

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DOUGLAS SILVA NUNES FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS COMPUTACIONAIS E
RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS
DE CHUMBO-ÁCIDO**

Alegrete

2015

DOUGLAS SILVA NUNES FERREIRA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS COMPUTACIONAIS E
RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS
DE CHUMBO-ÁCIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Felipe Bovolini Grigoletto

Alegrete

2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S383e Silva Nunes Ferreira, Douglas

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS COMPUTACIONAIS E
RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS
DE CHUMBO-ÁCIDO / Douglas Silva Nunes Ferreira.

92 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015.
"Orientação: Felipe Bovolini Grigoletto".

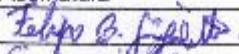
1. Baterias. 2. Engenharia. 3. Estudo. I. Título.

Autoria: Douglas Silva Nunes Ferreira

Título: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE MODELOS COMPUTACIONAIS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS NA CARGA E DESCARGA DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Instituição	Assinatura
1	Felipe Bovolini Grigoletto	Prof. Dr.	unipampa	
2	Sidinei Ghissoni	Prof. Dr.	unipampa	
3	Giovani Guarienti Pozzebon	Prof. Dr.	unipampa	

Data da aprovação: 2 de Dezembro de 2015.

Dedico este trabalho a minha família,
pois sem eles, nada disso seria
possível.

AGRADECIMENTO

A Deus por ser meu protetor e sempre iluminar e nortear meu caminho.

Aos meus pais Arbues P. Ferreira e Marilu S. N. Ferreira, pelo apoio incondicional e compreensão durante o tempo que transcorreu minha graduação.

A Fundação Universidade Federal do Pampa pelo excelente ambiente de estudos disponibilizado, assim como a todos os funcionários que fazem parte da Instituição.

A todos os professores do Curso de Engenharia Elétrica que com suas singularidades contribuíram com minha formação.

Aos meus colegas e amigos que me auxiliaram sempre que necessário.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim”. Nicola Tesla

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados alcançados na busca de um método confiável e prático, para a determinação do estado de carga de baterias de chumbo-ácido utilizadas em cadeiras de rodas elétricas, através da simulação computacional utilizando o software Matlab - Simulink. A metodologia consiste na análise comportamental do conjunto de baterias que alimentam uma cadeira de rodas elétrica, através do cálculo da integração do fluxo de corrente líquida da bateria em determinado instante t . Usando um diagrama de circuito elétrico como modelo da bateria de chumbo-ácido, foi executado um modelo simulado de uma bateria de chumbo-ácido onde o seu carregamento e descarregamento característicos foram estimados com base nos valores de entrada fornecidos pelos fabricantes ou especificações do usuário. Uma investigação da resposta da descarga de baterias de chumbo ácido através da comparação entre resultados teóricos e práticos, sobre a estabilidade de tensão transiente em uma condição de carga máxima. Foi realizada para comparar a resposta das baterias com o aumento da demanda de carga. Além disso, uma investigação sobre a viabilidade do uso dessas baterias aplicadas ao sistema atual verificando os resultados alcançados com os dados fornecidos pelo manual dos fabricantes. Os dados apontam que os resultados obtidos nos testes aplicados e as simulações realizadas demonstraram similaridade em seus valores de carga e de descarga, o que comprovou bom desempenho do modelo utilizado.

Palavras-Chave: Estado de Carga. Baterias Chumbo-ácido. Cadeira de Rodas Elétricas. Simulink. Manual dos Fabricantes.

ABSTRACT

This work presents the results achieved in the search for a reliable and practical method for determining the state of charge of lead-acid batteries used in electric wheelchairs through computer simulation using Matlab - Simulink. The methodology consists of the behavioral analysis of the battery pack powering the electric wheelchair, by calculating the integration of net current flow from the battery at any given time t . Using an electric circuit diagram as a model of lead-acid battery has run a simulated model of a lead acid battery where the loading and characteristic discharge were estimated based on input values provided by the manufacturer or user specifications. An investigation of the response of the discharge of lead acid batteries by comparing theoretical and practical results on the stability of transient voltage at a maximum load condition. It was performed to compare the response of the batteries with increasing load demand. In addition, an investigation into the feasibility of using these batteries applied to the current system by checking the results achieved with the data provided by the manufacturers manual. The results obtained in the tests and simulations showed similarity in their charge and discharge values, which proved good performance of the model.

Keywords: State of Charge. Lead-acid batteries. Chair Power Wheels. Simulink. Manual of Manufacturers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Bateria de Chumbo-ácido e seus componentes.....	21
Figura 2: Processo de descarga da bateria de chumbo-ácido.....	22
Figura 3: Processo de carga da bateria de chumbo-ácido	23
Figura 4: Característica de tensão e corrente para o carregamento com estágio simples.....	26
Figura 5: Característica de tensão e corrente para o carregamento com estágio duplo	27
Figura 6: Característica de tensão e corrente para o carregamento automático	28
Figura 7: Característica de corrente para o carregamento com carga pulsada	28
Figura 8: Característica de tensão e corrente para o carregamento rápido	29
Figura 9: Modelo Simplificado de Bateria	33
Figura 10: Modelo de Bateria com Resistência Interna.....	34
Figura 11: Modelo de Bateria com Capacitor.....	34
Figura 12: Modelo de Bateria com Controle de Tensão.....	35
Figura 13: Modelo de Bateria com Carregamento e Descarregamento	37
Figura 14: Gráfico da Tensão	38
Figura 15: Gráfico do Estado de Carga	38
Figura 16: Modelo da Bateria de Chumbo-Ácido no Simulink.....	40
Figura 17: Gráfico da tensão da bateria versus o tempo de descarga	42
Figura 18: Gráfico da tensão versus SOC (%/100) em correntes de descarga diferentes.....	43
Figura 19: Modelo de descarga da bateria no Simulink	44
Figura 20: Taxa de descarga das baterias testadas na simulação	44
Figura 21: Gráfico do Efeito Puckert	45
Figura 22: Testes Experimentais.....	46
Figura 23: Curva de carga do experimento	47
Figura 24: Curva de descarga para uma corrente de 18 A.....	48
Figura 25: Curva de descarga para uma corrente de 10 A.....	49
Figura 26: Curva de descarga para uma corrente de 15 A.....	49
Figura 27: Modelo de uma bateria no Simscape™	50
Figura 28: Modelo dinâmico da bateria no Simscape™	51
Figura 29: Gráfico comparativo entre o resultado simulado e o experimental	53
Figura 30: Gráfico do erro de tensão residual 1	53
Figura 31: Gráfico comparativo entre o resultado simulado e o experimental	54
Figura 32: Gráfico do erro de tensão residual 2	55
Figura 33: Gráfico de descarga e carga a 10A em Simscape™	57
Figura 34: Gráfico de descarga e carga a 15A em Simscape™	58
Figura 35: Gráfico de descarga e carga a 18A em Simscape™	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quadro comparativo entre baterias recarregáveis	11
Tabela 2: Processo de simulação no Simulink	39
Tabela 3: Parâmetros das Baterias	39
Tabela 4: Parâmetros utilizados na simulação no Simscape™	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Li-on – Íons-Lítio

Ni-Fe – Níquel e Ferro

Ni-Zn – Níquel e Zinco

Zn-Cl – Zinco e Cloro

PbO₂ – Óxido de Chumbo

Pb – Chumbo

NiCad – Níquel Cádmio

NiMH – Níquel Metal

EWc – *Electric Wheelchair*

ANSI – *American National Standards Institute*

RESNA – *Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America*

SUMÁRIO

CAPITULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Estrutura do tcc	4
CAPÍTULO 2	5
REFERÊNCIAL TEÓRICO	5
2.1 A criação das fontes eletroquímicas de corrente	5
2.2 Tipos de baterias	7
2.2.1 Baterias de chumbo-ácido	7
2.2.3 Baterias de íons de lítio (Li-Íon)	8
2.2.4 Baterias de Enxofre de sódio (NAS)	8
2.2.5 Níquel cádmio (NiCd)	9
2.2.6 Baterias de Zinco bromo (ZnBr)	9
2.3 Construção e classificação das baterias	10
2.4 Evolução das baterias de chumbo-ácido	11
2.5 Aplicação em cadeiras de rodas elétricas	13
2.6 Consumo de energia	13
CAPÍTULO 3	15
TERMINOLOGIAS UTILIZADAS EM BATERIAS	15
3.1.1 Capacidade de carga	15
3.1.2 Tensão de Corte	16
3.1.3 Taxa de carga / descarga	16
3.1.4 Tensão de Circuito Aberto (VOC)	16
3.1.5 Força eletromotriz	16
3.1.6 Profundidade de descarga (DOD)	16
3.1.7 Estado de carga (SOC)	17
3.1.8 Resistência interna	17
3.1.9 Resistência de carga e descarga (Rc ou Rd)	17
3.1.10 Taxa de auto descarga	18
3.1.11 Estado de saúde	18
3.1.12 Vida útil da bateria	18
3.1.13 Corrosão da grade positiva	18
3.1.14 Sulfatação irreversível	19
3.1.15 Limitação de carga	19
3.1.16 Amolecimento dos eletrodos	19

3.1.17 Eficiência da bateria	19
3.1.18 Fuga térmica	20
3.2 Estrutura e operações químicas de uma bateria de chumbo ácido	20
3.3 Tipos de bateria de chumbo ácido.....	24
3.3.1 Bateria chumbo ácida convencionais.....	24
3.3.2 Bateria seladas chumbo ácido com eletrólito gelificado	24
3.3.3 Bateria chumbo ácida regulada por válvula (VRLA).....	24
3.3.4 Baterias chumbo ácida AGM (<i>Absorved Glass Mat</i>).....	24
3.4 Carga / descarga métodos e técnica	25
3.5 Métodos de carregamento e técnicas utilizadas para baterias chumbo-ácido.....	25
3.5.1 Carregamento com estágio simples (W ou Wa). 26	3.5.2 Carregamento com estágio duplo (WoWa).....
3.5.3 Carregamento automático (IUa)	27
3.5.4 Carga pulsada.....	28
3.5.5 Carregamento rápido.....	29
3.5.6 Descarregando	29
3.5.7 A escolha do método de carregamento adequado	30
CAPÍTULO 4	31
MODELAGEM DA BATERIA	31
4.1 Equações dinâmicas do modelo de circuito	32
4.2 Modelagem do circuito elétrico.....	33
4.3 Modelos de circuito elétrico da bateria.....	33
4.4 O Estado de carga da bateria onde $V_p \leq V_{oc}$	36
4.5 O Estado de descarga da bateria onde $V_p > V_{oc}$	36
4.6 Suposições para o modelo.....	37
4.7 Processo de validação do modelo	37
4.8 Parâmetros dos fabricantes – <i>datasheet</i>	39
4.9 Discussão sobre o modelo desenvolvido no simulink e simulação de resultados.....	40
4.10 Análise dos resultados da simulação	41
4.10.1 Profundidade de descarga (DOD) (%).....	41
4.10.2 Correlação entre a tensão da bateria e a taxa de profundidade de descarga.....	41
4.10.3 Efeito da temperatura na capacidade da bateria	42
4.10.4 Estado de carga da bateria	42
4.10.5 Capacidade Ampère-hora	43

4.10.6 O Efeito da Lei de Peukert para as diferentes especificações da bateria pelos fabricantes	44
4.11 Testes experimentais.....	46
4.11.1 Carregamento da bateria.....	47
4.11.2 Descarga da bateria.....	47
CAPÍTULO 5	50
ANÁLISE DA BATERIA CHUMBO-ÁCIDO NO MATLAB SIMSCAPE™	50
5.1.1 Modelo estrutural de uma bateria de chumbo-ácido do Simulink	50
5.1.2 Circuito equivalente de uma bateria.....	51
5.1.3 Parâmetros para o circuito	51
5.2 Resultados	52
5.2.1 Discussões	55
5.2.2 Discussão entre o modelo dinâmico e o modelo Simscape™	56
CAPÍTULO 6	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	61
REFERÊNCIAS	62

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Atualmente as baterias elétricas têm sido utilizadas em diversas aplicações, sendo principalmente empregadas como elementos acumuladores para sistemas de alimentação ininterruptos, como por exemplo, veículos elétricos, fontes renováveis de energia [1].

Para que haja a correta instalação e uso das baterias é necessário o conhecimento de suas limitações intrínsecas. Dessa forma, aumenta-se o grau de confiabilidade do sistema, bem como, prolonga-se a vida útil destes dispositivos.

Ao se conectar uma bateria em um determinado circuito elétrico, há a circulação de uma corrente devido à transformação eletroquímica, ou seja, ocorre a geração de corrente contínua, devido à conversão de energia química em energia elétrica [2].

Baterias possuem elementos de operação chamados de célula eletroquímica, sendo essa a sua unidade mais simples. São chamadas de células primárias, as que pertencem a baterias que não podem ser recarregadas (Ex: pilhas alcalinas comuns). Quando ocorre a descarga completa desta célula primária que compõe a bateria, ela então, não pode ser mais utilizada, pois perdeu sua vida útil. Esse tipo de bateria é comumente empregado em fontes de energia de baixa potência, como calculadoras, relógios e outros equipamentos portáteis.

Baterias recarregáveis são compostas por células secundárias e suas características permitem serem reutilizadas várias vezes [3].

Existe um número muito grande desse tipo de baterias (Li-on, Ni-Fe, Ni-Zn, Zn-Cl, etc.). No entanto, a disponibilidade e custo de tensão, apresentados no mercado, reduzem a possibilidade de escolha dos tipos a serem empregados para a maioria dos sistemas, dentre os quais se cita os de locomoção. Dessa forma, a utilização de baterias como de chumbo-ácido ou de níquel-cádmio torna-se uma opção mais viável para aplicação nesses sistemas [4]. Nesse estudo de conclusão de curso aqui apresentado, a bateria

de chumbo-ácido foi utilizada para testes em uma cadeira de rodas elétrica, visto que é um instrumento de locomoção essencial para pessoas com deficiências (PCDs).

Durante atividades do dia a dia, se tem a necessidade de se deslocar por percursos curtos ou longos e isso torna evidente a importância da movimentação na vida das pessoas. Sendo assim, pessoas com deficiência física ficam impossibilitadas de se deslocarem sem a ajuda de equipamentos específicos, como, por exemplo, a cadeira de rodas motorizada.

Essa limitação de locomoção faz que pessoas deficientes se deparem com situações triviais para pessoas como nós, mas para eles, se tornam barreiras intransponíveis na maioria das vezes. Essas barreiras podem ser desde um desnível em um piso irregular, uma rampa ou barreiras invisíveis que são impostas pela incapacidade do ser humano de se pôr no lugar da pessoa com deficiência (PCD), que é o caso da dependência, do constrangimento e do preconceito.

No sentido holístico (considerar o todo levando em consideração as partes e suas inter-relações), deficiência física abrange todas as pessoas com restrições físicas por seqüelas orgânicas funcionais como os cardíacos, diabéticos, paraplégicos, cegos etc [5]. O ser humano apresenta grande potencial intelectual e físico e quando, por algum fator, um de seus potenciais for limitado, muitas vezes acaba tendo seu desenvolvimento interno ou externo restringido.

Reabilitar essas pessoas é uma especialidade profissional orientada à recuperação psicológica, física e de seu bem-estar. Vários trabalhos que tem por finalidade a reabilitação humana, como por exemplo, o exoesqueleto desenvolvido por Miguel Nicolelis, tem a Engenharia como área de desenvolvimento. Engenheiros, devido a seus conhecimentos adquiridos durante sua formação, são capazes de desenvolver projetos que auxiliaram pacientes que tiveram membros amputados [6] ou algum sistema que traga auxílio a um deficiente visual [7].

Contudo, os desenvolvimentos destes projetos envolvem muitos desafios, visto que, os sistemas para reabilitação humana são ferramentas complexas que envolvem robótica, eletrônica, processamento de sinais, entre outros campos da área. A Cadeira de rodas motorizada é um produto

desenvolvido pela engenharia de reabilitação e utilizada pelos deficientes para deslocamento.

Este trabalho faz uma comparação entre dados obtidos a partir de testes práticos de carga e descarga realizados em baterias de chumbo-ácido e o modelo de bateria de chumbo-ácido fornecido pelo programa computacional Matlab simulink. Os comparativos entre software e testes experimentais foram baseados no manual do fabricante. Por meio das comparações buscou-se averiguar a correlação entre os dados experimentais e os resultados obtidos por meio de simulações. Isso permite que as realizações desses testes computacionais venham a contribuir com o usuário, pois, visa à economia financeira, visto que, se fossem utilizar diversas baterias para a coleta de dados, as despesas seriam elevadas. Além disso, elimina o risco de danos ao meio ambiente e possui facilidade de acesso. Os testes para coleta de dados na experimentação concreta apontam que os resultados obtidos são semelhantes em ambos os casos.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi testar modelos computacionais de uma bateria de chumbo-ácido, que simula o desempenho real da bateria sob condições de carga e descarga, aplicada no uso em uma cadeira de rodas elétrica e compará-lo com testes experimentais realizados em bancada. Foram investigados antes de serem implementados nos modelos computacionais, quais valores de descarga otimizados e ciclos de carga garantem um maior tempo de vida para a bateria. Este trabalho também permitiu descobrir e investigar os seguintes itens:

- Entendimento da medição de corrente e otimizar o desempenho do estado de carga (SOC - *State Of Charge*) da bateria;
- O processo de carga e descarga;
- Análise comparativa de baterias reais aplicadas a um mesmo sistema elétrico.

1.2 Estrutura do tcc

As próximas seções deste trabalho são organizadas da seguinte forma;

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão histórica sobre a descoberta e desenvolvimento das baterias de chumbo-ácido. Comenta-se tipos de baterias, suas classificações, a evolução da bateria de chumbo ácido e a sua aplicação em um sistema real.

No capítulo 3 são citadas as principais terminologias utilizadas em baterias, onde os itens relevantes ao assunto estão especificados e comentados. Demonstra-se também a estrutura e operações químicas de uma bateria de chumbo ácido bem como a metodologias de carga e descarga.

No capítulo 4 é tratado sobre a modelagem matemática e de circuitos elétricos referentes à bateria de chumbo-ácido. Dá-se início a validação do modelo, fazendo uma breve discussão sobre o modelo simulink e a simulação dos resultados. Expressa os resultados obtidos com os testes práticos realizados em bancada.

O capítulo 5 relata as simulações feitas no Matlab que é um programa matemático; e o modo de operação do mesmo, está contido nos apêndices. Os resultados obtidos durante as simulações e as discussões entre o modelo dinâmico e o modelo simscape fazem parte da apresentação nesta parte do trabalho.

O capítulo 6 traz as considerações finais sobre o trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REFERÊNCIAL TEÓRICO

A utilização do modelo de bateria de chumbo-ácido se deve ao fato da mesma, ser um sistema de armazenamento simples, e possuir grande variedade de modelos com baixo custo em relação aos demais tipos de baterias ofertados no mercado. Esse diferencial possibilitou a aquisição do material concreto necessário para os testes e coletas de dados. No decorrer do capítulo é apresentada uma breve revisão histórica sobre a descoberta e desenvolvimento das baterias de chumbo-ácido. Comenta-se tipos de baterias, suas classificações, a evolução da bateria de chumbo ácido e a sua aplicação em um sistema real.

2.1 A criação das fontes eletroquímicas de corrente

Durante o ano 1799, o professor e físico na Universidade de Paiva na Itália, o italiano Alessandro Volta (1745-1827), obteve a partir de uma pilha de discos de diferentes metais, do tamanho semelhante a uma moeda, faíscas e choques elétricos.

O físico, após realizar inúmeros testes com diferentes materiais, conseguiu construir um aparelho que repetia sistematicamente os resultados obtidos. Para obter esse resultado foi empregado um conjunto de discos com configurações diferentes contendo prata, zinco e papel ou tecido absorvente umedecido com água e sal, ambos constituídos alternadamente. Aproximadamente, 30 desses conjuntos, os quais continham três discos cada, eram empilhados e apoiados em hastes verticais de madeira que serviam como suporte para os mesmos. Ao aproximar das extremidades de dois fios de cobre, um previamente ligado à base e outro ao topo da pilha, ocorria uma faísca elétrica.

Rocha [8] acrescenta que Volta na data de 20 de março de 1800, relatou tais resultados desse trabalho científico em uma carta encaminhada à *Royal Society* de Londres, que o publicou posteriormente. Isso foi o ponto inicial para o desenvolvimento de uma vasta gama de fontes de

corrente, intituladas de células primárias galvânicas [9]. Nesse período, ocorria um forte fascínio ao redor da eletricidade e suas possíveis aplicações práticas.

No mês de novembro do ano de 1801, Volta foi então convidado pelo Cônsul da França, Napoleão Bonaparte, para ir ao Instituto Nacional da França, onde iria expor os efeitos elétricos de sua descoberta.

Fontes eletroquímicas de corrente novas, foram encontradas de maneira praticamente empírica até o ano de 1890. Simultaneamente surgiam questionamentos da origem desta corrente. Durante esse período, se tinha o conhecimento que a eletrólise possuía relação com a ação da corrente no eletrólito, dessa forma, esperava-se que a corrente fosse gerada por um fenômeno químico, e isso fez com que a teoria do contato desenvolvida por Volta fosse revisada.

O paradigma sobre o assunto na época gerou pesquisas paralelas sobre fontes eletroquímicas de corrente formadas por dois condutores de corrente elétrica, feitos de material diferente um do outro e sendo imersos em um eletrólito de condução iônica.

Ritter, em 1803-1805, percebeu em seus experimentos que o fluxo de corrente entre dois eletrodos constituídos de um mesmo material, mergulhados em um eletrólito, (cobre/cloreto de sódio/cobre) faz surgir uma polarização. Posteriormente ao retirar a fonte de alimentação externa de corrente, o sistema, agora já polarizado, apresentava uma corrente no sentido contrário [10]. Era dado início, na construção das células secundárias de energia e no desenvolvimento de sistemas voltados para o armazenamento de energia.

Depois que Ritter apresentou os resultados de sua experiência, levou cerca de 50 anos para que fosse conhecido que os eletrodos constituídos de chumbo possuíam a característica de poderem ser polarizados permanentemente por uma fonte de corrente externa e isso os tornava um sistema eficiente para o armazenamento de energia [8].

Gaston Planté, no ano de 1859, utilizando de tiras de chumbo separadas por espaçadores de borracha e mergulhadas em uma solução contendo 10% de ácido sulfúrico, realizou a primeira demonstração desse modelo de sistema. Durante essa demonstração o sistema foi alimentado

por uma fonte de corrente externa por um período determinado de tempo e o resultado foi a produção de uma célula com 2 V (volts).

A característica mais relevante desse modelo de bateria era a sua propriedade do sistema de ser reversível. A quantidade de energia acumulada, que é diretamente ligada à capacidade da bateria, era proporcional a quantidade de dióxido de chumbo formado durante o processo na eletrólise.

A bateria criada por Planté exigia vários ciclos de carga e descarga antes de possuir uma capacidade ou nível de energia acumulado satisfatórios para o uso prático. Planté denominou de “formação” o que acontecia em sua bateria, pois, durante o processo, o material dos eletrodos (sua parte ativa), que era constituída por Óxido de chumbo (PbO_2) e chumbo (Pb) respectivamente eram transformados em um material poroso.

Apenas em 1886 com a criação do dínamo, ao qual se mostrou um sistema eficiente para o carregamento de baterias, foram que as baterias de chumbo ácido começassem a ser utilizadas em uma variedade de aplicações. As pesquisas visavam o aumento da velocidade no processo de formação, assim como, desenvolver novos tipos de fabricação, aliados a novas teorias para o funcionamento.

2.2 Tipos de baterias

Com a evolução dos métodos de armazenamento de energia, percebeu-se que as baterias são o sistema de armazenamento mais eficiente para equipamentos de pequeno porte como uma cadeira de rodas elétrica. Existem vários tipos de baterias que podem ser aplicados nesse tipo de equipamento. As baterias mais populares são apresentadas abaixo:

2.2.1 Baterias de chumbo-ácido

A bateria de chumbo-ácido é o mais antigo tipo de bateria recarregável, inventado por Planté em 1859. A célula da bateria tem chumbo (Pb) e óxido de chumbo (PbO_2) como eletrodos e ácido sulfúrico (H_2SO_4) como eletrólito. Estas baterias são amplamente utilizadas como partida de motores ou de sistemas de energia de *backup*. Muito popular devido a seu

baixo preço, mas de curta duração (500-1000 ciclos) torna as aplicações de gestão de energia limitada. Apresenta uma grande capacidade a descarga profunda e também uma baixa taxa de auto descarga. Grandes instalações de 40 MWh / 10 MW podem ser vistas em China, Califórnia, e 8,5 MWh em Berlim. O chumbo é tóxico, mas é 98% reciclável [11].

2.2.3 Baterias de íons de lítio (Li-Íon)

O cátodo é feito de óxido de metal litiado (por exemplo, LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMn_2O_4 , LiFePO_4) e o ânodo de carbono grafitado. Eletrólito de baterias de íon de lítio é feito de sais de lítio como LiPF_6 dissolvidos em carbonatos orgânicos. Quando a bateria é carregada, átomos de lítio no cátodo tornam-se íons e migram através do eletrólito para o ânodo de carbono, onde se combinam com os elétrons externos e são depositados entre as camadas de carbono como átomos de lítio. Alta eficiência, densidade de energia e longa vida útil são as qualidades vistas em baterias de íon de Li. No entanto, lítio íon têm baixas eficiências econômicas e estabilidade dos agentes químicos deve ser considerada por causa da atuação química efetiva no lítio [12].

2.2.4 Baterias de Enxofre de sódio (NAS)

Baterias de Enxofre de sódio consistem em enxofre fundido no eletrólito positivo e sódio fundido no eletrodo negativo os quais são separados por uma alumina cerâmico beta sólido eletrólito. Baterias de Enxofre de sódio (NAS) cerâmicas têm eficiência de cerca de 80-90% e ciclos de vida de 2500 a 100% de descarga. De modo a manter o fundido de sódio e de enxofre na bateria, e para obter a condutividade suficiente no eletrólito, que estão alojados num compartimento termicamente isolado que deve mantê-lo acima de 270°C , usualmente de 320°C a 340°C . Uma das maiores características das baterias NAS é a sua capacidade para fornecer energia em uma única descarga contínua.

Baterias NAS também têm sido utilizadas para atualizações de transmissão. A principal desvantagem de baterias NAS é o dispositivo de

retenção a temperaturas elevadas acima de 270 ° C. Não é só o consumo de energia, mas também traz consigo problemas tais como, gerenciamento térmico e regulamentos de segurança [13].

2.2.5 Níquel cádmio (NiCd)

Bateria de níquel mais comum é de níquel-cádmio (NiCd), que tem o níquel como cátodo e cádmio como ânodo com uma solução alcalina de hidróxido de potássio (KOH) como eletrólito. Porque o cádmio é tóxico, hidretos metálicos são agora substituindo cádmio como ânodo. O metal é geralmente um composto de metais das terras raras e de Ni, Co, Mn e / ou alumínio. NiMH têm menor densidade de energia do que as baterias de íons de lítio. Baterias de níquel têm uma baixa resistência interna e pode tolerar altas correntes de descarga em níveis de descarga profunda. A maioria das aplicações são portáteis como em ferramentas ou em automóveis. Outro problema, impedindo a aplicação em larga escala deste tipo de bateria é que as baterias de níquel-cádmio sofrem uma taxa de auto descarga mais rápida, além de o cádmio ser tóxico e bem mais caro [14].

2.2.6 Baterias de Zinco bromo (ZnBr)

Ânodo é puro metal como zinco ou alumínio enquanto que cátodo é feito de estrutura de carbono poroso ou uma malha metálica coberta com catalisadores e utiliza o ar de entrada como o oxidante. Os eletrólitos utilizados neste tipo de bateria são bons condutores de íons como KOH ou líquido saturado na membrana de polímero sólido. ZnBr são baterias compactas e baratas, mas baterias recarregáveis são difíceis de fazer. A eficiência é inferior a 50% e tempo de vida 100-300 ciclos que o torna menos popular [18].

Critérios de seleção de bateria são basicamente, o desempenho e a densidade de energia, em contra ponto a preocupações com o ciclo de vida e meio ambiente. Enquanto nas baterias de NiCd esses critérios são bem compreendidos, sua relativamente baixa densidade torna-a menos popular. Da mesma forma, devido à gestão de energia na bateria NAS e a baixa

eficiência de ZnBr torna menos popular no mercado das baterias. No entanto, Lítio íon e bateria de chumbo-ácido parecem ser a melhor escolha. Devido a sua característica reciclável e um bom tempo de vida, baterias de chumbo ácido é, com certeza, a escolha mais econômica, para aplicações na maioria dos sistemas de armazenamento, tanto pequenos (de alguns W a kWh) e sistemas maiores (a partir de 100kWh em áreas isoladas).

2.3 Construção e classificação das baterias

As baterias internamente apresentam em suas células unitárias, ligações na configuração paralela ou série, permitindo assim, ter, uma variedade de tensões e correntes de trabalho.

Baterias ou acumuladores representam fontes autônomas de energia, pois permitem acumular energia, como uma das denominações sugere, além de ter a capacidade de manter essa energia, posteriormente ela pode ser devolvida ao sistema que venha a ser conectada.

As Baterias se dividem em duas principais classes [17]:

- Baterias Primárias
- Baterias Secundárias

Baterias primárias são baterias que não possuem a capacidade de serem recarregadas, uma vez que sua energia é gerada a partir de reações eletroquímicas. Este processo eletroquímico não é reversível, ou seja, após a bateria ser utilizada, essa não conseguirá voltar ao seu estado de carga anterior, fazendo com que a célula acabe sendo inutilizada após o uso de sua carga. Os principais tipos de baterias primárias são as alcalinas, secas e lítio.

Baterias secundárias são baterias que podem ser recarregadas a partir de uma fonte externa de alimentação. Devido a suas características construtivas elas podem ser carregadas e descarregadas inúmeras vezes. Cerca de 60% das baterias vendidas no mundo correspondem às baterias de chumbo-ácido, pois além de apresentarem um custo mais baixo devido à sua tecnologia, são eficientes e apresentam a vantagem de serem recicláveis em sua totalidade. Os principais tipos de baterias secundárias são de chumbo, íons

de lítio, NiCad e NiMH. Na tabela 1 abaixo se apresenta um comparativo entre as principais características dessas baterias.

Tabela 1: Quadro comparativo entre baterias recarregáveis

	Chumbo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Íons de Lítio
Tensão da célula (V)	2	1,2	1,2	3,6
Energia específica (Wh/kg)	1 - 60	20 - 55	1 - 80	3 - 100
Potência específica (W/kg)	< 300	150 - 300	< 200	100 - 1000
Densidade de energia (kWh/m ³)	25 - 60	25	70 -100	80 - 200
Densidade de potência (MW/m ³)	< 0,6	0,125	1,5 - 4	0,4 - 2
Ciclo de vida*	200 - 700	500 - 1000	600 - 1000	3000
Intervalo de tempo de descarga	> 1min	1 min – 8 hr	> 1min	10 s – 1 hr
Custo (\$/kWh)	125	600	540	600
Custo (\$/kW)	200	600	1000	1100
Tolerância à sobrecarga	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa
Eficiência (%)	75 - 90	75	81	99
*Quantidade de ciclos de carga/descarga para a capacidade de carga da bateria decair de 100% a 80%				

Fonte: Portal dos resíduos sólidos

Analisando os dados da tabela 1 fica perceptível o porque da escolha do uso da bateria de chumbo-ácido em relação aos demais modelos ofertados no mercado. Logo, a aplicação da bateria de chumbo-ácido na maioria dos sistemas e sua utilização nos testes para a elaboração deste trabalho de conclusão, se deve ao fato de que, além de apresentar um custo (\$/kW ou \$/kWh) muito menor que as demais baterias, apresenta eficiência significativamente boa, além de uma alta tolerância a sobrecarga.

2.4 Evolução das baterias de chumbo-ácido

No início do século 20 a indústria automobilística, proporciona um novo patamar para as baterias de chumbo-ácido, fazendo com que houvesse um aumento significativo nas pesquisas em busca de melhores compostos, melhor eficiência, maior velocidade nas reações, além de maior busca em aplicações. Uma nova revolução para este segmento de baterias vem ocorrendo nesse período atual, graças a um aumento na demanda por energia, pelo crescimento na utilização de energias renováveis, os quais em sua maioria necessitam de dispositivos acumuladores de energia como as baterias e principalmente das de chumbo-ácido [15].

As tecnologias mais recentes em baterias dessa categoria consistem nas baterias seladas, as quais não apresentam manutenção, pois o desenvolvimento de sua estrutura interna leva em conta a reordenação de oxigênio. Esse tipo de tecnologia desenvolvida só foi possível devido aos anos de estudos na busca do aprimoramento desse produto assim como o emprego correto dos conhecimentos adquiridos nos inúmeros testes e de modelos apropriados [16].

Todo esse empenho em melhorar o produto gerou baterias mais eficientes e menores sem a necessidade de grandes lugares isolados, repletos de exaustores e com suas instalações elétricas a prova de explosões. A criação de retificadores chaveados em alta frequência fez com que fosse implementado um controle de tensão da flutuação em função da temperatura.

A quase que nula necessidade de manutenção retirou do processo o controle de densidade do eletrólito e a exigência de repor o nível do eletrólito com água deionizada como acontece em baterias ventiladas, isso, permitiu que, como por exemplo, a melhoria da infra-estrutura dos sistemas de telecomunicações e os de informática, pois agora devido às baterias não liberarem gases que eram corrosivos e inflamáveis, elas poderiam trabalhar em conjunto com esses sistemas e isso proporcionou um aumento da produtividade e redução do tamanho necessário para acomodação desses sistemas.

Hoje em dia, baterias seladas são as principais fontes em sistemas que necessitam de energia contínua [17].

2.5 Aplicação em cadeiras de rodas elétricas

O número de pessoas que utilizam cadeiras de rodas nos Estados Unidos é estimado em perto de 2 milhões, com mais de 100.000 usuários em cadeiras de rodas elétricas (EWc) e 60.000 usuários em *scooters* elétricos [18]. Cadeiras de rodas elétricas parecem estar evoluindo mais rápido do que cadeiras de rodas manuais.

Aumento do poder de computação, micro controladores de baixo custo, e uma maior variedade de sensores têm produzido uma interação muito complexa entre cadeiras de rodas elétricas e seus usuários [19]. Cadeiras de rodas elétricas não consistem em simplesmente uma cadeira de rodas manual equipada com dois motores de acionamento. Há uma grande variedade de modelos disponíveis para os consumidores, existem cadeiras de rodas com propulsão traseira, por correia ou engrenagens, e de tração dianteira. Certos tipos podem subir escadas e até mesmo passar por cima de obstáculos.

Com tantos modelos e recursos disponíveis, os consumidores e os médicos devem considerar numerosas características de segurança e desempenho de uma cadeira de rodas elétrica ao decidir que tipo de dispositivo selecionar. No entanto, a tentativa de adquirir informações de desempenho dos fabricantes de cadeira de rodas pode ser difícil e desafiadora.

2.6 Consumo de energia

Segundo normas de construção, uso e eficiência estipulados pelo *American National Standards Institute* (ANSI) em conjunto com o *Rehabilitation Engineering and Assistive Technology Society of North America* (RESNA) cadeira de rodas e *scooters* elétricos devem passar por testes de determinação do consumo de energia e alcance teórico. A intenção deste teste é determinar o alcance teórico de uma cadeira de rodas elétrica com uma carga completa da bateria. As cadeiras de rodas utilizadas neste estudo eram compostas por um sistema de 24 V. Duas baterias de 12 V são conectadas em série para fornecer os necessários 24 V.

Cadeiras de rodas necessitam de grande carga elétrica para se locomover. Buscando analisar o comportamento das baterias nesse sistema,

optou-se por baterias de chumbo-ácido de ciclo profundo para alimentar e executar o funcionamento do motor, pois, apresentam grande quantidade de energia por um período maior de tempo.

A bateria pode ser recarregada, e em seguida, ter sua carga drenada e recarregada outra vez, conforme a necessidade de utilização. A maioria dos veículos, por outro lado, utilizam baterias de partida. Estas baterias são projetadas para oferecer uma carga alta, porém, em curtos períodos de energia. Elas não são capazes de ser totalmente descarregadas e recarregadas continuamente.

Os dois principais fatores a considerar ao escolher uma bateria são ampère-hora e ciclo de vida. Ampère-hora refere-se ao total de energia que pode fornecer uma bateria a uma taxa constante de descarga ao longo de um determinado período de tempo, geralmente 20 horas, antes que a carga cai para 10,5 volts. Por exemplo, uma bateria 100 Ah pode fornecer uma corrente de 5 ampères durante 20 horas antes de ser considerada morta. Ciclo de vida refere-se a quantas vezes uma bateria pode ser totalmente descarregada e depois recarregada antes de precisar ser substituída. Isso é extremamente importante porque as baterias da cadeira de rodas funcionam melhor com uma carga completa. Muitos usuários recarregam suas baterias a cada noite. A maioria dos usuários de cadeira de rodas elétricas (EWc – *Electric Wheelchair*) acreditam que a vida típica da bateria é de cerca de 9-14 meses ou cerca de 365 ciclos [20].

O alcance de uma EWc depende de muitas variáveis diferentes. O peso total da cadeira de rodas mais o do utilizador, velocidade média, inclinação do terreno, o montante de partida, parando e voltando, superfície de condução, clima e estilo de condução são algumas dessas variáveis. É vital que os utilizadores de EWcs tenham noção de quão longe a sua cadeira de rodas pode viajar com uma única carga, caso contrário, correm o risco de ficar à mercê de possíveis situações perigosas ou prejudiciais a sua segurança. Na Seção 2 estima-se o alcance teórico de uma cadeira de rodas elétrica medindo a drenagem de corrente na bateria ao longo de um determinado tempo.

CAPÍTULO 3

TERMINOLOGIAS UTILIZADAS EM BATERIAS

Neste capítulo é citado as principais terminologias utilizadas em baterias, onde os itens relevantes ao assunto estão especificados e comentados. Demonstra-se também a estrutura e operações químicas de uma bateria de chumbo ácido bem como a metodologias de carga e descarga.

3.1.1 Capacidade de carga

A medida da eficiência de uma bateria para armazenar ou distribuir energia elétrica é considerada a capacidade de carga, e é comumente expressa em unidades de ampères-hora. Ampère-horas é calculado integrando a corrente de descarga em ampères durante um período de tempo específico. A transferência de um ampère por uma hora é igual a um ampère-hora ou é igual a 3600 coulombs de carga. Vamos dizer que, se uma bateria proporciona 5 ampères por 20 horas, essa bateria entrega 100 ampères-hora. A quantidade de material ativo, o número, a concepção e dimensões físicas das placas, e a gravidade específica do eletrólito, entre outros fatores, são os que determinam a capacidade da bateria. Geralmente, a capacidade é especificada em uma taxa de descarga específica ou ao longo de um determinado período de tempo [21].

Segundo a lei de Peukert, em (1):

$$C = I^k t \quad (1)$$

Onde

C= capacidade na taxa de descarga um ampère

I= corrente de descarga

K= Constante da Peukert

t= Tempo de descarga

A capacidade da bateria é sempre referida como "Cn", o que significa que para descarregar completamente a bateria, leva-se um período de n horas.

A capacidade sob taxa de descarga de 10 horas "C10" é sempre tomada como a capacidade nominal.

3.1.2 Tensão de Corte

É a menor tensão, a qual um sistema de baterias pode atingir em operação. Ele é fornecido pelo manual do fabricante e apresenta uma taxa de descarga definida.

3.1.3 Taxa de carga / descarga

É a razão entre a capacidade nominal da bateria para o período de carga ou de descarga em horas. Por exemplo, uma descarga de 5 ampères, para uma bateria com 100 ampères-hora nominal, seria considerada uma taxa de descarga C/20.

3.1.4 Tensão de Circuito Aberto (VOC)

Quando a bateria está em repouso ou estado estacionário a saída é chamada de tensão de circuito aberto (*VOC-Open Circuit Voltage*). A tensão de circuito aberto depende do projeto da bateria, a gravidade específica e temperatura, a tensão de circuito aberto de uma bateria de chumbo-ácido completamente carregada é tipicamente cerca de 2,1 volts.

3.1.5 Força eletromotriz

A energia é transferida ao elétron para as baterias de modo a que eles fluem em torno de um circuito. A quantidade total de energia por Coulomb de carga fornecida pela bateria é referida como força eletromotriz. É calculada pela diferença entre o potencial elétrico dos dois eletrodos de cada célula. Esta força eletromotriz é numericamente igual à tensão de circuito aberto da bateria.

3.1.6 Profundidade de descarga (DOD)

A profundidade de descarga (*DOD-Depth of Discharge*) de uma bateria é definida, como a percentagem da capacidade que tenha sido retirada a partir de uma bateria, em relação à capacidade total de sua carga completa.

3.1.7 Estado de carga (SOC)

O estado de carga (SOC-State of charge) é definido como a porcentagem da energia armazenada em relação a uma bateria totalmente carregada. O estado de carga aumenta quando a bateria está carregando e diminui à medida que a bateria está descarregando.

3.1.8 Resistência interna

O caminho do elétron, enquanto flui através da bateria, terá uma resistência interna. Esta resistência interna depende do desenho células, a construção, a idade e condição. Portanto, a descarga causada por essa resistência interna, faz com que a tensão medida entre os terminais das células serem menor do que a tensão real. Assim, quando a corrente flui, a resistência é dada em (2):

$$r = \frac{V_{oc} - V_t}{t} \quad (2)$$

Vários fatores causam o aumento da resistência interna da bateria, tais como a sulfatação, temperatura, descarga completa ou profunda que conduz ao uso excessivo do material ativo. A sulfatação é um processo de formação da forma cristalina estável de sulfato de chumbo que não pode ser convertido ao chumbo, óxido de chumbo e ácido sulfúrico e com isso, não pode conduzir eletricidade [22]. Operação em alta temperatura aumenta a taxa de envelhecimento da bateria, portanto, aumenta a resistência interna.

3.1.9 Resistência de carga e descarga (Rc ou Rd)

São as resistências ligadas à resistência do eletrólito, resistência da placa e a resistência do fluído [23].

3.1.10 Taxa de auto descarga

Mesmo se a bateria não é carregada ou descarregada no modo de circuito aberto, uma bateria sofre uma redução em seu estado de carga, devido a mecanismos e perdas no interior da bateria. A taxa de auto descarga depende dos materiais ativos e da qualidade dos elementos utilizados na concepção baterias, isso, faz com que, cada bateria apresente uma taxa diferente.

3.1.11 Estado de saúde

Estado de saúde é definido para mostrar o quão danificado está a bateria e representa a porcentagem de capacidade restante, para a capacidade inicial quando a bateria é nova.

3.1.12 Vida útil da bateria

O tempo de vida da bateria vai ser afetado em diferentes formas, dependendo das condições em que são tratadas e num certo número de fatores de concepção. O fator de tensão da bateria é uma função da concepção, a seleção dos materiais e processos de fabricação. Em geral, a vida útil da bateria é citada pelo número de ciclos que ela é chamada a desempenhar. Alguns dos principais fatores da danificação da bateria são apresentados nas seções 3.1.13 a 3.1.18:

3.1.13 Corrosão da grade positiva

A capacidade disponível e da resistência interna da bateria é afetada pela corrosão da grade positiva. Como a grade corrói, uma parte da massa ativa reduz a conexão com o terminal, como resultado, a capacidade é diminuída. A resistência aumenta com o aumento da corrosão devido à conectividade reduzida do material corroída e a diminuição na seção transversal da grade positiva. A corrosão da grade positiva acontece com o aumento da tensão, a concentração de ácido e temperatura. Geralmente, quando a temperatura aumenta de 10 ° C, a taxa de uma reação eletroquímica

dobra, a vida da bateria diminui por um fator de dois para cada aumento de 10 ° C na temperatura média de funcionamento [24].

3.1.14 Sulfatação irreversível

Os cristais de sulfato são formados enquanto a bateria está descarregada e estes cristais são dissolvidos durante o carregamento. No entanto, se a bateria não é operada adequadamente os cristais de sulfato, crescem em tamanho, resultando em sulfatação irreversível. Isto leva a perda de capacidade da massa e de um baixo tempo de vida da bateria, pois, como os cristais de sulfato estão grandes, esses, não participarão da reação química, além de, deixar parte do material ativo isolado do terminal [22].

3.1.15 Limitação de carga

O processo de separação do material ativo do eletrodo, devido à sobrecarga e sulfatação reduzindo a capacidade da bateria é chamado de Limitação de carga. Enquanto sulfatação cria a diferença de volume dos cristais de sulfato e óxido de chumbo no eletrodo positivo levando a Limitação de carga. A criação de bolhas durante a sobrecarga separa o material ativo do eletrodo [22].

3.1.16 Amolecimento dos eletrodos

É a mudança na estrutura mecânica dos eletrodos e do material ativo, devido à sobrecarga ou carga insuficiente. Como a porosidade e área de superfície do eletrólito diminui medida que a reação química é concentrada em um menor espaço, o amolecimento dos eletrodos diminui a capacidade da bateria [22].

3.1.17 Eficiência da bateria

Devido à resistência interna e o fato de que a tensão de carga é maior do que a tensão de descarga. A energia retornada da descarga da bateria será

menor do que a energia utilizada para recarregar. Normalmente, uma bateria de chumbo terá de 80 a 90% de eficiência, vista em (3), quando se considera em ampères-horas [24].

$$Eficiência\ Ah = \frac{Descarga\ Ah\ X\ 100\ \%}{Carga\ Ah} \quad (3)$$

3.1.18 Fuga térmica

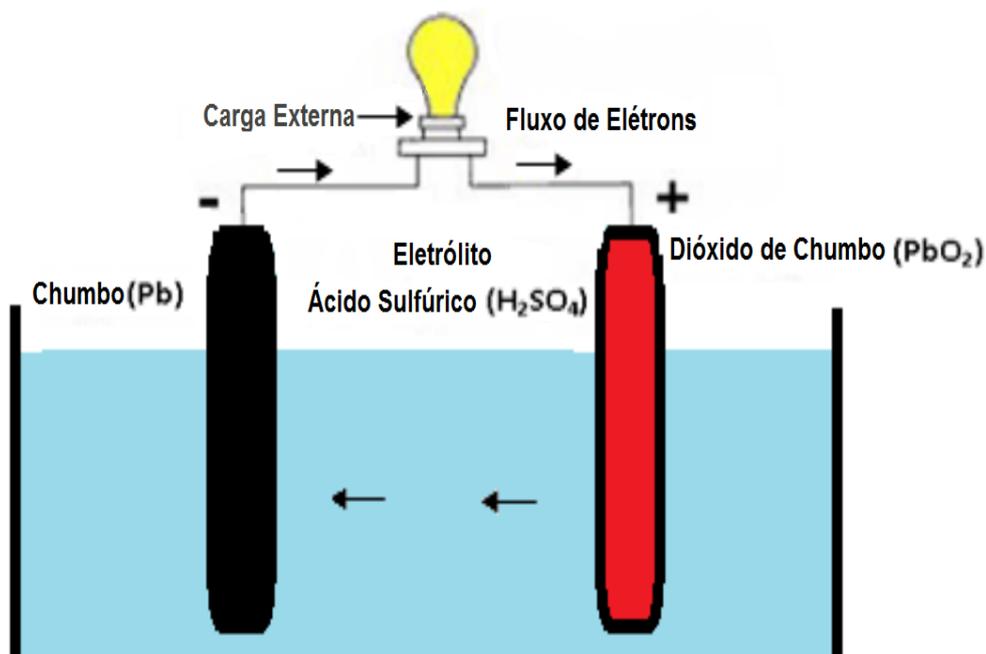
Fuga térmica é o exemplo extremo de quando a bateria esquenta, a uma taxa em que a bateria pode ser danificada, além do reparo. Se a bateria não for utilizada corretamente quando operando em alta temperatura, alta tensão, além da tensão de uso de gás que resulta em extrema evolução de gás, alto aumento da perda de água, queda excessiva de material ativo positivo e aumento da corrosão da grade positiva, então a bateria será danificada. Na fuga térmica, o calor gerado internamente na bateria é mais do que o que pode ser dissipado para o ambiente de modo que este também pode danificar o equipamento circundante. Daí em diante, é extremamente importante que a temperatura da bateria não seja alta, durante o carregamento em alta tensão [24].

3.2 Estrutura e operações químicas de uma bateria de chumbo ácido

Uma bateria de chumbo-ácido figura 1, típica consiste em compartimentos individuais de placas de chumbo na forma de células, imersas em ácido sulfúrico. Quando o ácido sulfúrico entra em contato com as placas de chumbo no interior da célula, uma reação química é produzida. Esta reação química que ocorre, depende de se a célula está experimentando carregamento ou o descarregamento.

O eletrodo positivo (ânodo) feito, a partir de dióxido de chumbo e o eletrodo negativo (cátodo) são feito de chumbo puro. Ambos os eletrodos são imersos no eletrólito que é constituído de ácido sulfúrico para baterias de chumbo-ácido. Estas estruturas formam o dispositivo de armazenamento de energia da bateria, e podem converter energia elétrica em energia química e vice-versa [24].

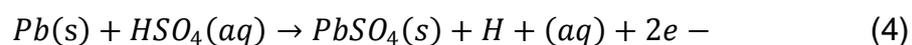
Figura 1: Bateria de Chumbo-ácido e seus componentes



Fonte: Referência [24] alterada pelo autor

Durante a descarga figura 2, ambas as placas irão retornar sulfato de chumbo. A condução de elétrons do cátodo visto em (5) vai retornar à célula pelo ânodo exposto em (4) da bateria, e isso, efetivamente irá descarregar a bateria [18].

Reação do ânodo:



Reação do Cátodo:

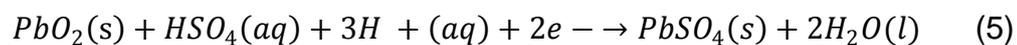
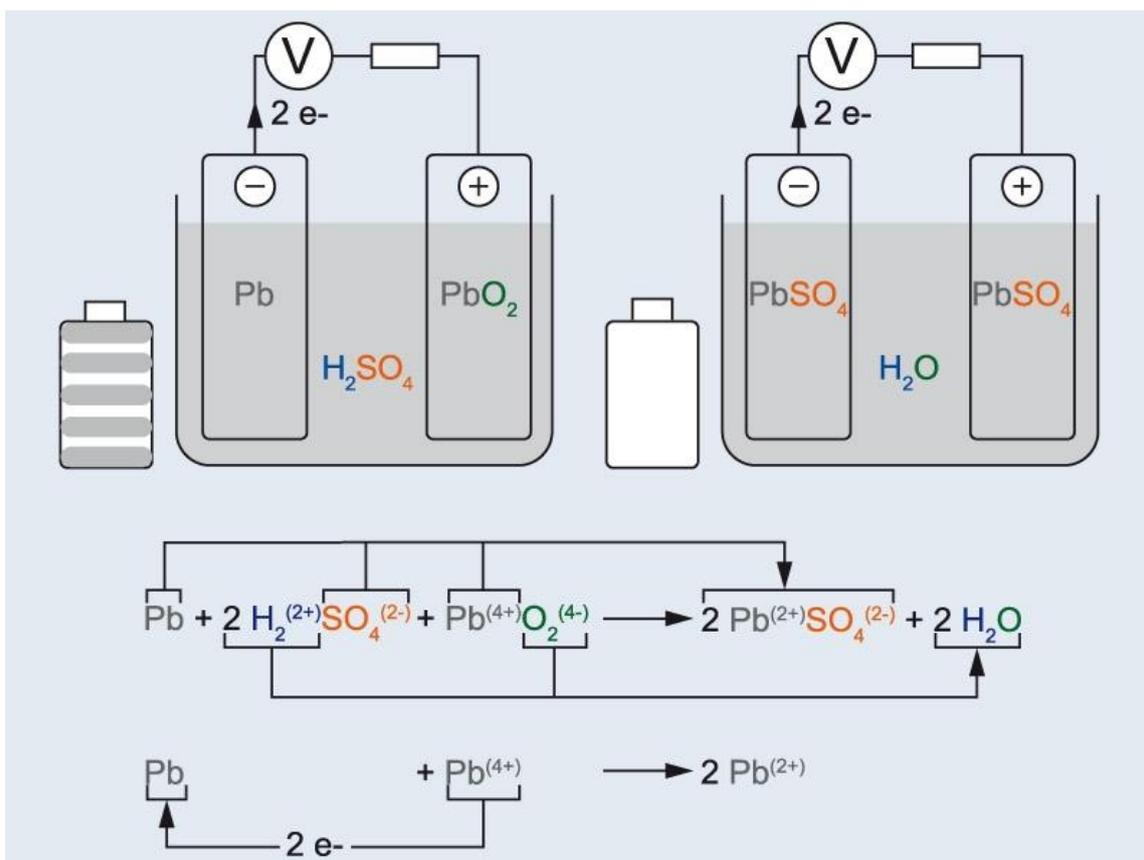


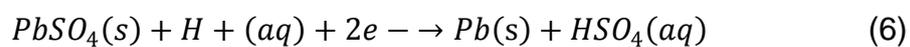
Figura 2: Processo de descarga da bateria de chumbo-ácido



Fonte: Referência [25] alterada pelo autor

Um subsequente recarregamento irá colocar a bateria de volta em um estado carregado figura 3, que altera os sulfatos de chumbo em óxidos de chumbo. O processo de carregamento é acionado por uma transferência de elétrons do ânodo mostrado em (6) para o cátodo exibido em (7) [25].

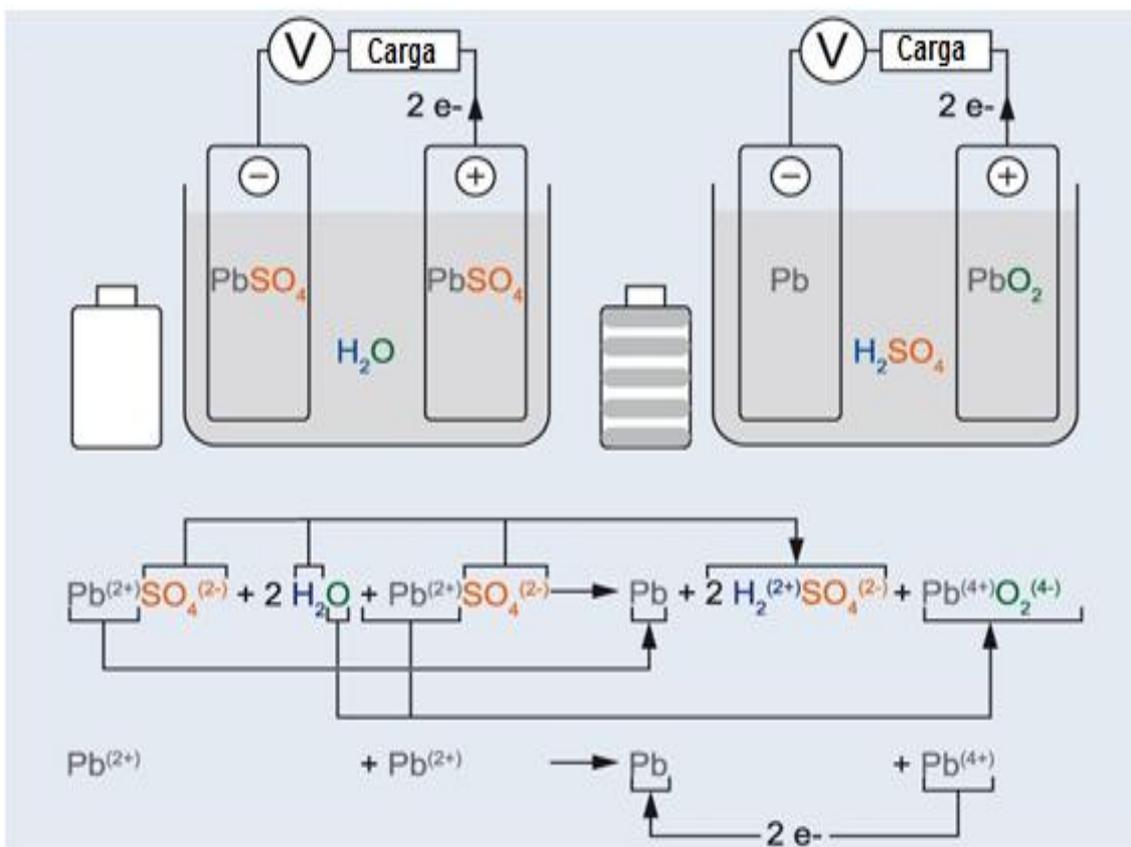
Reação do ânodo, equação 6:



Reação do Cátodo, equação 7:



Figura 3: Processo de carga da bateria de chumbo-ácido



Fonte: Referência [25] alterada pelo autor

O potencial do eletrodo é medido em condições normais de ensaio contra um eletrodo de hidrogênio normal. A representação elétrica para esta reação é apresentada em (8) [9]:

$$I_{bat}(V_{bat}) = I_{bat}(V_{catodo}) + I_{bat}(V_{anodo}) \quad (8)$$

A tensão do cátodo para uma bateria de chumbo-ácido é de 12,5 V, onde, a tensão em circuito aberto é 1,69 V, enquanto no ânodo é - 0.358 V. A voltagem da célula da bateria é determinada pela diferença de tensão entre o ânodo e o cátodo [25]. A tensão de circuito aberto é, portanto, 2,048 volts por célula para uma bateria de chumbo-ácido. Uma bateria com 12 V de tensão é constituída por seis células ligadas em série. Ao definir os valores de tensão do cátodo e ânodo, é possível analisar as reações químicas que ocorrem dentro das células da bateria para o modelo de bateria desenvolvido.

3.3 Tipos de bateria de chumbo ácido

3.3.1 Bateria chumbo-ácido convencional

Baterias convencionais têm um eletrólito líquido convencional e tampas removíveis para que o eletrólito possa ser diluído. Estas baterias são usadas devido a sua grande capacidade de reserva de energia, centros de informática, sistema independentes (*off-grid*) etc. Baterias convencionais de chumbo-ácido são menos sensíveis ao carregamento e devem ser mantidos na posição vertical [24].

3.3.2 Bateria seladas chumbo-ácido com eletrólito gelificado

O eletrólito da bateria como se sugere o nome, é geleificado, que a torna a prova de vazamentos. No entanto, este tipo de eletrólito não pode ser diluído de modo que deve ser evitado sobrecargas. Estas baterias duram apenas 1 a 2 anos, mas são tecnicamente fáceis de trabalhar [24].

3.3.3 Bateria chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA)

O eletrólito nas baterias VRLA é selado no recipiente. As placas, tamanho e peso deste tipo de baterias são diferentes de outros tipos de baterias uma vez que são totalmente dependentes do tipo de recipiente. Eles podem ser mobilizados e montados em qualquer posição. Há muito baixa gaseificação, devido à recombinação de gás interno [24].

3.3.4 Baterias chumbo-ácido AGM (*Absorved Glass Mat*)

O eletrólito neste tipo de bateria é mantido entre as placas, sendo absorvidos na esteira de tal modo que o eletrólito permaneça imobilizado. Ao contrário das baterias com eletrólito gelatinoso, podem suportar sobrecargas. No entanto, estas baterias apresentam um valor (R\$) muito mais elevado [24].

3.4 Carga / descarga métodos e técnica

O carregamento da bateria de chumbo-ácido é feito com corrente contínua. O carregamento e descarregamento da bateria desempenha um papel vital no tempo de vida da bateria. Durante a descarga a reação química é de tal modo que os componentes ativos da placa da bateria, ou seja, de chumbo e dióxido de chumbo, na placa negativa e placa positiva, converte em elétrons livres, respectivamente, água e sulfato de chumbo. A parte mais complexa é durante a recarga, estes sulfatos são eliminados por meio da recombinação de água em ácido; no entanto, este deve ser realizado sem perder gases, como hidrogênio e oxigênio, o que torna a água. A principal razão das perdas dos gases é se o carregamento é feito, além da tensão de gaseificação (2,54 V) ou carregamentos a temperaturas mais elevadas.

A técnica de carregamento da bateria deve também considerar a conversão completa dos componentes ativos. A bateria pode aceitar uma elevada energia de corrente, mas o processo químico na bateria é muito lento.

O consumo de energia elétrica, mais rápido do que a produção química pode causar a sobrecarga local, o sobreaquecimento, e reação química indesejável perto dos eletrodos, prejudicando assim a célula. A seguir, um período de repouso é desejável de modo a que o processo químico pode propagar-se ao longo da bateria. O carregamento da bateria é análogo a derramar cerveja em um copo. Se a cerveja for derramada muito rapidamente, em seguida, um monte de espuma pode ser visto e um pouco de cerveja na parte inferior do copo, mas se a cerveja é derramada, muito lentamente a cerveja, completará o copo com o mínimo de espuma [27].

3.5 Métodos de carregamento e técnicas utilizadas para baterias chumbo-ácido

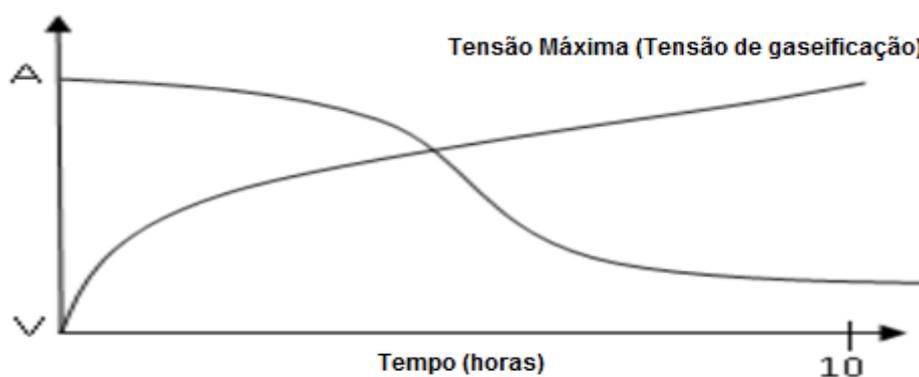
Normalmente, o tempo de carregamento de baterias de chumbo-ácido seladas é 12-16 horas, até 36-48 horas para as baterias estacionárias. Mas o tempo de carregamento pode ser reduzido para 10 horas ou menos com os métodos de carregamento com tensão mais elevada ou com múltiplos estágios [27]. Portanto, as técnicas e metodologia de carregamento de baterias de

chumbo-ácido variam de acordo com a demanda e tempo de carregamento. Algumas das técnicas de carregamento são discutidas a seguir:

3.5.1 Carregamento com estágio simples (W ou Wa)

Este é o tipo mais simples do método de carregamento. O carregador é construído de acordo com o tipo de bateria. Se houver grande quantidade de tempo de carregamento disponível (10 horas), então este tipo de técnica de carga é usado. A bateria é carregada inicialmente com corrente alta, definido pelo fabricante e em seguida, diminuiu exponencialmente a medida que a tensão sobe até a bateria estar totalmente carregada, esse comportamento é mostrado na figura 4. O carregador é então desativado. A eficiência é de cerca de 70 a 75% e os aumentos de temperatura de até + 70 ° C. Com este tipo de método de carregamento a duração da bateria é de cerca de 5 a 6 anos [26].

Figura 4: Característica de tensão e corrente para o carregamento com estágio simples

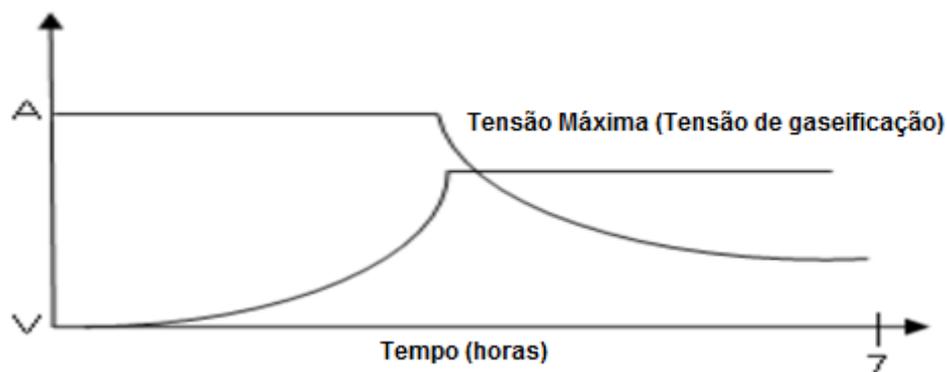


Fonte: Referência [26] alterada pelo autor

3.5.2 Carregamento com estágio duplo (WoWa)

Neste tipo de método de carregamento, a bateria é carregada inicialmente com corrente constante (corrente nominal) até que a tensão de gaseificação for atingida, então a corrente é diminuída exponencialmente à medida das características W_a , como apresentado na figura 5. A eficiência da carga é de cerca de 85% e os aumentos de temperatura de até + 70 ° C. O tempo de carga é geralmente 6-7 horas. A vida útil da bateria é geralmente de 5 anos a partir deste tipo de métodos de carregamento [26].

Figura 5: Característica de tensão e corrente para o carregamento com estágio duplo

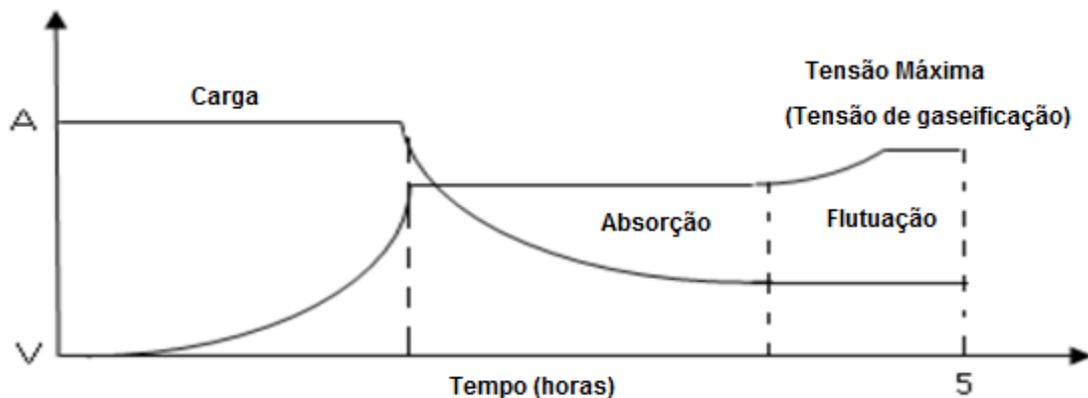


Fonte: Referência [26] alterada pelo autor

3.5.3 Carregamento automático (IU1a)

Neste tipo de método de carregamento, inicialmente, a bateria está carregada com uma corrente constante até que a tensão da célula é atingida ao valor pré-definido. Este tipo de carregamento é chamado de carga de fase. Na segunda parte, na qual a tensão alcança o valor pré-definido até ser considerada constante, onde a corrente diminui exponencialmente, até atingir outro valor pré-definido, é chamado de absorção. Nesta fase, a saturação é fornecida à bateria. Finalmente, o carregador muda para o modo de corrente constante até que a tensão atinge outro valor pré-estabelecido que seja chamado de carga flutuante, mostrado na figura 6. Durante esta fase, as perdas devido auto descarga são compensadas. Finalmente, o carregador está desligado. Este tipo de carregador é altamente eficiente, com eficiência cerca de 95% e a duração da carga é de 5 a 6 horas. A temperatura sobe até 150 ° C e a expectativa de vida é de cerca de 3 a 4 anos [26].

Figura 6: Característica de tensão e corrente para o carregamento automático

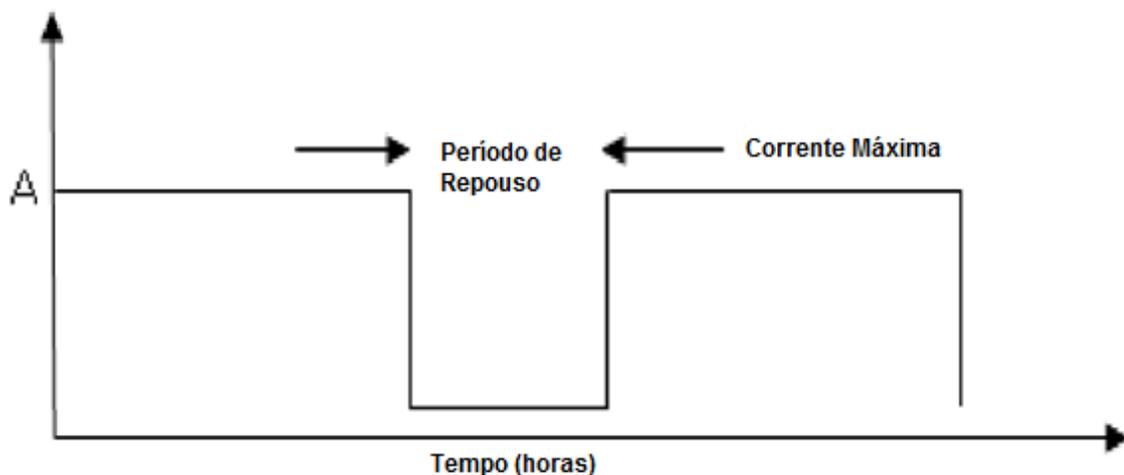


Fonte: Referência [26] alterada pelo autor

3.5.4 Carga pulsada

A bateria é carregada pela corrente de pulso. A bateria é carregada inicialmente por uma corrente constante e, em seguida, não há corrente. Depois de um pequeno período de descanso a bateria é carregada novamente. Este período de repouso permite que as reações químicas na bateria estabilizem e a equalização da reação por toda a carga do eletrodo, mostrado na figura 7. Ele também ajuda na redução da formação de gás, o crescimento de cristais e passivação. É preciso muito tempo para carregar a bateria, no entanto, o tempo de vida da bateria pode ser aumentado a partir deste tipo de carregador [27].

Figura 7: Característica de corrente para o carregamento com carga pulsada

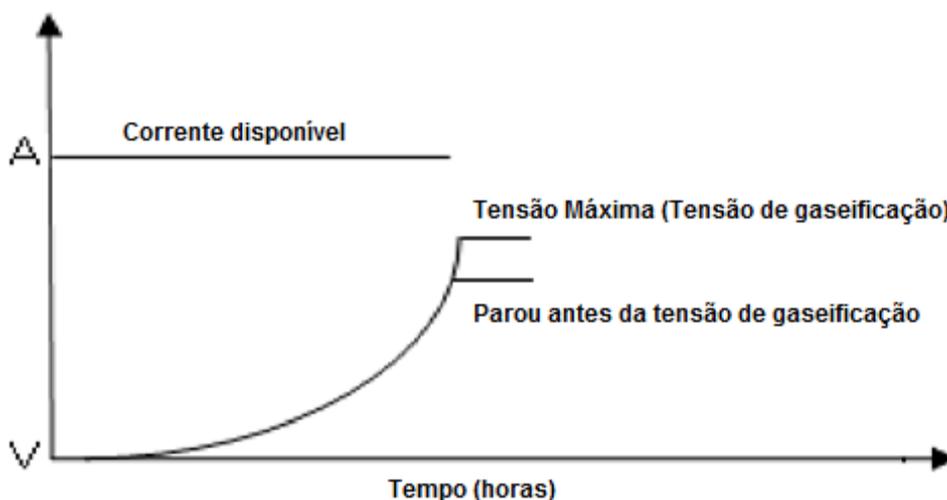


Fonte: Referência [26] alterada pelo autor

3.5.5 Carregamento rápido

A bateria é carregada com corrente constante acima do limite atual da temperatura levando em consideração o manual do fabricante. O carregamento da bateria é parado, antes que a tensão de carga de gaseificação seja atingida, mostrado na figura 8. Com este tipo de carregador a bateria está carregada apenas 80%, mas a bateria pode ser carregada dentro de uma hora. O tempo de vida útil da bateria é de cerca de 2 a 2,5 anos. É principalmente aplicável quando não há tempo para carregar a bateria [27].

Figura 8: Característica de tensão e corrente para o carregamento rápido



Fonte: Referência [26] alterada pelo autor

3.5.6 Descarregando

A bateria deve ser descarregada na corrente nominal e a taxa de descarregamento é mantida constante. Quando o estado de carga da bateria atingir 20%, em seguida, a descarga deve ser interrompida.

Se a bateria é sobre descarregada, em seguida, o eletrólito de ácido sulfúrico pode ser empobrecido do íon sulfato e torna-se essencialmente água. A deficiência do íon sulfato irá causar impedância na célula para aumentar a resistência e haverá um obstáculo no fluxo de corrente.

3.5.7 A escolha do método de carregamento adequado

O método de carregamento depende da demanda, do estoque disponível e do tempo de carregamento. Para esse estudo o carregamento é feito por carregadores comerciais, geralmente, acoplados diretamente nas baterias, ou passado pelo joystick da cadeira de rodas elétrica, onde a bateria pode ser carregada durante a noite e descarregada durante o dia. A principal preocupação é a eficiência da bateria e o tempo de vida da bateria. Usando Wa requer grande quantidade de tempo, enquanto WoWa é menos eficiente em comparação com IUla. O carregamento de impulsos exige grande quantidade de tempo e uma carga rápida não é possível que a corrente seja grande. Daí em diante, a escolha do método de carregamento adequado será IUla com suas vantagens de alta eficiência de carregamento, tempo e expectativa de vida.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DA BATERIA

Neste capítulo é tratado sobre a modelagem matemática e de circuitos elétricos referentes à bateria de chumbo-ácido. Dá-se início a validação do modelo, fazendo uma breve discussão sobre o modelo simulink e a simulação dos resultados. Expressa os resultados obtidos com os testes práticos realizados em bancada.

Quando realizamos um estudo de investigação sobre o comportamento de baterias, a modelagem é um importante fator a ser elaborado. Essa modelagem gera alguns benefícios durante a simulação, pois, pode eliminar limitações de tempo, custos de instalação, o processo de construção de um módulo de teste físico caro e permite ao usuário ter controle sobre fatores externos ou parâmetros.

Expresso isto, há uma dificuldade inerente na modelagem de baterias para a aplicação em testes de objetos reais, e isso se deve à complexidade dos sistemas de bateria e as reações químicas que ocorrem dentro da mesma.

Dessa maneira, a capacidade de caracterizar e definir um modelo de bateria torna-se limitado, isso porque, além do que já foi citado anteriormente existem inúmeras normas regulamentadoras para cada tipo de aplicação de bateria, aliados ao fato de que os fabricantes raramente compartilham suas técnicas de desenvolvimento, o que torna a realização de um teste de modelagem de bateria para o projeto da bateria um tema difícil a ser pesquisado.

O modelo de bateria desenvolvido neste trabalho visa à aplicação em um sistema real para uma cadeira de rodas motorizada fabricada pela empresa D&D Tecnologia. Esse modelo foi usado para realizar um teste de descarga e carga de uma bateria em condições normais de ensaio ao traçar as curvas e obter o estado relevante de leituras de carga atuais e tensão.

4.1 Equações dinâmicas do modelo de circuito

A equação dinâmica do modelo de bateria de chumbo-ácido proporcionará o circuito de descarga e de capacidade de carga, como uma função do tempo. Em (9) diz que, a estimativa do estado de carga é dada por [28]:

$$SOC = \alpha SOC_c + (1 - \alpha) SOC_V \quad (9)$$

Onde:

SOC_c : é a Contagem-Coulomb baseada no SOC;

SOC_V : é a Tensão baseada no SOC;

$\alpha(\in[0,1])$: É o fator de peso.

À medida que o estado de carga é estimado com base na quantidade de carga que foi extraída a partir da bateria, em (10) determina o estado de carga como uma função de tempo sendo calculada como:

$$SOC_c(t) = SOC_c(0) - \frac{1}{Q} \int_0^t I(t) dt \quad (10)$$

Onde:

Q é uma constante relacionada com a corrente e com o estado de carga.

O modelo de simulação é baseado no processo iterativo inerente das equações de SOC (9) e (10). Há certos comandos no MATLAB e blocos (ex: comando function) que permitem a adaptação destas equações matemáticas para serem usadas num processo de simulação, com isso, através das equações 9 e 10 é possível obter resultados da contagem coulomb e tensão baseada em SOC.

4.2 Modelagem do circuito elétrico

O modelo desenvolvido em Matlab-Simulink é baseado nos resultados da investigação de um modelo de bateria genérica para a simulação dinâmica de veículos elétricos híbridos [29]. Existem vários modelos de circuito elétrico utilizados em baterias, para o desenvolvimento do modelo Simulink utilizado no estudo. Neste trabalho foram pesquisados quatro tipos de circuitos que são explicados no item 4.3.

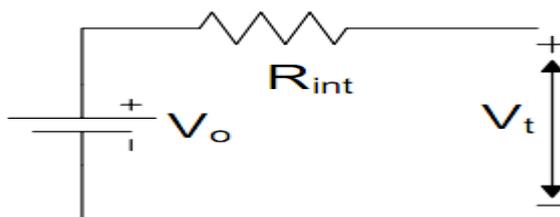
4.3 Modelos de circuito elétrico da bateria

Um modelo para o circuito de uma bateria elétrica pode ser concebido como uma fonte de tensão ligada a um resistor.

A figura 9 mostra um modelo simplificado de bateria [23]. O modelo consiste em uma bateria com tensão de circuito aberto (V_o), uma constante que é equivalente para a resistência interna (R_{int}), e a tensão do terminal da bateria (V_t). Esta tensão é obtida através da medição da tensão em circuito aberto. Ao ligar a carga e medir a corrente do terminal, bem como a tensão, o valor para R_{int} pode ser obtido. No entanto, a resistência interna é diferente para as condições de descarga e de carga [23].

O modelo discutido aqui não tem a capacidade de gravar qualquer dinâmica da bateria.

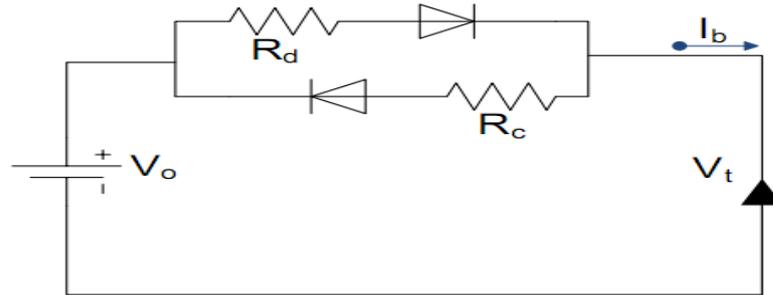
Figura 9: Modelo Simplificado de Bateria



Fonte: Referência [23]

Para ter em conta os diferentes valores de resistência em condições de carga e descarga, o circuito é modificado como se mostra na figura 10 [30] com um curto circuito de resistência aplicada através dos terminais da bateria.

Figura 10: Modelo de Bateria com Resistência Interna

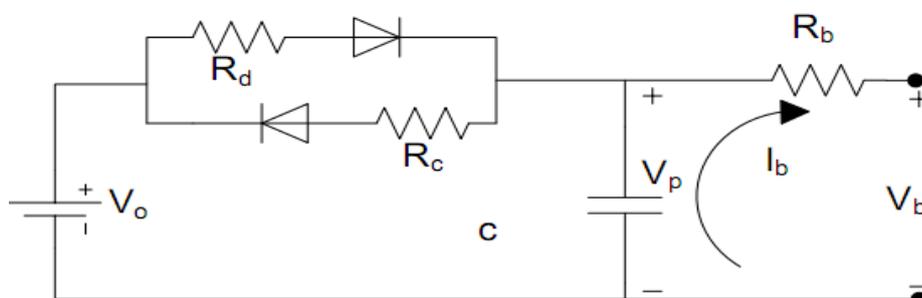


Fonte: Referência [30]

O modelo de bateria na figura 10 é constituído por duas resistências internas; R_c e R_d . Devido aos diodos, ou um ou outro são ativos durante o processo de carga e descarga, respectivamente. Os parâmetros para as resistências (R_c e R_d) do modelo explicam a perda de energia, incluindo quaisquer perdas elétricas e não elétricas (perdas por temperatura elevada). Durante os processos de carga e descarga, um diodo, irá fornecer corrente estando polarizado enquanto o outro está em modo de polarização reversa. Os dois diodos são encontrados somente para fins de modelagem. Eles não têm presença física em uma bateria.

O modelo necessário para simular a difusão química dos eletrólitos e o efeito resultante, causados pelas correntes transitórias no interior da bateria. Isto é conseguido através da adição de um capacitor no modelo, como mostrado na figura 11.

Figura 11: Modelo de Bateria com Capacitor



Fonte: Referência [30]

Finalmente, a bateria é modelada utilizando um controlador de circuito fechado com realimentação proporcional integral para proporcionar o modelo

com uma fonte de tensão que é controlada e em série com uma resistência. Esta configuração é mostrada na figura 12. Isto permitirá que o modelo seja utilizado para simular uma carga e processo de descarga com a fonte de tensão controlada, com base no SOC da bateria.

A fonte de tensão controlada é descrita pela equação 11 [30]:

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp\left(-B \cdot \int idt\right) \quad (11)$$

Onde:

E é a tensão a vazio (V),

E_0 é a constante de tensão da bateria (V),

K é a tensão de polarização (V),

Q é a capacidade da bateria (Ah),

$\int idt$ é a carga real da bateria (Ah),

A é a amplitude da parcela exponencial (V),

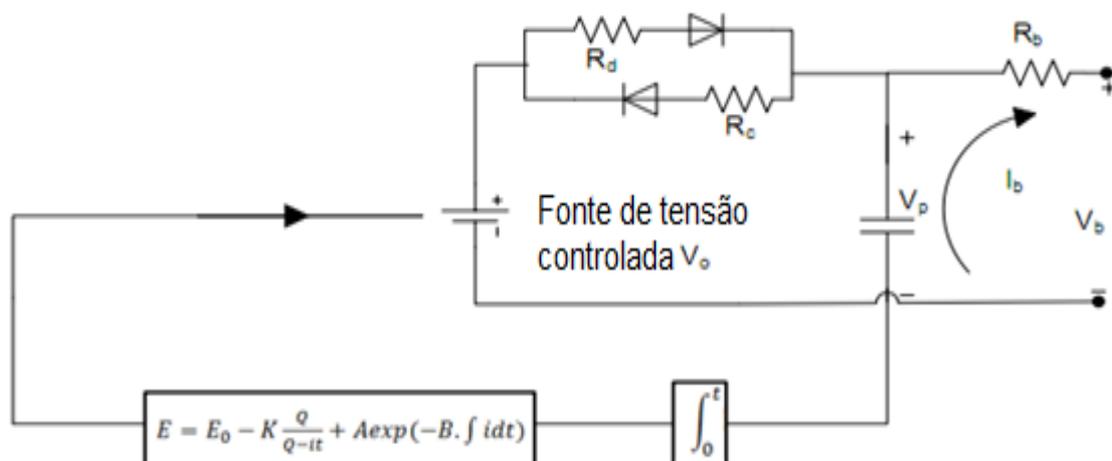
B é o inverso constante de tempo da parcela exponencial (Ah)⁻¹,

V_{bat} é a tensão da bateria (V),

R é a resistência interna (Ohms), e

I é a corrente da bateria (A).

Figura 12: Modelo de Bateria com Controle de Tensão



Fonte: Referência [21] alterada pelo autor

4.4 O Estado de carga da bateria onde $V_p \leq V_{oc}$

No caso de o carregamento da bateria, a simulação tem um controlador de circuito fechado de realimentação no qual se compara a diferença em valores do estado de carga da bateria (SOC) pré-definido para determinar se a bateria tiver atingido o menor valor especificado de SOC. Se o valor ajustado mais baixo for atingido, o motor vai iniciar o carregamento da bateria em um valor atual com taxa pré-definida. A equação 12 que descreve este processo de o modelo de carga é dada como [29]:

$$\begin{aligned}
 f1(it, i^*, i, Exp) & \quad (12) \\
 & = E_0 - K \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(-B \cdot it) \\
 & + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right)
 \end{aligned}$$

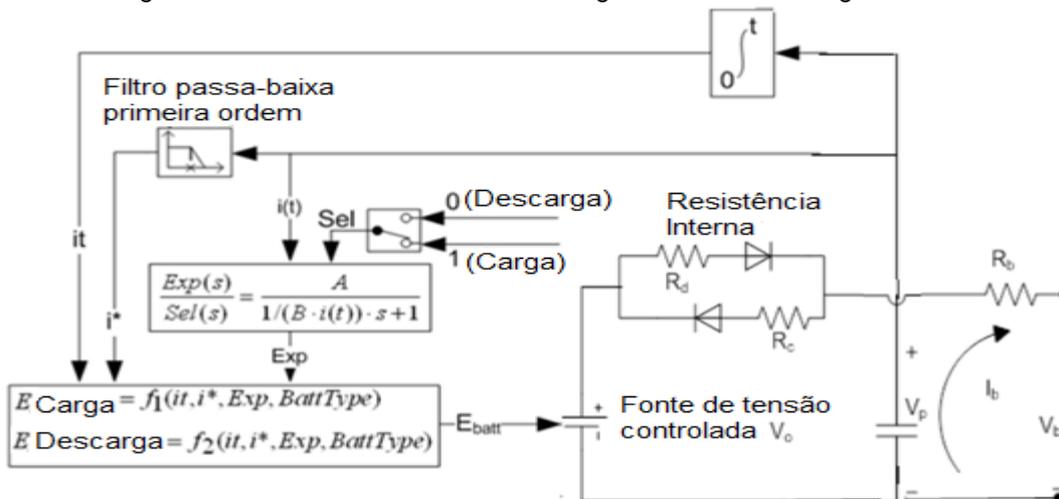
4.5 O Estado de descarga da bateria onde $V_p > V_{oc}$

Semelhante ao estado de carga da bateria, um controlador de laço de realimentação (*loop de feedback*) para o estado de descarga também é projetado para medir a diferença de valores SOC pré-definidos para determinar se a bateria está em um estado de descarga onde $V_p > V_{oc}$. A equação 13 que descreve o processo de descarga do modelo é dada como [25]:

$$\begin{aligned}
 f2(it, i^*, i, Exp) & \quad (13) \\
 & = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(-B \cdot it) \\
 & + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right)
 \end{aligned}$$

O diagrama de circuito figura 13 é então modificado para incorporar o estado de carregamento e descarregamento da bateria explicado pelas equações (12) e (13).

Figura 13: Modelo de Bateria com Carregamento e Descarregamento



Fonte: Referência [30] alterada pelo autor

4.6 Suposições para o modelo

Houveram algumas suposições feitas para o modelo de simulação listado abaixo [30]:

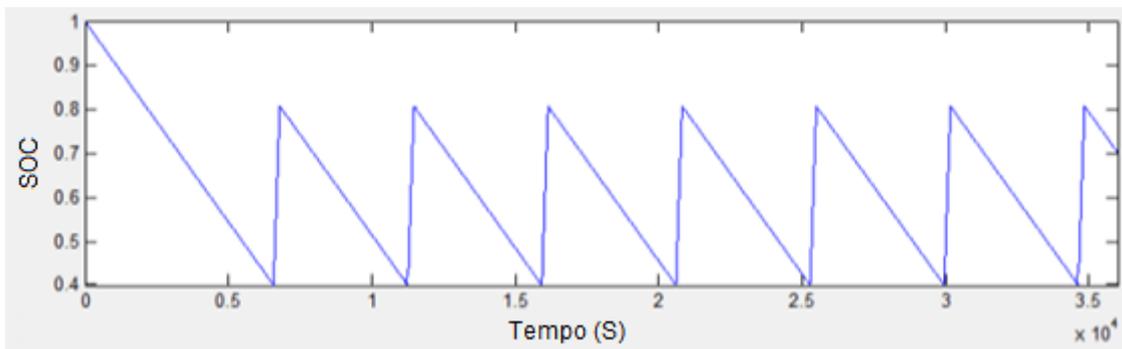
- A resistência interna é considerada constante durante a sequência de carga e descarga.
- Os parâmetros para o modelo são baseados em valores encontrados a partir da sequência de descarregamento e carregamento.
- Não há nenhuma alteração com a capacidade da bateria ou a amplitude da corrente.
- A temperatura da bateria não é levada em consideração.
- O estado de autodescarga não está representado; e a bateria é considerada como não tendo efeito sobre a memória de armazenado.

4.7 Processo de validação do modelo

A simulação foi baseada em valores SOC que variam de 0,4 a 0,8. Isto foi feito porque a janela de tensão bem como o tempo de vida ideal de uma bateria de chumbo-ácido opera, dentro destes valores. Assim, o processo de descarga irá começar a partir de um 1,0 SOC e alcançar o valor de 0,4 SOC. Essa queda ocorre devido ao processo de carga e descarga característicos da bateria de chumbo-ácido, dessa forma, o processo de carga inicia com o valor de 0,4 SOC e parando em 0,8 SOC.

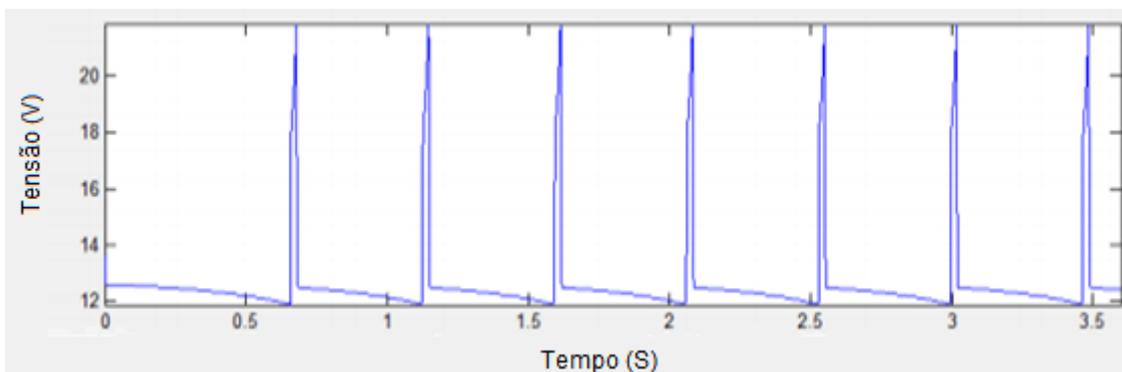
Tensão

Figura 14: Gráfico da Tensão



SOC

Figura 15: Gráfico do Estado de Carga



Os gráficos das variáveis de saída ilustrados nas figuras 14 e 15 foram obtidas a partir da medição na tela de tela do osciloscópio (*Scope*) para o modelo de bateria no Simulink.

Conforme explicado anteriormente, o estado de carga (SOC) cai para o valor de 0,4 durante a descarga, antes de o motor começar a carregar a bateria com uma corrente constante, até o processo ser encerrado quando atinge o valor de 0,8 SOC.

O processo de descarga e carga repete-se para a duração da simulação e a tensão de saída é medida. Esses resultados obtidos, validam que o modelo de bateria de chumbo-ácido no Simulink está funcionando conforme o esperado.

O processo de simulação foi conduzido como apresentado na tabela1:

Tabela 2: Processo de simulação no Simulink

Número	Processo de simulação do modelo de bateria de Chumbo-ácido no Simulink
(1)	Botão de início da simulação está ligado; (1) O tempo de execução da simulação está definido para 36.000 segundos (2) Os dados são capturados via MATLAB espaço de trabalho e salvos em arquivo ordenado 'Filename. xls'
(2)	Descarga da bateria; (1) A bateria começa descarga de um SOC de 100% (2) A medição é obtida para a tensão, SOC, a velocidade do motor e corrente de armadura.
(3)	Carregamento da bateria; (1) O motor começa carga com uma corrente constante (2) A medição é obtida para a tensão, SOC, a velocidade do motor e corrente de armadura.
(4)	Simulação para após 36.000 segundos.

4.8 Parâmetros dos fabricantes – *datasheet*

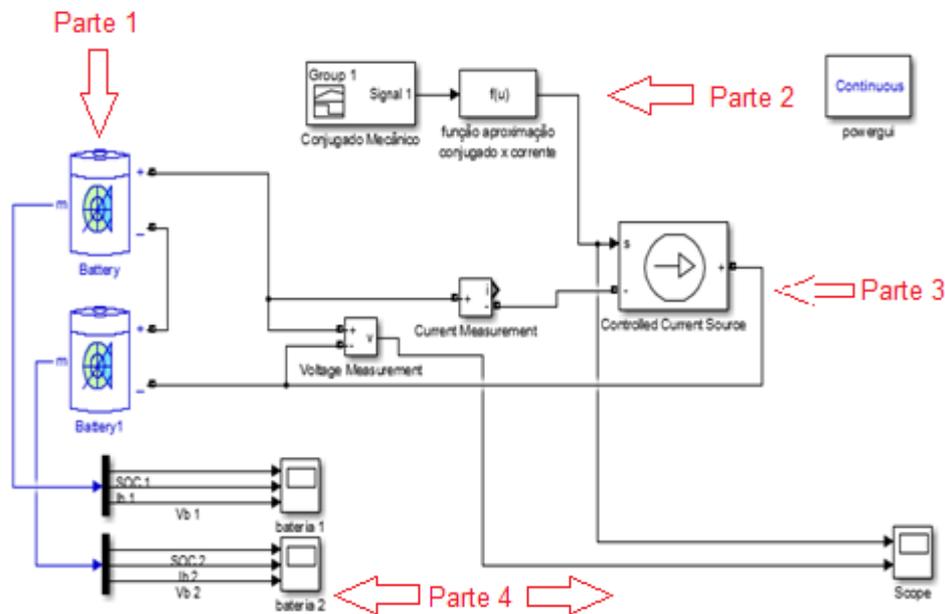
A tabela 2 abaixo contém os dados de parâmetros utilizados no modelo da simulação. Informações mais detalhadas sobre os vários parâmetros analisados nas baterias podem ser encontrado em seu manual de fabricação no Anexo A.

Tabela 3: Parâmetros das Baterias

Parâmetros	FullRiver 12V 15Ah	Trojan 12V 15Ah	Global 12V 15Ah
Tensão nominal E_0 (V)	12,5	12,5	12,5
Resistência Interna (Ohms)	0,025	0,035	0,015
Tensão constante de carga K (V)	0,23	0,25	0,25
Capacidade Nominal B (Ah) ⁻¹	15	15	15
Corrente de Descarga (A)	25,6	26,5	28,5

4.9 Discussão sobre o modelo desenvolvido no simulink e simulação de resultados

Figura 16: Modelo da Bateria de Chumbo-Ácido no Simulink



A figura 16 mostra o diagrama de blocos desenvolvido para simular o processo de carga e descarga de uma bateria de chumbo-ácido. A simulação foi desenvolvida em Matlab Simulink e realizada em quatro partes distintas. A primeira parte é o modelo da bateria pré-definido, desenvolvido no Matlab. Segunda parte é a máquina DC que carrega a bateria por uma corrente de carga constante. A terceira parte como é demonstrado na figura 16 trata-se do controlador de ciclo para o *feedback*, que leva a medição do estado de carga em diferentes intervalos e compara-o com SOC (*State of Charge*) pré-definidos limites superior e inferior, que, como explicado anteriormente é ajustado para 0,8 e 0,4 respectivamente.

Por sua vez, o controlador tem controle sobre a decisão de carregar a bateria através da máquina DC. A quarta e última parte é a aquisição de dados, onde a saída é ligada a uma tela do osciloscópio e a saída de simulação é apresentada na área de trabalho; e, posteriormente, salvo como um arquivo de planilha do Excel para a análise independente dos dados coletados. Uma explicação detalhada de cada componente individual pode ser encontrada no Apêndice B.

4.10 Análise dos resultados da simulação

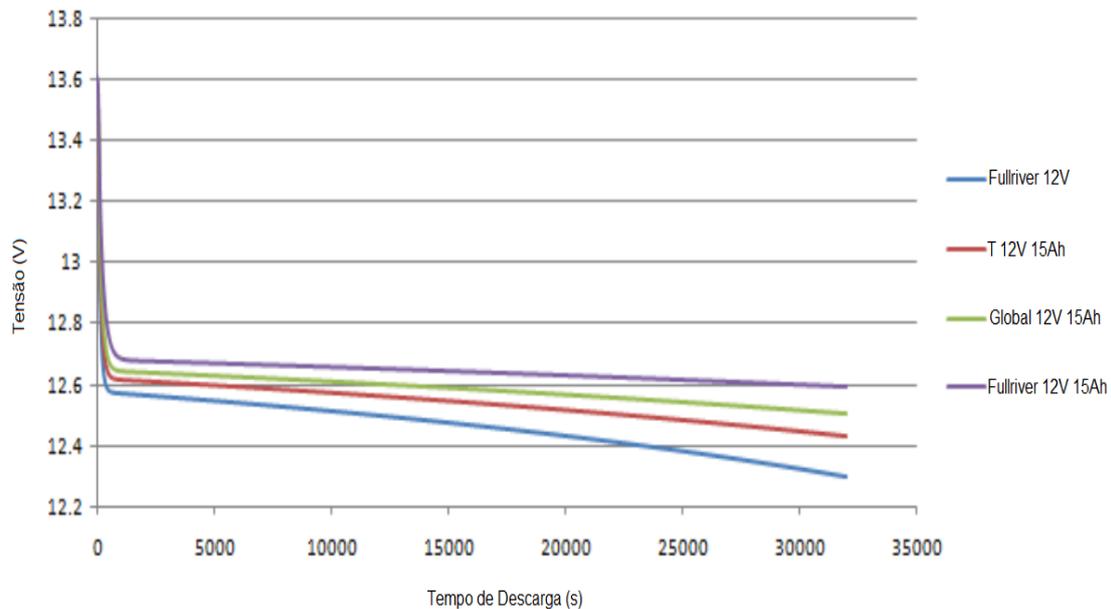
4.10.1 Profundidade de descarga (DOD) (%)

Refere-se a quanto da capacidade é retirada a partir da bateria. Este valor é dado como uma porcentagem. Baterias de ciclo profundo como as baterias de chumbo-ácido de grande capacidade são capazes de resistir a uma profundidade de descarga de até 80%. A vida da bateria está diretamente relacionada com a profundidade de descarga e o número de ciclos de carga que experimenta durante sua vida útil.

4.10.2 Correlação entre a tensão da bateria e a taxa de profundidade de descarga

De acordo com o Solar International Handbook [29], a taxa em que a bateria é descarregada afeta diretamente a capacidade. Se a bateria está descarregando demasiadamente depressa, a capacidade é significativamente reduzida e o oposto ocorre com a capacidade, quando a bateria é descarregada ao longo de um período prolongado de tempo. No gráfico que relaciona a tensão pelo tempo de descarga abaixo, são mostradas as diferentes taxas de descarga para tensões nominais da bateria de três dos fabricantes ao longo de um período de tempo de 36 mil ciclos por segundo. O nível de tensão nominal ao longo do tempo é significativamente afetado pela taxa de descarga, com a tensão nominal experimentando uma redução drástica depois de um período de tempo. Isso também foi validado e comparado com fabricantes encontrados no Apêndice A.

Figura 17: Gráfico da tensão da bateria versus o tempo de descarga



4.10.3 Efeito da temperatura na capacidade da bateria

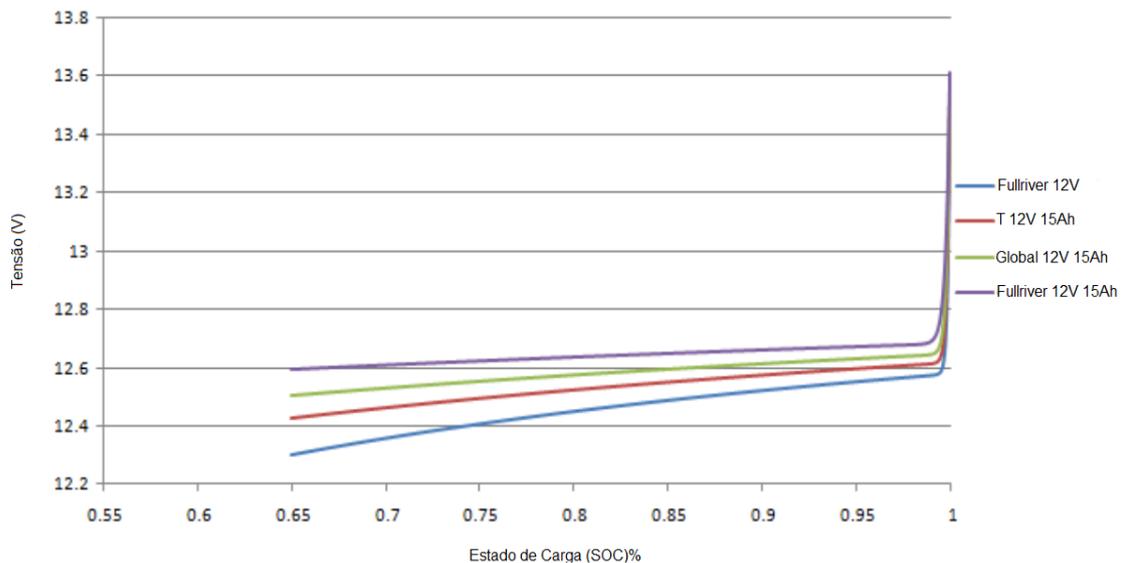
Este teste não levou em conta a temperatura, um estudo mostrou [31] que as baterias são sensíveis ao meio ambiente e são particularmente afetadas pela temperatura. Embora a capacidade da bateria diminua com temperaturas mais baixas, a vida da bateria, na verdade, aumenta com temperaturas mais frias. Os fabricantes prevêem uma perda de 50 por cento na vida da bateria para cada 15 graus F (- 9.44 C°) acima da temperatura normal das células que é de 77 graus (25 C°) [28]. Temperaturas extremamente frias podem ter um efeito prejudicial na bateria por congelamento e inibir o movimento de eletrólitos.

4.10.4 Estado de carga da bateria

O nível de tensão nominal da bateria está relacionado com o estado atual da carga na mesma. Conforme mostrado no gráfico abaixo, o nível nominal de tensão é significativamente maior com cada aumento no estado de carga da bateria. Isto sugere que uma bateria com um elevado estado de carga

é responsável por apresentar níveis de tensão mais elevados e é consistente com todas as baterias através da placa.

Figura 18: Gráfico da tensão versus SOC (%/100) em correntes de descarga diferentes



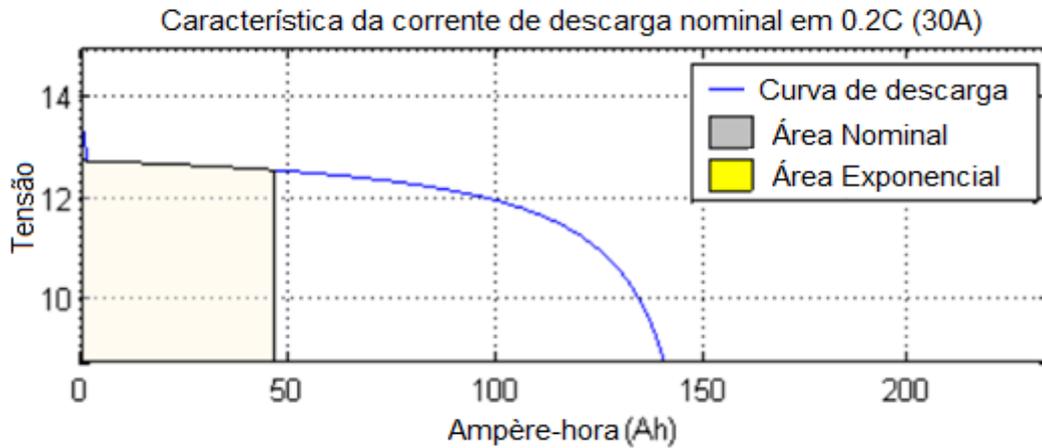
4.10.5 Capacidade Ampère-hora

Baterias de ciclo profundo são classificadas em termos de Ampère-Hora (Ah). Isto significa a quantidade de amperagem que uma bateria pode armazenar dentro de uma hora ou ampère x hora. A figura 19 foi obtida a partir do modelo de descarga da bateria contido no Simulink. A figura 20 mostra as tensões nominais de quatro baterias diferentes em quatro taxas de ampère-hora. Outra razão para especificarmos essa taxa é por causa do efeito que as baterias sofrem durante esse processo ao qual foi definido pela experiência de Puekert. A Lei Puekert é definida pelo aumento do débito de descarga e subsequente diminuição da capacidade disponível da bateria [32]. Fatores como a profundidade de descarga, taxa de descarga, temperatura, idade e carga terá um efeito sobre a capacidade da bateria.

A capacidade em watts-horas (Wh) de uma bateria é o produto entre a capacidade nominal e a tensão da bateria. Adicionando pilhas em série aumenta o armazenamento de energia, aumentando a tensão enquanto a capacidade ampère-hora permanece constante. Por outro lado, a adição de

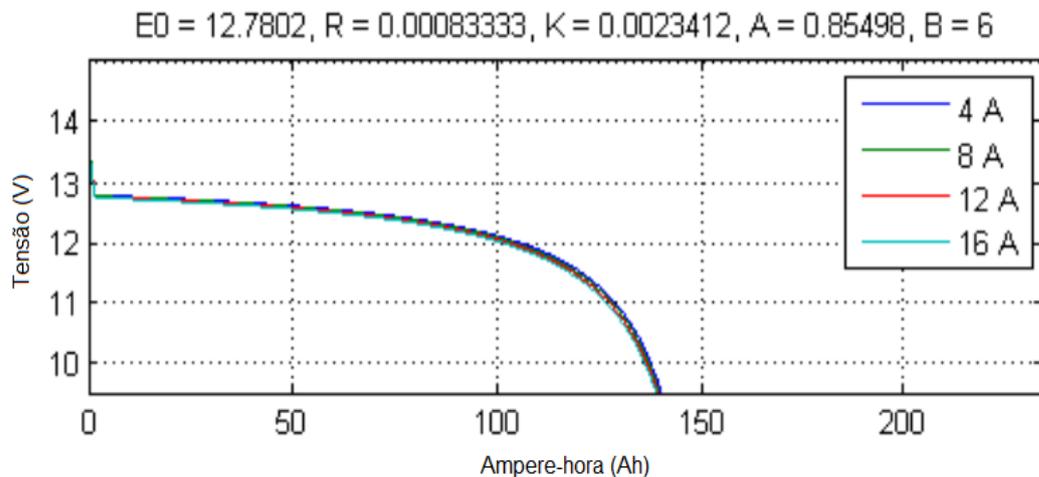
baterias em paralelo aumenta o armazenamento de energia através do aumento da capacidade nominal, embora mantendo constante a tensão.

Figura 19: Modelo de descarga da bateria no Simulink



Fonte: Matlab Simulink

Figura 20: Taxa de descarga das baterias testadas na simulação



4.10.6 O Efeito da Lei de Peukert para as diferentes especificações da bateria pelos fabricantes

A capacidade da bateria é uma função do tempo na qual se avalia o tempo de descarga da mesma. Em adição a isto, a capacidade de uma bateria é reduzida conforme a sua descarga de corrente aumenta. Esta redução de capacidade da bateria foi documentada por Peukert em 1897 [23]. O efeito Peukert é uma descrição de como a capacidade da bateria é diretamente afetada pela velocidade em que a bateria está sendo descarregada. Os

fabricantes de baterias especificam a capacidade da bateria para diferentes períodos de descarga.

Peukert também descobriu que a capacidade de uma bateria pode ser encontrada através da representação gráfica da taxa de descarga.

$$C = I^k t$$

Onde:

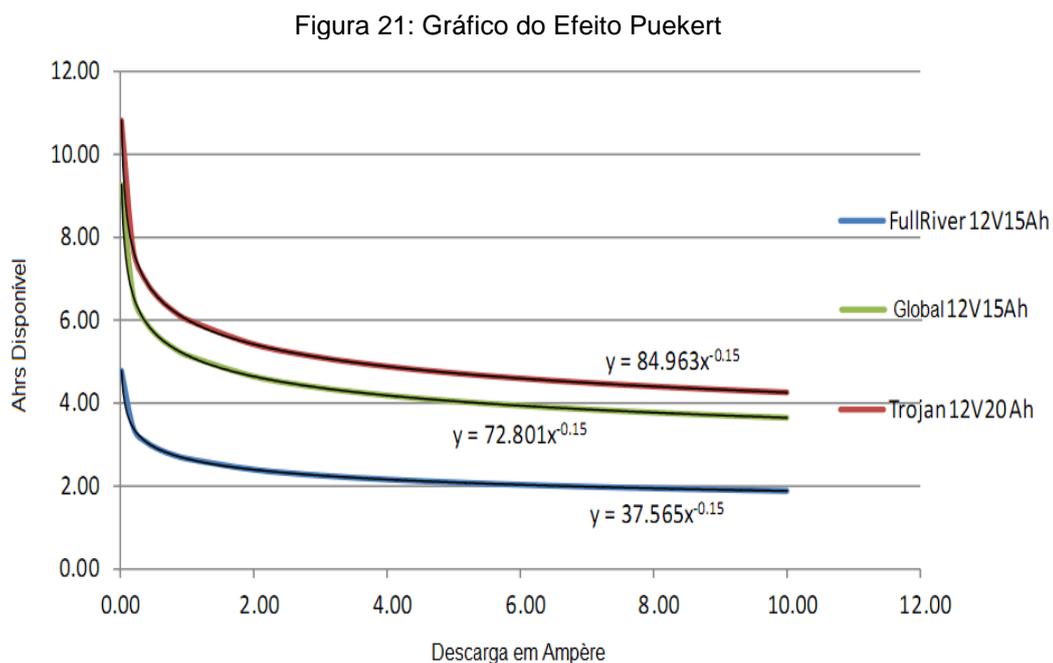
C = capacidade da bateria na taxa de descarga de um ampère.

I = corrente de descarga

K = coeficiente peukert é determinado pelos fabricantes de baterias no manual de fabricação (*datasheet*), sendo que, as curvas de descarga, estão tipicamente entre 1.1 e 1.3.

t = tempo de descarga

Consulte a figura 21,



A validação do modelo de bateria de chumbo-ácido no programa Matlab Simulink, apresentou um erro máximo de 5% para a corrente de carga e descarga. Baseado nesse resultado se pode concluir que o programa Matlab simulink é uma ferramenta eficaz para a análise dos dados.

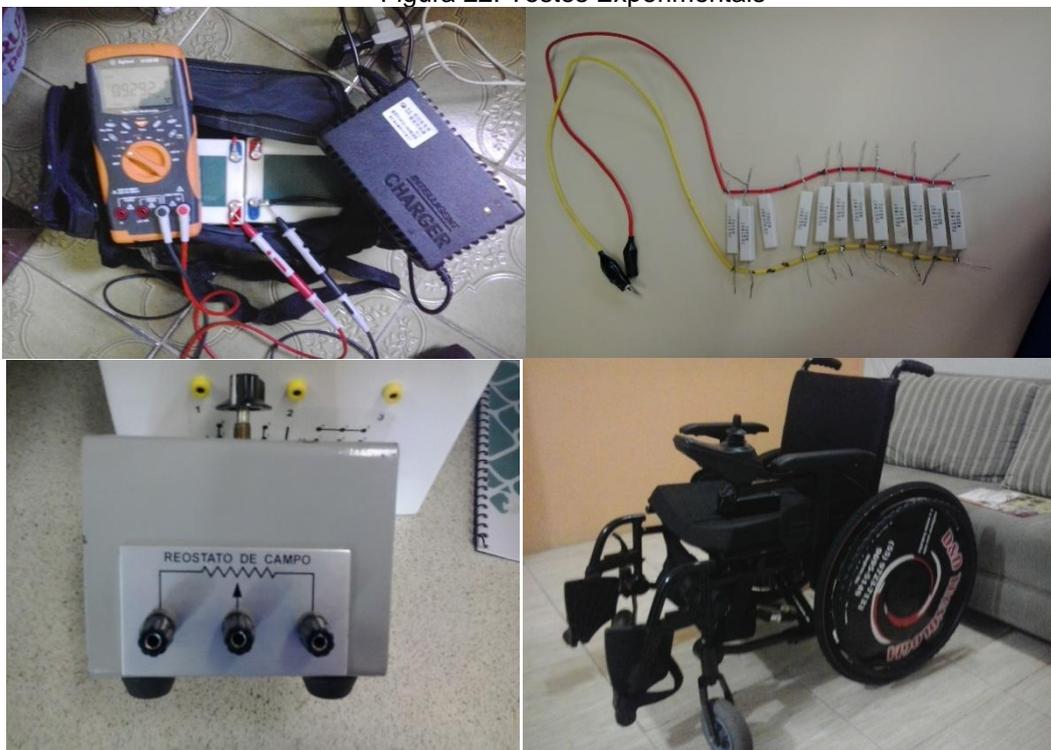
4.11 Testes experimentais

Os testes experimentais representados pela figura 22 foram realizados, utilizando bateria de chumbo-ácido de 12V com uma capacidade nominal de 15 Ah. Algumas das características da bateria podem ser encontradas nos testes. Os dados obtidos a partir do teste foram utilizados para selecionar o modelo adequado a ser utilizado e os parâmetros. Basicamente consistiram na carga e descarga da bateria em temperatura constante.

No experimento, o carregador *Intelligent 24 V / 10-14 A*, foi utilizado para carregar as baterias, dois multímetros para registrar os dados e cargas variadas foram utilizadas para a descarrega cujas especificações são fornecidos no apêndice.

Um sensor de temperatura foi utilizado na experiência, mas devido ao modelo de bateria utilizado (bateria selada de chumbo-ácido de gel), não se obteve medições precisas, o que levou a adotar a temperatura ambiente como padrão (25 °C) para o experimento. O estado de carga da bateria e demais parâmetros, foram também estimados.

Figura 22: Testes Experimentais



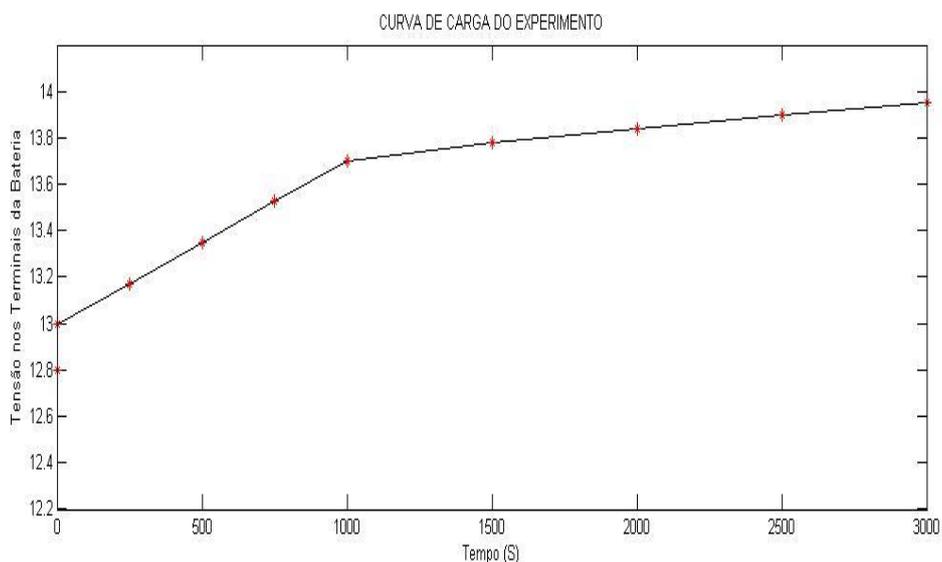
Fonte: Câmera Digital Ge do autor

4.11.1 Carregamento da bateria

Durante o carregamento mostrado na figura 23, as cargas foram desconectadas e o carregador *Intelligent* foi ligado à bateria. A bateria foi carregada, com temperatura ambiente normal 25°C e com corrente limitada eletronicamente pelo carregador de 4,5 A, a qual se manteve constante até que a tensão de carregamento ficasse estável. Uma vez que a tensão de carga permanecer constante a bateria começa a carregar a corrente de carregamento constante diminui.

Quando a bateria está descarregada, a bateria sofre uma grande corrente de carga, no entanto, quando a carga no interior da bateria aumenta, a corrente de carga começa a diminuir. Aproximadamente 90% da carga é alcançada rapidamente, mas os 10% restantes leva um intervalo de tempo maior para carregar, esse comportamento foi demonstrado, com a aquisição de 10 medidas durante um período de 3000 s.

Figura 23: Curva de carga do experimento



4.11.2 Descarga da bateria

Durante a descarga, o carregador foi desligado e foram acopladas diferentes cargas a bateria. Uma carga constante foi aplicada sobre a bateria e

o desempenho da bateria foi gravado. Quatro testes foram feitos para o descarregamento:

- i. Descarga em 18 A a 25 °C
- ii. Descarga em 18 A a 35 °C
- iii. Descarga em 10 A a 25 °C
- iv. Descarga em 15 A a 25 °C

Nas figuras 24, 25 e 26 estão os resultados de quando a carga foi aplicada na bateria de chumbo-ácido, conforme os valores propostos nos itens (i a iv). Neste processo constatou-se que a tensão nos terminais da bateria baixou significativamente, durante o início da descarga. Quando a bateria se aproxima de sua tensão mínima, a tensão nos terminais começa a diminuir rapidamente. A temperatura na célula da bateria foi estimada em 25 °C, sendo essa, a mesma do ambiente. No entanto, para a mesma carga (18 A) o tempo de descarga diminui com o aumento da temperatura.

O intervalo de tempo entre ensaios consecutivos foi de aproximadamente 8 a 12 horas, devido à metodologia de carga e descarga determinada nos manuais dos fabricantes, na qual se sugere esse período de tempo entre os ensaios.

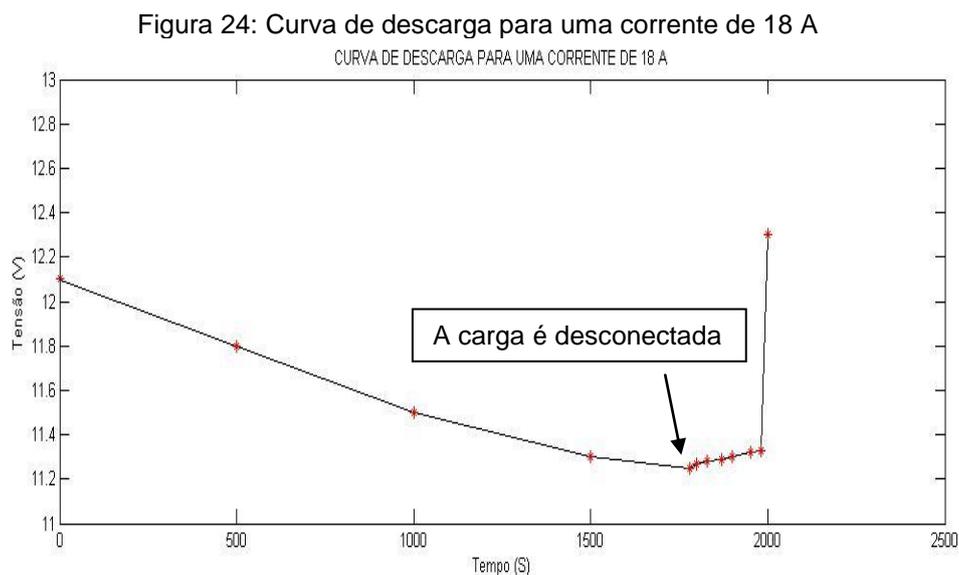


Figura 25: Curva de descarga para uma corrente de 10 A

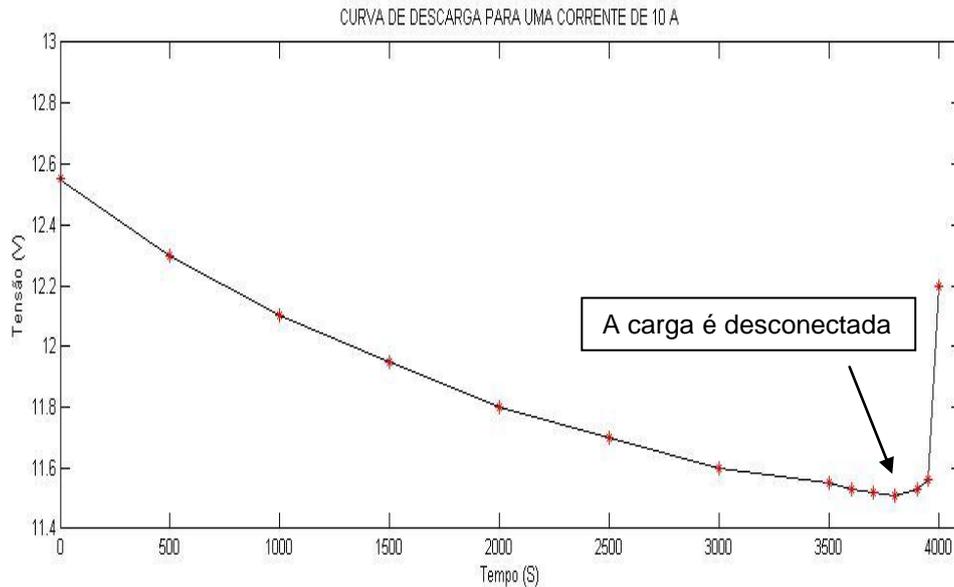
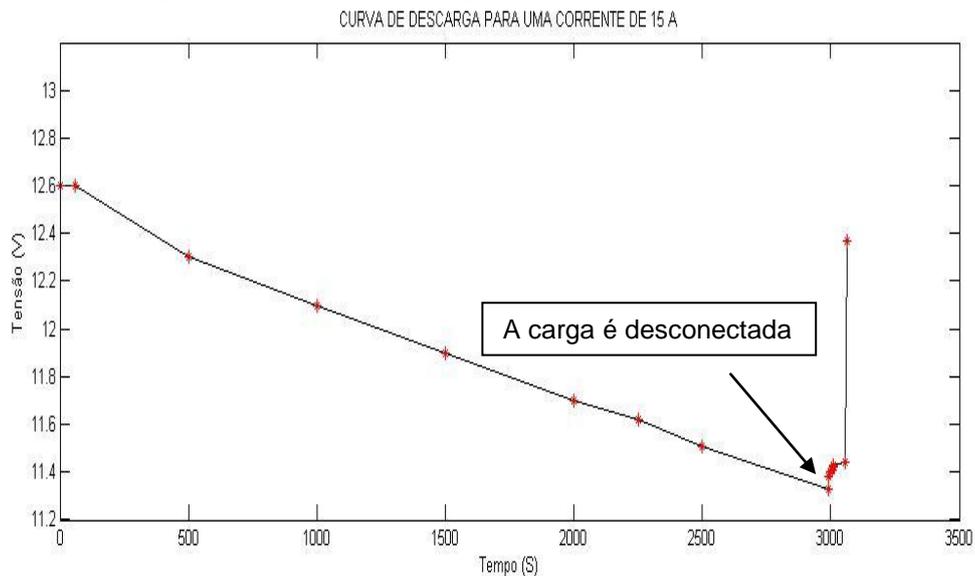


Figura 26: Curva de descarga para uma corrente de 15 A



Para uma maior exatidão nos resultados durante os experimentos, foram utilizados de 10 a 14 pontos de medida do valor de tensão em um período máximo de 4000 s, pois, as características de descarga de uma bateria de chumbo-ácido são perceptíveis nessa configuração de pontos. Logo após se desconectar a carga de descarga da bateria, se percebe a regeneração em sua tensão e capacidade, devido a suas características químicas.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA BATERIA CHUMBO-ÁCIDO NO MATLAB SIMSCAPE™

É relatado a partir deste capítulo as simulações feitas no Matlab que é um programa matemático; e o modo de operação do mesmo está contido nos apêndices. Os resultados obtidos durante as simulações e as discussões entre o modelo dinâmico e o modelo Simscape fazem parte da apresentação nesta parte do trabalho.

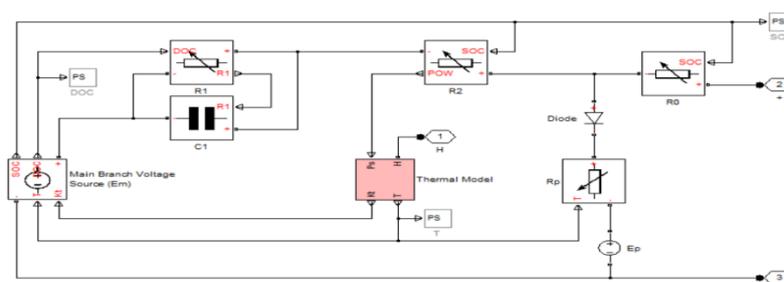
Existe um modelo de simulação de uma célula de baterias de chumbo-ácido em linguagem Simscape™ apresentado na figura 27, baseado no programa matemático, Matlab. Uma descrição detalhada sobre como operar esse modelo pode ser encontrada no Apêndice B deste trabalho. Este modelo consiste em componentes matemáticas individuais que, quando combinados cria uma simulação dinâmica e precisa de uma bateria de chumbo-ácido.

Esta demonstração é muito útil na modelagem de diferentes cenários de bateria devido à capacidade de alterar os valores dos parâmetros para aqueles necessários. Uma análise detalhada da capacidade do software e como ele pode ajudar a determinar o estado de carga de baterias SOC dos diferentes fabricantes e outras medições importantes sobre a bateria foram realizadas.

5.1.1 Modelo estrutural de uma bateria de chumbo-ácido do Simulink

A célula de baterias de chumbo-ácido, apresenta um modelo de simulação em linguagem Simscape™ como demonstrado na figura 27.

Figura 27: Modelo de uma bateria no Simscape™



Fonte: Matlab Simulink

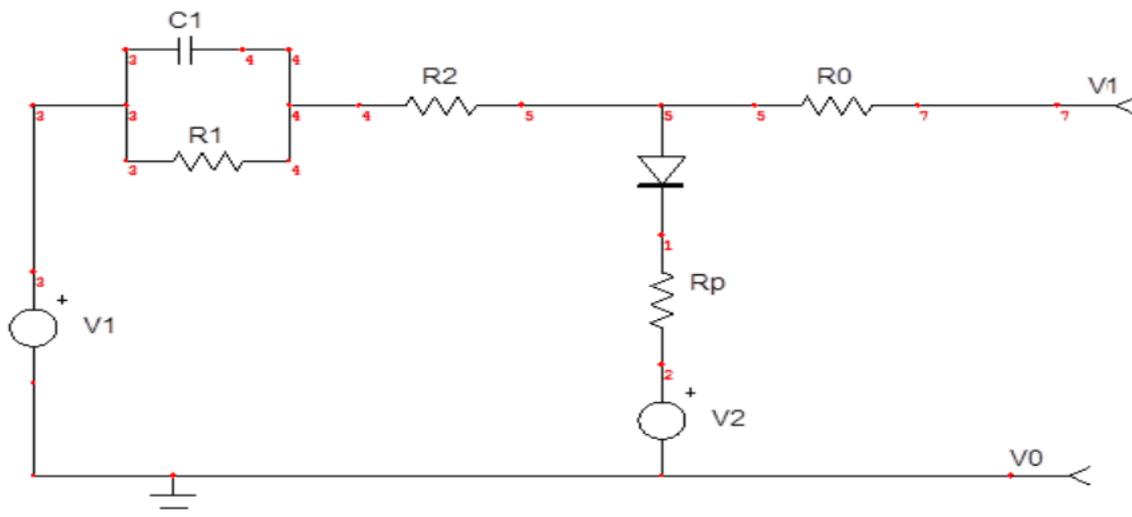
Uma explicação dos vários componentes pode ser encontrada no Apêndice A.

5.1.2 Circuito equivalente de uma bateria

Um modelo dinâmico da bateria foi desenvolvido para fornecer um circuito elétrico equivalente ao modelo Simscape™[33]. As equações de circuito de bateria da figura 27 baseiam-se num circuito equivalente não linear simples do modelo Simulink da figura 28. Ele é o modelo do circuito equivalente do comportamento observadas nos terminais da bateria [34].

O circuito é dividido em dois ramos; o primeiro ramo simula a dinâmica da bateria sob a maioria das condições e um ramo parasita simula o comportamento da bateria no final de uma carga [34]. A descrição para o modelo e equações Simulink desenvolvido para uso na demonstração da bateria de chumbo-ácido baseado em Simscape™ Matlab pode ser encontrada no Apêndice B.

Figura 28: Modelo dinâmico da bateria no Simscape™



Fonte: Matlab Simulink

5.1.3 Parâmetros para o circuito

Os valores dos parâmetros para o circuito foram baseados em dados do fabricante encontrados no Anexo A.

Os valores de entrada para o circuito que foi inserido no modelo dinâmico do Simscape™ e estão listados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros utilizados na simulação no Simscape™

Parâmetros	Unidades	Descrição	Valores
V1	[V]	Tensão de Circuito Aberto	12,5
Capacitância, C1	[F]	Capacitância por célula	50
R1	[Ohms]	Resistor 1	0,008
R2	[Ohms]	Resistor 2	0,12
Diodo	[int]	Diodo polarizado inversamente	
Rp	[Ohms]	Resistor diodo	0,01
R0	[Ohms]	Resistor de corrente tensão nominal	0,9
V2	[V]	Tensão nominal	0,001

5.2 Resultados

Os resultados apresentados nas figuras 29, 30, 31 e 32 são parcelas para a carga/corrente de carga, tensão terminal, estado de carga, profundidade de carga e a temperatura da bateria de chumbo-ácido fabricante baseado na simulação Simscape™ Matlab. A análise de comparação dos resultados Simscape™ foi conduzida com o circuito elétrico destinado a simulação do modelo dinâmico [35]. Os resultados obtidos foram validados comparando as folhas de dados dos fabricantes (*datasheet*) no Anexo A e os testes experimentais realizados com a bateria de chumbo ácido.

Figura 29: Gráfico comparativo entre o resultado simulado no software simulink e o experimental 1

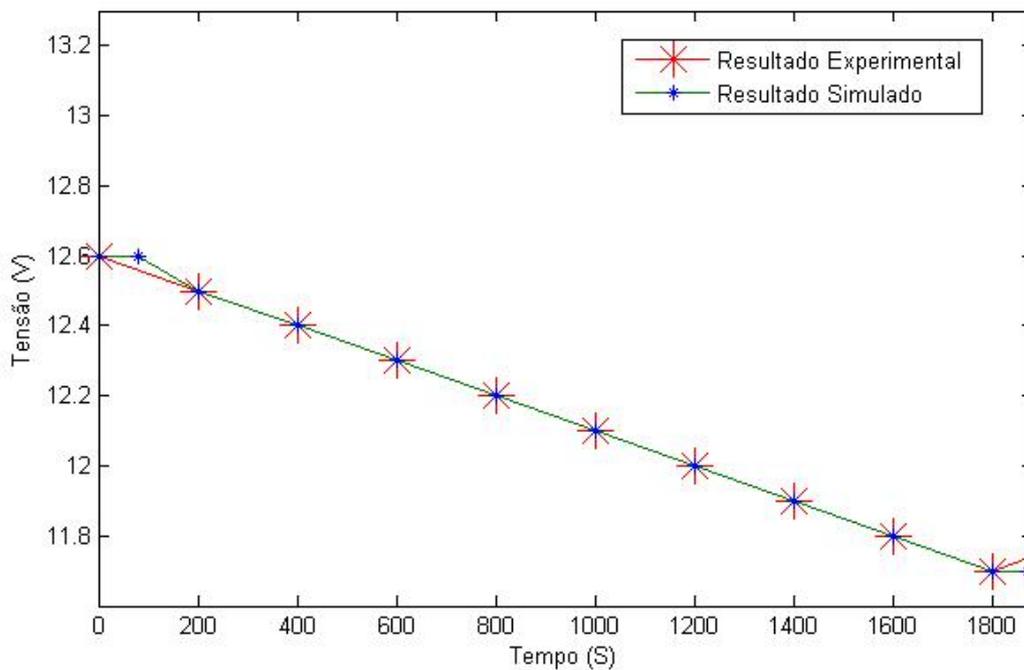
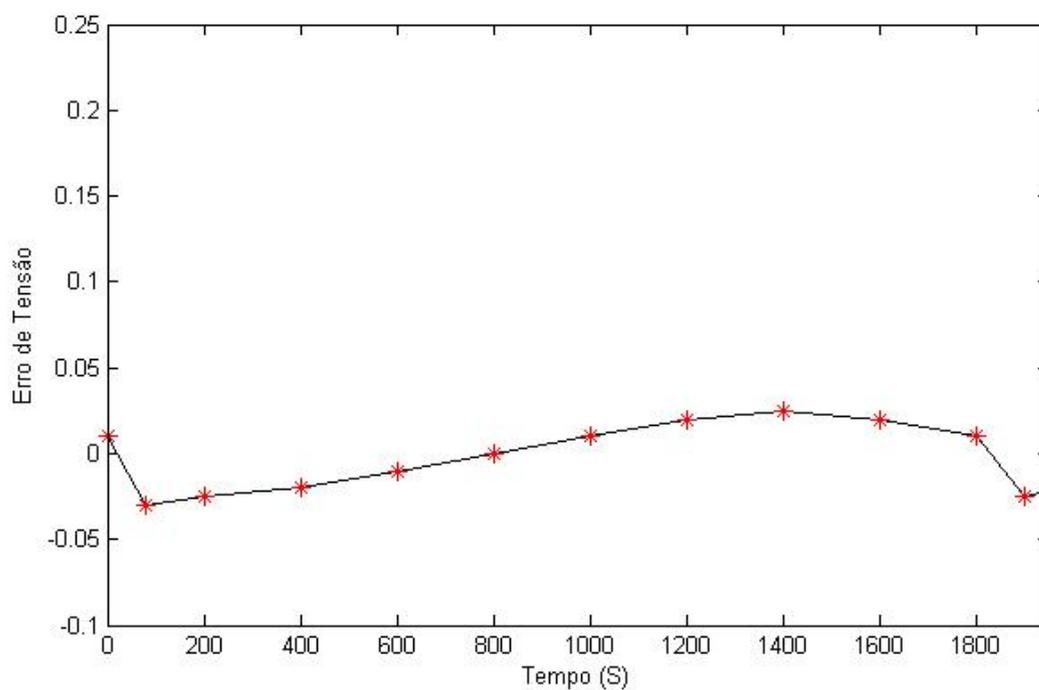


Figura 30: Gráfico do erro de tensão residual 1



A partir do resultado da simulação figuras 29 e 30, a descarga começa na tensão de 12,62 V e o resultado da simulação mostra uma pequena variação nos primeiros 300 s. Enquanto a tensão terminal experimental diminui

linearmente o resultado simulado é constante para 50 s. Em seguida, ambos os resultados, tanto o simulado como o resultado experimental, diminuem linearmente. Pode ser visto que a tensão terminal experimental e tensão terminal simulada mostram uma razoável concordância para 1750 s. O erro de tensão é calculado em (14) [35] e para os primeiros testes, apresentou um valor de 0,01%.

$$\text{Erro de tensão} = \left(\sum_{t_0}^{t_n} w(t)(V_{\text{Experimental}} - V_{\text{Simulado}}) \right) \quad (14)$$

Onde:

$w(t)$ - pesos da diferença nos resultados simulados e experimentais

$V_{\text{Experimental}}$ - dados experimentais de tensão

V_{Simulado} - dados simulados de tensão

Figura 31: Gráfico comparativo entre o resultado simulado no software simulink e o experimental 2

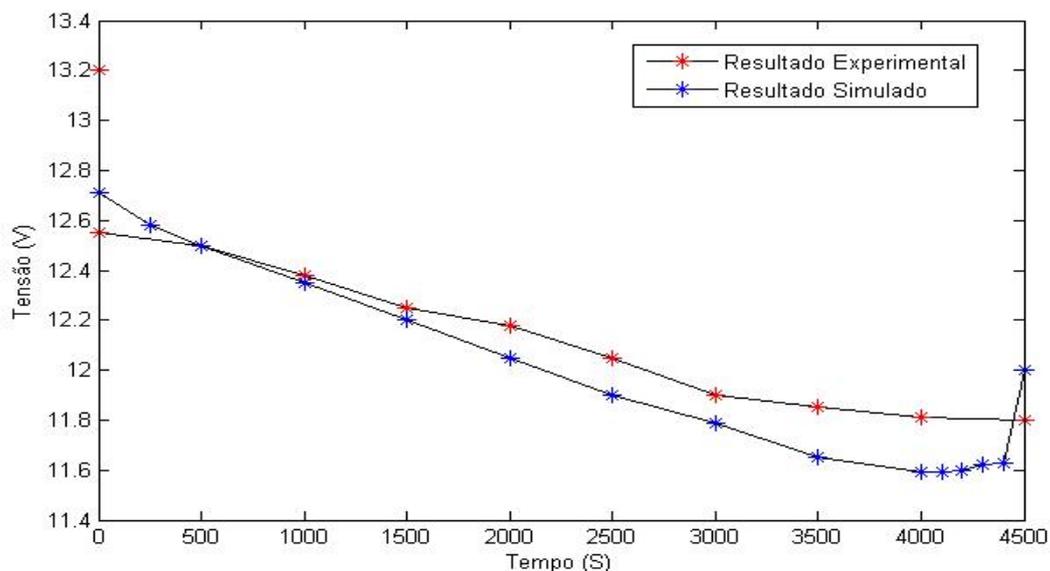
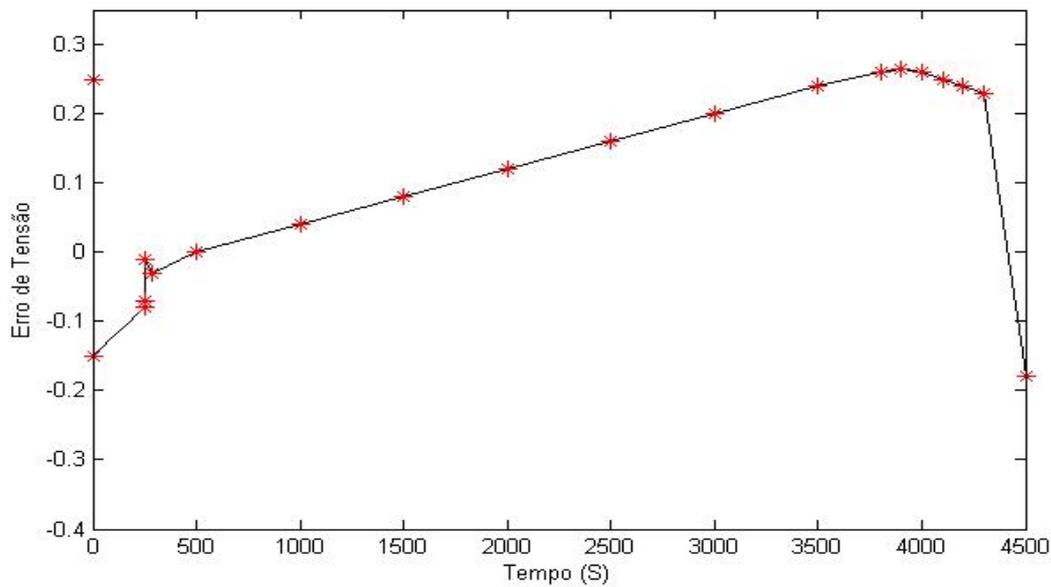


Figura 32: Gráfico do erro de tensão residual 2



A partir das figuras 31 e 32, a descarga começa a 13,2 V e a tensão nos terminais medida experimentalmente diminui abruptamente em um curto intervalo de tempo até 12,6 V, porém, a tensão simulada não é uniforme no início da descarga. No entanto, a tensão começa a diminuir linearmente após 200 s. O erro entre simulado e experimental de tensão aumenta depois de 1000 s, e ao final da descarga, as saídas mostram uma concordância razoável. O erro calculado em (14) entre o simulado e o experimental, se constitui em 0,3%, valor esse considerado aceitável para os testes.

5.2.1 Discussões

Dois conjuntos de dados experimentais estão expressos nos gráficos das figuras 29 a 32, os quais foram utilizados a fim de validar o modelo matemático do programa Matlab Simulink para a bateria de chumbo-ácido.

A primeira validação de dados apresentada na figura 29 mostra uma concordância razoável com o resultado da simulação com um erro de 0,01% no início dos dados, visto na figura 30. Isto é devido ao "golpe de fouet", um fenômeno associado com a queda de tensão no início da descarga [36]. O efeito desse "golpe de fouet" pode ser visto também, nos segundos dados de validação, figura 31.

Houve, no entanto, um erro de 0,3% entre a tensão simulada e experimental, figura 32. Isto é, devido ao fato de que os parâmetros térmicos iniciais foram tomados diretamente a partir do manual do fabricante em vez de ser obtido a partir do experimento. Além disso, o experimento foi realizado imediatamente depois de a bateria ser carregada, pois algumas das baterias de chumbo-ácido utilizadas no experimento prático, não era estável o suficiente. Por isso, o desvio pode ser observado entre a tensão simulada e experimental.

5.2.2 Discussão entre o modelo dinâmico e o modelo Simscape™

Os resultados entre o modelo dinâmico e modelo Simscape™ apresentam pequenas variações; e é em parte devido aos modelos dos circuitos elétricos dinâmicos terem menos parâmetros de entrada do que o modelo Simscape™ [37]. A simulação em tempo de execução também é diferente, com o modelo Simscape™ correndo ao longo de um período prolongado de tempo, em que, como o modelo dinâmico o circuito capta a reação instantânea. Assim, eles podem ser utilizados para fins diferentes, um para a análise do desempenho de uma bateria durante um período de tempo, e o outro para a análise do desempenho instantâneo da bateria [38].

Nas figuras 33, 34 e 35, estão apresentados os resultados das simulações realizadas no modelo Simscape™ da bateria de chumbo-ácido. Esses resultados obtidos na simulação, utilizam os mesmos parâmetros dos testes experimentais e do modelo dinâmico, ou seja, a figura 33 apresenta uma corrente de carga e de descarga de 10 A, a figura 34 apresenta uma corrente de carga e de descarga de 15 A e a figura 35 apresenta uma corrente de carga e de descarga de 18 A.

O modelo da bateria de chumbo-ácido em Simscape™ Matlab é uma simulação precisa e bem desenvolvida que é capaz de exibir características dinâmicas da tensão terminal, estado de carga, profundidade de carga e a temperatura em qualquer período de tempo determinado. As funções fáceis de usar encontradas no modelo permitem personalização do usuário para praticamente quaisquer critérios conhecidos de uma bateria de chumbo-ácido encontrado em um circuito elétrico.

Figura 33: Gráfico de descarga e carga a 10A em Simscape™

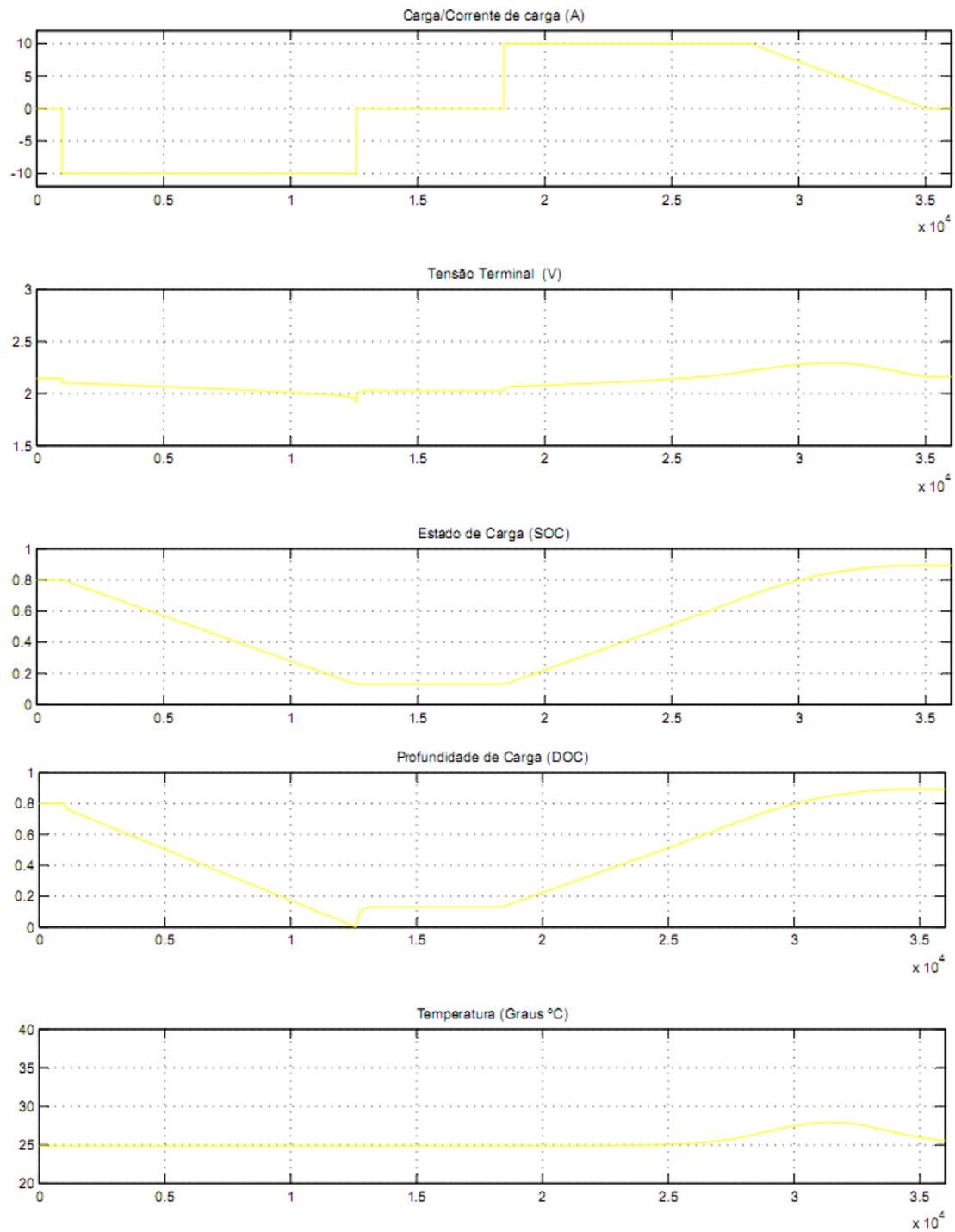


Figura 34: Gráfico de descarga e carga a 15A em Simscape™

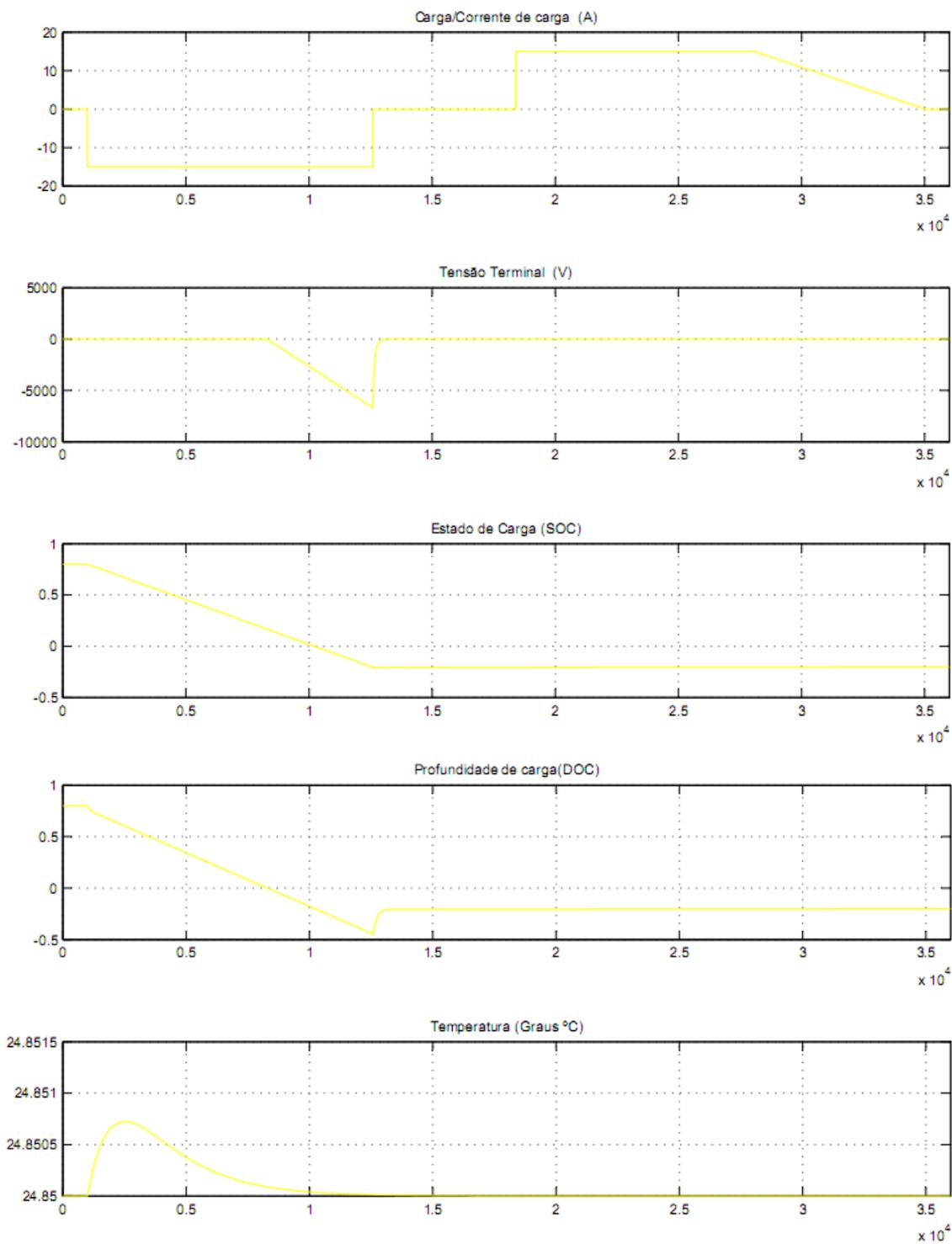
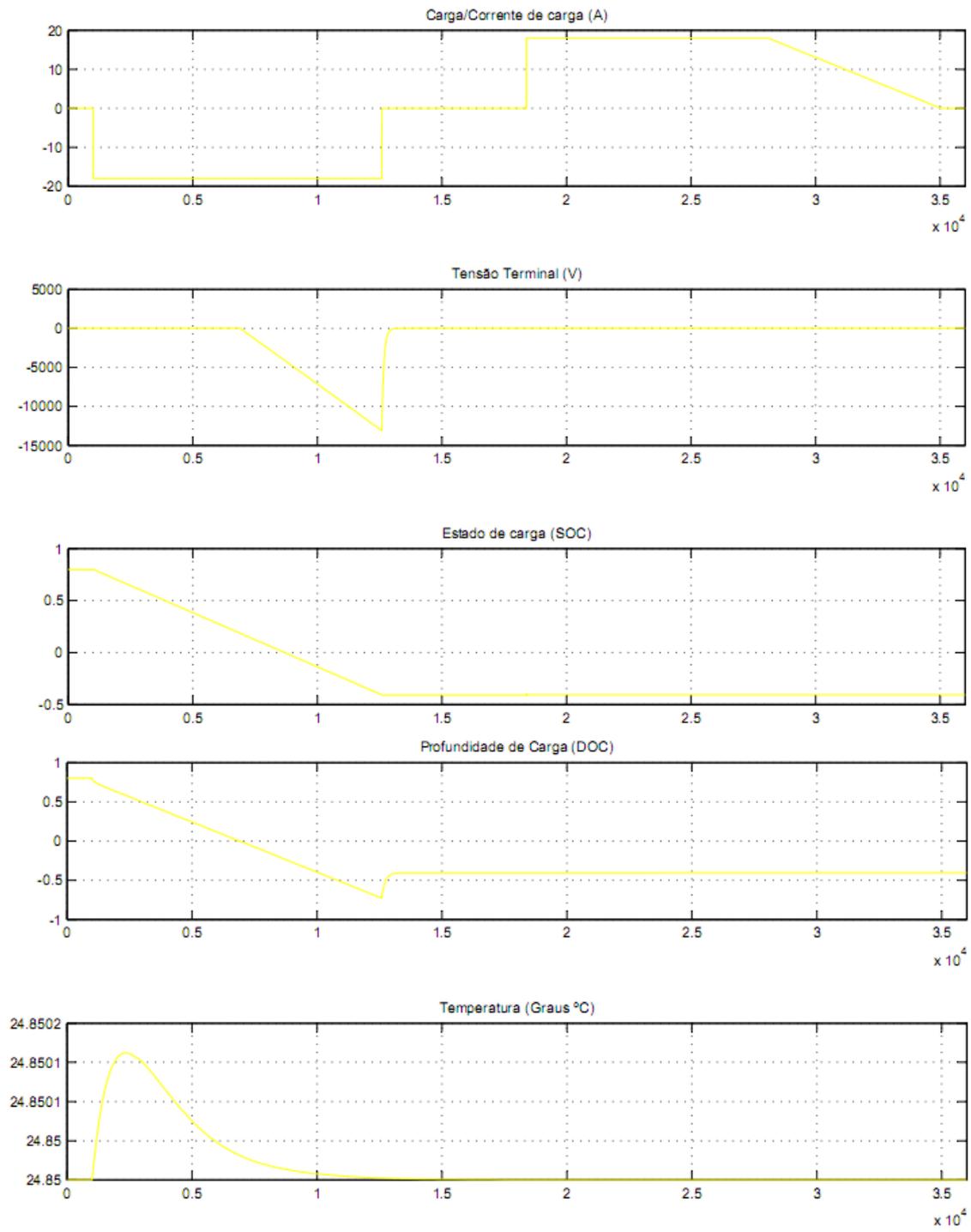


Figura 35: Gráfico de descarga e carga a 18A em Simscape™



CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As baterias de chumbo-ácido são usadas como armazenamento de energia, em vários sistemas, devido a sua grande diversidade de modelos e baixo custo. Observa-se, porém, que ocorre perda de capacidade nessas baterias devido à carga repetida e ciclo de descarga.

Com base no ensaio experimental da bateria de chumbo-ácido, vários modelos foram estudados para a elaboração e escolha de um modelo apropriado para a estimativa dos parâmetros da bateria. Um modelo final equivalente da bateria de chumbo-ácido foi desenvolvido e implementado sob software Matlab / Simulink. O modelo foi validado em seguida, com dados experimentais. A partir do resultado de validação pode ser verificado que o modelo pode estimar com precisão as características da bateria com um erro de 0,3%.

O modelo de bateria de chumbo-ácido foi implementado com sucesso no software Matlab Simulink e foi usado para simular os níveis de estado de carga SOC e tensão nominal de baterias com diferentes resultados, dependendo de testes para valores obtidos a partir do manual dos fabricantes.

A vantagem do modelo utilizado no software é que qualquer usuário pode usá-lo para analisar a resposta de uma bateria para quaisquer condições de carga. Pode ser utilizado para encontrar o estado de carga, ou ainda para determinar as condições de carga e descarga que a bateria pode operar.

O estudo dos modelos de baterias aplicados em um sistema de energia real foi decisivo para o entendimento e busca no aprimoramento de sistemas mais eficientes e que venham a garantir um aumento significativo no tempo de vida e autonomia das baterias aplicadas ao sistema.

Os resultados mostram que o conjunto de baterias de chumbo-ácido é plenamente capaz de atender cargas solicitadas pelos motores mesmo em condições de baixa carga, onde a capacidade de regeneração de carga da bateria é mais eficaz.

Para a análise de viabilidade no uso em outros sistemas ou até mesmo de baterias diferentes recomenda-se realizar novas simulações levando em conta os parâmetros e outras variáveis necessárias para essas baterias.

Este trabalho propôs uma metodologia de realização de testes em uma bateria aplicada em um sistema real, onde, o software Simscape™ foi capaz de executar tal simulação e obter valores precisos que podem então ser analisados e comparados com os dados do manual dos fabricantes ou considerado confiável para simulações de sistemas maiores, sem a necessidade de possuir as baterias para o teste.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho apresentam grande precisão na estimação do tempo de carga e descarga das baterias comparadas com os dados dos fabricantes. Para minimizar possíveis erros detectados no processo de comparação entre a simulação e os testes físicos, é pertinente realizar estudos desenvolvendo pesquisa focada utilizando outros softwares que possuam capacidade semelhante ao Matlab. Dessa forma, sendo capaz de simular o tempo de vida do ciclo de uma bateria baseado, especialmente, nos parâmetros que estão diretamente ligados à autonomia da bateria a ser testada. Pode-se sugerir a este trabalho outros diversos estudos como:

- Cálculo com maior exatidão da predição do tempo de vida das baterias empregado no simulador utilizado, visando descargas não lineares (variadas);
- Desenvolvimento de um teste experimental em bancada para efetuar a descarga de maneira linear, sem variações na corrente;
- Monitoria e controle do estado de carga de uma bateria presente em um dispositivo, visando o aumento do tempo de vida da bateria a partir de intervenções na corrente, sejam estas efetuadas de maneira autônoma através de um software ou por ação do usuário.

REFERÊNCIAS

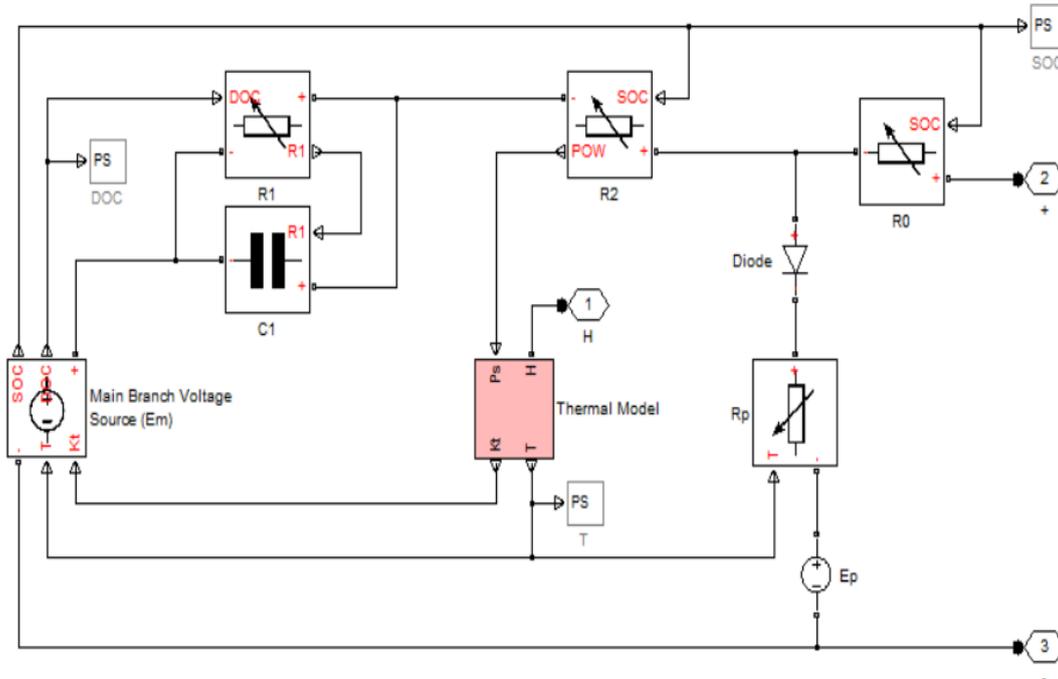
- [1] SANTOS, W., Erick, MATSUMOTO, S., Ricardo, “**DIBB – Dimensionador de banco de baterias**”, Curitiba 2010.
- [2] LIVINT, G.; RATOI, M.; HORGHA, V.; ALBU, M. “**Estimation of Battery Parameters based on Continuous-Time Model**”, IEEE Signals, Circuits and Systems, 2007, pp: 1-4.
- [3] SCHWEIGHOFER, B., RAAB, K. M., and BRASSEUR G. “**Modeling of High Power Automotive Batteries by the Use of an Automated Test System**” IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement Vol. 52, 2003 , pp. 1087-1091.
- [4] LORENZO, E.: “**Electricidad Solar: Ingenieria de Los Sistemas Fotovoltaicos**”, Espanha, Artes Gráficas Gala, S.L. 1994.
- [5] SEC. NAC. DE PROMOÇÃO DOS DIREITOS DA PESSOA COM DEFICIÊNCIA. “**Normas ABNT**”. Disponível em: <<http://www.pessoacomdeficiencia.gov.br/app/>>. Acesso em 04/04/2015.
- [6] ANDRADE, N., BORGES, G., DE O. NASCIMENTO, F., et al. “**A new biomechanical hand prosthesis controlled by surface electromyographic signals**”. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*, pp. 6141 –6144, 2007. doi: 10.1109/IEMBS.2007.4353751.
- [7] SOEDA, K., AOKI, S., YANASHIMA, K., et al. “**Development of the visually impaired person guidance system using GPS**”. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS '04. 26th Annual International Conference of the IEEE*, v. 2, pp. 4870 –4873, 2004. doi: 10.1109/IEMBS.2004.1404347.
- [8] ROCHA J. R., “**Mecanismos das reações de descarga das placas positivas nas baterias de chumbo-ácido**”, UFPR, Curitiba, PR, (2004), p.3-31.
- [9] HEISE G. W., CAHOON N. C., “**The Primary Battery**”, Volume 1, Wiley, New York, (1971). , 3 Fleischer A., Lander J. J. (Editores), Zink-Silver Oxide Batteries, Wiley, New York, (1971).
- [10] RITTER J.W., “**Phil. Mag**”, 23 (1805) 5.
- [11] BERNDT, D. (2009). “**Electrochemical Energy Storage**”. Battery Technology Handbook, CRC Press 2003, ISBN 978-0-8247-4249-2
- [12] BERNARDES, A. M., ESPINOSA, D. C. R., and TENÓRIO J. A. S. (2004). “**Recycling of batteries: a review of current processes and technologies**”. Journal of Power Sources 130(1-2): 291-298

- [13] CONNOLLY, David (2009) **“A Review of Energy Storage Technologies For the integration of fluctuating renewable energy”**, Version 3, August 2009, Pages 17-18
- [14] BATTERY UNIVERSITY. **“whats the best battery”**. Disponível em: <http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery>. Acesso em 04/04/2015.
- [15] SCHÖTTLE, R., MÜLLER, W. MEYER, H. and SCHOCH. E. **“Methods for the Efficient Development and Optimization of Automotive Electrical Systems,”** 970301, SAE, Warrendale, PA, 1997.
- [16] JAYNE, M.G.; MORGAN, C. **“A New Mathematical Model of a Lead Acid Battery for Electric Vehicles”**. In: **Anais...** . Washington, D.C., 1986.
- [17] LINDEN D. and REDDY T. B. (editors), **“Handbook of Batteries”**, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, NY, 2001.
- [18] JONES ML, Sanford JA, **“People with Mobility Impairment in the United States Today and in 2010”**, Assistive Technology, Vol. 8, 1996, pp. 43-45.
- [19] COOPER RA, **“Engineering Manual and Electric Powered Wheelchairs”**, Critical Reviews in Biomedical Engineering, Vol. 27(1&2), 1999, pp. 27-73.
- [20] PROCEEDINGS FOR THE STAKEHOLDER FORUM ON WHEELED MOBILITY, Pittsburgh, 25-26, 1999, **“Power, Management and Monitoring”** pp. 31-52.
- [21] RAND, D. A. J., MOSELEY P. T. and GARCHE, J. (2004). **“Valve-Regulated Lead-Acid Batteries”**, Elsevier.
- [22] B. Henrik, C. Tom, L. Per, M.F. James, A. , Utama, B. Ian. (2005). **“Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries”**. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark. Risø-R-1515(EN).pp 8-9.
- [23] CHIASSON, J.; VAIRAMOHAN, B.; **“Estimating the state of charge of a battery, Control Systems Technology”**, IEEE Transactions on , vol.13, no.3, pp. 465- 470, May 2005.
- [24] JONES, R. (2004). **“Charge Control Options For Valve Regulated Lead Acid Batteries”**. White Paper: TW0060
- [25] LINDEN, David; REDDY, THOMAS B., **“Handbook Of Batteries”**, New York: McGraw-Hill, 2002, p. 23.5. ISBN 0-07-135978-8.
- [26] E.WEHRLE(2003). **“Battery Technology Handbook”**. CRC Press.pp. 309-320.

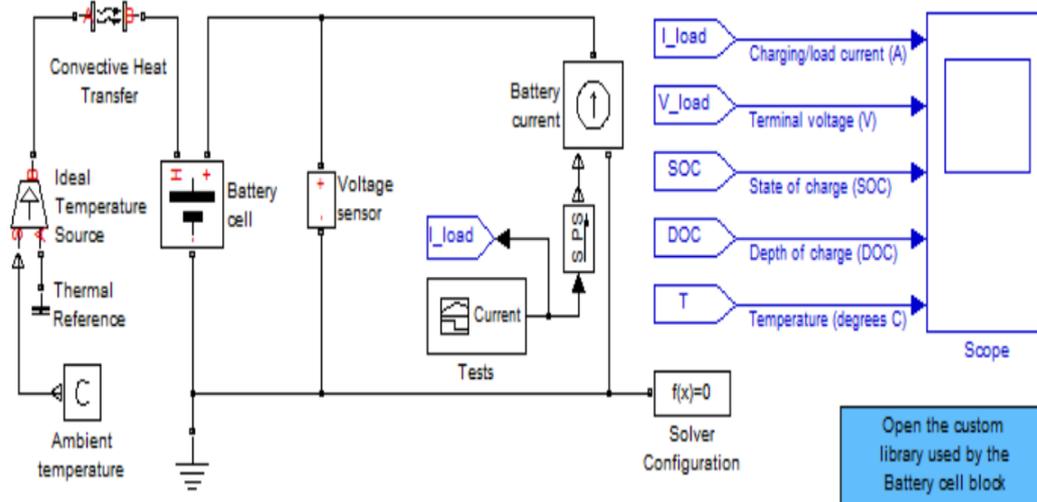
- [27] PVE EDUCATION. **“Depth of Discharge and Battery Capacity”**. Disponível em: <<http://pvcdrom.pveducation.org/BATTERY/charlead.htm>>. Acesso em 04/04/2015.
- [28] BINGJUN Xiao, et al; **“A universal state-of-charge algorithm for batteries”**, In DAC, pages 687–692, 2010.
- [29] SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. **“Photovoltaics Design and Installation Manual”**. 4th ed. British Columbia: New Society Publishers, 2004.
- [30] TREMBLAY, O., DESSAINT, L.-A. **“Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications”**, World Electric Vehicle Journal, 2009.
- [31] CHEN, Min; A.Rincon-Mora, Gabriel, **“Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance”**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No.2, 2006.
- [32] BAERT, Daniël, and ALFONS Vervaet. **“Lead-acid battery model for the derivation of Peukert’s law”**, Electrochimica acta 44, no. 20, 1999.
- [33] CERAOLO, M. **“New dynamical models of lead-acid batteries”**. IEEE Trans. Power Systems, 15(4):1184–1190, November 2000.
- [34] DURR, Matthias; CRUDEN, Andrew; GAIR, Sinclair; MCDONALD, J.R., **“Dynamic model of a lead acid battery for use in domestic fuel cell system”**, Journal of Power Sources, 2006.
- [35] BARSALI, S. and CERAOLO, M. **“Dynamical models of lead-acid batteries”**: implementation issues. IEEE Trans. Energ. Conv., 17(1):16–23, March 2002.
- [36] BOSE, C.S.C., LAMAN, F.C., **“Battery state of health estimation through coup de fouet”**. Telecommunications Energy Conference, 2000. INTELEC. Twenty second International, 10-14 Sept. 2000, pp. 597-601.
- [37] JOSSEN, Andreas, **“Fundamentals of battery dynamics”**, Journal of Power Sources 154 (2006) 530-538, 2005.
- [38] LEO, J.F. ARAUJO; HARTMANN L.V., CORREA M.B.R; LIMA A.M.N, **“Lead-Acid Battery Modeling and State of Charge Monitoring”**, Universidade Federal de Campina Grande, Brazil, 2005.

APÊNDICE A

Tutorial sobre como usar o modelo de Bateria de chumbo-ácido no Simulink / Matlab.

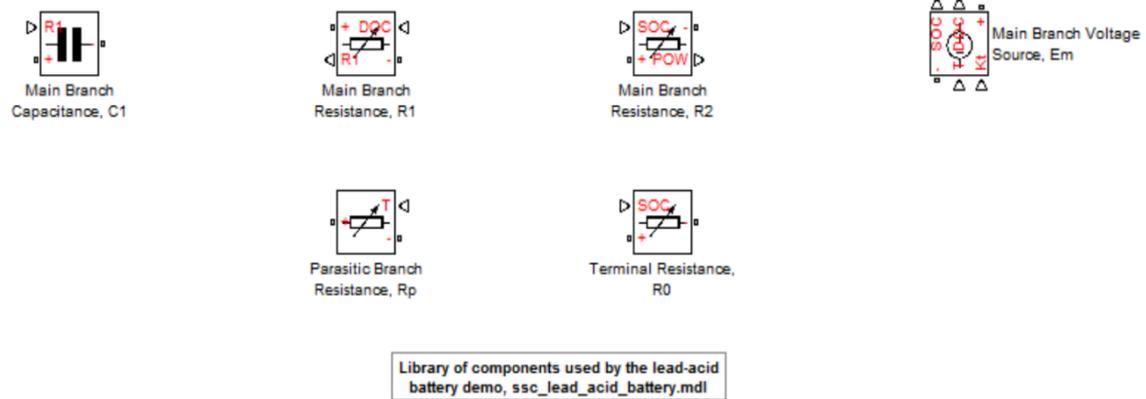


O modelo da bateria Simulink / SimScape™ corresponde ao modelo de bateria de chumbo-ácido abaixo.

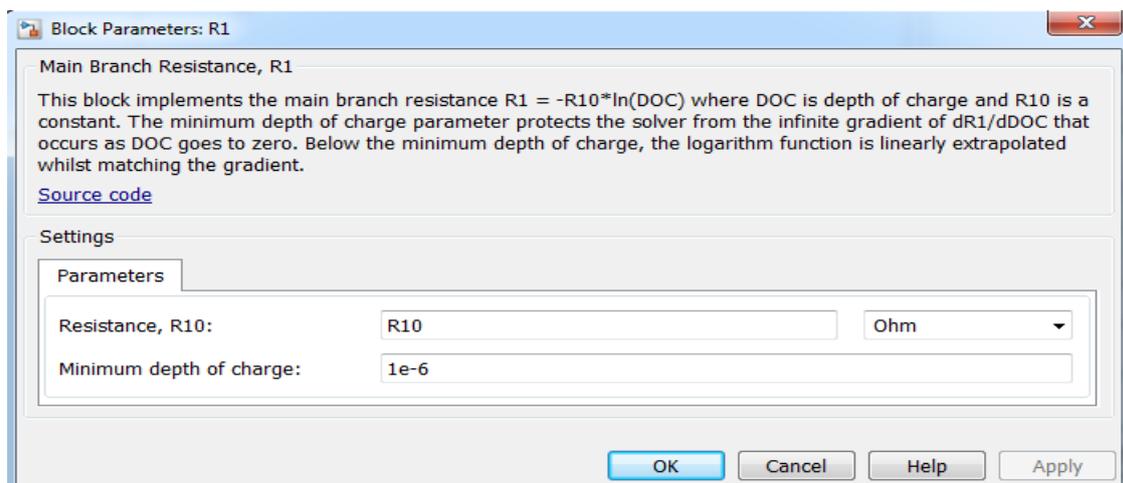
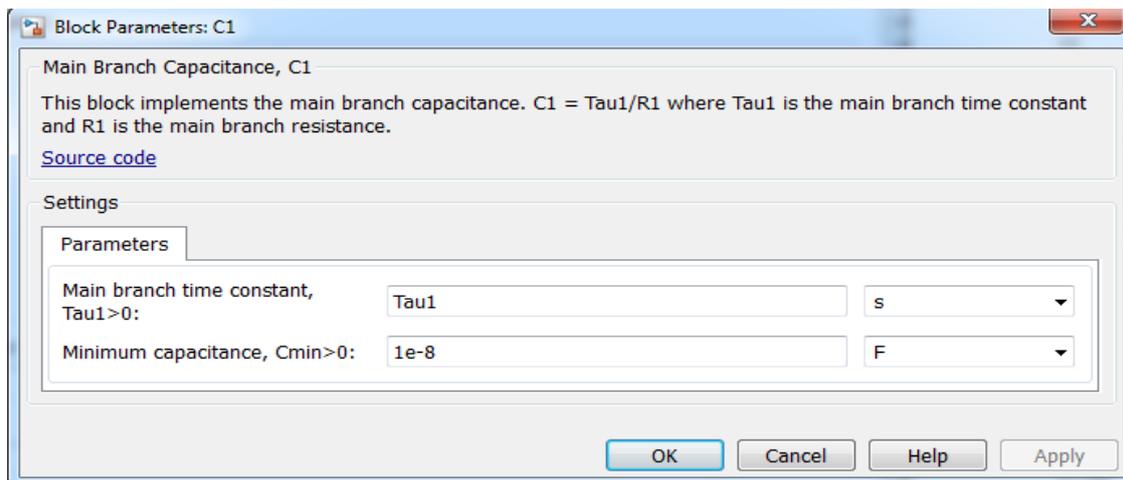


Lead-Acid Battery

1. Abra a função "custom library" colorido em azul.



2. Dê um duplo clique na caixa de função "ssc_lead_acid_battery.mdl" e selecione as caixas de desbloqueio.
3. Agora você é capaz de editar todos os dados que você se sinta satisfeito.



Block Parameters: R2

Main Branch Resistance, R2

This block implements the main branch resistance, R2. $R2 = R20 \cdot \exp(A2 \cdot (1 - SOC)) / (1 + \exp(A22 \cdot i / Istar))$

[Source code](#)

Settings

Parameters

R20:	<input type="text" value="1"/>	Ohm
A21:	<input type="text" value="0"/>	
A22:	<input type="text" value="0"/>	
Nominal battery current, Istar:	<input type="text" value="1"/>	A

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Main Branch Voltage Source (Em)

Main Branch Voltage Source, Em

This block implements the main branch voltage source. Voltage is defined by $Em = Em0 - Ke \cdot T \cdot (1 - SOC)$ where $SOC = 1 - Qe / C(0, T)$ is the state of charge, Qe is extracted charge, and C is given by $C(i, T) = Kc \cdot C0 \cdot Kt(T) / (1 + (Kc - 1)(i / Istar)^\delta)$. The block also calculates the depth of charge, $DOC = 1 - Qe / C(Iavg, T)$ where $Iavg$ is the component current i filtered by a first order lag $1 / (\tau_1 \cdot s + 1)$.

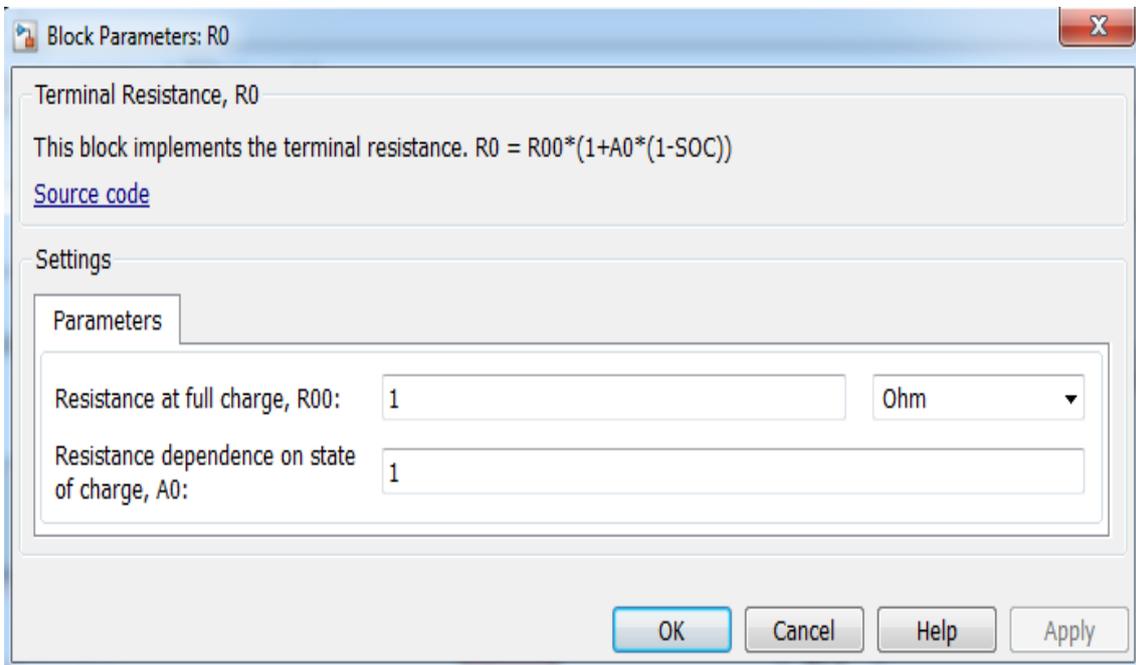
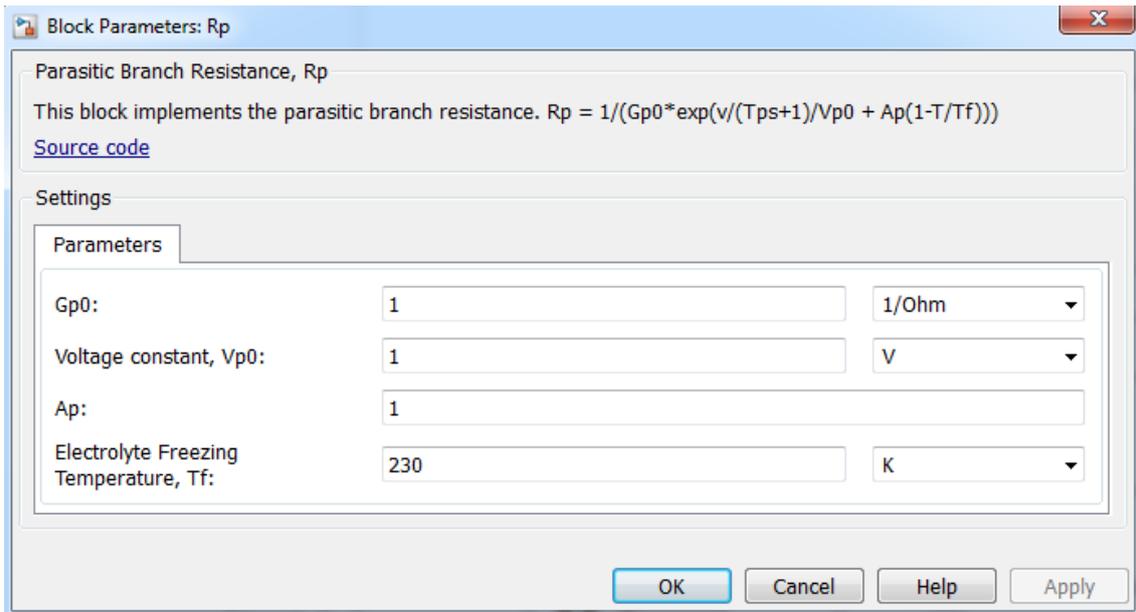
[Source code](#)

Settings

Parameters

Open-circuit voltage at full charge, Em0:	<input type="text" value="1"/>	V
Maximum voltage drop per Kelvin, Ke:	<input type="text" value="1"/>	V/K
Battery capacity constant, Kc:	<input type="text" value="1"/>	
No-load capacity at 0 degC, C0:	<input type="text" value="1"/>	s*A
Nominal battery current, Istar:	<input type="text" value="1"/>	A
delta:	<input type="text" value="1"/>	
Main branch time constant, Tau1>0:	<input type="text" value="1"/>	s
Initial extracted charge:	<input type="text" value="0"/>	s*A

OK Cancel Help Apply



4. Depois de editar os valores, usando de folhas o *datasheet* fornecido pelos fabricantes, salve o bloco de funções "ssc_lead_acid_battery.mdl" antes de executar a simulação.
5. Clique duas vezes no "Scope" para obter leituras de saída.

APÊNDICE B

Main Branch Voltage

Equação 1 é usada para calcular a tensão de circuito aberto de uma célula. Esta equação utilizada para calcular o ramo principal fonte de tensão (E_m), no Simulink. Figura 26 e figura 27 modelo dinâmico.

$$E_m = E_{m_0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad (\text{B. 1})$$

Onde:

E_m é a tensão de circuito aberto (EMF) em volts

E_{m_0} é a tensão de circuito aberto em plena carga

K_E é uma constante em volts / °C

θ é a temperatura do eletrólito em °C

SOC é o estado de carga da bateria

Terminal Resistance

Equação 2 calcula a resistência nos terminais da bateria. O cálculo foi computado para o "bloco R0" de Simulink figura 26 e modelo dinâmico figura 27.

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad (\text{B. 2})$$

Onde:

R_0 é a resistência em Ohms

R_{00} é o valor de R_0 para um $SOC = 1$ em Ohms

A_0 é uma constante

SOC é o estado de carga da bateria

Main Branch Resistance 1

Equação 3 calcula a resistência no primeiro ramo principal da bateria. O cálculo foi realizado em "R1" bloco de Simulink figura 26 e modelo dinâmico figura 27.

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (B. 3)$$

Onde:

R_1 é a resistência do ramo principal em Ohms

R_{10} é uma constante em Ohms

DOC é a profundidade de descarga da bateria

Main Branch Capacitance 1

Equação 4 é a capacitância (ou tempo de reação) do ramo principal. O cálculo foi realizado em "C1" bloco do Simulink. figura 26 e figura 27 modelo dinâmico.

$$C_1 = \tau_1 / R_1 \quad (B. 4)$$

Onde:

C_1 é a capacitância do ramo principal em Farads

τ_1 é a constante de tempo do ramo principal em segundos

R_1 é a resistência do ramo principal em Ohms

Main Branch Resistance 2

Equação 5 calcula a segunda resistência ramo principal. O cálculo foi realizado no bloco de Simulink. figura 26 e figura 27 modelo dinâmico "R2".

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp [A_{21} (1-SOC)]}{1 + \exp \left(\frac{A_{22} I_m}{I^*} \right)} \quad (\text{B.5})$$

Onde:

R_2 é a resistência do ramo principal em Ohms

R_{20} é uma constante em Ohms

A_{21} é uma constante

A_{22} é uma constante

SOC é o estado de carga da bateria

I_m é a corrente do ramo principal em Ampères

I^* é a corrente nominal da bateria em Ampères

Parasitic Branch Current

Equação 6 calcula a corrente de parasita perda que ocorreu quando a bateria estava sendo carregada. O cálculo foi realizado no "Ip" bloco de Simulink. figura 26 e modelo dinâmico figura 27.

$$I_p = V_{PN} G_{p0} \exp \left(\frac{V_{PN}}{\frac{(\tau_p S + 1)}{V_{P0}}} + A_p \left(1 - \frac{\theta}{\theta_f} \right) \right) \quad (\text{B. 6})$$

Onde:

I_p é a perda de corrente no ramo parasitário

V_{PN} é a tensão no ramo parasitário

G_{p0} é uma constante em segundos

τ_p é uma constante de tempo em segundos no ramo parasitário

V_{p0} é uma constante em volts

A_p é uma constante

θ é a temperatura do eletrólito em °C

θ_f é a temperatura de congelamento do eletrólito em °C

ANEXO A



27TMX DATA SHEET

MODEL:	27TMX with POD vent
VOLTAGE:	12
DIMENSIONS:	Inches (mm)
BATTERY:	Flooded/wet lead-acid battery
COLOR:	Maroon (case/cover)
MATERIAL:	Polypropylene
WATERING SYSTEM:	N/A



PRODUCT SPECIFICATIONS

BCI GROUP SIZE	TYPE	CAPACITY* Minutes		CAPACITY* Amp-Hours (AH)				ENERGY (KWh)	TERMINAL Type ¹	DIMENSIONS ² Inches/(mm)			WEIGHT lbs. (kg)
		@ 25 Amps	@ 75 Amps	5-Hr Rate	10-Hr Rate	20-Hr Rate	100-Hr Rate			Length	Width	Height ³	
12 VOLT DEEP CYCLE BATTERY - with T2 TECHNOLOGY™													
27	27TMX	175	45	85	97	105	117	1.40	5-9	12.72 (323)	6.60 (168)	9.24 (235)	55 (25)

- A. The number of minutes a battery can deliver when discharged at a constant rate at 80°F (27°C) and maintain a voltage above 1.75 V/cell. Capacities are based on peak performance.
 B. The amount of amp-hours (AH) a battery can deliver when discharged at a constant rate at 80°F (27°C) and 80°F (30°C) for the 5-Hour rate and maintain a voltage above 1.75 V/cell. Capacities are based on peak performance.
 C. Dimensions are based on nominal size. Dimensions may vary depending on type of handle or terminal.
 D. Dimension taken from bottom of the battery to the highest point on the battery. Height may vary depending on type of terminal.
 E. Terminal images are representative only.
 Trojan's battery testing procedures adhere to both BCI and IEC test standards.

CHARGING INSTRUCTIONS

CHARGER VOLTAGE SETTINGS (AT 77°F/25°C)					
System Voltage	6V	12V	24V	36V	48V
Absorption Charge	7.40	14.8	29.6	44.4	59.2
Float Charge	6.60	13.2	26.4	39.6	52.8
Equalize Charge	7.75	15.5	31.0	46.5	62.0

Do not install or charge batteries in a sealed or non-ventilated compartment. Constant under or overcharging will damage the battery and shorten its life as with any battery.

CHARGING TEMPERATURE COMPENSATION

.028 VPC for every 10°F (5.55°C) above or below 77°F (25°C) (add .028 VPC for every 10°F (5.55°C) below 77°F and subtract .028 VPC for every 10°C above 77°F).

OPERATIONAL DATA

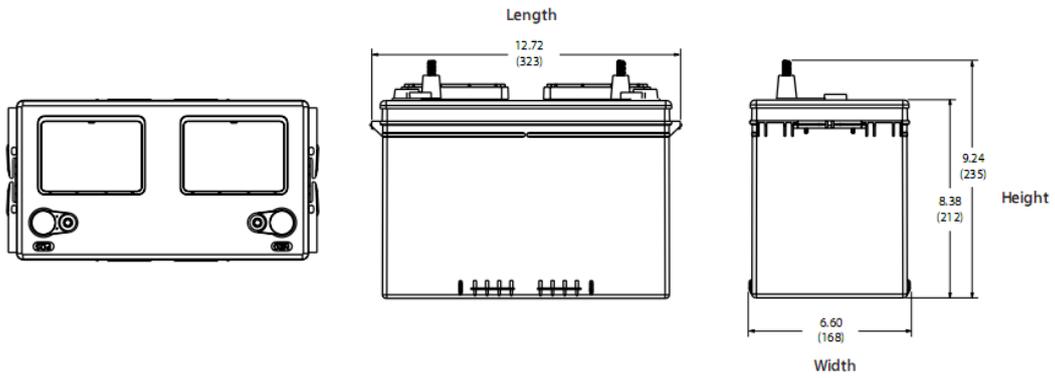
Operating Temperature	Self Discharge
-4°F to 113°F (-20°C to +45°C). At temperatures below 32°F (0°C) maintain a state of charge greater than 60%.	5 - 15% per month depending on storage temperature conditions.

TERMINAL CONFIGURATIONS

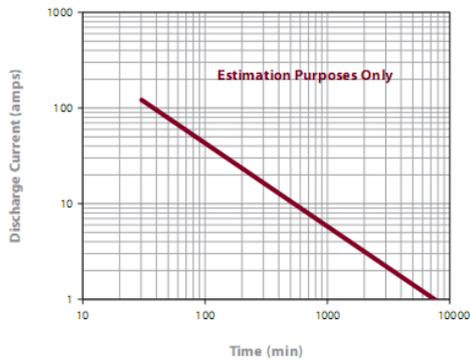
5	LT	L-Terminal	Terminal Height (mm) 1.70 (43) Torque Value in-lb (Nm) 95-105 (11-12) Bolt 5/16"
7	UT	Universal Terminal	Terminal Height (mm) 1.10 (28) Torque Value in-lb (Nm) 95-105 (11-12) Bolt 5/16"
8	AP	Automotive Post Terminal	Terminal Height (mm) .83 (21) Torque Value in-lb (Nm) 50-70 (6-8)
9	WNT	Wingnut Terminal	Terminal Height (mm) .95 (24) Torque Value in-lb (Nm) 95-105 (11-12) Bolt Size 5/16"

S110301-20M-LEC-0018

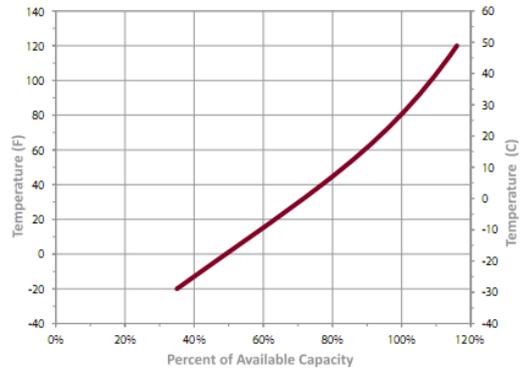
BATTERY DIMENSIONS (shown with WNT)



TROJAN 27TMX PERFORMANCE



PERCENT CAPACITY VS. TEMPERATURE





HC SERIES

**AGM Batteries for High
Cranking Service**

HC Series General Specifications

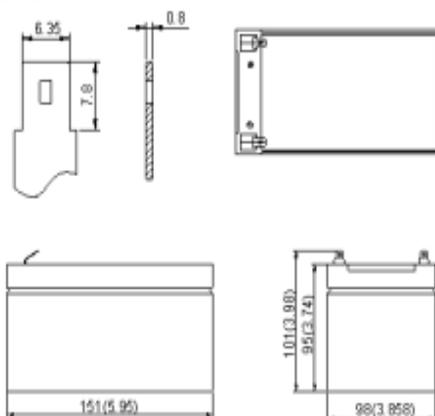
Fullriver Type	Industry Ref.	Capacity C20 1.75 V/C 25°C Ah	5sec. pulse hot cranking amps (PHCA)	Cranking Performance			Reserve capacity, Minutes 25A	Length mm (in)	Width mm (in)	Height mm (in)	Total Height mm (in)	Weight (Approx.) kg (pound)	Terminal Type	Pallet QTY
				CCA @ 0°F	CA @ 32°F	HCA @ 80°F								
12V High Cranking Battery														
HC8	N/A	8	310	100	155	200	8	138 (5.43)	86 (3.39)	101.6 (4.00)	101.6 (4.00)	300 (6.61)	M6	220
HC14A	N/A	14	535	200	265	300	20	170.2 (6.70)	99.1 (3.90)	155 (6.10)	155 (6.10)	600 (13.23)	M6	160
HC14B	N/A	14	545	185	240	300	15	177 (6.97)	86 (3.39)	130.7 (5.15)	130.7 (5.15)	500 (11.02)	M6	192
HC15	N/A	15	370	156	190	220	25	200 (7.87)	77 (3.03)	134 (5.28)	138 (5.43)	555 (12.24)	M6	192
HC18	N/A	18	625	265	350	440	26	170.2 (6.70)	99.1 (3.90)	175 (6.89)	175 (6.89)	700 (15.43)	M6	144
HC20	N/A	20	680	230	310	410	28	181 (7.13)	77 (3.03)	167 (6.57)	167 (6.57)	700 (15.43)	M6	144
HC28	N/A	28	925	410	530	625	48	165 (6.50)	176 (6.93)	125 (4.92)	125 (4.92)	10.70 (23.59)	M6	120
HC30	N/A	30	950	450	550	635	60	250 (9.84)	97 (3.82)	142 (5.59)	156 (6.14)	10.60 (23.37)	M6 M	104
HC35	U1	35	975	438	525	605	50	196 (7.72)	131 (5.16)	167 (6.57)	167 (6.57)	12.1 (26.68)	M6	66
HC40	N/A	40	1100	500	600	700	70	250 (9.84)	97 (3.82)	192 (7.56)	206 (8.11)	14.90 (32.85)	M6 M	78
HC44	N/A	44	1200	560	725	860	80	198 (7.80)	166 (6.54)	170 (6.69)	170 (6.69)	15.10 (33.29)	M6	66
HC50	(DIN/L2)	50	1280	610	745	890	105	241 (9.49)	175 (6.89)	190 (7.48)	190 (7.48)	19.10 (42.11)	AP	64
HC55	22NF	55	1300	620	745	890	100	229 (9.02)	138 (5.43)	208 (8.19)	212 (8.35)	18.00 (39.68)	M6	63
HC60	N/A	60	1340	700	840	1010	105	220 (8.66)	121 (4.76)	247 (9.72)	251 (10.28)	20.50 (45.19)	M6 M	48
HC80B	(DIN/L3)	80	1320	680	810	975	120	278 (10.94)	175 (6.89)	190 (7.48)	190 (7.48)	21.80 (48.06)	AP	48

EV12-15 12V-15Ah



The battery is designed specially for electric vehicles, such as electric golf cart, electric wheelchair, mower dust collector etc. It has high cycling life, high efficiency and long service life.

Outer Dimensions



Dimensions and Weight

Length (mm / inch)	151 / 5.95
Width (mm / inch)	98 / 3.85
Height (mm / inch)	95 / 3.74
Total Height (mm / inch)	101 / 3.98
Approx. Weight (Kg)	4.60

Performance Characteristics

Nominal Voltage	12V
Number of cell	6
Design Life	3 years
Nominal Capacity 77°F (25°C)	
5 hour rate (3.0A, 10.5V)	15Ah
2 hour rate (6.6A, 10.5V)	13.2Ah
1 hour rate (9.75A, 9.6V)	9.75Ah
Internal Resistance	
Fully Charged battery 77°F (25°C)	15mOhms
Self-Discharge	
3% of capacity declined per month at 25°C (average)	
Operation Temperature Range	
Discharge	-20~60°C
Charge	-10~60°C
Storage	-20~60°C
Max. Discharge Current 77°F (25°C)	225A(5s)
Short Circuit Current	750A

Battery Construction

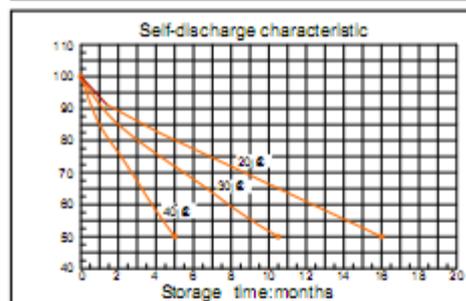
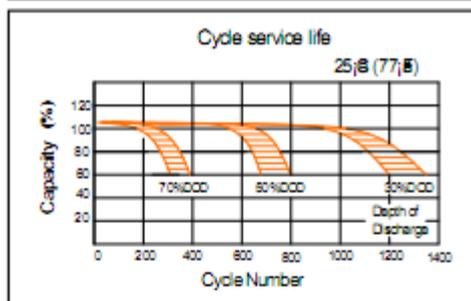
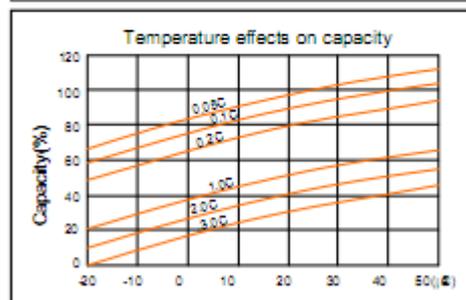
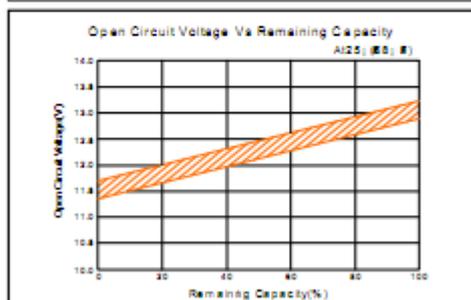
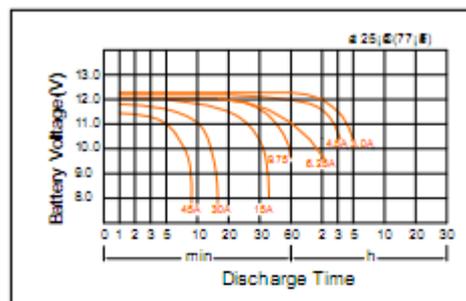
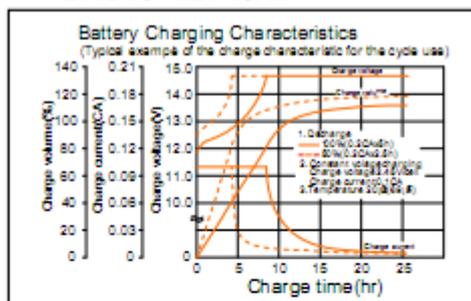
Component	Positive plate	Negative plate	Container	Cover	Safety valve	Terminal	Separator	Electrolyte
Raw material	Lead dioxide	Lead	ABS	ABS	Rubber	Copper	Fiberglass	Sulfuric acid

Charging Methods

Application	Charging method	Charging Voltage at 25°C	Temperature compensation coefficient of charging voltage	Max. charging current	Charging time 0.1CA, 25°C (h)		Temp (°C) (32~104°F)
					100% discharge	50% discharge	
For standby power source	Constant voltage & Constant Current	13.6~13.8V	-20 mV/°C	4.5A	24	20	0~40 (32~104°F)
For cycle service	Charging (with current restriction)	14.6~15.0V	-30 mV/°C	4.5A	16	10	

*Temperature compensation of charging voltage is not needed when using the batteries within 15°C to 35°C range.

EV12-15 12V-15Ah



Discharge Constant Current (Amperes at 77°F 25°C)

FV / Time	10 Min	15 Min	30 Min	40 Min	1 h	2 h	3 h	5 h
10.80V	37.5	28.5	17.4	14.8	10.5	6.13	4.38	2.98
10.50V	40.0	29.8	18.1	14.9	10.8	6.25	4.48	3.00
10.20V	42.5	30.8	18.5	15.1	11.0	6.38	4.50	3.03
9.90V	43.8	31.4	18.8	15.3	11.1	6.50	4.53	3.05
9.60V	45.0	32.0	19.0	15.6	11.3	6.63	4.56	3.08

Discharge Constant Power (Watts/ at 77°F 25°C)

FV / Time	10 Min	15 Min	30 Min	40 Min	1 h	2 h	3 h	5 h
10.80V	404	327	206	206	124	71.0	52.5	33.3
10.50V	438	343	214	214	128	72.5	53.5	33.8
10.20V	453	353	218	218	131	73.5	54.0	34.0
9.90V	464	362	222	222	132	74.5	54.5	34.3
9.60V	473	368	223	223	133	75.0	54.5	34.3

Globalbat Importação e Exportação Ltda
Rua Eng. Fernando de A. Pereira, 607 - Porto Alegre/RS
CEP 91.130-030 TEL:(51) 3355 23 00 FAX:(51) 3348 00 66
www.globalbat.com.br globalbat@globalbat.com.br

