



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Gustavo José Luna Filho

**Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de
geração de energia utilizando o método KiBaM**

Recife

2017

Gustavo José Luna Filho

Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Pedro André Carvalho Rosas, *Ph.D.*

Coorientador: Gustavo Medeiros de Souza Azevedo, *D.Sc.*

Recife

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

L961p Luna Filho, Gustavo José.
Previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia utilizando o método KiBaM /Gustavo José Luna Filho. - 2017.
68 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Pedro André Carvalho Rosas, Ph.D.
Coorientador: Gustavo Medeiros de Souza Azevedo, D.Sc.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas híbridos de geração de energia renovável. 3. Baterias de chumbo-ácido. 4. Autonomia de baterias de chumbo-ácido. 5. Método KiBaM. 6. I. Rosas, Pedro André Carvalho (Orientador). II. Azevedo, Gustavo Medeiros de Souza (Coorientador) II. Título.

621.3 CDD (22. Ed.)

UFPE/BCTG/2017 - 245



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

GUSTAVO JOSÉ LUNA FILHO

TÍTULO

**“PREVISÃO DA AUTONOMIA DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO
APLICADAS A SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA
UTILIZANDO O MÉTODO KiBaM”**

A comissão examinadora composta pelos professores: PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS, DEE/UFPE; GUSTAVO MEDEIROS DE SOUZA AZEVEDO, DEE/UFPE, MÁRCIO EVARISTO DA CRUZ BRITO, DEE/UFPE e LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, DEE/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **GUSTAVO JOSÉ LUNA FILHO APROVADO.**

Recife, 17 de fevereiro de 2017.

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Coordenador do PPGE

PEDRO ANDRÉ CARVALHO ROSAS
Orientador e Membro Titular Interno

MÁRCIO EVARISTO DA CRUZ BRITO
Membro Titular Externo

**GUSTAVO MEDEIROS DE SOUZA
AZEVEDO**
Coorientador e Membro Titular Interno

LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS
Membro Titular Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Rosa Maria Gonçalves Luna e Gustavo José Luna por tudo que sou na vida. Agradeço aos meus professores: orientador Prof. Pedro André Carvalho Rosas e coorientador Prof. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo, essenciais para este resultado, por serem, extremamente inteligentes e capazes e aos meus colegas de estudo Leonardo Araújo, Márcio Regis e David Soares por ter me proporcionado grandes e saudáveis momentos de trabalhos e pesquisas.

RESUMO

Baterias são utilizadas como forma de armazenamento em sistemas de energia renovável devido à natureza de intermitência do sistema, e mais especificamente as de chumbo-ácido possuem atualmente uma maior penetração devido a uma melhor relação de custo-benefício para o sistema. Com isso é observada uma perda de capacidade nessas baterias devido a uma alta quantidade de ciclos de carga e descarga. Como resultado, é importante conhecer o desempenho da bateria e o custo de investimento significativo necessário para sua instalação, manutenção e substituição, quando necessário. Dentre alguns tipos de modelagem de baterias existentes e com base nos testes experimentais da bateria obtidos na literatura, foi desenvolvido neste trabalho, o modelo empírico KiBaM e estimado seus parâmetros para a bateria estudada. Esse modelo consiste num conceito importante de bateria que reflete a resposta dinâmica de tensão nos seus terminais. Em seguida uma validação foi implementada através do software Matlab/Simulink e comparado como modelo experimental. A partir do resultado da validação verificou-se que o modelo pode estimar com boa precisão as características da bateria. O bom funcionamento de um sistema híbrido com geração de energia renovável depende, sobretudo, do tempo de vida de sua bateria. A importância do estudo em relação a como determinar de forma precisa este tempo de funcionamento, se torna indispensável para quem desenvolve esse tipo de sistema. Uma das maneiras de prever o tempo de vida de baterias é através do uso de experimentos reais e outra forma é utilizando modelos matemáticos que simulam o processo de descarga.

Palavras-chave: Sistemas híbridos de geração de energia renovável. Baterias de chumbo-ácido. Autonomia de baterias de chumbo-ácido. Método KiBaM.

ABSTRACT

Batteries are used as a form of storage in renewable energy systems due to the intermittent nature of the system, and more specifically lead-acid batteries currently have a higher penetration due to a better cost-benefit ratio for the system. This results in a loss of capacity in these batteries due to a high number of charge and discharge cycles. As a result, it is important to know the battery performance and the significant investment cost required for its installation, maintenance and replacement, when necessary. Among some types of modeling of existing batteries and based on the experimental battery tests obtained in the literature, the empirical model KiBaM was developed in this work and its parameters for the battery studied were estimated. This model is an important battery concept that reflects the dynamic voltage response at its terminals. Then a validation was implemented through Matlab / Simulink software and compared as an experimental model. From the validation result it was verified that the model can accurately estimate the characteristics of the battery. The proper functioning of a hybrid system with renewable energy generation depends, above all, on the life of its battery. The importance of the study in relation to how to precisely determine this time of operation becomes indispensable for those who develop this type of system. One of the ways to predict the lifetime of batteries is through the use of real experiments and another way is to use mathematical models that simulate the discharged process.

Keywords: Hybrid systems of renewable energy generation. Lead-acid batteries. Lifetime in lead-acid batteries. KiBaM Method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de descarga de uma célula.	21
Figura 2 - Processo de carga de uma célula.....	21
Figura 3 - Processos de carga e descarga de uma bateria de chumbo ácido.....	28
Figura 4 - Carga e descarga de uma célula de íon-lítio.	31
Figura 5 - Classificação dos controladores de carga.	35
Figura 6 - Carga e descarga para configuração liga/desliga.....	36
Figura 7 - Circuito genérico para configuração série.	36
Figura 8 – Circuito genérico para configuração paralelo.	37
Figura 9 - Circuito equivalente de Thevenin	38
Figura 10 - Modelo de impedância.....	39
Figura 11 - Modelo baseado em tempo de execução.....	39
Figura 12 - Diarama do modelo Shepherd.....	41
Figura 13 - Distribuição de carga no modelo KiBaM.....	42
Figura 14 - Tensão x Tempo em células de 2V para carregamento e descarregamento.....	47
Figura 15 - Ensaio em baterias de 12V de 120Ah para carregamento e descarregamento.	49
Figura 16 – Tensão em baterias de 12V: Tensão x SOC (a) e Tensão x DOD (b).....	50
Figura 17 - Obtenção de parâmetros do modelo de tensão KiBaM por interpolação no Carregamento (a) e Descarregamento (b).....	50
Figura 18 - Capacidade x Corrente de descarga.	51
Figura 19 - Modelo KiBaM implementado no Simulink.	52
Figura 20 - Comparação entre resultados experimentais e implementados pelo KiBaM referentes à queda na capacidade da bateria em função do aumento na corrente de descarga.	53
Figura 21 – Ciclos para falha x DOD para um modelo de bateria.	54
Figura 22 – LPE em função do da profundidade de descarga sofrida pela bateria.	55
Figura 23 – Sistema híbrido de Energia eólico-diesel.....	58
Figura 24 – Variação do estado de carga da bateria ao longo de trinta dias para o sistema eólico-diesel.....	59
Figura 25 – Potência processada pela bateria para o sistema eólico-diesel.....	59
Figura 26 – Sistema híbrido de Energia solar-diesel	61

Figura 27 – Variação do estado de carga da bateria ao longo de trinta dias para o sistema solar-diesel.....	61
Figura 28 - Potência processada pela bateria para o sistema solar-diesel.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – DOD, Ciclos para falha e LPE para sistema eólico-diesel.....	60
Tabela 2 – DOD, Ciclos para falha e LPE para sistema solar-diesel.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$i(t)$ - corrente de descarga da bateria no instante t

$u(t)$ - carga total disponível na bateria no instante t

$\delta(t)$ - diferença de altura entre as fontes de carga no modelo KiBaM

K - razão de fluxo de carga entre as fontes de carga do modelo KiBaM

K_0 - constante relacionada com a taxa de vazão de fluxo de carga entre as fontes do modelo KiBaM

h_1 - altura da fonte de carga disponível do modelo KiBaM

h_2 - altura da fonte de carga limitada do modelo KiBaM

y_0 - quantidade total de carga

y_1 - quantidade de carga da fonte disponível

y_2 - quantidade de carga da fonte limitada

c - fração da capacidade total disponível da bateria

C - Capacidade total da bateria

$y_1(0)$ - quantidade inicial de carga disponível

$y_2(0)$ - quantidade inicial de carga limitada

V_{oc} - tensão de circuito aberto

V_{bat} - tensão nos terminais da bateria

I_{bat} - corrente de carga/descarga da bateria

$R_{auto-descarga}$ - resistência de auto-descarga da bateria

TCG - tensão de corte de geração

TRG - tensão de reconexão de geração

TCC - tensão de corte da carga

TRC – tensão de reconexão da carga

REA – Renewable Energy Association

BIS – Department for Business, INovation and Skills

KiBaM – Kinect Battery Model

SPICE – Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis

VHDL – Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

SOC – Estado de Carga (State of Charge)

BMS – Battery Monitor System

DOD – Profundidade de descarga (Deep of Discharge)

CAES – Compressed Air Energy Storage

DC - corrente contínua

AC - corrente alternada

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Objetivos da dissertação	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
2.	O ESTADO DA ARTE.....	16
2.1	Sistemas de Armazenamento de Energia	17
2.1.1	Ar comprimido (CAES).....	17
2.1.2	Capacitores eletroquímicos	17
2.1.3	Bombeamento de água	18
2.1.4	Flywheel	18
2.1.5	Baterias eletroquímicas.....	19
2.2	Baterias	19
2.2.1	Definições elementares.....	20
2.2.2	Características relevantes de baterias para sistemas elétricos	22
2.2.3	Características e efeitos não-lineares.....	24
2.3	Tipos de baterias.....	25
2.3.1	Baterias de Chumbo-ácido	26
2.3.2	Baterias de Íon-lítio	30
2.3.3	Baterias de Níquel-cádmio	32
2.4	Sistema de Carregamento de Baterias.....	33
2.4.1	A utilização do controlador de carga.....	34
2.4.2	Tipos de controladores de carga	35
2.5	Modelagem de baterias	37
2.5.1	Modelos Elétricos	37
2.5.1.1	<i>O Modelo de Casacca e Salameh.....</i>	<i>38</i>
2.5.2	Modelos empíricos	40
2.5.2.1	<i>O modelo Shepherd-Schiffer</i>	<i>40</i>
2.5.2.2	<i>O modelo KiBaM.....</i>	<i>41</i>
2.5.3	Modelos abstratos	44
2.5.3.1	<i>O modelo KiBaM modificado.....</i>	<i>44</i>

3.	PARAMETRIZAÇÃO EM MODELO DE BATERIAS.....	46
3.1	Ensaio em células de 2V	46
3.2	Parametrização para o modelo de tensão em baterias.....	47
3.3	Parametrização para o modelo de capacidade em baterias.....	51
3.3.1	Validação do modelo KiBaM através do Simulink.....	52
3.4	Previsão da autonomia de bateria de chumbo-ácido pelo método do limite de processamento de energia (Throughput).....	53
4.	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	57
4.1	<i>O HOMER ENERGY</i>	57
4.2	Simulação em sistemas híbridos.....	57
4.2.1	Sistema Eólico-diesel	58
4.2.2	Sistema Solar-diesel	60
5.	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	64
5.1	Trabalhos futuros	65
	REFERÊNCIAS	66

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado um significativo aumento na utilização de fontes de energia renovável como forma de geração de energia elétrica em meio a uma crescente demanda no setor segundo a *Renewable Energy Association* (REA). E que devido à intermitência na produção de energia de várias dessas fontes é que muitas vezes se faz necessário o uso de algum tipo de armazenamento de energia associados ao sistema.

As mais modernas tecnologias de armazenamento de energia dão suporte à geração de energia renovável a vários sistemas ao redor do mundo. De acordo com o *The Department for Business, Innovation and Skills* (BIS), o desenvolvimento de tecnologias para o armazenamento de energia elétrica está entre as oito grandes tecnologias que podem ser desenvolvidas no mundo.

De acordo com a REA em sua publicação de 2015/2016, um sistema de armazenamento é capaz de absorver e liberar energia quando solicitado, e dessa forma auxiliar na estabilidade dos sistemas de potência a ele conectado. Tanto em residências quanto na indústria, o armazenamento de energia pode trazer inúmeros benefícios como estabilidade e segurança para as cargas consumidoras, além de não contribuir com a liberação de gás carbônico para a atmosfera, como é o caso de sistemas que utilizam como recursos energéticos, combustíveis à base de petróleo, o que faz dele uma parte importante para redução na emissão de gases tóxicos para o futuro do planeta.

Essas tecnologias de estocagem de energia oferecem ainda uma maior flexibilidade em momentos de flutuação na geração e demanda de energia. Além disso, os benefícios econômicos são significantes. Se 2GW de potência fosse implantado até 2020, a indústria criaria mais de 10 mil empregos só no Reino Unido, segundo (Association, 2015). Um dos problemas mais relevantes em projetos que envolvam acumuladores de energia como baterias, ao sistema elétrico (sistema híbridos, por exemplo) reside na determinação em fase de projeto básico ou conceitual da autonomia dessas baterias e com isso determinar o seu custo de vida no ciclo do projeto.

Baterias podem ser empregadas em sistemas isolados ou distribuídos de geração de energia e seu desenvolvimento varia de acordo com o tipo de carga ou demanda energética, requerendo, dessa forma, altos investimentos em todo o mundo e em particular no Brasil.

1.1 Objetivos da dissertação

Nesta seção são apresentados os objetivos deste trabalho. Para facilitar a compreensão os objetivos foram divididos em Objetivo Geral e Objetivos Específicos, os quais são destacados a seguir.

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo a previsão da autonomia de baterias de chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia com fontes renováveis utilizando o método KiBaM (*Kinect Battery Model*) considerando baterias do tipo VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*- termo em inglês para baterias de chumbo-ácido reguladas por válvula).

1.1.2 Objetivos específicos

Afim de alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos foram apontados:

- Revisão bibliográfica dos principais tipos e características das baterias mais utilizadas em sistemas de potência;
- Revisão bibliográfica dos principais modelos de baterias chumbo-ácido existentes na literatura;
- Apresentar e caracterizar o modelo KiBaM, a ser utilizado nesse trabalho;
- Desenvolver e adaptar o modelo KiBaM, com todos os parâmetros, para tensão e capacidade e cálculo de autonomia para diferentes tipos de baterias com informações obtidas na literatura, através de ensaios ou fornecidas pelo fabricante e validar o modelo através de implementação no Matlab/Simulink, utilizado nesse trabalho;
- Prever a autonomia e o comportamento operacional de uma bateria de chumbo-ácido VRLA em um sistema híbrido de geração de energia com fontes renováveis identificando os principais aspectos que prolonguem sua vida útil.

2. O ESTADO DA ARTE

Devido ao comportamento intermitente das fontes renováveis de energia como solar e eólica, ocorrem intervalos de funcionamento nos quais a potência elétrica produzida não está em conformidade com a potência requerida pelas cargas a serem alimentadas. Essa diferença entre produção e demanda pode ocorrer por excesso ou por provimento insuficiente em sistemas de geração isolada.

Em virtude dessa característica, faz-se necessário o armazenamento de energia quando há excesso de produção para ser empregado nos momentos de insuficiência e dessa forma, garantir um adequado funcionamento dos sistemas híbridos para produção e abastecimento de energia elétrica de acordo com (Pinho, 2008). Esse acúmulo de energia é feito através dos sistemas de armazenamento.

Há muito tempo, objetivando uma boa operacionalidade dos sistemas elétricos, vários dispositivos com diferentes tecnologias para armazenamento de energia têm interessado aos meios técnicos em diferentes áreas onde o acúmulo de energia seja de necessidade.

Estes dispositivos têm sido muito utilizados em auxílio ao sistema no suporte a utilização de fontes renováveis, com características intermitentes, provenientes das gerações eólicas e solares.

De modo a manter a carga em seu funcionamento estável, uma das características mais importantes para um sistema elétrico é armazenar energia durante os períodos de baixa demanda para utilizá-la durante os períodos de maior demanda, permitindo uma menor utilização da geração de energia de maior custo dos períodos de maior consumo.

Na busca pela oferta de uma energia complementar para otimização do sistema elétrico, é que mais dispositivos têm operado utilizando características próprias do sistema, na melhoria de sua infraestrutura evitando, dessa forma, a transferência de carga ou ainda a construção de novas linhas de transmissão. Ainda como vantagem oferecida pelo armazenamento pode-se incluir apoio técnico para os serviços necessários a fim de manter o equilíbrio entre oferta e demanda segundo (Parfomak, 2012).

A geração de energia renovável, tal como, a partir de fontes eólicas e solares, geram oportunidades adicionais para a utilização de sistemas armazenamento devido à intermitência quanto à energia produzida por elas. Levando em consideração a utilização dessas fontes num sistema elétrico, este pode vir a sofrer diversos impactos operacionais os quais podem ser reduzidos com a utilização das várias tecnologias de armazenamento.

2.1 Sistemas de Armazenamento de Energia

Atualmente são conhecidas diversas formas de armazenamento que diferem em termos de desempenho, custo e desenvolvimento tecnológico, tais como:

2.1.1 Ar comprimido (CAES)

Essa forma de armazenamento de energia possui larga escala podendo armazenar uma grande quantidade de eletricidade através de uma tecnologia que utiliza ar comprimido.

Ar comprimido pode ser armazenado em grandes volumes a partir de formações geológicas subterrâneas e em um processo convencional de troca de calor, o gás comprimido armazenado é liberado através de um sistema de gerador rotativo, como uma turbina, por exemplo.

Considerado como o de menor custo dentre todas as tecnologias de armazenamento de eletricidade, o CAES pode ser dimensionado desde megawatts até gigawatts, onde provém armazenamento de longa duração e operação eficiente para um amplo leque de variedade de condições. De acordo com (Oberhofer, 2012) essas características tornam a tecnologia vantajosa por diversas razões e capaz de prover inúmeros serviços como reserva operativa, suprimento de carga, geralmente reduzindo os impactos decorrentes das variações de carga devido às diversas fontes de geração que atuam no sistema.

O maior obstáculo para seu desenvolvimento dessa tecnologia é a indicação de formações rochosas subterrâneas que sejam capazes de armazenar o gás comprimido incluindo depósitos de gás já esgotados.

Atualmente há dois sistemas operando comercialmente no mundo: Um Sistema de 290 MW em Huntorf na Alemanha e outro de 110 MW em McIntosh no Alabama/EUA. Ambos os sistemas armazenam o ar comprimido em cavernas escavadas.

2.1.2 Capacitores eletroquímicos

São dispositivos que armazenam energia em forma de campo elétrico, sendo, portanto indispensáveis em equipamentos eletrônicos, podendo também ser usado em instalações elétricas para partida de motores e regulação do fator de potência. Nessa classe de armazenadores de energia estão incluídos também os supercapacitores e ultracapacitores.

Diferentemente dos capacitores eletrostáticos tradicionais, estes capacitores usam um eletrólito carregando íons entre dois eletrodos de forma semelhante às baterias. São tipicamente usados em aplicações que requerem maior qualidade de energia bem como aquelas que oferecem estabilidade para a tensão transiente e estão entre os processos que têm a resposta mais rápida dentre os dispositivos de armazenamento de eletricidade. Entretanto, segundo (Parfomak, 2012), devido a sua baixa capacidade de energia, seu uso se restringe a intervalos de curto período.

2.1.3 Bombeamento de água

Seu princípio de funcionamento baseia-se no transporte de água entre reservatórios em diferentes níveis de implantação por meio de bombas de sucção que consomem energia elétrica. Dessa forma, a energia é transformada em energia potencial para posterior geração hidroelétrica a fim de atender demandas em épocas específicas ou para regular o preço de comercialização da energia.

Essa é a única tecnologia de armazenamento de energia desenvolvida mundialmente em escala de gigawatts. No mundo, existem mais de 270 estações deste tipo em operação capazes de gerar 120 GW de energia.

2.1.4 Flywheel

Os Flywheels (volantes de inércia) constituem uma das formas mais antigas de tecnologia de armazenamento de energia, historicamente usada para facilitar a transferência de potência em aplicações variando desde rodas de moinho até motores alternativos.

O sistema armazena a energia cinética pelo movimento de um rotor, instalado em uma câmara de vácuo onde a energia cinética armazenada pelo rotor em movimento é consumida ao fazer funcionar uma unidade geradora de energia. Contrariamente, a quantidade de energia armazenada aumenta quando uma máquina, que consome energia, acelera o rotor.

Essa forma de armazenamento de energia, atualmente, é uma opção custosa, sendo implantada em situações com variação de demanda de curta duração e com necessidade de resposta em fração de segundos.

Essa tecnologia avançou enormemente desde o último século, que passou a utilizar em vez de grandes rodas de aço que giram de dezenas até centenas de rotações por minuto,

rotores de fibra de carbono ou resina de fibra de vidro que giram até centenas de milhares de rpm atingindo velocidade supersônica em sistemas à vácuo. Estas inovações permitem a esses volantes atingir alta potência e alta densidade de energia, elevada eficiência, baixa perda por atrito e longo ciclo de vida útil com baixos custos de operação e manutenção ainda de acordo com (Parfomak, 2012).

Flywheels tem a capacidade de responder rapidamente como fonte para alteração da eletricidade tornando um valioso recurso principalmente para regulação de frequência em sistemas elétricos.

Contudo, essa tecnologia tem, tipicamente, um custo mais elevado que outras tecnologias de armazenamento e é de forma pouco provável que em futuro próximo possa competir com algumas aplicações que requerem horas de armazenamento de energia. São normalmente utilizados em áreas de aplicações em transportes, em automóveis, ônibus e trens, competindo nestes mercados com as baterias e os capacitores.

2.1.5 Baterias eletroquímicas

Sistemas de armazenamento com baterias eletroquímicas recarregáveis produzem energia elétrica na transformação de elementos químicos em compostos com potencial de liberar energia ao reagir quimicamente através de reações de redução e oxidação.

Para aplicações em sistemas elétricos existem alguns tipos de baterias que são de interesse, tais como, baterias de chumbo-ácido, íon-lítio e níquel-cádmio, que serão melhor apresentadas no próximo item.

2.2 Baterias

Segundo (Parfomak, 2012), uma bateria é um dispositivo que converte a energia química contida em materiais ativos diretamente em energia elétrica através de reações eletroquímicas de oxi-redução (redox).

Este tipo de reação envolve transferência de elétrons de um material para outro através de um circuito elétrico. Embora o termo “bateria” ser frequentemente usado, a unidade eletroquímica básica é a célula. Uma bateria consiste de uma ou mais dessas células, conectadas em série ou em paralelo, ou ambos, dependendo da produção desejada de tensão e capacidade.

As maiores exigências para aplicação de baterias em sistemas de potência são tempo de vida útil alto, densidade de energia elevada e baixo custo.

Os acumuladores eletroquímicos podem ser classificados em baterias (ou células) primárias e secundárias. As baterias primárias são mais conhecidas como pilhas, e não foram projetadas para serem recarregadas. Suas aplicações mais conhecidas incluem o uso em equipamentos eletrônicos em geral, como relógios e lanternas por exemplo. As baterias secundárias são as mais usadas hoje e abrange uma ampla gama de aplicações. Por serem recarregáveis e com uma maior vida útil, usa-se basicamente em qualquer aplicação de baterias, como em automóveis, aviões, equipamentos eletrônicos, satélites, aparelhos celulares e diversos serviços para a rede elétrica.

2.2.1 Definições elementares

A célula galvânica é a unidade eletroquímica básica que proporciona uma fonte de energia elétrica através da conversão de energia química por meio de uma reação eletroquímica de oxidação e redução (redox) segundo (Bagotsky e Skundin, 2015). Esse tipo de reação envolve a transferência de elétrons de um material para outro através de um circuito elétrico. De forma simplificada, a célula galvânica pode ser caracterizada como um dispositivo contendo dois condutores de elétrons (eletrodos) em contato com um condutor de íons (eletrólito). Os eletrodos são de dois tipos distintos:

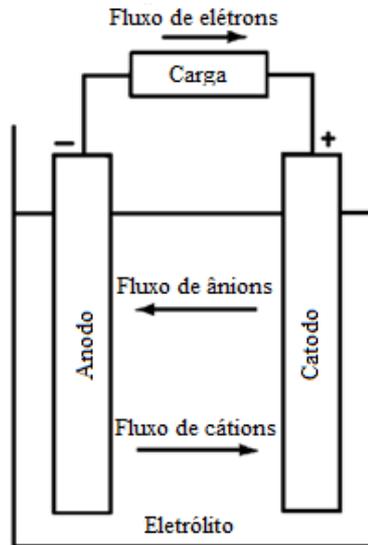
- I. O anodo ou eletrodo negativo: responsável por fornecer elétrons ao circuito externo e é oxidado durante a reação eletroquímica;
- II. O catodo ou eletrodo positivo: responsável por receber elétrons do circuito externo e é reduzido durante a reação eletroquímica.

Já o eletrólito é responsável por proporcionar um meio de transferência de carga (íons) dentro da célula entre o anodo e o catodo. O eletrólito é tipicamente um líquido, como água ou outro solvente, onde são dissolvidos sais, ácidos ou bases para promover condutividade iônica, de acordo com (Linden e Reddy, 2002).

O processo de descarga da célula (conversão de energia química em elétrica) ocorre quando uma carga é conectada externamente ao catodo e ao anodo, elétrons fluem do anodo (oxidado) para o catodo (reduzido) através da carga. Nesse processo ocorre a formação dos íons negativos (ânions) e os íons positivos (cátions). A Figura 1 apresenta o circuito elétrico

completo incluindo o fluxo de íons entre os eletrodos através do eletrólito e fluxo de elétrons através de um meio externo representado pela carga fluindo do anodo para o catodo.

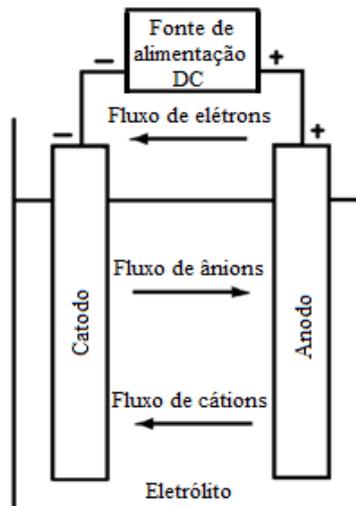
Figura 1 – Processo de descarga de uma célula.



Adaptado de: LINDEN, David e REDDY, Thomas B (2002).

Dependendo do tipo de célula, é possível fazer uma recarga da mesma. Nesse processo, o fluxo de corrente é revertido: o eletrodo positivo passa a ser o anodo enquanto o eletrodo negativo passa a ser o catodo. A Figura 2 apresenta o circuito completo para o processo de carga de uma célula, onde o carregamento é definido a partir de uma fonte de alimentação externa que injeta cargas na bateria a partir de uma tensão definida.

Figura 2 – Processo de carga de uma célula.



Adaptado de: LINDEN, David e REDDY, Thomas B (2002).

Uma bateria é constituída de uma ou mais células eletroquímicas eletricamente conectadas de forma apropriada em série ou em paralelo conforme a necessidade de tensão e/ou corrente. Cada célula produz uma diferença de potencial relativamente baixa, tipicamente 0,5 a 4 V ainda segundo (Bagotsky e Skundin, 2015). Logo, baterias com tensões mais altas possuem maior quantidade de células conectadas em série.

2.2.2 Características relevantes de baterias para sistemas elétricos

- **Capacidade da bateria:** É a medida da capacidade de uma bateria para armazenar energia elétrica, normalmente expressa em unidades de ampere-horas, obtida através do cálculo integrando a corrente de descarga em amperes ao longo de um período de tempo específico. A transferência de um ampere durante uma hora é igual a um ampere hora ou é igual a 3600 coulombs de carga. Por exemplo, se uma bateria fornece 5A por 20 horas, sua capacidade é de 100 ampere-horas. A quantidade de material ativo, o número, o modelo, as dimensões físicas das placas, e o tipo do eletrólito, determinam a capacidade da bateria. Geralmente, a capacidade é especificada a uma taxa de descarga específica ou durante um determinado período de tempo de acordo com (Rand e Moseley, 2004).
- **Taxa de carga/descarga:** É a corrente de carga ou descarga utilizada. Está relacionada com a razão entre a capacidade máxima da bateria e o período de carga ou descarga em horas.
- **Tensão de corte:** É a menor tensão na qual uma bateria pode operar. Esse valor é fornecido pelo fabricante. Caso seja imputada à bateria níveis de tensão menores que a tensão de corte, se iniciará internamente um processo de degradação das células.
- **Estado de carga (*State of Charge* - SOC):** É definido como sendo o percentual de energia armazenada em relação à bateria completamente carregada. O estado de carga aumenta quando a bateria é carregada e diminui quando ela é descarregada. Esse parâmetro é importante para se definir os ciclos de carga e a quantidade de energia remanescente na bateria que pode ser utilizada. O SOC normalmente é usado para monitoramento da bateria.

- **Profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DOD):** É definida como sendo o percentual de energia da bateria que foi retirada, em relação à bateria completamente carregada. Esse parâmetro normalmente está relacionado ao projeto de um sistema de armazenamento para sistemas elétricos, pois é importante para definir a autonomia ou vida útil da bateria, uma vez que a vida útil de uma bateria está diretamente relacionada à sua profundidade de descarga nos diversos ciclos de uso.
- **Resistência interna:** É a resistência elétrica encontrada pela corrente através da bateria. Esta resistência depende do projeto das células, construção e tempo de uso. Vários fatores provocam o aumento da resistência interna da bateria, tal como a sulfatação, temperatura, descarga completa ou profunda levando ao uso excessivo do material ativo e o nível de carga.
- **Vida útil:** Segundo a (NBR 15254, 2005), a duração da bateria, ou vida útil, ou tempo de vida é o tempo de vida em que a capacidade efetiva da bateria atinge 80% de sua capacidade nominal e que é influenciada de diferentes formas dependendo das condições em que são tratadas e em uma série de fatores de design, como por exemplo, o estresse da bateria, a seleção dos materiais e os processos de fabricação. Geralmente, a duração da bateria é estabelecida pelo número de ciclos que é esperado para executar. Alguns dos principais fatores que provocam danos a bateria são:
 - Corrosão na grade positivas: A capacidade disponível e a resistência interna da bateria são afetadas pela corrosão da grade positiva. À medida que a grade corrói, uma parte da massa activa tem uma ligação reduzida ao terminal, como resultado a capacidade é diminuída. A resistência interna aumenta à medida que a corrosão aumenta devido à conectividade reduzida do material corroído e diminuição na secção transversal da grade positiva. A corrosão da grelha positiva ocorre com o aumento da tensão, concentração de ácido e temperatura, por (Jones, 2004).
 - Sulfatação irreversível: Cristais de sulfato são formados enquanto a bateria de chumbo-ácido é descarregada e são dissolvidos durante seu carregamento. No entanto, se a bateria não é operada adequadamente, em seus níveis de tensão e temperatura definidas pelo fabricante, os cristais de sulfato crescem em tamanho e resultando em sulfatação irreversível. De acordo com (Bindner et al, 2005) isso leva a perda de capacidade da massa e baixa vida útil da bateria, pois os grandes cristais de sulfato não

tomarão parte na reação química e também deixarão parte do material ativo isolado do terminal.

- Derramamento de eletrólito: O processo de desprendimento do material ativo do eletrodo devido à sobrecarga e sulfatação reduzindo a capacidade da bateria é chamado derramamento. Enquanto a sulfatação cria a diferença no volume dos cristais de sulfato e peróxido de chumbo no eletrodo positivo levando ao derramamento, as bolhas de gaseificação criadas durante a sobrecarga separam o material ativo do eletrodo.

- Redução dos eletrodos: É a alteração na estrutura mecânica dos eletrodos e do material ativo devido a sobrecargas e subcargas. A redução dos eletrodos diminui a capacidade da bateria, uma vez que a porosidade e a área de superfície do eletrólito diminuem à medida que a reação química é concentrada para menos espaço ainda segundo (Bindner et al, 2005).

2.2.3 Características e efeitos não-lineares

Nesta seção serão descritas algumas características importantes para o entendimento do funcionamento das baterias. Além disso, serão discutidos dois efeitos não-lineares que estão ligados a quantidade de energia que pode ser entregue pela bateria: o efeito de recuperação e o efeito da taxa de capacidade.

- a. Tensão de circuito aberto (V_{OC}): É a tensão medida nos terminais da bateria quando não há carga conectada a mesma.
- b. Capacidade nominal (total): É a máxima quantidade de carga que pode ser extraída de uma bateria.
- c. Capacidade efetiva: É a quantidade de carga que pode ser extraída de uma bateria sob determinadas condições operacionais, tais como: taxa de descarga, temperatura, estado inicial de carga, dentre outros.
- d. Auto-descarga: É o fenômeno pelo qual a bateria se descarrega, mesmo sem que haja conexão à mesma.

- e. Efeito de recuperação: Durante períodos em que não há descarga ou uma descarga muito pequena, a bateria pode recuperar a capacidade “perdida” durante os períodos de alta corrente de descarga. Isso caracteriza o efeito de recuperação. Os projetistas de sistemas podem explorar esse efeito visando controlar a taxa de descarga para maximizar a vida útil das baterias segundo (Rao, Vrudhula e Rakhmatov, 2003).
- f. Taxa de capacidade: Esse efeito é caracterizado pela menor quantidade de carga que a bateria pode fornecer quando a corrente de descarga é aumentada, segundo (Kim e Qiao, 2011).

2.3 Tipos de baterias

Dentre as classificações das baterias destacam-se: quanto ao tipo de utilização (automotivas, estacionárias, tração, etc.) e quanto ao tipo de células que as compõem (primárias e secundárias). As baterias primárias têm por característica principal não ser recarregável, enquanto as secundárias são recarregáveis. Segundo (Linden e Reddy, 2002) as aplicações das baterias secundárias dividem-se em duas categorias principais:

- I. Quando empregadas como dispositivo de armazenamento de energia. Geralmente estando eletricamente conectada e sendo carregada por uma fonte primária de energia, entregando sua energia para a carga sob demanda. Exemplos: automóveis, sistemas de aviação, fonte de alimentação ininterrupta (UPS - *Uninterruptible Power Supply*), sistemas de armazenamento de energia estacionária para estabilização de carga em sistemas de energia elétrica, etc.
- II. Quando são utilizadas essencialmente como uma bateria primária, porém sendo recarregadas ao invés de descartadas após o uso. Exemplos: dispositivos eletrônicos portáteis, veículos elétricos, ferramentas elétricas, etc.

No conjunto das baterias recarregáveis, a mais utilizada é a bateria de chumbo-ácido (Pb-ácido) devido ao seu custo-benefício. Existem baterias com características de funcionamento melhores do que a bateria de chumbo-ácido, dentre essas estão: íon-lítio (Li-

ion) e níquel-cádmio (NiCd) (Pinho, 2014). Porém, devido ao custo (para a mesma quantidade de energia, de quatro a cinco vezes maior) ainda são pouco empregadas em sistemas de geração que têm por base fontes renováveis de energia.

A seguir serão apresentadas algumas características dos tipos de baterias mais presentes e mais utilizados no mercado, tais como, chumbo-ácido, íon-lítio e níquel-cádmio

2.3.1 Baterias de Chumbo-ácido

A tecnologia chumbo-ácida é o tipo de armazenamento eletroquímico mais antigo no mercado atual e hoje são as baterias de armazenamento mais utilizadas no mundo, segundo (Bagotsky e Skundin, 2015). Isso pode ser justificado pelo baixo custo, alta confiabilidade, bom desempenho, células de alta voltagem ($> 2,0$ V), fácil indicação do estado de carga, disponíveis em configurações livres de manutenção e em diversos tipos de tamanho e modelos de acordo com (Dürr, 2006).

A história das baterias PbA tem sua origem em 1854, quando Sinsteden publicou pela primeira vez resultados de sua experiência com este par eletroquímico. Entretanto, foi em 1859 que Gastón Planté produziu a primeira bateria recarregável de chumbo-ácido, efetuando ciclos de carga e descarga continuamente em uma folha de chumbo, submersa em ácido sulfúrico. Desde então uma série de desenvolvimentos foram feitos até hoje, desde o processo de fabricação à operação e reciclagem.

O primeiro grande mercado da bateria chumbo-ácida foi o de baterias stand-by, para garantir o funcionamento de equipamentos essenciais na geração de eletricidade e em outros locais com cargas críticas. Alguns anos depois, foi desenvolvido o carro elétrico que demandou em sua maioria, o uso de baterias chumbo-ácido com descargas mais profundas. Também foi usada em iluminação pública, alimentação de sinais para trens, equipamentos elétricos em navios, e radiotransmissores e receptores, iniciando sua era nas telecomunicações.

Com o surgimento dos motores à combustão, as baterias foram usadas primeiramente para iluminação nos automóveis e depois para partida de motores. Hoje, o seu uso em veículos elétricos-híbridos demanda cada vez mais capacidade, mais potência e um regime de operação em estado parcial de carga.

Para acompanhar as evoluções do mercado, uma série de inovações foram feitas ao longo de todas essas décadas. Ainda no século XIX, foi descoberto que as ligas de chumbo poderiam trazer uma série de vantagens, como por exemplo, o uso de antimônio nas grades para imbuir uma maior resistência mecânica nas placas. Aditivos são constantemente

empregados nos materiais ativos nas baterias para dar mais durabilidade, aumento de aceitação de carga, entre outros.

As principais tecnologias de acumuladores chumbo-ácido usadas hoje são classificadas primeiramente (i) quanto ao design de placa (plana, tubular ou espiral); (ii) se são do tipo ventilada (eletrólito “livre”) ou regulada por válvula (VRLA) – também conhecidas como baterias seladas ou livres de manutenção; e por fim, as baterias VRLA podem ter o eletrólito imobilizado por (iii) uma manta de fibra de vidro (AGM – absorbed glass material), ou através do processo de gelificação do eletrólito, dando origem à duas novas classificações AGM e Gel.

Há algumas exceções, como por exemplo baterias ventiladas e ‘livres de manutenção’, como é o caso de uma tecnologia desenvolvida no Brasil, patenteada pela Acumuladores Moura. O diagrama abaixo conforme ilustra a divisão mais comum da tecnologia chumbo-ácida.

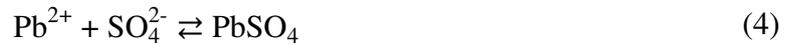
O formato das placas (eletrodos) da bateria interfere na condição interna de operação, com áreas de superfície, resistência e compressão distintas, podendo ser planas, tubulares ou espirais. As placas planas são formadas por grades em formato retangular, com filetes horizontais e verticais, podendo ter filetes transversais para facilitar o fluxo de corrente até o strap. As baterias com placas tubulares, tem o catodo com formato de tubo e o anodo de placa plana. Com a diferença de estrutura mecânica, a composição química também é modificada para inferir resistência à grade, aceitação de carga e outras características. As placas espirais têm uma maior resistência à queda de massa, devido à compressão dada em toda a superfície da placa com o enrolamento das placas em formato espiral. Este formato é de processo de fabricação mais complexo e é usado em aplicações mais especiais.

As baterias de chumbo-ácido usam o peróxido de chumbo (PbO₂) como material ativo do eletrodo positivo e chumbo metálico, numa estrutura porosa (chumbo poroso), como material ativo do eletrodo negativo. O eletrólito é composto por uma solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄) e água (H₂O), (Linden e Reddy, 2002). As reações químicas envolvidas no funcionamento desse tipo de bateria são as seguintes:

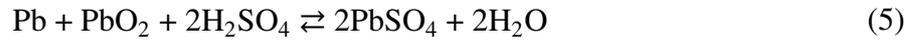
- Eletrodo negativo:



- Eletrodo positivo:



- Reação global:

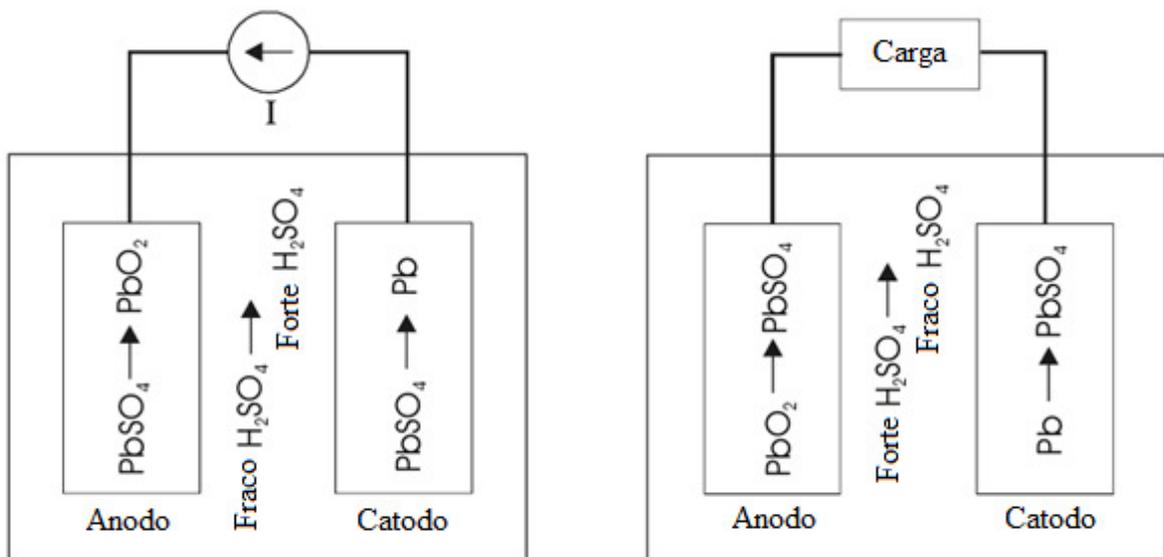


Nas equações acima, seta para a direita indica processo de descarga da bateria enquanto seta para a esquerda indica processo de carga da bateria.

No processo de carga da bateria ocorre um depósito de peróxido de chumbo no eletrodo positivo e um acúmulo de chumbo no eletrodo negativo. Isso provocará a liberação de ácido sulfúrico no eletrólito, aumentando sua concentração. Por outro lado, durante a descarga, o transcorrer das reações provoca um depósito de sulfato de chumbo nos dois eletrodos, retirando ácido sulfúrico do eletrólito e, dessa forma, reduzindo sua concentração, (Messenger e Ventre, 2004). A Figura 33 ilustra esse processo.

Como desvantagens desse tipo de bateria têm-se: ciclo de vida relativamente pequeno (50-500 ciclos), densidade de energia limitada (em média 30-40 Wh/kg) e a dificuldade de fabricação de modelos muito pequenos (ex.: 500 mAh), segundo (Linden e Reddy, 2002).

Figura 3 – Processos de carga e descarga de uma bateria de chumbo ácido.



Adaptado de: Messenger e Ventre (2004)

O carregamento completo de uma bateria de chumbo-ácido à temperatura constante de 25°C, indicada pelo fabricante, partindo de um estado onde ela encontra-se completamente descarregada divide-se, basicamente, em 3 etapas de acordo com (Saad, 2012):

- **1ª Etapa: Carregamento a correntes constantes:** Essa fase inicial não deve forçar à geração de gás nem perda do eletrólito da bateria, onde a taxa de carregamento (corrente) é constante. O tempo até a conclusão desta etapa depende da corrente de carregamento à qual a bateria está submetida. Nessa fase a tensão vai subindo gradativamente enquanto a bateria vai sendo carregada. Ao atingir a tensão máxima, ou limite, conhecida como tensão de gaseificação da bateria, onde já se tem armazenada parte considerável da carga, a bateria começará a liberar gás perdendo eletrólito para maiores níveis de tensão aplicada. Dessa forma, a primeira etapa de carregamento de uma bateria restringe-se a manter uma corrente constante ao longo do tempo necessário para se alcançar este valor limite. A partir daí termina-se a primeira parte de carga e inicia-se a etapa seguinte onde a fonte de energia muda de corrente constante para tensão constante. Para baterias chumbo-ácidas esta tensão máxima permitida pelo fabricante é de aproximadamente 14,4V.
- **2ª Etapa: Tensão constante:** Nesta etapa, a tensão limite deve ser mantida constante fazendo com que a corrente diminua com o aumento da carga da bateria. Quando a corrente for próxima da centésima parte da capacidade da bateria, a bateria estará completamente carregada, passando-se à etapa de flutuação.
- **3ª Etapa: Tensão de flutuação:** Nesta terceira e última etapa a tensão deve ser reduzida para a tensão de flutuação. Esta tensão mantém a bateria carregada, compensando eventuais perdas devido a resistências internas da bateria.

Existem alguns tipos de baterias de chumbo-ácido, os quais são apresentados a seguir:

- **Baterias inundadas:** As baterias inundadas, também conhecida como baterias ventiladas, possuem em seu interior um eletrólito líquido e tampas removíveis para que ele possa ser diluído, repondo a quantidade de água que foi evaporada. Esse tipo de bateria possui para alta capacidade de armazenamento de energia e são utilizadas em centrais de redes de computadores, sistemas offgrid entre outros. As baterias inundadas são menos sensíveis à

carga e devem ser mantidas em posição vertical para evitar o vazamento do eletrólito (Jones, 2004).

- **Baterias a gel:** O eletrólito na bateria, como diz o nome, é gelificado e por isso a probabilidade de vazamento é bem menor. No entanto, estes eletrólitos não podem ser diluídos de modo que a sobrecarga deve ser evitada. A depender da temperatura e utilização essas baterias duram de um a dois anos, provocam menos danos ao meio ambiente e são mais fáceis de trabalhar tecnicamente (Jones, 2004).
- **Baterias VRLA:** O eletrólito em baterias de VRLA (*Valve Regulated Lead Acid Battery*) é selado no recipiente. As placas, o tamanho e o peso deste tipo das baterias são diferentes dos outros tipos de baterias porque são totalmente dependentes do tipo do recipiente. Podem ser mobilizadas e montadas de várias formas. Possuem baixa produção de gases tóxicos devido à recombinação interna desses gases, evitando com isso qualquer tipo de manutenção. São bastante utilizadas em veículos (Jones, 2004).

2.3.2 Baterias de Íon-lítio

Em se tratando de energia e densidade de potência, o lítio (Li) tem se mostrado como um dos elementos químicos mais promissores. Além de ser leve e pequeno, devido à sua posição na tabela periódica, apresenta alta eletropositividade. Essas características são ótimos pré-requisitos para baixo peso, altas voltagens, transporte rápido e fácil acomodação em fases sólidas de acordo com (Schögl, 2013).

As baterias de íon-lítio são compostas de células que utilizam compostos de lítio como materiais positivos intercalados com materiais negativos. O eletrodo positivo é tipicamente um óxido de lítio com uma estrutura em camadas, como o óxido de lítio-cobalto (LiCoO_2), ou um material com uma estrutura em túnel, como o óxido de lítio-manganês (LiMn_2O_4). Já o eletrodo negativo é composto tipicamente por carbono grafite. Quanto ao eletrólito, um dos mais utilizados é o hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6) cuja característica principal é a alta condutividade iônica (Linden e Reddy, 2002).

A Figura 4 ilustra o processo do funcionamento das células de íon-lítio baseado na incorporação reversível de lítio em um processo de intercalação, uma reação onde íons de lítio são reversivamente removidos ou inseridos em um hospedeiro sem haver mudança estrutural significativa no hospedeiro de acordo com (Linden e Reddy, 2002). Quando essas células são

carregadas, o material positivo é oxidado enquanto o material negativo é reduzido. Durante esse processo, íons de lítio são desentrelaçados do material positivo e entrelaçados no material negativo. Na descarga ocorre o processo inverso.

As reações envolvidas no processo de descarga (seta para direita) e carga (seta para esquerda) das baterias de íon-lítio, onde LiMO_2 representa um óxido metálico, são as seguintes:

- Eletrodo positivo:



- Eletrodo negativo:



- Reação global:

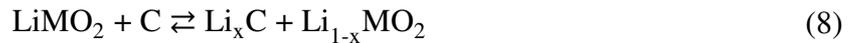
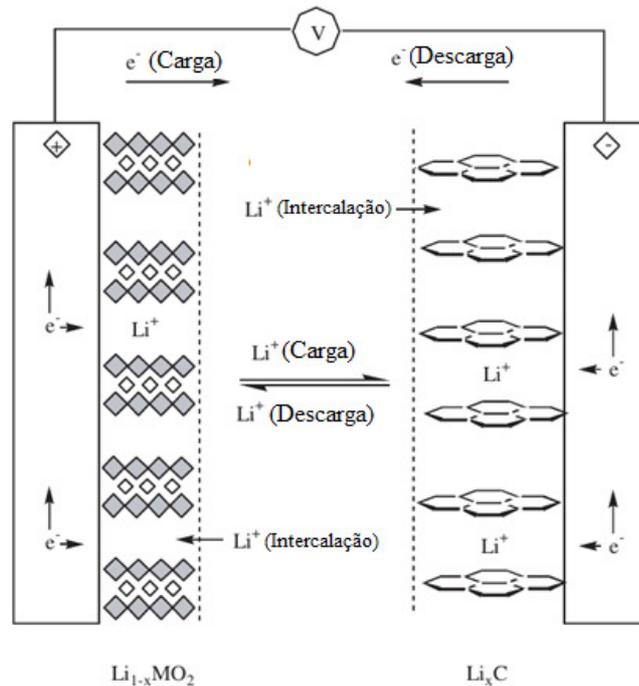


Figura 4 – Carga e descarga de uma célula de íon-lítio.



Adaptado de: LINDEN, David e REDDY, Thomas B (2002).

Segundo (Pinho, 2014) e (Linden e Reddy, 2002), as principais vantagens das baterias de íon-lítio estão relacionadas a:

- Não necessitam de manutenção (células seladas);
- Apresentam longo ciclo de vida útil;
- Ampla faixa de temperaturas de operação;
- Rápida capacidade de carga;
- Baixa taxa de autodescarga.

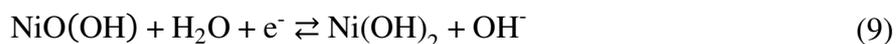
Como desvantagens podem ser citadas: custo elevado, degradação em altas temperaturas, necessitam de circuitos de proteção, *design* cilíndricos tipicamente oferecem menor densidade de energia quando comparado com as baterias de níquel-cádmio.

2.3.3 Baterias de Níquel-cádmio

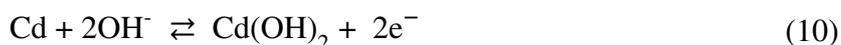
A primeira patente para baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) foi concedida ao engenheiro *Waldemar Jungner* da *Swedish* em 1899. Essas baterias possuem um ciclo de vida longo (alguns milhares de cargas e descargas), são compactas e de fácil operação, (Bagotsky e Skundin, 2015). Baterias de Ni-Cd possuem um eletrodo positivo de hidróxido de óxido de níquel (NiOOH), um eletrodo negativo de cádmio (Cd) e um eletrólito alcalino que, normalmente, é o hidróxido de potássio (KOH). Seu funcionamento tem por base uma reação redox entre o hidróxido de óxido de níquel e o cádmio, (Menictas, Skyllas-Kazacos e Lim, 2015).

As reações envolvidas no processo de descarga (seta para direita) e carga (seta para esquerda) das baterias de Ni-Cd são as seguintes:

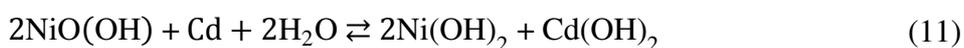
- Eletrodo positivo:



- Eletrodo negativo:



- Reação global:



Durante os processos de carga e descarga a composição e a densidade do eletrólito não são significativamente alteradas quando comparado com as baterias de chumbo-ácido. A densidade do eletrólito é geralmente de aproximadamente 1,2g/ml em (Menictas, Skyllas-Kazacos e Lim, 2015).

Em algumas baterias é adicionado hidróxido de lítio (LiOH) ao eletrólito com a finalidade de aumentar o ciclo de vida útil e proporcionar operação em temperaturas mais elevadas segundo (Menictas, Skyllas-Kazacos e Lim, 2015) e (Messenger, 2004).

Ainda segundo (Menictas, Skyllas-Kazacos e Lim, 2015) e (Messenger, 2004) o emprego das baterias de Ni-Cd pode ser justificado a partir dos itens seguintes:

- São mais robustas do que as baterias de chumbo ácido;
- Apresentam melhor relação peso-potência;
- São resistentes ao congelamento e a altas temperaturas;
- Podem ser totalmente descarregadas e são menos afetadas por sobrecarga;
- Devido à sua natureza robusta, em algumas aplicações pode ser eliminado o sistema de controle de carga.

Como principal desvantagem desse tipo de bateria tem-se o alto custo, sendo justificada sua utilização em localidades com difícil acesso para realização de manutenção. Outras desvantagens são: dificuldade de determinação do estado de carga das baterias e a toxicidade do cádmio.

2.4 Sistema de Carregamento de Baterias

Um sistema de carregamento de baterias tem por objetivo principal aperfeiçoar o uso das baterias protegendo-as contra cargas e descargas excessivas ou outros tipos de efeitos sobre as células da bateria, como o calor excessivo durante o processo de carregamento de acordo com (Broussely e Pistoia, 2007). Esse dispositivo pode receber algumas denominações tais como: controlador de carga, gerenciador de carga ou regulador de carga.

Trata-se de um dispositivo eletrônico operando em corrente contínua e é normalmente associado à geração fotovoltaica em sistemas híbridos. A escolha desse componente depende de vários fatores, tais como: tipo de bateria que será utilizada, regime de operação do sistema e carga instalada.

O equipamento dispõe de unidade de processamento para que em comunicação com um PC, possa fazer o controle da carga, permitindo, dessa forma que seja utilizado como dados de entrada para o controlador, tensões de carga e de flutuação da bateria, podendo assim ser efetuada a configuração do sistema, de forma a operar com diferentes tipos de baterias de chumbo ácido (Saad, 2012).

Da mesma forma, um sistema de carregamento de baterias monitora constantemente a capacidade da bateria em relação à sua carga nominal, através da tensão em seus terminais e sua eficiência, ao contabilizar o total de energia liberada no descarregamento e armazenada durante o carregamento.

2.4.1 A utilização do controlador de carga

De forma simplificada, o controlador de carga deve desconectar a fonte primária de energia da bateria quando esta atingir a carga plena e, durante a descarga da bateria, impedir o fornecimento de energia quando a carga armazenada na bateria atingir um nível mínimo de segurança (Pinho, 2014). Além disso, ele deve controlar os níveis de tensão e corrente de entrada e saída da bateria.

A função básica de um carregador em sistemas fotovoltaicos isolados é manter a bateria com seu maior estado de carga possível, ou seja, com o máximo de carga, protegendo-a também de sobrecargas provenientes dos painéis, e de altos níveis de descargas para as várias partes do sistema. O controle de armazenamento utilizado determina a efetividade do carregamento da bateria e o aproveitamento da energia produzida nos painéis solares, e consequentemente a capacidade de o sistema atender a todas as possíveis demandas de carga. Nesse contexto, duas de suas funções mais importantes são (Saad, 2012):

- **Evitar sobrecarga:** Devido a intermitências na geração de energia, características dos sistemas fotovoltaicos, fazendo com que eles operem em condições climáticas não satisfatórias durante baixos índices de insolação, é comum que a energia produzida pelos painéis exceda a utilizada pelo sistema quando a houver uma maior taxa de incidência de luz solar. Portanto uma das funções do controlador é a de regular a carga, chegando a desconectar ou interromper quando a bateria alcançar um estado pleno de carga evitando dessa forma uma sobrecarga.

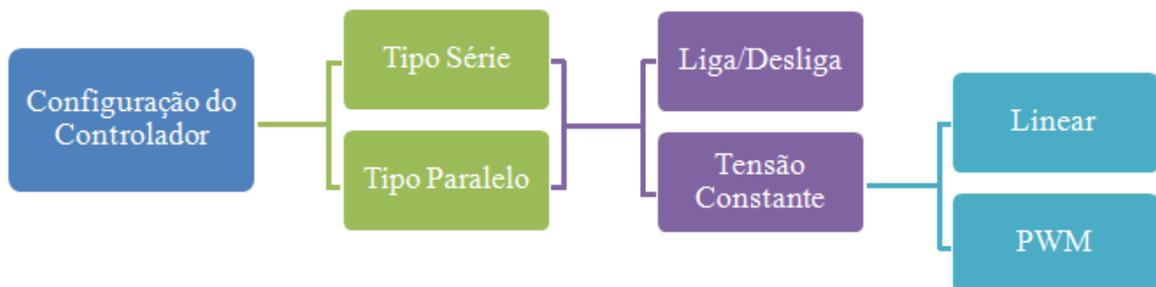
- **Evitar excesso de descarga:** Em períodos de baixa insolação ou de maiores consumos pela carga conectada a um sistema fotovoltaico, a tensão de operação do sistema

pode sofrer quedas em virtude da bateria não se manter em seu nível máximo de carga devido à insuficiência na geração de energia produzida pelos painéis solares. Dessa forma, afim de evitar descargas excessivas é importante limitar o ponto máximo de descarga de uma bateria, desconectando as cargas, evitando, assim, que a sua tensão caia abaixo dos níveis desejados para o sistema e preservando a integridade da bateria evitando que tenha uma redução em sua vida útil.

2.4.2 Tipos de controladores de carga

De acordo com (IEA, 2016), controladores de carga, quanto à forma de desconexão da fonte primária de energia, podem ser construídos em duas configurações distintas: paralelo ou série. Quanto ao controle de carga, são empregados dois métodos distintos: método liga/desliga e o método de tensão constante. Esse último pode ser dividido em: linear e modulação por largura de pulso (PWM). A Figura 5 sintetiza essas classificações.

Figura 5 – Classificação dos controladores de carga.

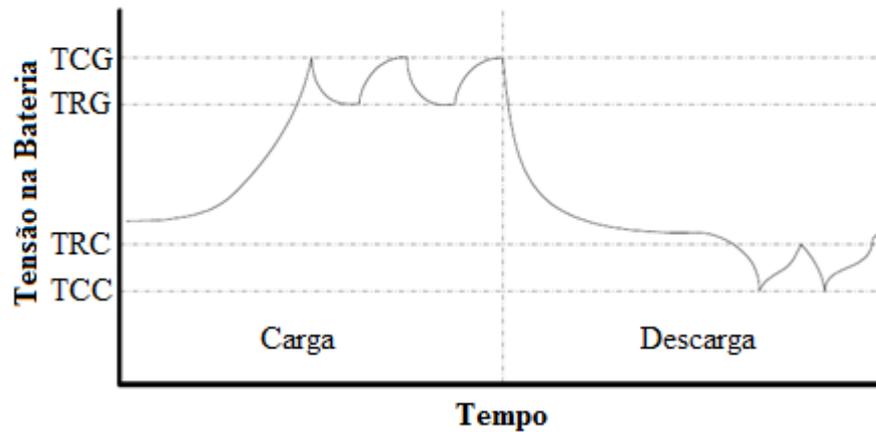


Fonte: Próprio Autor.

Configuração em série

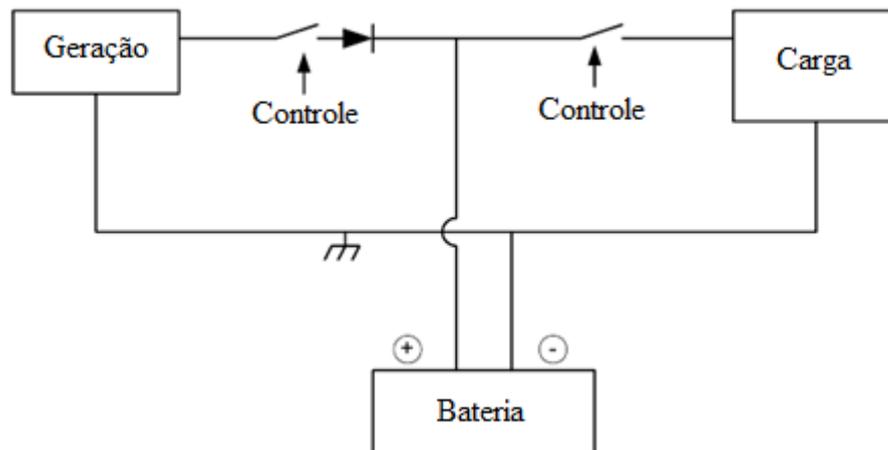
Na configuração série tipo liga/desliga quando a bateria alcança a tensão de corte de geração (TCG), o controlador tipo série interrompe a corrente vinda da geração. A reconexão ocorre quando a bateria atingir a tensão de reconexão da geração (TRG). Em relação à carga o controlador atua de forma semelhante monitorando a tensão de corte da carga (TCC) e tensão de reconexão da carga (TRC). A Figura 6 ilustra o comportamento da tensão na bateria durante o processo de carga e descarga, enquanto a Figura 7 mostra um circuito genérico para essa configuração.

Figura 6 – Carga e descarga para configuração liga/desliga.



Adaptado de: International Energy Agency - IEA,(2016).

Figura 7 – Circuito genérico para configuração série.



Adaptado de: International Energy Agency - IEA,(2016).

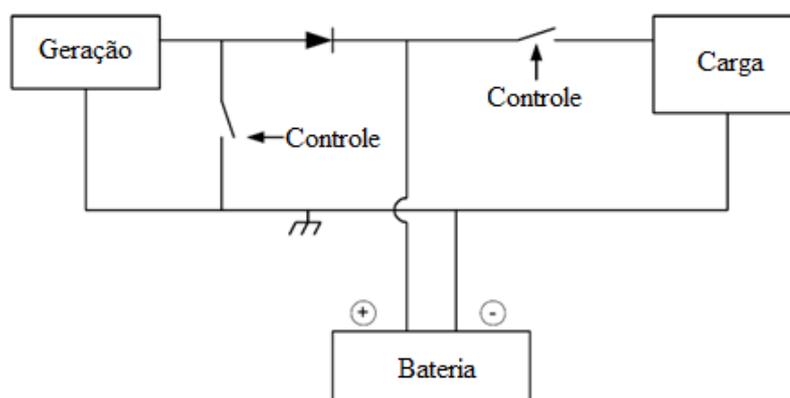
Segundo (IEA, 2016), esse arranjo não é recomendado para grandes sistemas uma vez que ocorre perda de potência no elemento de comutação, além da necessidade de um meio de dissipação do calor.

Já a configuração série linear emprega um elemento de controle responsável por aperfeiçoar o processo descrito na configuração liga/desliga. Esse elemento mantém a bateria no ponto de TCG à medida que a bateria aproxima-se da carga completa e atua como um resistor variável.

Configuração em paralelo

O controlador configurado em paralelo funciona de forma semelhante ao controlador configurado em série, porém, a geração é desconectada através de um curto-circuito quando a bateria está completamente carregada. A Figura 8 mostra um circuito genérico para essa configuração.

Figura 8 - Circuito genérico para configuração paralelo.



Adaptado de: International Energy Agency - IEA,(2016).

2.5 Modelagem de baterias

Atualmente existem diversos modelos para descrever o comportamento das baterias e permitir a simulação computacional dos mesmos. Segundo (Rao, Vrudhuka e Rakhmatov, 2003), esses modelos podem ser divididos em quatro categorias:

2.5.1 Modelos Elétricos

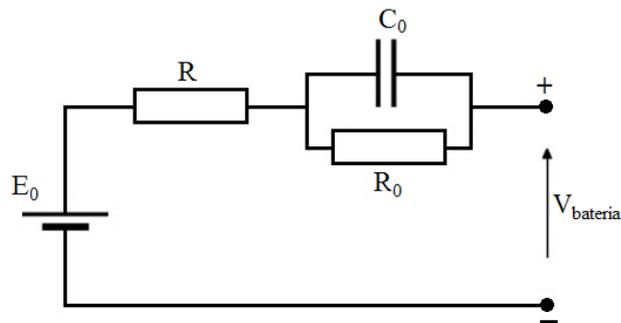
Proporcionam uma descrição detalhada dos processos físicos que ocorrem na bateria. Esses modelos são mais precisos e possuem maior utilidade para os projetistas de baterias com ferramentas para aperfeiçoar os parâmetros físicos da bateria. São exemplos de modelos elétricos os modelos propostos por (Ross, 2000), (Chan, 2000), (Ceraolo, 2002) e (Casacca, Salameh e Lynch, 1992) que será descrito a seguir.

2.5.1.1 O Modelo de Casacca e Salameh

Os modelo elétrico de (Casacca e Salameh, 1992) representa a bateria em termos de um circuito elétrico equivalente, cuja composição inclui elementos como fontes de tensão, fontes de corrente, resistências e capacitores. Segundo (Chen e Rincon-Mora, 2006) e (Ghossein, 2015) esses modelos são bons para simulação com outros circuitos elétricos e sistemas. Existem vários modelos elétricos para baterias, sendo em sua maioria compostos por três categorias básicas: Circuito equivalente de *Thevenin*, impedância e modelos baseados em tempo de execução.

O circuito equivalente de *Thevenin* descreve uma bateria com uma tensão ideal (E_0), uma resistência (R), uma capacitância (C_0) e uma resistência de sobre-tensão (R_0). R representa a resistência interna, C_0 representa a capacitância efetiva, R_0 representa a resistência devido ao contato entre as placas e o eletrólito. A principal desvantagem desse modelo está em considerar todos os componentes constantes. Na realidade, todas as características representadas por E_0 , R , C_0 variam em função do estado de carga (SOC – *State of Charge*) e da taxa de descarga (Dürr, 2006). A Figura 9 mostra o circuito equivalente de *Thevenin*.

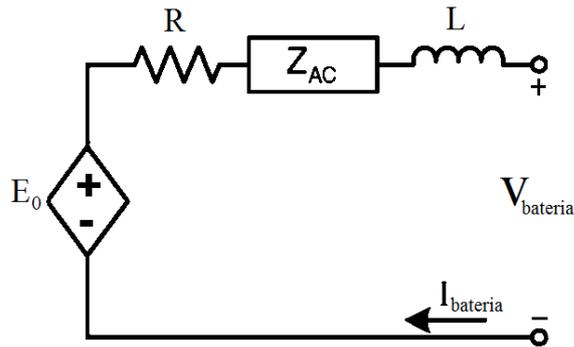
Figura 9 – Circuito equivalente de Thevenin.



Adaptado de: (Casacca e Salameh, 1992).

Os modelos baseados em impedância utilizam a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica para obtenção de um modelo de impedância CA-equivalente no domínio da frequência e em seguida, utilizar uma rede equivalente com impedância Z_{AC} para ajustar o espectro de impedância de acordo com o proposto por (Casacca e Salameh, 1992). A Figura 10 ilustra um modelo baseado em impedância com seus componentes elementares.

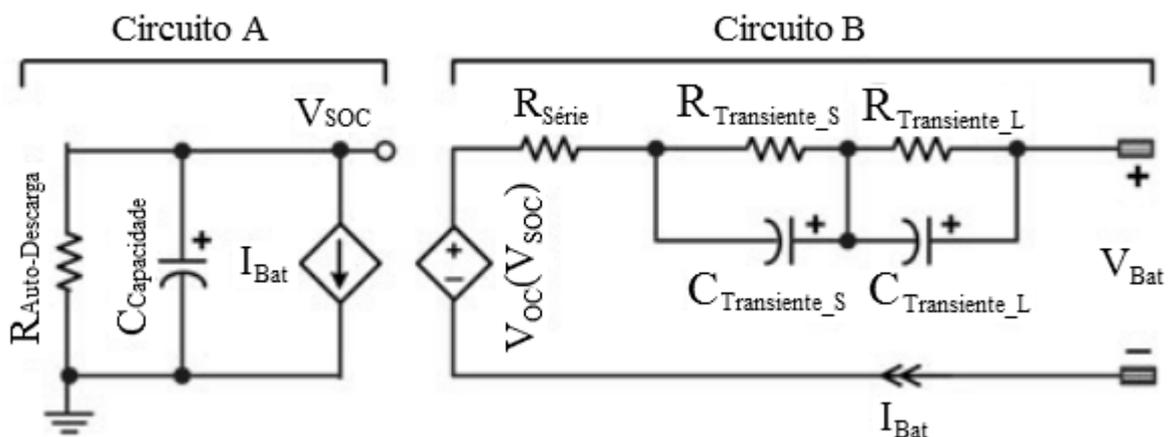
Figura 10 – Modelo de impedância.



Adaptado de: Chene Rincon-Mora, (2006).

Os modelos baseados em tempo de execução utilizam uma rede complexa de circuitos para simular a duração da bateria e a resposta de tensão em corrente contínua para uma corrente de descarga constante em simuladores SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*) compatíveis. Esses modelos não permitem prever, com precisão, o comportamento em tempo real nem a tensão de resposta para diferentes correntes de carga. Ainda segundo (Chen e Rincon-Mora, 2006), as implementações das simulações podem ser de tempo contínuo, utilizando simuladores SPICE, ou de tempo discreto podendo fazer uso de códigos VHDL (*Very high speed integrated circuit Hardware Description Language*).

Figura 11 - Modelo baseado em tempo de execução.



Adaptado de: Kim e Qiao (2011).

Na representação da Figura 11, o circuito A é usado para monitoramento do estado de carga (SOC) e previsão do tempo de execução da bateria, onde: a resistência de auto-descarga ($R_{auto-Descarga}$) é utilizada para caracterizar a energia de auto-descarga perdida pela bateria, a

capacitância ($C_{\text{capacidade}}$) é usada para representar a carga armazenada na bateria e a fonte de corrente (I_{Bat}) representa a corrente de carga/descarga da bateria (Kim e Qiao, 2011).

Já o circuito B, simula as características de tensão e corrente e a resposta transiente da bateria, onde: a fonte de tensão controlada por tensão $V_{\text{OC}}(V_{\text{SOC}})$ é usada para interligar o estado de carga (V_{SOC}) a tensão de circuito aberto (V_{OC}) da bateria, a resistência série ($R_{\text{Série}}$) é usada para caracterizar a energia de carga/descarga perdida da bateria, as outras resistências e capacitâncias são usadas para caracterizar a resposta transiente de curta duração (Transiente_S) e de longa duração (Transiente_L) da bateria. A tensão nos terminais da bateria é representada por V_{Bat} (Kim e Qiao, 2011).

2.5.2 Modelos empíricos

Também conhecido como modelo analítico, consiste de equações cuja finalidade é descrever o comportamento da bateria com parâmetros ajustados para coincidir com os dados experimentais. Esses modelos são fáceis de configurar, são geralmente menos precisos e apropriados para condições específicas (ex.: condições de temperatura e corrente constantes) segundo (Zhang, 2014). Modelos como o de (Ross, 2001) e (Armenta-Deu, 2003) são exemplos de modelos empíricos e dois desses modelos bastante utilizados para descrever o comportamento de uma bateria são o modelo (Shepherd-Schiffer, 2003) e o modelo KiBaM desenvolvido originalmente para baterias de chumbo-ácido por (Manwell e McGowan, 1993).

2.5.2.1 O modelo Shepherd-Schiffer

Trata-se de um modelo para baterias chumbo-ácido que permite a determinação do tempo de vida útil destas baterias quando submetidas a condições de operação diversas, em diferentes tamanhos de sistemas e utilizando diferentes tecnologias desenvolvidas na fabricação de baterias.

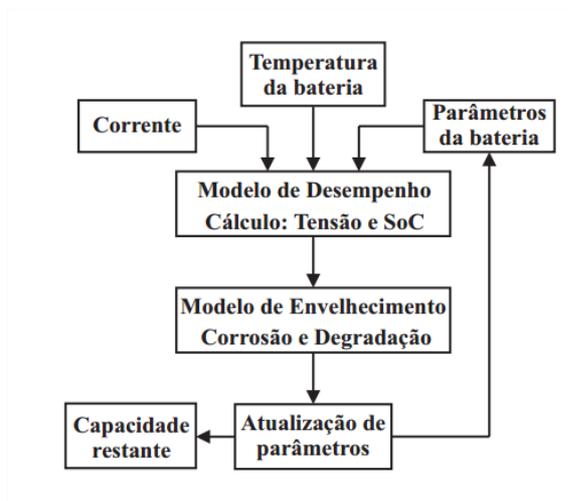
O modelo leva em conta algumas situações de desgaste como degradação do material ativo da bateria e corrosão da grade positiva além de sulfatação e gaseificação.

Durante um ciclo de simulação, a tensão e o estado de carga são determinados com base nos parâmetros da bateria.

O modelo se destaca por levar em consideração a influência da temperatura no tempo de vida útil da bateria

De acordo com (Brito Souza e Nogueira Lima, 2008) a Figura 12 apresenta um diagrama simplificado do modelo.

Figura 12 – Diagrama do modelo Shepherd



Fonte: Brito Souza e Nogueira Lima (2010)

A tensão pode ser calculada a partir da Equação modificada de Shepherd e o estado de carga determinado pela integração da diferença entre a corrente da bateria e a corrente de gás.

Com base na tensão e no estado de carga, os parâmetros que retratam corrosão e degradação são determinados e utilizados para modificar os parâmetros da bateria e assim determinar a sua capacidade restante, principal informação fornecida pelo modelo.

2.5.2.2 O modelo KiBaM

Algumas pesquisas retratam um modelo desenvolvido para uso de baterias chumbo-ácido em sistemas híbridos de energia. Essas pesquisas são destinadas a superar algumas das dificuldades associadas a métodos atualmente utilizados, baseando-se na aproximação da cinética química em baterias.

Este modelo, o qual é usado em análises de cargas e descargas, está concentrado especificamente na mudança da capacidade da bateria em função de taxas de carregamento e descarregamento.

Para isso assume-se que a carga pode ser armazenada de duas formas: Uma parte que está imediatamente disponível para consumo e outra que se encontra quimicamente “presa” no interior da bateria. O estudo recai na necessidade da determinação de três parâmetros para a análise do comportamento da carga na bateria ao longo de sucessivos ciclos de cargas e descargas.

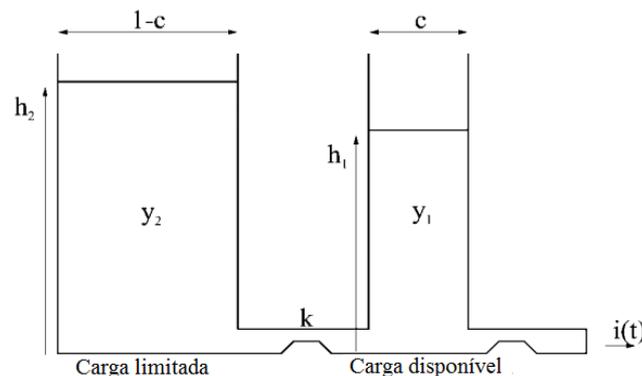
Um sistema híbrido de energia é bem-sucedido quando se tem conhecimento sobre o sistema de baterias utilizado. Por isso, na mesma época em que o simulador de sistema eólico/diesel da universidade de Massachusetts estava sendo desenvolvido, um modelo de baterias chumbo-ácido também estava em desenvolvimento. O propósito era ajudar no design conceitual do simulador e dar uma base para avaliação dos sistemas similares focados em armazenamento de energia.

O KiBaM (*Kinetic Battery Model*) é um modelo empírico de baterias que foi originalmente desenvolvido para modelar baterias de chumbo-ácido. Esse modelo foi proposto por (Manwell e McGowan, 1993) e descreve os processos químicos de uma bateria através de um processo cinético.

Como descrito por (Jongerden e Haverkort, 2009), nesse modelo a carga da bateria é distribuída ao longo de duas fontes: a fonte de carga disponível e a fonte de carga “presa” ou limitada conforme apresenta a Figura 13. Uma fração c da capacidade total é colocada na fonte de carga disponível (y_1) e uma fração $(1 - c)$ é colocada na fonte de carga limitada (y_2).

A fonte de carga disponível fornece elétrons diretamente para a carga $i(t)$, enquanto a fonte de carga limitada fornece elétrons apenas para a fonte de carga disponível através de uma “válvula” k de condutância fixa.

Figura 13 – Distribuição de carga no modelo KiBaM.



Adaptado de: Jongerden e Haverkort (2009).

A taxa do fluxo de carga da fonte de carga limitada para a fonte de carga disponível depende de k e da diferença de altura das fontes h_1 e h_2 , onde h_1 representa o SOC da bateria. As alturas das duas fontes são dadas por:

$$h_1 = \frac{y_1}{c} \quad (12)$$

$$h_2 = \frac{y_2}{1-c} \quad (13)$$

A variação de carga nas duas fontes é dada pelo seguinte sistema de equações diferenciais:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -i(t) + k(h_2 - h_1) \\ \frac{dy_2}{dt} = -k(h_2 - h_1) \end{cases} \quad (14)$$

As condições iniciais para esse sistema de equações são: $y_1(0) = cC$ e $y_2(0) = (1 - c)C$, onde C representa a capacidade total da bateria. A condição de descarga total da bateria ocorre quando não há carga na fonte de carga disponível.

No momento em que uma carga é conectada a bateria, a carga disponível diminui e a diferença entre as alturas das duas fontes aumenta. Quando a carga é desconectada, há um fluxo de carga oriundo da fonte de carga limitada para a fonte de carga disponível até o momento em que h_1 e h_2 tornem-se iguais. Portanto, durante um período de inatividade, mais carga estará disponível e a bateria terá um tempo de vida maior do que quando uma carga é aplicada continuamente. Isso explica o efeito de recuperação da bateria.

O efeito da taxa de capacidade também é representado pelo modelo, uma vez que para uma corrente de descarga elevada, a fonte de carga disponível será drenada rapidamente e haverá menos tempo para carga limitada fluir para a carga disponível. Logo, mais carga permanecerá inutilizada e a capacidade efetiva é menor (Jongerden e Haverkort, 2009).

Resolvendo as equações diferenciais (14) para o caso da corrente de descarga constante $i(t) = I$, utilizando a transformada de Laplace, obtém-se:

$$\begin{cases} y_1(t) = y_{1,0}e^{-k't} + \frac{(y_0k'c - I)(1 - e^{-k't})}{k'} - \frac{Ic(k't - 1 + e^{-k't})}{k'} \\ y_2(t) = y_{2,0}e^{-k't} + y_0(1 - c)(1 - e^{-k't}) - \frac{I(1 - c)(k't - 1 + e^{-k't})}{k'} \end{cases} \quad (15)$$

Onde: $y_{1,0}$ e $y_{2,0}$ são, respectivamente, as quantidades de carga disponível e limitada em $t = 0$ e $y_0 = y_{1,0} + y_{2,0}$. O termo k' é uma constante relacionada à taxa de difusão (Kim e Qiao, 2011) e é definido pela Equação (16).

$$k' = \frac{k}{c(1 - c)} \quad (16)$$

A diferença de altura entre as duas fontes $\delta(t)$ é definida por:

$$\delta(t) = h_2(t) - h_1(t) = \frac{y_2(t)}{1-c} - \frac{y_1(t)}{c} \quad (17)$$

Na prática se a corrente de descarga é alterada, y_1 e y_2 podem ser calculados a partir da Equação (15), enquanto δ pode ser calculado a partir da Equação (17) utilizando o novo valor da corrente e as novas condições $y_{1,0}$ e $y_{2,0}$ que são os valores finais y_1 e y_2 da corrente de descarga anterior. Logo, y_1 , y_2 e δ podem ser determinados para qualquer intervalo contínuo de corrente de descarga constante. A descarga completa ocorre quando y_1 chega à zero, indicando um estado de carga (SOC) nulo (Kim, Qiao, 2011). Nessa condição, a carga indisponível na bateria $u(t)$ é dada por (Jongerden e Haverkort, 2009):

$$u(t) = (1 - c)\delta(t) \quad (18)$$

2.5.3 Modelos abstratos

O modelo abstrato ou estocástico representa a bateria como um circuito elétrico, equivalentes de tempo discreto e modelos de processos estocásticos. Esses modelos buscam apresentar uma representação equivalente da bateria. O modelo KiBaM modificado é um exemplo de modelo abstrato.

2.5.3.1 O modelo KiBaM modificado

Um modelo de bateria estocástica baseado na análise cinética do modelo de bateria KiBaM foi proposto em 2005 de acordo com (Jongerden e Haverkort, 2009). O KiBaM estocástico foi usado para modelar uma bateria Ni-MH, em vez de uma bateria de chumbo-ácido para a qual KiBaM original foi desenvolvido. Para ser capaz de modelar este tipo diferente de bateria duas modificações foram feitas no modelo.

Primeiro, no termo correspondente ao fluxo de carga da fonte de carga limitada para a fonte de carga disponível bem um fator extra h_2 é adicionado, mudando a Equação (14) para:

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = -i(t) + k \cdot h_2(h_2 - h_1) \\ \frac{dy_2}{dt} = -k \cdot h_2(h_2 - h_1) \end{cases} \quad (19)$$

Isso faz com que a recuperação seja mais lenta quando menos carga é deixada na bateria.

A segunda Modificação é que no modelo estocástico a possibilidade de não recuperação durante períodos ociosos é acrescentada. O comportamento da bateria é representado por um processo de Markov de tempo discreto. Os estados da cadeia de Markov são rotulados com três parâmetros (i, j, t). Os parâmetros i e j são os níveis discretizados da fonte de carga disponível e da fonte de carga limitada respectivamente, e t é o tempo de corrente inativa, ou seja, quando não há processo de descarga. Este é o número de passos de tempo desde a última vez que alguma corrente foi retirada da bateria.

A escolha de um desses modelos pode ser avaliada partindo-se de alguns critérios básicos (Rao, Vrudhula e Rakhmatov, 2003):

- Precisão: Até que ponto os valores de saída do modelo devem coincidir com os valores reais fornecidos pela bateria funcionando em uma aplicação real?
- Complexidade computacional: Quanto tempo deve levar as simulações?
- Complexidade de configuração: Quantos parâmetros o modelo pode estimar? O modelo requer conhecimento aprofundado da química da bateria?
- Visão analítica: As equações descritas no modelo proporcionam algum entendimento qualitativo do comportamento da bateria? Tal visão é útil para explorar características como tempo de vida e desempenho da bateria?

A utilização desses modelos proporciona um melhor entendimento do comportamento das baterias e pode, por exemplo, auxiliar os projetistas de sistemas a aperfeiçoar os algoritmos de gerenciamento das baterias.

3. PARAMETRIZAÇÃO EM MODELO DE BATERIAS

Na seção 2.5.2.2 foi apresentado o modelo KiBaM, onde alguns parâmetros do modelo elétrico precisam ser obtidos de forma empírica através de ensaios de carregamento e descarregamento de baterias para assim poder-se estimar alguns outros parâmetros que possam complementar a validação do modelo.

3.1 Ensaios em células de 2V

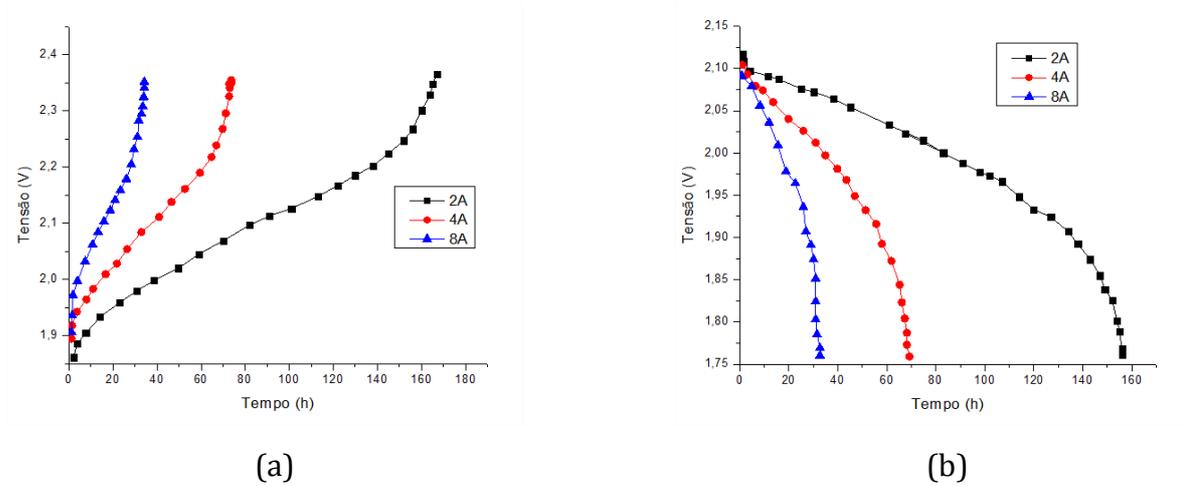
Segundo (Zhou, Yang e Fang, 2008) uma bateria com tensão nominal de 12V é carregada até 14,4V ou 2,4V por célula a uma temperatura constante de 25°C. Este valor de tensão é um ponto de equilíbrio entre a máxima carga na bateria e um excesso de carga que possa provocar reações químicas internas indesejadas como sulfatação, por exemplo. A mínima tensão de descarga pode ir até 10,5V ou 1,75V por célula, dependendo do regime de descarga, tipo de bateria e de suas aplicações.

Em (Zhou, Yang e Fang, 2008) foram obtidos resultados de ensaios com baterias de chumbo-ácido do tipo GFM-1000 com capacidade nominal de 1000 Ah, o mesmo tipo usado em projetos de sistemas de geração híbrida solar-eólica, por serem baterias de ciclo de descarga profundo, ideal para esse tipo de aplicação.

No processo de ensaio, primeiramente a bateria é carregada a uma corrente constante até a tensão máxima de 2,35V (recomendada pelo fabricante) e mantida a esse nível de tensão por 20h, para então a bateria ser considerada como completamente carregada. Em seguida a bateria é descarregada a uma corrente constante até que a tensão mínima de 1,75V (recomendada pelo fabricante) seja atingida. Esses dois passos constituem um ciclo de ensaio. A partir de então muda-se o valor da corrente e repetem-se outros ciclos. Durante todo o processo um sistema de aquisição de dados é utilizado para verificar a tensão dos terminais da bateria, em ambos os processos de carregamento e descarregamento utilizando diferentes valores de corrente.

Resultados de ensaios típicos, como esse, realizados em baterias de chumbo ácido, a correntes constantes de 2A, 4A e 8A, de carregamento e descarregamento em células com tensão nominal de 2V, podem ser observados na Figura 14, onde a Figura 14(a) apresenta os resultados dos ensaios de carregamento e a Figura 14(b) os resultados para ensaios de descarregamento onde pode-se perceber a variação de tensão nos terminais da bateria de acordo com carregamentos e descarregamentos praticados a correntes constantes.

Figura 14 – Tensão x tempo em células de 2V para carregamento (a) e descarregamento (b).



Adaptado de: Zhou, Yang e Fang (2008)

3.2 Parametrização para o modelo de tensão em baterias

O modelo KiBaM baseia-se na tensão obtida nos terminais da bateria, no momento da descarga, na forma (Manwell e McGowan, 1993):

$$V = E - IR_0 \quad (20)$$

Onde V é a tensão medida nos terminais da bateria, E é a tensão interna da bateria, I a corrente de descarga e R_0 a resistência interna da bateria.

A tensão interna E é obtida a partir da expressão:

$$E = E_0 + AX + \frac{CX}{D-X} \quad (21)$$

Onde

E_0 é a tensão interna inicial da bateria quando não houve descarga,

A é o parâmetro que indica a variação linear inicial da tensão interna da bateria com o estado da carga que será positivo no carregamento e negativo no descarregamento.

C é o parâmetro que indica variação na tensão da bateria quando a bateria está progressivamente carregada ou descarregada. Será positivo no carregamento e negativo no descarregamento.

D é o parâmetro que indica variação na tensão da bateria quando a bateria está progressivamente carregada ou descarregada. É positivo e tende a ser igual à capacidade máxima da bateria.

Para o descarregamento, X é definido em função da carga removida da bateria, como

$$X = q/q_{max} \quad (22)$$

e no carregamento,

$$X = q_{max} - q/q_{max} \quad (23)$$

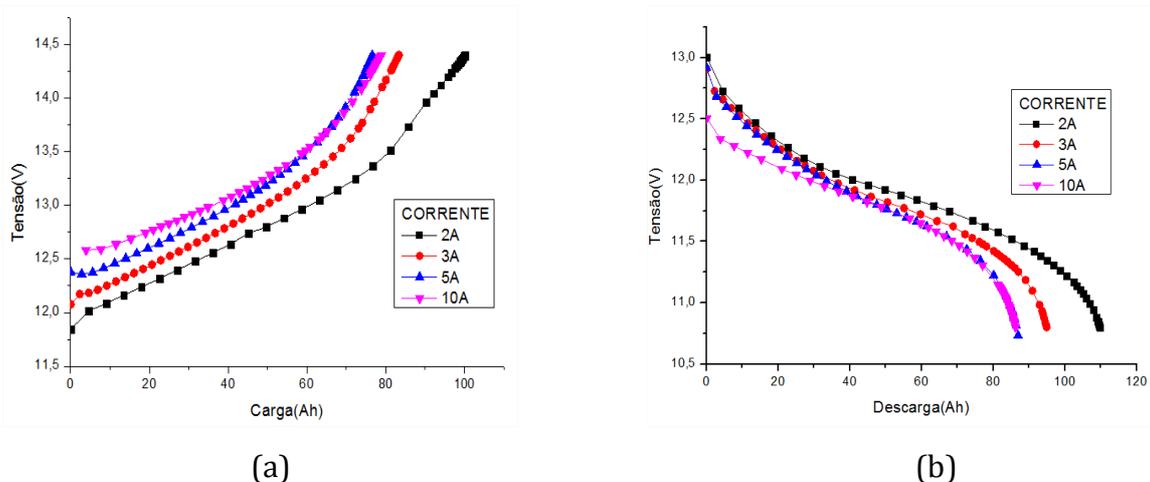
Consequentemente, o modelo de tensão do KiBaM mostra que a tensão apresentada nos terminais de uma bateria depende do estado da bateria, se carregamento ou descarregamento, do seu estado de carga, de sua resistência interna e da corrente utilizada.

Os parâmetros E_0 , A , C e D podem ser obtidos através de uma interpolação matemática das curvas obtidas através de ensaios experimentais, para isso, é necessário obter a relação de tensão x tempo para correntes constantes de carga e descarga. Se faz necessário, também, no mínimo quatro sequências de testes de ensaios de carga e descarga com correntes diferentes (Bindner et al, 2005).

Utilizando seis células, conectadas em série, com tensão e capacidade nominal de 2V e 120 Ah, cada, respectivamente, forma-se uma bateria de 12V de tensão nominal e 120 Ah de capacidade, podendo-se ter, conforme apresentado na Figura 15, obtidas através de ensaios de carga e descarga, as curvas que mostram a variação da tensão nos terminais da bateria em função da carga armazenada para diferentes valores de corrente utilizados, onde a carga Q acumulada, em Ah, foi obtida através da Equação (24) em implementação do modelo no Simulink (Bindner et al, 2005).

$$Q = Q_0 + \int idt \quad (24)$$

Figura 15 – Ensaio em baterias de 12V de 120Ah para carregamento (a) e descarregamento (b).



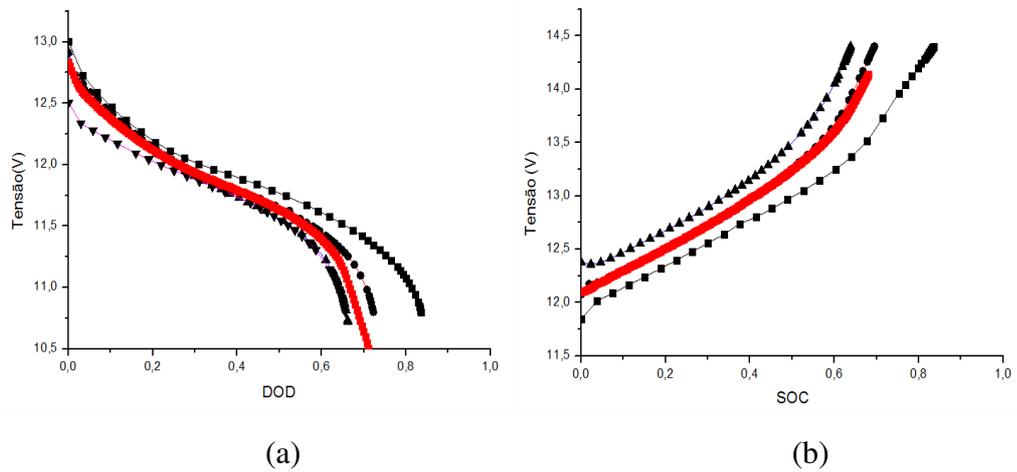
Adaptado de: Zhou, Yang e Fang (2008)

Os parâmetros do modelo KiBaM utilizados para o cálculo da tensão nos terminais da bateria, expressos na Equação (20), podem ser obtidos a partir de testes experimentais de ensaio realizados e cujos resultados foram reproduzidos na Figura 15. A obtenção de tais parâmetros pode ser feita através de processos de interpolação da curva que explicita a dependência da tensão em função da carga normalizada contida ou retirada da bateria.

Para isso, foi usada como base para extração dos parâmetros E_0 , A , C e D , uma curva média obtida através das curvas levantadas para diferentes correntes de carga e descarga apresentadas na Figura 15. Os valores de SOC e DOD, são calculados com base nos resultados obtidos. Portanto, Q_{max} é a carga disponível na bateria quando esta encontra-se sob uma tensão de 14,4V a uma temperatura de 25°C.

A Figura 16 apresenta, então, as curvas de Tensão x SOC e Tensão x DOD e a curva média (em vermelho) para os diferentes valores de corrente utilizados, ou seja, de acordo com as curvas obtidos em ensaio, foi obtida uma curva média que bem representa o comportamento da bateria quando submetida a correntes entre a mínima e máxima utilizadas para o ensaio.

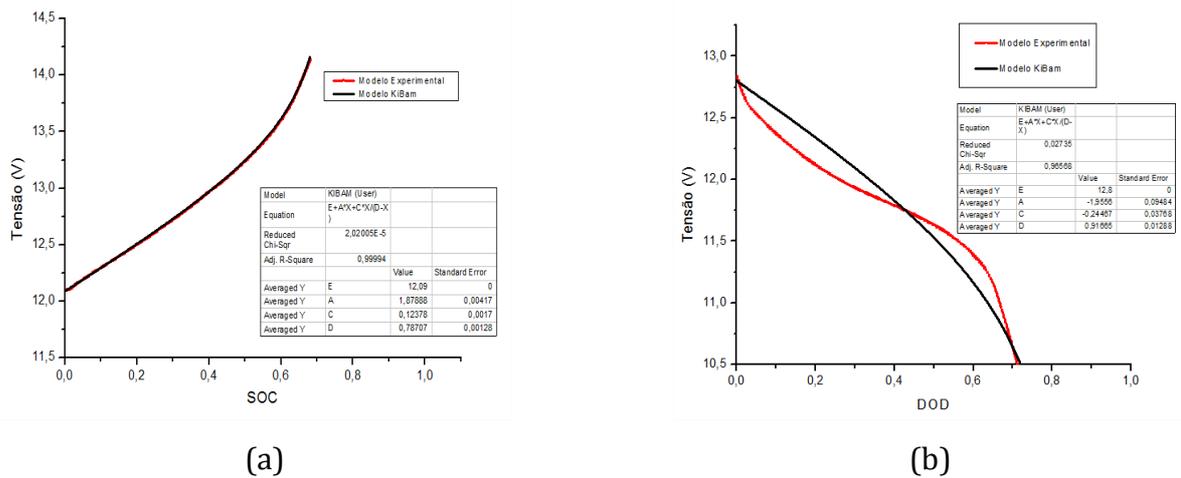
Figura 16 – Tensão em baterias de 12V: Tensão x SOC (a) e Tensão x DOD (b).



Adaptado de: Zhou, Yang e Fang (2008)

O processo de interpolação utilizado, afim de se determinar os parâmetros E_0, A, C e D a partir das curvas médias de carregamento e descarregamento para representar o modelo de tensão da bateria é apresentado na Figura 17, onde na Figura 17(a) tem-se as duas curvas justapostas uma à outra e os quadros apresentando os valores obtidos para os parâmetros e os erros encontrado na aproximação para obtenção de tais parâmetros.

Figura 17 – Obtenção de parâmetros do modelo de tensão KiBaM por interpolação no (a) Carregamento (a) e Descarregamento (b).



Adaptado de: Zhou, Yang e Fang (2008)

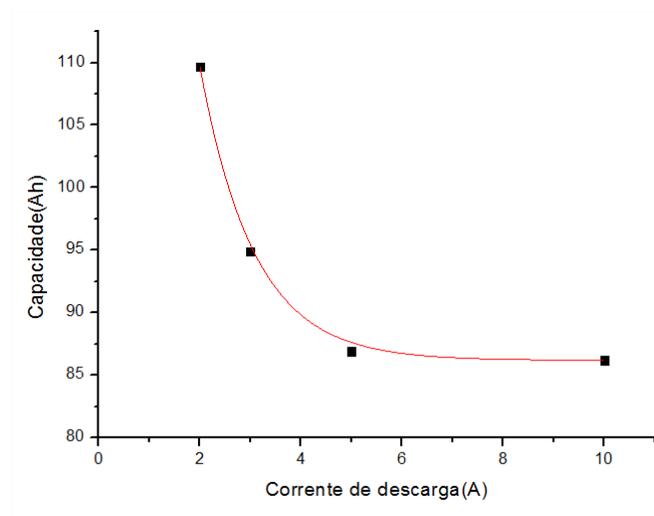
3.3 Parametrização para o modelo de capacidade em baterias

A partir de ensaios de descarga à diferentes valores de correntes, pode-se estimar as constantes do modelo KiBaM: c e k , conforme apresenta a Equação (25) para o modelo de capacidade. (Manwell e Macgwan, 1993).

$$q_{max}(I) = \frac{q_{max,0}k c T}{1 - e^{-kT} + c(kT - 1 + e^{-kT})} \quad (25)$$

Onde $q_{max,0}$, k e c , podem ser obtidos através de uma interpolação não linear da curva obtida a partir de dados experimentais de ensaios e T a temperatura de operação da bateria. A Figura 18 apresenta a curva de capacidade da bateria em função da corrente de descarga à qual está submetida, apresentada na Figura 15(b) para quatro valores de corrente utilizados.

Figura 18 – Capacidade x Corrente de descarga.



Adaptado de: Zhou, Yang e Fang (2008)

O modelo mostra que a capacidade total da bateria diminui à medida que lhe é solicitada maiores valores de corrente de descarga.

Da curva pode-se estimar a constante c como sendo:

$$c = \frac{q_{max}}{q_{max,0}} \quad (26)$$

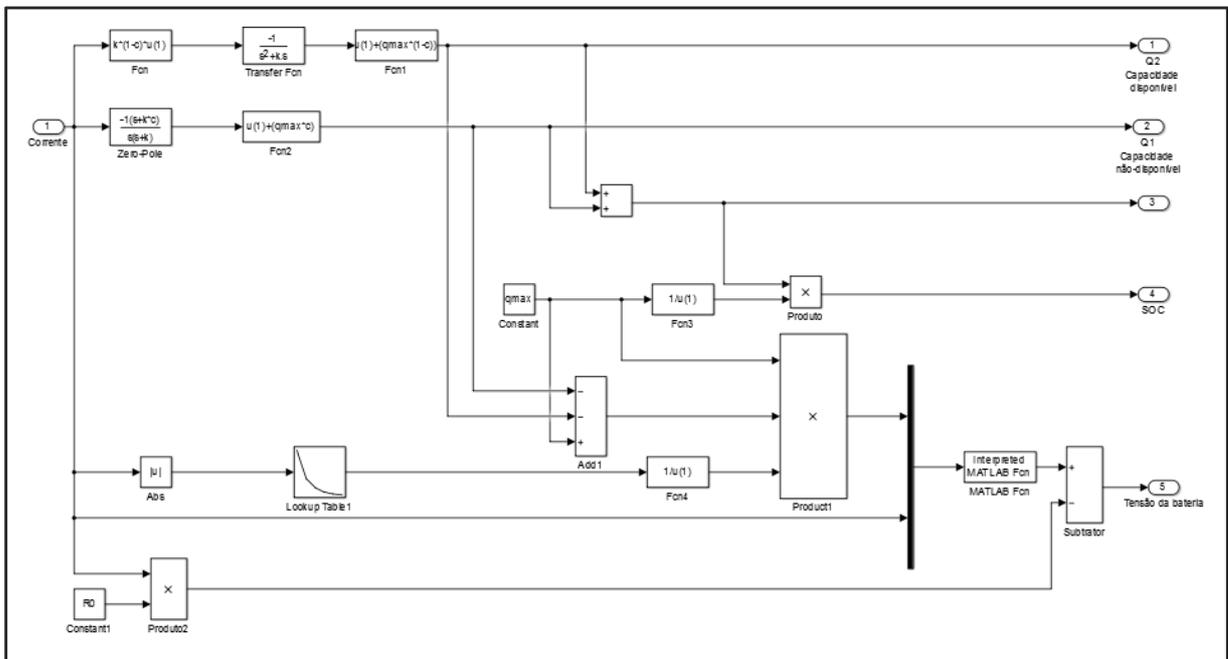
Onde $q_{max,0}$ é a carga máxima disponível a uma corrente mínima de descarga e q_{max} é a capacidade para a qual a curva tende na Figura 18.

Já o parâmetro k que é uma constante associada com a taxa de fluxo de corrente da fonte de carga limitada para a fonte de carga disponível pode ser determinada diretamente da Equação (24), uma vez conhecido c e utilizado um valor de corrente de descarga, conhecendo-se sua série temporal.

3.3.1 Validação do modelo KiBaM através do Simulink

A validação do modelo KiBaM para o cálculo da tensão e capacidade da bateria submetida a correntes de descarga de 2, 3, 5 e 10 A foi obtida com o auxílio do Matlab/Simulink, onde foram implementadas as equações (15), (16), (17) e (18), conforme mostra a Figura 19, de modo a se obter $q_1, q_2, q_{total}, V, SOC$ e DOD da bateria, dado o valor da carga total inicial e os parâmetros E_0, A, C e D que foram obtidos através de interpolação de curvas em ensaios e os parâmetros c e K , estimados (Duarte, 2014).

Figura 19 – Modelo KiBaM implementado no Simulink.

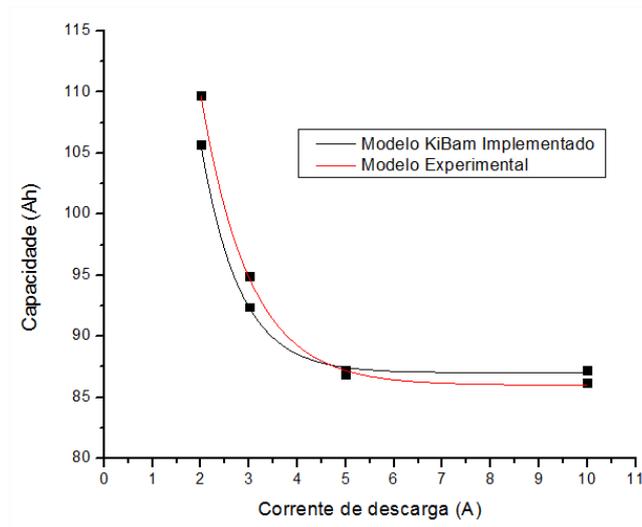


Fonte: Próprio autor.

Os valores obtidos no processo de ensaio experimental foram comparados com resultados obtidos através do modelo KiBaM implementado no Simulink. A Figura 20

apresenta a comparação dos resultados e a validação do modelo, cujos critérios a serem considerados foram erros menores que 1% na obtenção de todos os parâmetros (Jongerden e Haverkort, 2009).

Figura 20 – Comparação entre resultados experimentais e implementados pelo KiBaM referentes à queda na capacidade da bateria em função do aumento na corrente de descarga.



Fonte: Próprio autor.

3.4 Previsão da autonomia de bateria de chumbo-ácido pelo método do limite de processamento de energia (*Throughput*)

O modelo proposto que avalia a autonomia de uma bateria utiliza uma Equação com dupla exponencial (27) apresentando uma curva de ciclos para falha em função da profundidade de descarga (DOD) a qual a bateria é submetida. (Bindner et al, 2005).

$$C_F = a_1 + a_2 e^{-a_3 R} + a_4 e^{-a_5 R} \quad (27)$$

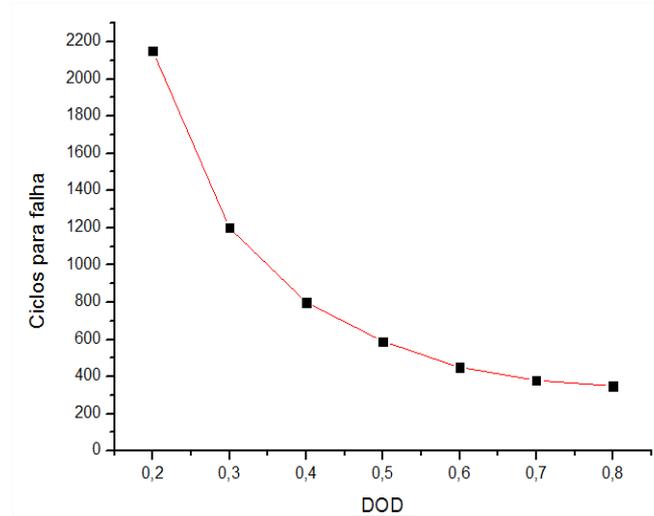
Onde a_i são parâmetros obtidos a partir da interpolação exponencial da curva definida a partir de dados que associam profundidade de descarga da bateria (DOD) e ciclos para falha, fornecidos pelo fabricante, R representa a profundidade de descarga (DOD) e C_F a quantidade de ciclos de carga e descarga restantes para que a bateria atinja sua vida útil.

Com informações fornecidas pelo fabricante de uma bateria de chumbo-ácido do tipo VRLA com tensão e capacidades nominais respectivamente de 12V e 1KWh, equivalente a 83,3 Ah, pôde-se levantar a curva apresentada na Figura 21 para seis níveis de DOD e suas

respectivas quantidades de ciclos para falha. Com isso as constantes do modelo puderam ser determinadas através de interpolação da curva, obtendo-se:

$$a_1 = 1380,3, a_2 = 6833,5, a_3 = 8,750, a_4 = 6746,5 \text{ e } a_5 = 6,216$$

Figura 21 – Ciclos para falha x DOD para um modelo de bateria.



Adaptado de: Bindner et al, 2005

O modelo para previsão da autonomia de vida de uma bateria, conhecido como modelo de limite de processamento de energia (LPE), pressupõe que há uma quantidade fixa de energia que pode ser utilizada em sucessivos ciclos de carga e descarga, através de uma bateria antes que ela precise ser substituída, independentemente da profundidade dos ciclos individuais ou quaisquer outros parâmetros específicos para a forma de como a energia é extraída ou suprida para bateria.

Na maioria dos casos, o LPE estimado para uma bateria é derivado da quantidade de ciclos para falha em função de profundidade de descarga (DOD) como mostrado anteriormente na Figura 21 através de informações fornecidas pelo fabricante.

Este processo baseia-se na observação de que para muitas baterias de chumbo-ácido, se a quantidade de ciclos para falha em cada profundidade de descarga é multiplicado pela energia resultante daquela descarga, a curva resultante pode ser assumida como constante.

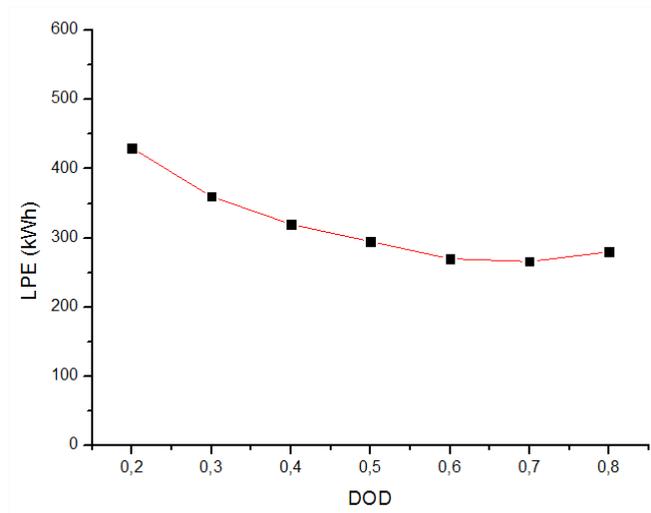
Portanto, o LPE para uma bateria pode ser considerado como sendo:

$$LPE = \frac{\sum_{i=1}^n C_{nom} \cdot DOD_i \cdot C_{F,i}}{n} \quad (28)$$

Onde C_{nom} é a capacidade nominal da bateria, DOD_i é o valor específico de uma determinada profundidade de descarga e $C_{F,i}$ é a quantidade de ciclos para falha associada ao DOD_i . O valor de i representa cada profundidade de descarga informada pelo fabricante.

A Figura 22 apresenta a curva que mostra os valores de LPE em função da profundidade de descarga (DOD) para o caso estudado.

Figura 22 – LPE em função do da profundidade de descarga sofrida pela bateria.



Fonte: Próprio autor.

Na maioria dos casos, o valor de LPE é calculado com base em uma média dos LPE's para cada profundidade de descarga, que se faz a partir de uma contagem das várias profundidades de descargas individuais sofridas pela bateria, com seus respectivos valores.

Essa média pode ser tomada para todos os casos de profundidade de descarga. O resultado é um número que indica o número total de Ah ou Wh que podem passar pela bateria antes de se esperar que falhe (Bindner et al, 2005).

Para determinar a expectativa de vida de uma bateria em um sistema de energia, o modelo de bateria soma, então, todo o fluxo de energia Ah ou Wh que entra ou sai da bateria e quando este valor atinge o total do LPE calculado para a bateria, a vida útil da bateria é considerada atingida.

Os fabricantes de baterias geralmente criam seus ciclos de falha usando testes específicos, geralmente a uma temperatura constante de 25°C com a condição de que quando a capacidade da bateria atinge 80% de sua capacidade nominal já é considerada inútil. Assim como acontece com outros métodos, o método de transferência de energia baseia-se nos dados do fabricante da bateria para calcular a vida útil e não pode facilmente avaliar a degradação da

bateria com o uso ou a operação da bateria para sistemas onde a bateria caiu abaixo da vida útil especificada pelo fabricante.

Em sistemas de potência, pode-se, através de simulações, calcular o LPE para a bateria utilizada, considerando o período analisado, e de acordo com a Equação (27), dispondo-se da capacidade nominal da bateria C_{nom} , o DOD referente a cada descarga sofrida pela bateria ao longo do período, e o C_F , informado pelo fabricante para algumas DOD's específicas interpolada por uma curva característica para baterias de chumbo-ácido conforme já apresentado na Figura 21.

O cálculo de toda a energia processada pela bateria no período em análise pode ser obtido através do simulador de acordo com a Equação

$$E_{processada} = \frac{E_{carregamento} + E_{descarregamento}}{2} \quad (29)$$

Já que,

$$E_i = \int P_i \cdot dt \quad (30)$$

Onde i indica se a energia a ser calculada provém do carregamento ou descarregamento da bateria

De posse da energia processada pela bateria e do seu limite de processamento de energia (LPE) pode-se então prever sua expectativa de vida de acordo com a Equação

$$Expectativa\ de\ vida = \frac{LPE}{E_{processada}/t} \quad (31)$$

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Como parte do estudo do comportamento de um banco de baterias em chumbo-ácido e sua previsão da autonomia de vida útil, foram feitas algumas simulações utilizando o software *HOMER ENERGY*.

4.1 O *HOMER ENERGY*

O software utilizado para simulações foi o *HOMER ENERGY (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)* desenvolvido pela *US National Renewable Energy Lab (NREL)* em 2000 e que faz análises em um determinado cenário constituído por fontes de geração, cargas e elementos armazenadores de energia. No processo de simulação é modelado um único sistema de fontes e cargas e na otimização algumas configurações para o sistema são adotadas de modo a encontrar um sistema otimizado em custos que satisfaça as condições técnicas do projeto.

Para fazer uso do *HOMER ENERGY*, é necessário alimentar o modelo com dados de entrada, os quais descrevem as opções de tecnologia, a disponibilidade de recursos, entre outros. O software usa essas entradas para simular diferentes configurações de sistema, ou combinações de componentes.

Através de uma configuração do sistema e seu modo de operação, definido pelo usuário, o processo de simulação funciona durante o período de um ano, sempre efetuando cálculos de balanço de energia a cada hora de funcionamento do sistema, comparando demanda elétrica com a energia que o sistema pode fornecer naquele momento e calculando os fluxos de energia que entram e saem em cada componente do sistema. Para sistemas que incluem baterias ou geradores movidos a combustível, o software também decide como operar os geradores a cada hora, carregando ou descarregando um banco de baterias.

4.2 Simulação em sistemas híbridos

Foram feitas duas simulações com fontes de energias renováveis em uma área localizada no interior da região Nordeste do Brasil cujo objetivo foi fazer um levantamento de informações acerca do comportamento da bateria em ambos os casos.

De acordo com a Equação (31) é sempre possível verificar o balanço de potência na bateria mediante oferta da fonte e demanda da carga (Zhou, Yang e Fang, 2008).

$$P_{BAT} = P_{SOLAR} + P_{EÓLICA} \cdot \eta_{RETIF} - P_{CARGA} / \eta_{INVERSOR} \quad (32)$$

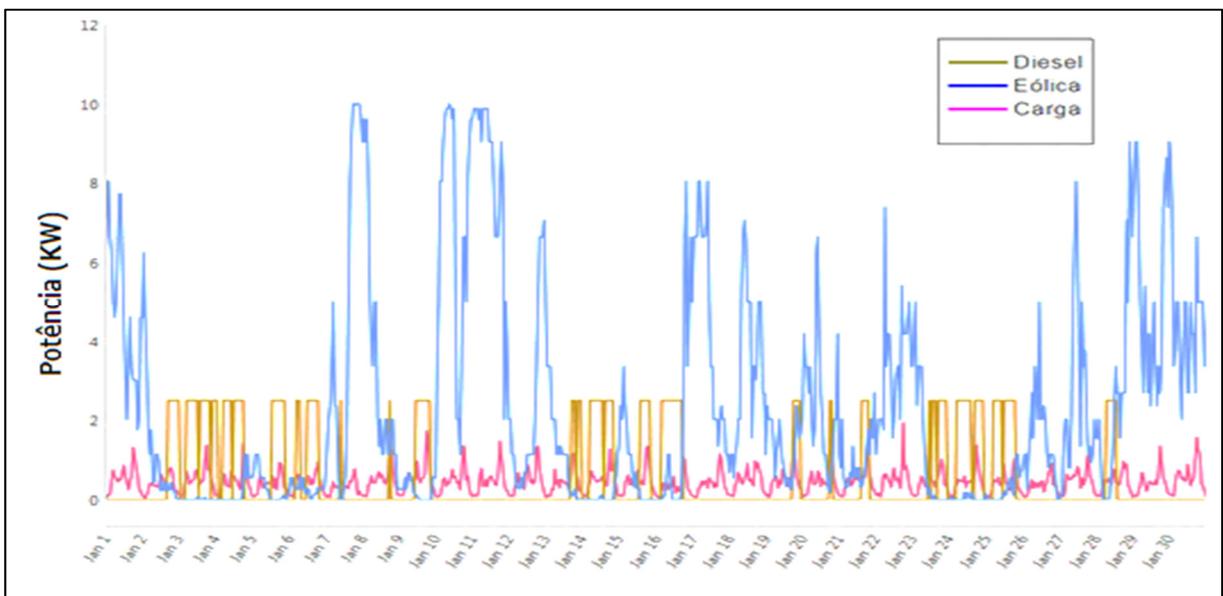
Onde P_{BAT} , P_{SOLAR} , $P_{EÓLICA}$ e P_{CARGA} são respectivamente potência na bateria, potência solar gerada, potência eólica gerada e potência demandada pela carga, η_{RETIF} e $\eta_{INVERSOR}$ são as constantes de rendimento do conversor quando funcionam como retificador e inversor, respectivamente.

A primeira simulação foi para um sistema eólico-diesel e a segunda para um sistema solar-diesel, ambos totalizando uma oferta de potência instalada de 20KW e uma demanda de carga de 11KWh/dia com pico de 2KW, além de uma bateria de chumbo-ácido de 12V com capacidade nominal de 1KWh equivalente a 83,3 Ah.

4.2.1 Sistema Eólico-diesel

Para o sistema eólico-diesel, a Figura 23 apresenta o perfil de oferta e demanda de potência ao longo de um período aleatório de trinta dias contínuos.

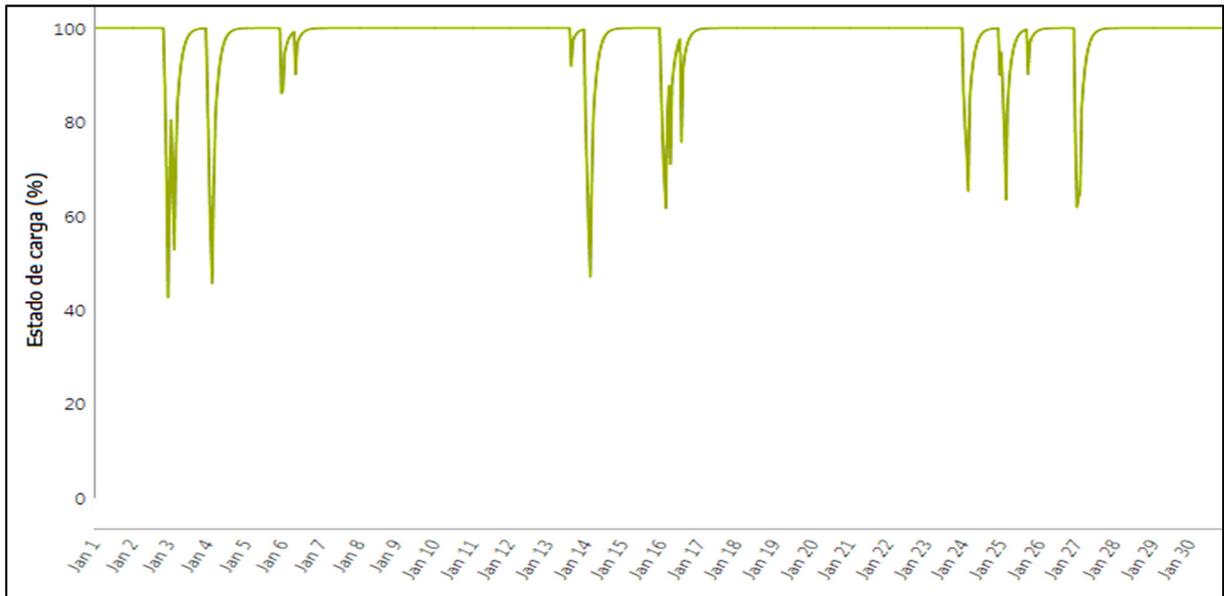
Figura 23 – Sistema híbrido de Energia eólico-diesel.



Fonte: Próprio autor

A partir do gráfico da Figura 24, que apresenta a variação do estado de carga da bateria que inicialmente encontrava-se completamente carregada, pôde-se calcular através das equações (27) e (28) o valor para o LPE.

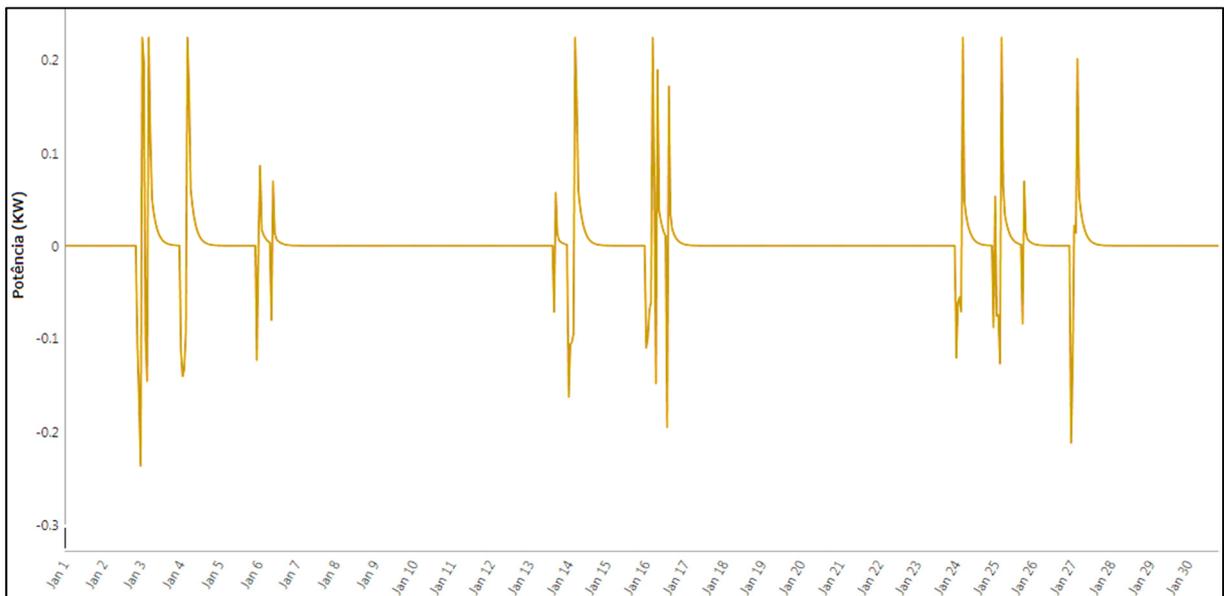
Figura 24 – Variação do estado de carga da bateria ao longo de trinta dias para o sistema eólico-diesel.



Fonte: Próprio autor.

Já a partir dos resultados obtidos na Figura 25, onde é apresentado o comportamento da bateria ao longo do intervalo analisado, explicitando os valores de potência positivo para carregamento e negativo para descarregamento a cada instante, pôde-se calcular através das equações (29) e (30) o total da energia processada no período.

Figura 25 – Potência processada pela bateria para o sistema eólico-diesel.



Fonte: Próprio autor.

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos com a simulação, onde o LPE, para a bateria, pode ser expresso conforme a Equação (28), resultando em 835 KWh.

Tabela 1 – DOD, Ciclos para falha e LPE para sistema eólico-diesel.

DIA	DOD	CICLOS PARA FALHA	LPE (KWh)
03/jan	0,57	1618,35	926,18
03/jan	0,47	1851,59	872,47
04/jan	0,54	1671,70	906,40
06/jan	0,14	6270,02	867,77
06/jan	0,05	10463,41	565,02
13/jan	0,08	8832,80	713,69
14/jan	0,53	1699,89	898,39
16/jan	0,38	2244,29	859,34
16/jan	0,29	3042,17	879,80
16/jan	0,24	3699,87	895,74
24/jan	0,35	2493,47	863,74
25/jan	0,10	7871,37	783,99
25/jan	0,36	2360,44	860,85
25/jan	0,10	7962,45	777,93
27/jan	0,38	2258,15	859,45

Fonte: Próprio autor.

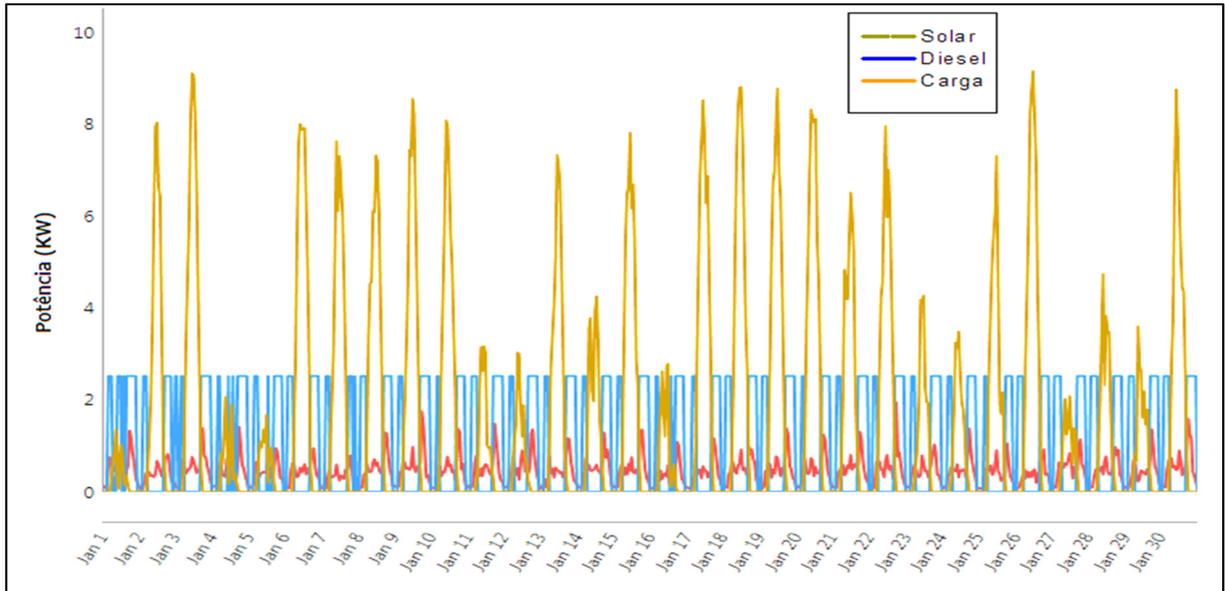
O cálculo da energia processada pela bateria durante o período, de acordo com os resultados apresentados na Figura 25 e utilizando as equações (29) e (30) foi de 7,2 KWh/mês.

Em seguida, pela Equação (31), pôde-se determinar a expectativa de vida da bateria em 9,66 anos, mantida sua temperatura constante a 25°C durante todo o processo.

4.2.2 Sistema Solar-diesel

Para simulação do sistema Solar-diesel, a Figura 26 apresenta o perfil de oferta e demanda de potência ao longo do mesmo período de trinta dias simulado no caso anterior.

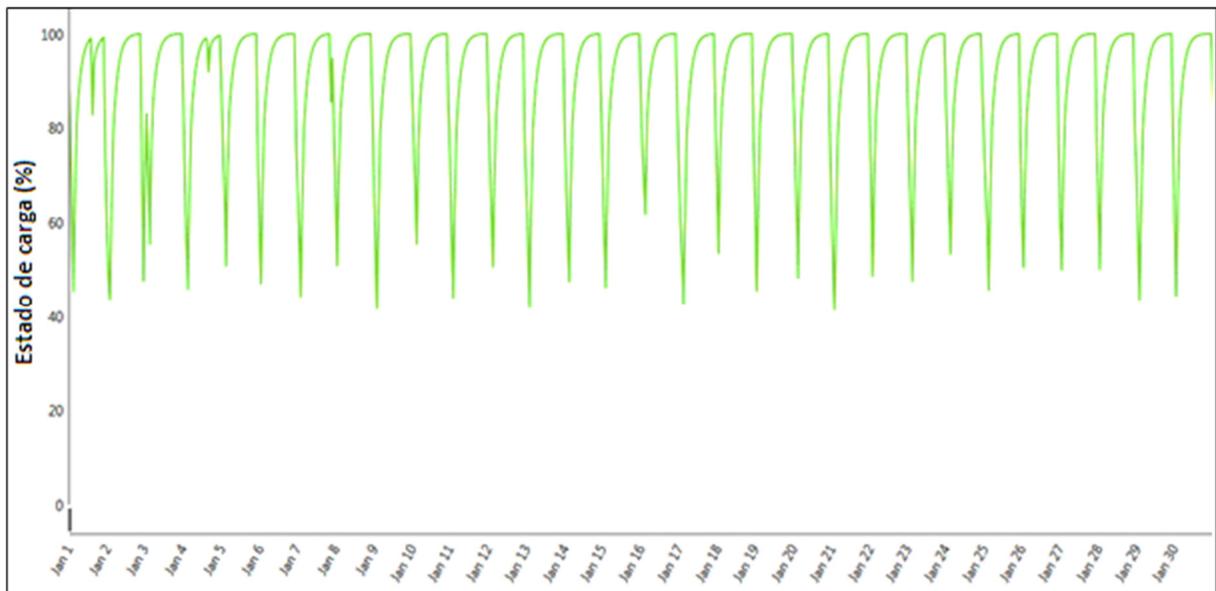
Figura 26 – Sistema híbrido de Energia solar-diesel.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 27 apresenta a variação do estado de carga da bateria, para o sistema solar-diesel, que inicialmente encontrava-se completamente carregada e da mesma forma que no caso simulado anteriormente pôde-se calcular através das equações (27) e (28) o valor para o LPE.

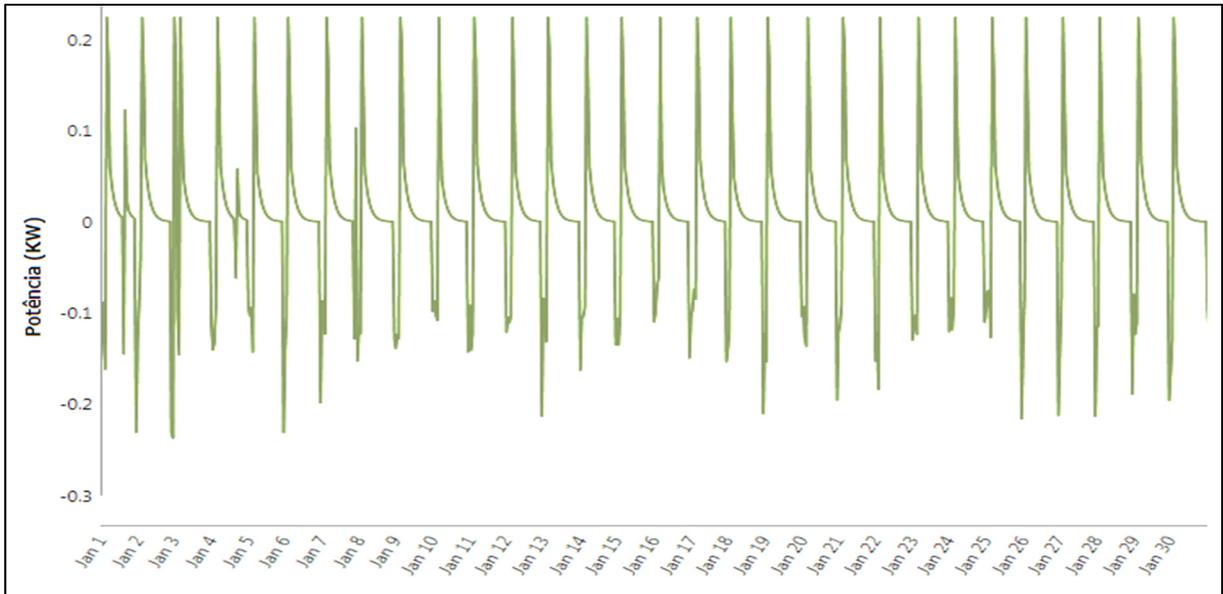
Figura 27 – Variação do estado de carga da bateria ao longo de trinta dias no sistema solar-diesel.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 28 apresenta o comportamento da bateria ao longo do período analisado, para o sistema solar-diesel, explicitando os valores de potência positivo para carregamento e negativo para descarregamento a cada instante e que similarmente ao caso do sistema eólico-diesel pôde-se calcular através das equações (29) e (30) o total da energia processada no período.

Figura 28 – Potência processada pela bateria para o sistema solar-diesel



Fonte: Próprio autor.

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos com a simulação, onde o LPE para a bateria, pode ser estimado como expressa a Equação (28), resultando em 893 KWh

Tabela 2 – DOD, Ciclos para falha e LPE para sistema solar-diesel.

DIA	DOD	CICLOS PARA FALHA	LPE (KWh)
01/jan	0,55	1662,44	909,35
01/jan	0,17	5194,21	897,04
02/jan	0,56	1631,30	920,71
03/jan	0,52	1708,41	896,23
03/jan	0,45	1938,13	865,37
04/jan	0,54	1671,70	906,40
04/jan	0,08	8805,42	715,88
05/jan	0,49	1787,77	880,66
06/jan	0,53	1695,39	899,58
07/jan	0,56	1641,27	916,81
07/jan	0,15	6037,68	876,07
08/jan	0,49	1788,88	880,49
09/jan	0,58	1599,38	935,16
10/jan	0,45	1939,66	865,28

11/jan	0,56	1636,41	918,68
12/jan	0,50	1780,10	881,86
13/jan	0,58	1603,98	932,87
14/jan	0,53	1704,45	897,22
15/jan	0,54	1678,85	904,23
16/jan	0,38	2241,90	859,32
17/jan	0,57	1616,13	927,17
18/jan	0,47	1868,92	870,73
19/jan	0,55	1664,15	908,79
20/jan	0,52	1721,98	893,02
21/jan	0,59	1596,04	936,88
22/jan	0,51	1731,35	890,95
23/jan	0,53	1706,65	896,67
24/jan	0,47	1862,63	871,34
25/jan	0,54	1667,61	907,68
26/jan	0,50	1780,10	881,86
27/jan	0,50	1764,16	884,55
28/jan	0,50	1769,67	883,59
29/jan	0,57	1629,63	921,39
30/jan	0,56	1643,91	915,82

Fonte: Próprio autor.

O cálculo da energia processada pela bateria durante o período, de acordo com os resultados apresentados na Figura 28 e utilizando as equações (29) e (30) foi de 11,6 KWh/mês.

Com isso, pela Equação (31), pôde-se determinar a expectativa de vida da bateria em 6,41 anos, mantida sua temperatura constante a 25°C durante todo o processo.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação apresentou uma abordagem para modelar e estimar o comportamento energético de baterias de chumbo ácido, ainda hoje, as mais aplicadas em sistemas elétricos.

Para tal, foi escolhida uma metodologia que aplica o modelo KiBaM e através de informações disponíveis de fabricantes de baterias, foi possível identificar o comportamento e estimar a autonomia da bateria em questão.

Ainda com a ferramenta apresentada nessa dissertação foi possível estimar a vida útil de baterias chumbo ácido em fase de projeto básico, onde não há informações completas nem se executam modelagens dinâmicas de operação. Portanto o modelo aplicado, apesar de não levar em consideração a temperatura, para a fase de especificação básica de baterias para sistemas elétricos apresenta-se como uma excelente opção em vista da facilidade de obtenção de dados e sua consequente simulação.

Conclui-se, portanto, que o modelo implementado em conjunto com a metodologia desenvolvida apresentou resultados satisfatório para representar as principais características elétricas das baterias.

O método de LPE para determinar a vida útil remanescente em baterias é um método validado em várias fontes, e nesse trabalho mostrou-se como uma alternativa viável que para projetos de sistemas híbridos tem uma aplicação direta. Nesses sistemas a geração e a carga muitas vezes têm comportamento imprevisível e estimar a vida de uma bateria em condições fora de laboratório se torna muito complexo.

Aplicadas em sistemas híbridos com fontes renováveis, não é possível a obtenção de uma corrente de carga e descarga controladas, pois as fontes energéticas são de geração intermitente de energia, não tendo com isso uma regularidade para cargas e descargas das baterias, havendo dificuldade para a estimativa de comportamento utilizando modelos padrões para previsão de autonomia de baterias.

Contudo, o modelo apresentado se mostra satisfatório na determinação da vida útil de baterias em condições mais próximas das reais.

Finalmente, essa dissertação contribui com o conhecimento e difusão sobre o uso de baterias em sistemas elétricos.

5.1 Trabalhos futuros

Considerando o tempo de desenvolvimento da dissertação, não foi possível abranger todos os aspectos da modelagem, porém a seguir serão apresentadas algumas sugestões de aprofundamento para o trabalho apresentado:

- Uma modificação do modelo KiBaM para levar em consideração os efeitos da temperatura no comportamento da bateria, ainda que uma simples alteração da temperatura média do local, e assim permanecendo a simplicidade do modelo para sua aplicabilidade em situações de poucas informações do local do projeto;
- Aplicação do modelo KiBaM para outros tipos de baterias, bem como, verificar a sua eficiência em representar o comportamento do sistema em conjunto com o modelo LPE na estimativa de autonomia de baterias em sistemas elétricos;
- Verificar o comportamento da ferramenta ao longo de períodos maiores de simulação e sua validação experimental em condições locais.

REFERÊNCIAS

ARMENTA-DEU, C., **Prediction of battery behavior in SAPV applications**. ScienceDirect. 2003.

BAGOTSKY, Vladimir S.; SKUNDIN, Alexander M.; VOLFKOVICH, Yuriy M.. **Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

BINDNER, H., CRONIN, T., LUNDSAGER P., MANWELL, J.F, ABDULWAHID, U., BARING-GOULD, I., **Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries**. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark. Risø-R-1515(EN), 2005.

BRITO SOUZA, J.R, NOGUEIRA LIMA, A.M., **Modelagem e simulação do tempo de vida de banco de baterias chumbo-ácido utilizados em sistemas de múltiplas fontes de energia**. ResearchGate. 2008.

BROUSSELY, M.; PISTOIA, G.. **Industrial Applications of Batteries: From Cars to Aerospace and Energy Storage**. Oxford: Elsevier, 2007.

CHAN, H.L., **A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems**, IEEE, 2000.

CHEN, M.; RINCON-MORA, G.A.. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. **IEEE Transactions On Energy Conversion**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.504-511, jun. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

DANIIL, Nikolaos; DRURY, David; MELLOR, Phil H.. Performance comparison of diffusion, circuit-based and kinetic battery models. **2015 IEEE Energy Conversion Congress And Exposition (ECCE)**, [s.l.], p.1382-1389, set. 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

DUARTE, KELLY P., **Aplicação de um modelo híbrido para predição do tempo de vida de baterias utilizadas em dispositivos móveis**. Dissertação de mestrado, Ijuí, RS, Brasil, 2014.

DÜRR, Matthias et al. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. **Journal of Power Sources**, [s.l.], v. 161, n. 2, p.1400-1411. Elsevier. 2006.

Energy Storage in the UK: An Overview. REA – Renewable Energy Association. 2015.

GHOSSEIN, Nagham El et al. Survey on electrical modeling methods applied on different battery types. **2015 Third International Conference On Technological Advances In Electrical, Electronics And Computer Engineering (TAEECE)**, [s.l.], p.39-44, abr. 2015. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE).

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY(IEA). **Recommended Practices For Charge Controllers: Use of PV Systems in Stand-Alone and Island Applications**. Disponível em: http://iea-pvps.org/index.php?id=9&eID=dam_frontend_push&docID=372. Acesso em: 22 ago. 2016.

JONES, R.. **Charge Control Options for Valve Regulated Lead Acid Batteries**. TW0060, nov. 2004.

JONGERDEN, M.r.; HAVERKORT, B.r.. Which battery model to use? **IET Software**, [s.l.], v. 3, n. 6, p.445-457, 2009. Institution of Engineering and Technology (IET).

KIM, Taesic; QIAO, Wei. A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects. **IEEE Transactions On Energy Conversion**, [s.l.], v. 26, n. 4, p.1172-1180, dez. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

LINDEN, David; REDDY, Thomas B.. **Handbook of batteries**. 3. ed. New York: Mcgraww-hill, 2002.

MANWELL, James F.; MCGOWAN, Jon G.. Lead acid battery storage model for hybrid energy systems. **Solar Energy**, [s.l.], v. 50, n. 5, p.399-405, maio 1993. Elsevier BV.

MENICTAS, Chris; SKYLLAS-KAZACOS, Maria; LIM, Tuti Mariana. **Advances in Batteries for Medium and Large-scale Energy Storage**. Cambridge: Elsevier, 2015.

MESSENGER, Roger A.; VENTRE, Jerry. **Photovoltaic systems engineering**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004.

PARFOMAK, Paul W. **Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment**. Congressional Research Service, [S.L], v. 75700, p. 11-15, mar. 2012.

PINHO, João Tavares et al. **SISTEMAS HÍBRIDOS: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396 p.

PINHO, João Tavares et al. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014.

RAO, Ravishankar; VRUDHULA, S.; RAKHMATOV, D.n.. Battery modeling for energy-aware system design. **Computer**, [s.l.], v. 36, n. 12, p.77-87, dez. 2003. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

ROSS, J.N., **Modelling Battery Charge regulation for a stand-alone photovoltaic system**. Elsevier, 2000.

SAAD, MARCELO C., **Controlador de carga e descarga de baterias microcontrolado com PIC, cm aplicação em sistemas de fornecimento de energia em geral, incluindo sistemas fotovoltaicos**. PUC Rio, 2012.

SALAMEH, Z.M., CASACCA, M.A., LYNCH, W.A., **A mathematical model for lead-acid batteries**. IEEE. 1992.

SCHLÖGL, Robert et al. **Schlögl (Ed.) - Chemical Energy Storage**. Berlin: De Gruyter Graduate, 2013.

ZHANG, Cheng et al. Battery modelling methods for electric vehicles - A review. **2014 European Control Conference (ECC)**, [s.l.], p.2673-2678, jun. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

ZHOU, W., YANG, H., FANG, Z., **Battery Behavior Prediction and Battery Working States Analysis of a Hybrid Solar-Wind Power Generation System**. Elsevier, 2008.