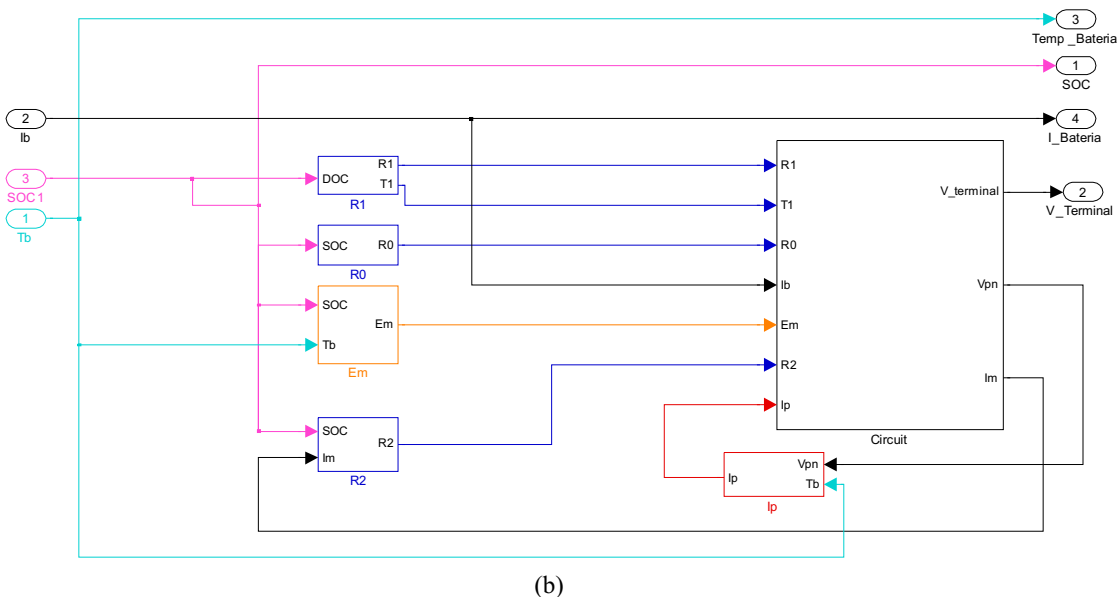
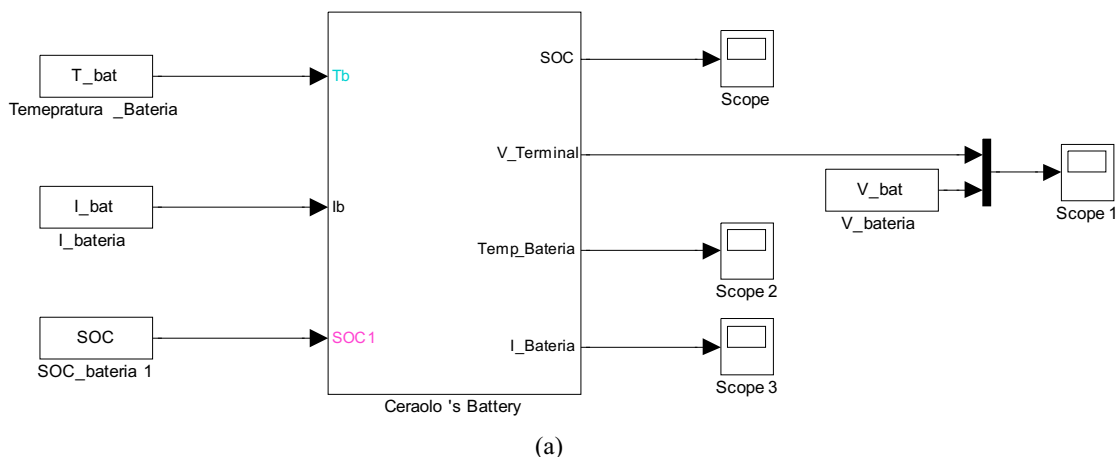


Figura 5.14. Modelo de bateria implementado em Simulink<sup>®</sup>. (a) Construção geral; (b) Construção interna.

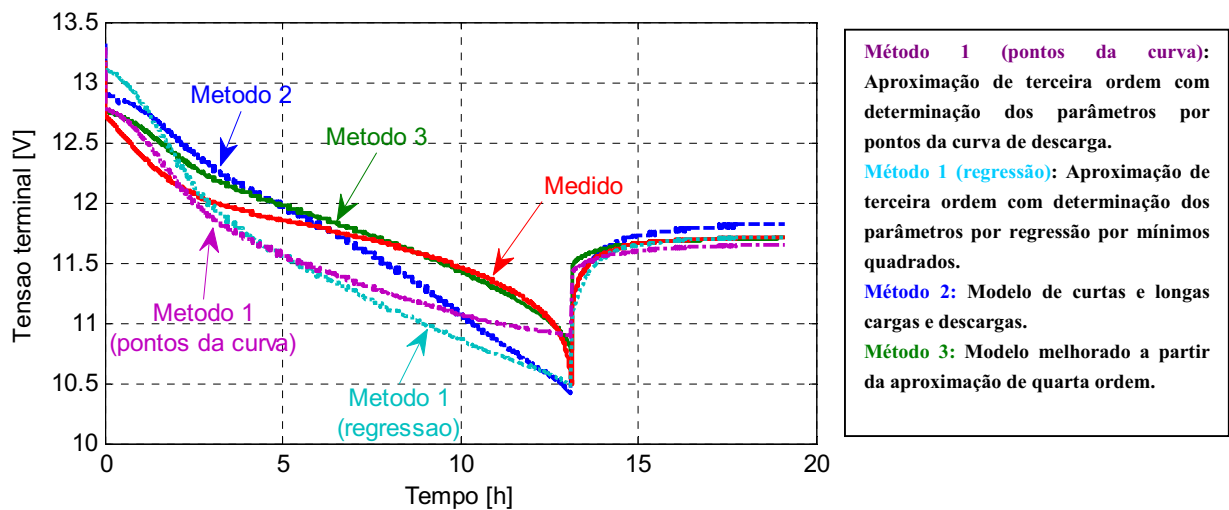
A construção do modelo de simulação no simulink<sup>®</sup> é uma técnica que visa à abstração do modelo básico com implementação mais compreensível e cujos resultados finais são iguais comparados aos modelos com linha de código. Logo, esta construção é uma alternativa para simular o comportamento das baterias.

## 5.6 Considerações finais

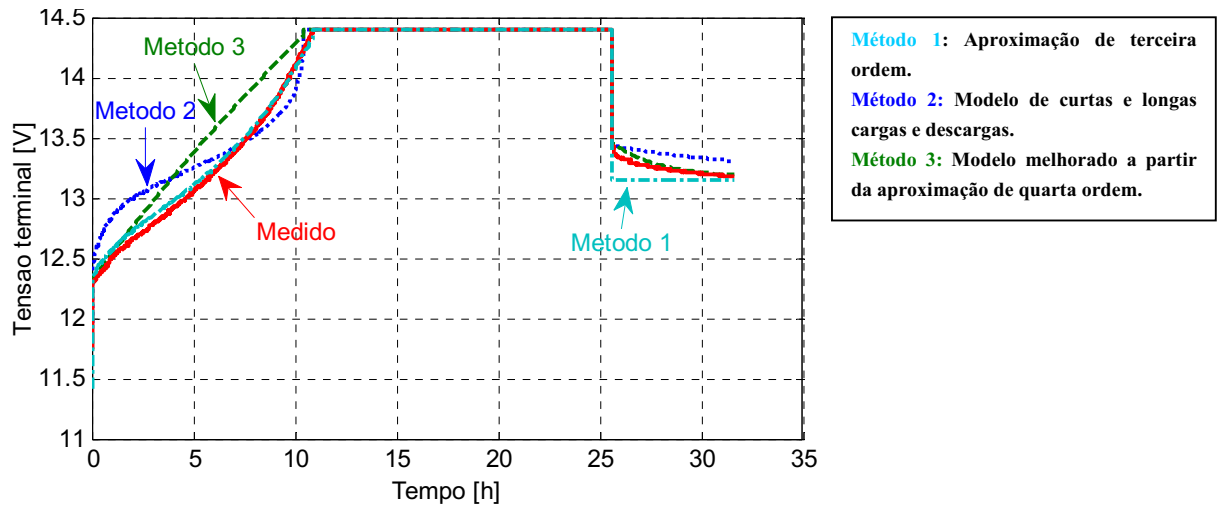
Os modelos de baterias abordados são úteis para:

- Estimar o tempo necessário, em determinadas condições de carga, para a bateria atingir a tensão máxima ( $V_b=14.403\text{ V}$ );
- Estimar o tempo necessário, em determinadas condições de descarga, para a bateria atingir a tensão mínima ( $V_b=10.5\text{ V}$ ).
- Analisar o comportamento da bateria para diferentes condições (temperatura, corrente e tempo de vida adversos) de carga, descarga e problemas com a bateria.

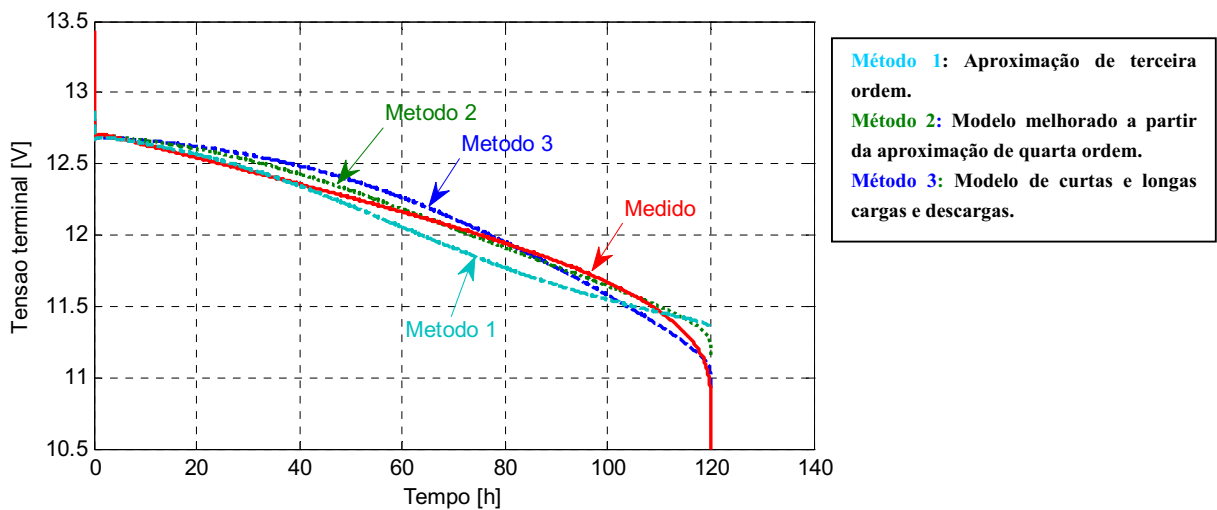
Estes objetivos são consequência da estimação da tensão terminal da bateria. A análise comparativa dos três métodos simulados é verificada nas figuras 5.15-5.17.



5.15. Simulações para o período de descarga.



5.16. Simulações para o período de carga.



5.17. Simulações para o período de descarga.

Assim, verifica-se na tabela 5.3 o balanço da comparação dos três modelos de baterias aplicadas a modelização de baterias de Chumbo-ácido com capacidade de 150 Ah.

Tabela 5.3. Balanço dos modelos aplicados a baterias de Chumbo-ácido com capacidade de 150 Ah.

Modelo da bateria	Vantagens	Desvantagens
Modelo por aproximação de terceira ordem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa estimativa do comportamento da tensão terminal no período de carga.</li> <li>• Contempla o ramo de perdas da bateria.</li> <li>• Existência do método de obtenção dos constantes do modelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimativa razoável do comportamento da tensão termina no período de descarga.</li> <li>• As constantes do modelo modificam-se de acordo com as condições do teste.</li> </ul>
Modelo para cargas e descargas de curta e longa duração	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa estimativa da tensão terminal na condição de descarga a temperatura constante.</li> <li>• Modelos diferenciados de acordo com o tipo de ensaio, curto ou longo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inexistência de um método de determinação das constantes do modelo.</li> <li>• Grande quantidade de constantes, boa parte empíricas.</li> <li>• Estimativa imprecisa do comportamento da tensão terminal em condições de temperatura variável.</li> </ul>
Modelo melhorado a partir da aproximação de quarta ordem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa estimativa do comportamento da tensão terminal no período de descarga.</li> <li>• Modelo de implementação simples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inexistência de um método de determinação das constantes do modelo.</li> <li>• Não contempla as perdas observadas devido a altas tensões na bateria.</li> </ul>



## 6. Conclusão

A modelização de baterias de Chumbo-ácido é um exercício extremamente complexo devido as características não lineares da reação química envolvida. Os modelos analisados retratam em parte este comportamento, pois o desempenho não é mantido para diferentes condições de temperatura e corrente. Os métodos de regressão por mínimos quadrados propostos, para calcular as constantes, podem vir a facilitar o ajuste rápido do modelo, todavia estabelecer um modelo único, robusto, capaz de estimar com precisão o comportamento da bateria requer um conhecimento profundo do comportamento químico da bateria, bem como dados de ensaios mais específicos, como, por exemplo, ensaios a temperatura constante para diferentes correntes e vice-versa.

Apesar de negligenciado, o efeito do tempo de utilização da bateria sobre o comportamento da bateria é notável, entretanto esta análise confronta-se com a lenta dinâmica da bateria, e ponderar este efeito requerirá um vasto tempo (meses ou até anos) de análise de uma única bateria.

O método de determinação do SOC para o período de descarga através de uma RNA tem apresentado resultados coerentes e convincentes que proporciona grandes perspectivas de estudos na generalização deste método para a condição de carga. A determinação do SOC é relevante para o gerenciamento da energia disponível na bateria, e a avaliação do tempo de vida da bateria.

É necessário compreender que a cinética de uma reação química depende dos fatores que alteram a reação (Temperatura, Pressão, Concentração dos reagentes, Impurezas, entre outros fatores), sendo assim, o comportamento de uma bateria sofre significativas variações de acordo com a variação de um destes fatores. Logo, um bom modelo de bateria é um modelo capaz de contemplar todas estas características e certamente um modelo confiável de estimativa do SOC é o primeiro passo.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] R. Giglioli, Buaonarota and M. Ceraolo, "Charge and Discharge Fourth Order Dynamic Model of the Lead Battery," *10th Int'l Electric Vehicle Symposium*, Hong Kong, 1990, pp. 371-382, December 1990.
- [2] H. L. Chan and D. Sutanto, "A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems," *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, Vol. 01, pp 470-475, January 2000.
- [3] S. Barsali and M. Ceraolo, "Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues," *IEEE Transactions on Energy conversion*, Vol. 17, No. 1, pp. 16-23, March 2002.
- [4] M. Ceraolo, "New Dynamical Models of Lead-Acid Batteries," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 1184-1190, November 2000.
- [5] C. J. Zhan, X. Z. Wu, S Kromlidis, V. K. Ramachandaramurthy, M. Barnes, N. Jenkins and A.J. Ruddell, "Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer," *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 150, No. 2, pp. 175-182, March 2003.
- [6] Z. M. Salameh, M. A. Casacca and W. A. Lynch, "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 7, No. 1, pp. 93-98, March 1992.
- [7] S. Mischie and D. Stoiciu, "A New and Improved Model of a Lead Acid Battery," *Ser.: Elec. Energ.* Vol. 20, No. 2, pp 187-202, August 2007.
- [8] S. Piller, M. Perrin and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination on their applications," *Journal of Power Sources* 96, pp 113-120, 2001.
- [9] D. J. Deepti and V. Ramanarayanan, "State of Charge of Lead-Acid Battery," *Proceeding of India International Conference on Power Electronics*, pp 89-93, 2006.
- [10] C. B. Zhu, M. Coleman and W. G. Hurley, "State of Charge Determination in a Lead-Acid Battery: Combined EMF Estimation and Ah-Balanced Approach," *35<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp 1908-1914, Germany 2004.
- [11] M. Coleman, C. K. Lee, C. Zhu and W. G. Hurley, "State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 5, pp 2550-2557, October 2007.

- [12] Y. Morita, S. Yamamoto, S. H. Lee and N. Mizuno, "On-Line Detection of State-of-Charge in Lead-Acid Battery Using Both Neural Network and On-Line Identification," *IEEE*, pp 3379-3384, 2006.
- [13] C. C. Chan, E. W. C. Lo and S. Weixiang, "The available capacity computation model based on artificial neural network for lead-acid batteries in electric vehicles," *Journal of Power Sources* 87, pp 201-204, 2000.
- [14] A. J. Salkind, C. Fennie, P. Singh, T. Atwater and D. E. Reisner, "Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology," *Journal of Power Sources* 80, pp 293-300, 1999.
- [15] G. Bittencourt, "Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias," Capítulo 6: Conexionismo, Editora da UFSC, Florianópolis 1998.
- [16] H. Demuth, M. Beale and M. Hagan, Neural Network Toolbox™ 6, User's Guide from MATLAB, Revised for Version 6.0.1 (Release 2008b), October 2008.
- [17] R. A. Jackey, "A Simple, Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection," The MathWorks, Inc., 2007

## 8. ANEXOS

**Anexo I: Resolução CONAMA Nº 257, de 30 de junho de 1999**

Publicada no DOU de 22 de julho de 1999

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama, no uso das atribuições e competências que lhe são conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981 e pelo Decreto nº 99.274, de 6 de junho de 1990, e conforme o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando os impactos negativos causados ao meio ambiente pelo descarte inadequado de pilhas e baterias usadas;

Considerando a necessidade de se disciplinar o descarte e o gerenciamento ambientalmente adequado de pilhas e baterias usadas, no que tange à coleta, reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final;

Considerando que tais resíduos além de continuarem sem destinação adequada e contaminando o ambiente necessitam, por suas especificidades, de procedimentos especiais ou diferenciados, resolve:

**Art. 1º** As pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos, necessárias ao funcionamento de quaisquer tipos de aparelhos, veículos ou sistemas, móveis ou fixos, bem como os produtos eletro-eletrônicos que as contenham integradas em sua estrutura de forma não substituível, após seu esgotamento energético, serão entregues pelos usuários aos estabelecimentos que as comercializam ou à rede de assistência técnica autorizada pelas respectivas indústrias, para repasse aos fabricantes ou importadores, para que estes adotem, diretamente ou por meio de terceiros, os procedimentos de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final ambientalmente adequada.

Parágrafo Único. As baterias industriais constituídas de chumbo, cádmio e seus compostos, destinadas a telecomunicações, usinas elétricas, sistemas ininterruptos de fornecimento de energia, alarme, segurança, movimentação de cargas ou pessoas, partida de motores diesel e uso geral industrial, após seu esgotamento energético, deverão ser entregues pelo usuário ao fabricante ou ao importador ou ao distribuidor da bateria, observado o mesmo sistema químico, para os procedimentos referidos no *caput* deste artigo.

**Art. 2º** Para os fins do disposto nesta Resolução, considera-se:

I - bateria: conjunto de pilhas ou acumuladores recarregáveis interligados convenientemente.(NBR 7039/87);

II - pilha: gerador eletroquímico de energia elétrica, mediante conversão geralmente irreversível de energia química.(NBR 7039/87);

III - acumulador chumbo-ácido: acumulador no qual o material ativo das placas positivas é constituído por compostos de chumbo, e os das placas negativas essencialmente por chumbo, sendo o eletrólito uma solução de ácido sulfúrico. (NBR 7039/87);

IV - acumulador (elétrico): dispositivo eletroquímico constituído de um elemento, eletrólito e caixa, que armazena, sob forma de energia química a energia elétrica que lhe seja fornecida e que a restitui quando ligado a um circuito consumidor.(NBR 7039/87);

V - baterias industriais: são consideradas baterias de aplicação industrial, aquelas que se destinam a aplicações estacionárias, tais como telecomunicações, usinas elétricas, sistemas ininterruptos de fornecimento de energia, alarme e segurança, uso geral industrial e para partidas de motores diesel, ou ainda tracionárias, tais como as utilizadas para movimentação de cargas ou pessoas e carros elétricos;

VI - baterias veiculares: são consideradas baterias de aplicação veicular aquelas utilizadas para partidas de sistemas propulsores e/ou como principal fonte de energia em veículos automotores de locomoção em meio terrestre, aquático e aéreo, inclusive de tratores, equipamentos de construção, cadeiras de roda e assemelhados;

VII - pilhas e baterias portáteis: são consideradas pilhas e baterias portáteis aquelas utilizadas em telefonia, e equipamentos eletro-eletrônicos, tais como jogos, brinquedos, ferramentas elétricas portáteis, informática, lanternas, equipamentos fotográficos, rádios, aparelhos de som, relógios, agendas eletrônicas, barbeadores, instrumentos de medição, de aferição, equipamentos médicos e outros;

VIII - pilhas e baterias de aplicação especial: são consideradas pilhas e baterias de aplicação especial aquelas utilizadas em aplicações específicas de caráter científico, médico ou militar e aquelas que sejam parte integrante de circuitos eletro-eletrônicos para exercer funções que requeiram energia elétrica ininterrupta em caso de fonte de energia primária sofrer alguma falha ou flutuação momentânea.

**Art. 3º** Os estabelecimentos que comercializam os produtos descritos no art.1º, bem como a rede de assistência técnica autorizada pelos fabricantes e importadores desses produtos, ficam obrigados a aceitar dos usuários a devolução das unidades usadas, cujas características sejam similares àquelas comercializadas, com vistas aos procedimentos referidos no art. 1º.

**Art. 4º** As pilhas e baterias recebidas na forma do artigo anterior serão acondicionadas adequadamente e armazenadas de forma segregada, obedecidas as normas ambientais e de saúde pública pertinentes, bem como as recomendações definidas pelos fabricantes ou importadores, até o seu repasse a estes últimos.

**Art. 5º** A partir de 1º de janeiro de 2000, a fabricação, importação e comercialização de pilhas e baterias deverão atender aos limites estabelecidos a seguir:

I - com até 0,025% em peso de mercúrio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês;

II - com até 0,025% em peso de cádmio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês;

III - com até 0,400% em peso de chumbo, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês;

IV - com até 25 mg de mercúrio por elemento, quando forem do tipo pilhas miniaturas e botão.

**Art. 6º** A partir de 1º de janeiro de 2001, a fabricação, importação e comercialização de pilhas e baterias deverão atender aos limites estabelecidos a seguir:

I - com até 0,010% em peso de mercúrio, quando forem do tipo zinco-manganês e alcalina-manganês;

II - com até 0,015% em peso de cádmio, quando forem dos tipos alcalina-manganês e zinco-manganês;

III - com até 0,200% em peso de chumbo, quando forem dos tipos alcalina-manganês e zinco-manganês.

**Art. 7º** Os fabricantes dos produtos abrangidos por esta Resolução deverão conduzir estudos para substituir as substâncias tóxicas potencialmente perigosas neles contidas ou reduzir o teor das mesmas, até os valores mais baixos viáveis tecnologicamente.

**Art. 8º** Ficam proibidas as seguintes formas de destinação final de pilhas e baterias usadas de quaisquer tipos ou características:

I - lançamento "*in natura*" a céu aberto, tanto em áreas urbanas como rurais;

II - queima a céu aberto ou em recipientes, instalações ou equipamentos não adequados, conforme legislação vigente;

III - lançamento em corpos d'água, praias, manguezais, terrenos baldios, poços ou cacimbas, cavidades subterrâneas, em redes de drenagem de águas pluviais, esgotos, eletricidade ou telefone, mesmo que abandonadas, ou em áreas sujeitas à inundação.

**Art. 9º** No prazo de um ano a partir da data de vigência desta resolução, nas matérias publicitárias, e nas embalagens ou produtos descritos no art. 1º deverão constar, de forma visível, as advertências sobre os riscos à saúde humana e ao meio ambiente, bem como a necessidade de, após seu uso, serem devolvidos aos revendedores ou à rede de assistência técnica autorizada para repasse aos fabricantes ou importadores.

**Art. 10** Os fabricantes devem proceder gestões no sentido de que a incorporação de pilhas e baterias, em determinados aparelhos, somente seja efetivada na condição de poderem ser facilmente substituídas pelos consumidores após sua utilização, possibilitando o seu descarte independentemente dos aparelhos.

**Art. 11.** Os fabricantes, os importadores, a rede autorizada de assistência técnica e os comerciantes de pilhas e baterias descritas no art. 1º ficam obrigados a, no prazo de doze meses contados a partir da vigência desta resolução, implantar os mecanismos operacionais para a coleta, transporte e armazenamento.

**Art. 12.** Os fabricantes e os importadores de pilhas e baterias descritas no art. 1º ficam obrigados a, no prazo de vinte e quatro meses, contados a partir da vigência desta Resolução, implantar os sistemas de reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final, obedecida a legislação em vigor.

**Art. 13.** As pilhas e baterias que atenderem aos limites previstos no artigo 6º poderão ser dispostas, juntamente com os resíduos domiciliares, em aterros sanitários licenciados.

Parágrafo Único. Os fabricantes e importadores deverão identificar os produtos descritos no *caput* deste artigo, mediante a aposição nas embalagens e, quando couber, nos produtos, de símbolo que permita ao usuário distinguí-los dos demais tipos de pilhas e baterias comercializados.

**Art. 14.** A reutilização, reciclagem, tratamento ou a disposição final das pilhas e baterias abrangidas por esta resolução, realizadas diretamente pelo fabricante ou por terceiros, deverão ser processadas de forma tecnicamente segura e adequada, com vistas a evitar riscos à saúde humana e ao meio ambiente, principalmente no que tange ao manuseio dos resíduos pelos seres humanos, filtragem do ar, tratamento de efluentes e cuidados com o solo, observadas as normas ambientais, especialmente no que se refere ao licenciamento da atividade.

Parágrafo Único. Na impossibilidade de reutilização ou reciclagem das pilhas e baterias descritas no art. 1º, a destinação final por destruição térmica deverá obedecer as condições técnicas previstas na NBR - 11175 - Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - e os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução Conama nº 03, de 28 de junho de 1990.

**Art. 15.** Compete aos órgãos integrantes do SISNAMA, dentro do limite de suas competências, a fiscalização relativa ao cumprimento das disposições desta resolução.

**Art. 16.** O não cumprimento das obrigações previstas nesta Resolução sujeitará os infratores às penalidades previstas nas Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

**Art. 17.** Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.



## 9. APÊNDICES

## Apêndice I

Rotina de interpolação da tensão terminal da bateria para uma faixa de temperaturas, mantendo a corrente de descarga constante.

```
% UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
% CEEI - Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% UAEE - Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM - Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Maquinas

% Rotina de Interpolação da tensão terminal da bateria (corrente de descarga de
%1.8 A)

clear all;
clc;

load Dados_18_27
dd=1;
ii=1;
amost=0;
t=0;
E=size(OUT_DADOS);
while dd < E(2)
    if amost <= dd
        Vb(1,ii)=DADOS(1,dd);
        time(1,ii)=t;
        tempol(ii)=time(1,ii);
        T1(ii)=27;
        V1(ii)=DADOS(1,dd);
        Vi(2,ii)=DADOS(1,dd);
        ti(2,ii)=time(1,ii);
        soc(1,ii)=OUT_DADOS(dd);
        ii=ii+1;
        amost=amost+10;
    end
    t=t+30/3600;
    dd=dd+1;
end
dd=1;
load Dados_18_50;
ii=1;
t=0;
E=size(OUT_DADOS);
amost=0;
while dd < E(2)
    if amost <= dd
        Vb(2,ii)=DADOS(1,dd);
        time(2,ii)=t;
        soc(2,ii)=OUT_DADOS(dd);
        tempo2(ii)=time(2,ii);
        T2(ii)=50;
        V2(ii)=DADOS(1,dd);
```

```
        ii=ii+1;
        amost=amost+31.1041;
    end
    t=t+30/3600;
    dd=dd+1;
end

% Para a corrente de descarga de -1.8A
x=[27 50];
x1=27:1:50;
Vv_18=interp1(x,Vb,x1); % mesh(tt_18,x1,Vv_18)
tt_18=interp1(x,time,x1);
SOC_18=interp1(x,soc,x1);
mesh(tt_18/3,x1,Vv_18)
hold on
plot3(tempo1/3,T1,V1) % Tempo em horas
plot3(tempo2/3,T2,V2)
hold off

%-----
```

## Apêndice II

Rotina de ajuste da tensão terminal da bateria, para um ensaio de descarga com temperatura constante.

```
% UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
% CEEI - Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% UAEE - Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM - Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Maquinas

clc;
clear all;
load ajuste;

fun = fittype('12.46-a*(1-x)+b*log(x)');
[c2,gof2] = fit(SOCaj,Vaj,fun);

% Resultado do ajuste

Z=12.46 - 0.6353.*(1-SOCaj)+ 0.1744.*log(SOCaj);
figure(1),plot(Z);
hold on
plot(Vaj);
hold off;
```

## Apêndice III

Rotina de formação da rede neural artificial, utilizando o Matlab<sup>®</sup> 2008b.

```
% UFCG - Universidade Federal de Campina Grande
% CEEI - Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% UAEE - Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM - Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Maquinas
% Formação da Rede Neural Artificial

clear all;
clc;
load dados_conj2;

net=newfit(DADOST,OUT_DADOST,5); % Método de ajuste de Curva Fitting a Function
% net=newpr(DADOST,OUT_DADOST,5); % Método de ajuste de Reconitivo
net=train(net,DADOST,OUT_DADOST);

SOC1=sim(net,DADOST);
figure(1),plot(SOC1);

load dados_conjunto;
SOC=sim(net,DADOST);
figure(2),plot(OUT_DADOST);
hold on
plot(SOC);
hold off;
```

## Apêndice IV

Rotina de avaliação do desempenho da estimação do SOC.

```

% Universidade Federal de Campina Grande
% Centro de Engenharia Eletrica e Informatica
% Unidade Academica de Engenharia Eletrica
% LEIAM
%
% Comparativo de Desempenho dos metodos

clc;
clear all;

load rede5;
load Dados_LEIAM;
tt=1;
cap_T=0;
E=size(Inp_dados);
while tt <= E(2)
    cap_T= cap_T+abs(Inp_dados(3,tt))*1/3600;
    tt=tt+1;
end

capp=cap_T;
dd=1;
while dd <= E(2)
    capp=capp+Inp_dados(3,dd)*1/3600;
    SOC_Ah(dd) = capp/cap_T;
    Ib(dd)=Inp_dados(3,dd);
    Tb(dd)=Inp_dados(2,dd);
    Vb(dd)=Inp_dados(1,dd);
    t(dd)=dd;
    dd=dd+1;
end
SOC_RNA =sim(net,Inp_dados); % SOC - RNA
SOC_V_ca=0.3743*Inp_dados(1,50)-3.9296;
figure(1),line(t/3600,Ib,'LineWidth',2,'Color','r');
ax1 = gca;
set(ax1,'XColor','k','YColor','k');
ax2 = axes('Position',get(ax1,'Position'),'YAxisLocation','right',...
    'Color','none','XColor','k','YColor','k');
line(t/3600,Vb,'LineWidth',2,'Color','k','Parent',ax2);
ax3 = axes('Position',get(ax1,'Position'),'YAxisLocation','right',...
    'Color','none','XColor','k','YColor','k');
line(t/3600,Tb,'LineWidth',2,'Color','b','Parent',ax3);

figure(2),plot(t/3600,SOC_Ah,t/3600,SOC_RNA,50/3600,SOC_V_ca,'o')

load Dados_18_50;
tt=1;
E=size(DADOS);
dd=1;
while dd <= E(2)
    Ib1(dd)=DADOS(3,dd);

```

```
Tb1(dd)=DADOS(2,dd);
Vb1(dd)=DADOS(1,dd);
t1(dd)=dd+29;
dd=dd+1;
end
SOC_RNA1 =sim(net,DADOS); % SOC - RNA
SOC_V_ca1=0.3743*DADOS(1,1)-3.7296;
figure(3),line(t1/360,Ib1,'LineWidth',2,'Color','r');
ax1 = gca;
set(ax1,'XColor','k','YColor','k');
ax2 = axes('Position',get(ax1,'Position'),'YAxisLocation','right',...
          'Color','none','XColor','k','YColor','k');
line(t1/360,Vb1,'LineWidth',2,'Color','k','Parent',ax2);
ax3 = axes('Position',get(ax1,'Position'),'YAxisLocation','right',...
          'Color','none','XColor','k','YColor','k');
line(t1/360,Tb1,'LineWidth',2,'Color','b','Parent',ax3);

figure(4),plot(t1/360,OUT_DADOS,t1/360,SOC_RNA1,1/360,SOC_V_ca1,'o')
```

## Apêndice V

Rotina de simulação do modelo da bateria por aproximação de terceira ordem utilizando o método de determinação por mínimo quadrado aprimorado.

```

% Universidade Federal de Campina Grande
% Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM
%
% Comparativo de Desempenho dos métodos

close all
clear all
clc
% Condições iniciais
Im=0;
I1=0;
R1=0;
R0=0;
Vc=0;
Q=0;
% Condições de simulação
h=1.095e-2;
% Constantes referentes aos parametros eletricos do modelo
Roo = 0.044;
Emo = 12.78;%13.172;
ke=0.0059;
T1 = 4000;
R1o = 0.032;%0.32
dd=1;

% load Dados_20081217_soc_rna;
load Dados_moura_147_50;
E=size(Vb);

while dd <= E(2)    % voir

    % Calculo dos elementos do modelo
    A = 0.05658;
    ke = 0.0042*(273+Tb(dd));
    R1 = -R1o*log(SOC(dd));

    Vpn = Emo - ke*(1-SOC(dd)) + R1*I1;
    V_medido(dd) = Vpn + Roo*Ib(dd) + A*Roo*Ib(dd)*(1 - SOC(dd));

    if R1 ~= 0
        C1 = T1/R1;
        dVc = (Ib(dd)-I1)/C1;
        Vc = Vc + dVc*1e-1;
        I1 = Vc/R1;
    end
    dd=dd+1;

```



end

Algoritmo de regressão

```
clear all;
% load EM_min_quad;
% Em=Emo-Kc*(273+Tb1)*(1-SOC) X=[Emo Kc] - B=[1 (273+Tb1)*(1-SOC)]
load dados_reg_rna_marco2
clc
ee=size(soc);
dd=1;
while dd <= ee(2)
    A(dd,1)=1;
    A(dd,2)=-1*(273+Tb1(dd))*(1-soc(dd));
    dd=dd+1;
end
X=inv(A'*A)*A'*Em'
% X(1)=Emo, X(2)=Kc

load Ro_min_quad;
% Ro=Roo*Ib+A*Roo*(1-SOC)*Ib - Y=[Roo A*Roo] - B=[1 1-SOC]
ee=size(soc);
dd=1;
while dd <= ee(2)
    B(dd,1)=1;
    B(dd,2)=(1-soc(dd));
    dd=dd+1;
end
Y=inv(B'*B)*B'*Ro'
% Y(1)=Roo, Y(2)=A*Roo
```

## Apêndice VI

Rotina de simulação do modelo da bateria por aproximação de terceira ordem utilizando o método de determinação por pontos da curva de descarga.

```

% Universidade Federal de Campina Grande
% Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM
%
% Comparativo de Desempenho dos métodos - Modelo de carga

close all
clear all
clc

% Condições iniciais
Im=0;
I1=0;
R1=0;
R0=0;
wx=0;

% Condições de simulação
h=5e-1;
% Constantes referentes aos parâmetros elétricos do modelo

Roo = 0.042175;
Emo = 13.172;
T1 = 4000;
R1o = 0.0319/3;
R2o=1.5;
A21=-3.513;
A22=3;

Ap=9.21;
Gpo=1e-12;
Vno=1.484;

Vpn=0;
Vc=0;
dd=1;
Ip=0;

load Dados_20081216;
E=size(Vb);

while dd <= E(1)

    if SOC_2(dd)==0
        SOC_2(dd)=0.01;
    end
    Ip=Vpn*Gpo*exp(Vpn/Vno+Ap*(1+Tb(dd)/40));

```

```

    if Ip >= Ib(dd)
        Ip=Ib(dd);
    end
    Im = Ib(dd)-Ip;
    if R1 ~= 0
        C1 = T1/R1;
        dVc = (Im-I1)/C1;
        Vc = Vc + dVc*h;
        I1 = Vc/R1;
    end

    % Calculo dos elementos do modelo

    A = 0.9849;
    ke = 0.0059*(273+Tb(dd));
    R1 = -R1o*log(SOC_2(dd));
    R2 = R2o*exp(A21*(1-SOC_2(dd)))/(1+exp(A22*Im/20));

    Vpn = Emo - ke*(1-SOC_2(dd)) + R1*I1 + R2*Im;
    V_medido(dd) = Vpn + Roo*Ib(dd) + A*Roo*Ib(dd)*(1 - SOC_2(dd));

    % Equalização

    if t(dd) > 10.918*3600 && t(dd) < 25.63*3600
        V_medido(dd) = 14.403;
    end

    dd=dd+1;
end

```

## Apêndice VII

Rotina de simulação do modelo de bateria para curtas e longas cargas e descargas.

```

% Universidade Federal de Campina Grande
% Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM
%
% Comparativo de Desempenho dos métodos - Modelo de descarga

close all
clear all
clc

% Condições iniciais
cap = 0;
SOC = 0.1;
Id = 0;
Ip = 0;
Ibb=0;
Vbat=0;
Rw=0;
% Condições de simulação
h=1.095e-2;

% Constantes referentes aos parametros eletricos do modelo
% Constantes Empiricas
kc=1.05;
s=0.2;
e=0.6;
b=-0.006;
Gso=0.4e-12;
ke=0.00233;
Ad1=8.5e-3;
Ad2=15;
Ad3=-8.45;
Asb=-9.95;
Aso=0.07;
Ii=10;
%Constantes experimentais
Rpo=1.1e-3*30;
Rcp=1.1e-3;
Rdo=50e-3;
Rcw=1e-5;
T=4000;
Epo=12.7;%13.172;
Es=12.75;
dd=1;

load Dados_20081217_soc_rna;
% load Dados_moura_147_50;
E=size(Vb);

while dd <= E(1)

```

```
% Calculo das variáveis dinâmicas

Ip = Ib(dd)-Ibb;
dId = (Ip-Id)/T;
Id = Id+dId*1e-1;

% Calculo dos elementos do modelo
Rp=Rpo*(1-b*Tb(dd))-Rcp*log(SOC(dd));
Rd=Rdo*(Ad1/(1-SOC(dd))+exp(Ad2*Ib(dd)*SOC(dd)))/(1+exp(Ad3*Id/Ii));
Rw=-Rcw*log(1-(1-SOC(dd))/SOC(dd))*(kc-1)*abs(Id/Ii)^s;
Gs=Gso*exp(Asb*Vb(dd)+Aso*(Tb(dd)+40));
Ep=Epo+ke*(273+Tb(dd))*log(0.09+SOC(dd));
Vbat(dd) = Ep+Rp*Ip+(Rw+Rd)*Id;
Ibb=Gs*(Vb(dd)-Es);
dd=dd+1;

end
```

## Apêndice VIII

Rotina de simulação do modelo de bateria para curtas e longas cargas e descargas.

```

% Universidade Federal de Campina Grande
% Centro de Engenharia Elétrica e Informática
% Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM
%
% Comparativo de Desempenho dos métodos - Modelo de carga

close all
clear all
clc

% Condições iniciais
cap = 0;
SOC = 0.1;
Id = 0;
Ip = 0;
Ibb=0;
Vbat(1)=11.712;

% Condições de simulação

h = 1e-1;

% Constantes referentes aos parâmetros elétricos do modelo
% Constantes Empíricas
kc=3.6;
s=0.2;
e=0.6;
b=-0.006;
Gso=0.4e-12;
ke=0.00103;
Ad1=8.5e-3;
Ad2=-15;
Ad3=-8.45;
Asb=-9.95;
Aso=0.07;
Ii=10;
%Constantes experimentais
Rpo=1.1e-3*40;
Rcp=1.1e-3;
Rdo=50e-3;
Rcw=29e-3;
T=4000;
Epo=13.172;
Es=12.75;

load Dados_20081216;
E=size(Vb);
dd=1;

while dd <= E(1)

```

```

if SOC_2(dd) == 0
    SOC_2(dd) = 0.01;
end

% Calculo das variáveis dinâmicas

Ip = Ib(dd) - Ibb;
dId = (Ip - Id) / T;
Id = Id + dId * 1e-1;

% Calculo dos elementos do modelo
Rp = Rpo * (1 - b * Tb(dd)) - Rcp * log(SOC_2(dd));
Rd = Rdo * (Ad1 / (1 - SOC_2(dd)) + exp(Ad2 * Ib(dd) * SOC_2(dd))) / (1 + exp(Ad3 * Id / Ii));
Rw = -Rcw * log(1 - (1 - SOC_2(dd)) / SOC_2(dd) * (kc - 1) * abs(Id / Ii) ^ s);
Ep = Epo + ke * (273 + Tb(dd)) * log(0.01 + SOC_2(dd));
Vbat(dd) = Ep + Rp * Ip + (Rw + Rd) * Id;

Gs = Gso * exp(Asb * Vbat(dd) + Aso * (Tb(dd) + 40));
Ibb = Gs * (Vbat(dd) - Es);
if Vbat(dd) > 14.403 || (t(dd) > 10.4 * 3600 && t(dd) < 25.63 * 3600)
    Vbat(dd) = 14.403;
end

dd = dd + 1;
end

```

## Apêndice IX

Rotina de avaliação do desempenho do modelo de bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem.

```

%
% -----
% UFCG - CEEI - Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM - Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Maquinas
% Joab Flavio ARAUJO LEAO
% Orientador: Prof. Mauricio
%
% SIMULATION
%
% -----

close all
clear all
clc

% Condições iniciais
cap = 0;
Id = 0;
Vbat=0;

% Condições de simulação
h=1.095e-2;
dd=1;

% Constantes referentes aos parâmetros elétricos do modelo
T=4000;

load Dados_20081217_soc_rna;
ZE=size(Vb);

while dd <= ZE(1)

    % Calculo das variáveis dinâmicas

    dId = (Ib(dd)-Id)/T;
    Id = Id+dId*h;

    % Calculo dos elementos do modelo

    Voc=(12.732-11.712)*SOC(dd)+11.712;
    Rd=0.685e-6*(-100.9198 + 2.7230*Voc - 20.1015*Voc^2 + 48.5066*Voc^3);
    Rdo = -0.15*log(SOC(dd));
    if t(dd) > 13.1372*3600
        Rdo = -0.06*log(SOC(dd));
    end

    Vbat(dd)=Voc+(Rd+Rdo)*Id;
    dd=dd+1;
end

```



```
%  
-----  
figure(1),plot(t/3600,Vbat,t./3600,Vb);  
xlabel('Tempo [h]');  
ylabel('Tensão Terminal [V]');
```

### Rotina de ajuste polinomial dos parâmetros:

```
clear all;  
clc  
  
% Aproximacao polinomial "polyfit(x,y,n)"  
% x--> Tensao de circuito aberto  
% y--> Resistencia  
% n--> Ordem do polinomio  
  
load Rp_dados;  
  
p = polyfit(Voc,R,10)  
y = polyval(p,Voc);  
figure(1),plot(Voc,R,Voc,y)  
  
load Rc_dados;  
p2 = polyfit(Voc2,Rc,5)  
y = polyval(p2,Voc2);  
figure(2),plot(Voc2,Rc,Voc2,y)
```

## Apêndice X

Rotina de avaliação do desempenho do modelo de bateria melhorado a partir da aproximação de quarta ordem.

```

%
% -----
% UFCG - CEEI - Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
% LEIAM - Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Maquinas
% Joab Flavio ARAUJO LEAO
% Orientador: Prof. Mauricio
%
%
%     SIMULACAO - Modelo de carga
%
% -----

clear all
clc

% Condições iniciais
cap = 0;
Id = 0;
Vbat=0;
% Condições de simulação
h = 1e-1;
dd = 1;
% Constantes referentes aos parâmetros elétricos do modelo
T=4000;

load Dados_20081216_soc_ah;
E=size(Vb);

while dd <= E(1)
    % Calculo das variáveis dinâmicas

    dId = (Ib(dd)-Id)/T;
    Id = Id+dId*h;
    % Calculo dos elementos do modelo

    Voc=(13.172-12.31)*SOC(dd)+12.31;
    Rc=-0.217e-6*(-0.0273 + 0.7322*Voc - 7.0021*Voc^2 + 28.6057*Voc^3 -
2.3730*Voc^4 + 0.1140*Voc^5);
    Rco = -0.00015*log(SOC(dd));

    Vbat(dd)=Voc+(Rc+Rco)*Id;

    if t(dd) > 10.4*3600 && t(dd) < 25.63*3600 % Equalizacao
        Vbat(dd)=14.403;
        h=5e-1;
    end
    if t(dd) > 25.63*3600 % Periodo de descanso
        h=5e-1;
        Rco = -0.15*log(SOC(dd));
    end
    dd=dd+1;
end

```