



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ANA CAROLINA DE LIMA MELO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO USO DE
BATERIAS PARA REDUÇÃO DO PICO DE CONSUMO DE ENERGIA**

Campina Grande - PB
2019

ANA CAROLINA DE LIMA MELO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO USO DE
BATERIAS PARA REDUÇÃO DO PICO DE CONSUMO DE ENERGIA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido a
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande, Campus Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador: Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, PB

2019

ANA CAROLINA DE LIMA MELO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO USO DE
BATERIAS PARA REDUÇÃO DO PICO DE CONSUMO DE ENERGIA**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido a
Coordenação de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande, Campus Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Aprovado em ___/___/___

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Edmar Candeia Gurjão
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador

*Dedico este trabalho aos meus pais, esposo,
filho e amigos que sempre me incentivaram.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, que acima de tudo me deu forças para superar todas as adversidades ao longo da graduação, não me deixando desistir nunca.

A minha Mãe, que sempre foi exemplo de força e superação que me ensinou a correr atrás dos meus sonhos e que me apoiou acreditando em mim quando decidi cursar Engenharia Elétrica em outra cidade.

Agradeço a meu esposo Leonardo que esteve comigo nos momentos difíceis, me dando conselho e sendo sempre companheiro. E principalmente a meu filho Caio Leonardo que entendeu quando sua mãe precisava estudar e sempre obedeceu quando precisei o levar comigo para alguma atividade dentro da universidade.

A minha amiga Lily Cardoso que esteve comigo nos últimos períodos do curso, sempre disposta a me ajudar e me escutar nos momentos mais filosóficos e de lamentações.

Aos amigos Pedro Ivo, Wanessa Medeiros, José Wallison por serem excelentes companheiros de estudo e trabalhos e por sempre me ajudarem nos momentos mais complicados com relação ao curso.

Ao professor Edmar Candeia, agradeço pela orientação e contribuição do seu saber para a realização desse trabalho, pela enorme paciência, por estar sempre disposto a ajudar em todos os momentos que precisei.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram com a minha formação profissional ao longo do curso.

"Só sei que nada sei." (Sócrates)

RESUMO

É cada vez maior o uso de baterias para o aproveitamento de energia de fontes renováveis, cortes de pico, deslocamento de demanda para horários em que a energia está mais barata, em casos de grandes armazenadores, além de melhoramento de índices de qualidade da energia fornecida pela concessionária. Com base nesse cenário, o presente trabalho avalia a forma mais eficiente do uso de baterias para o caso de consumidores que fazem uso de tarifação diferenciada, tarifa azul ou verde. O resultado do estudo que foi feito com base do perfil de carga de uma fase do bloco CJ pertencente à Universidade Federal de Campina Grande mostrou que existem dois horários de alto pico de demanda entre 11h e 17h30min, inviabilizando o uso de energia solar para carregamento das baterias. Finalmente, neste estudo utilizou-se de metodologias de trabalhos anteriores para dimensionar o banco de baterias que pode ser utilizado para corte de pico do perfil de carga estudado. A metodologia relaciona a vida útil em regime de ciclagem com a vida útil em flutuação para encontrar uma profundidade de descarga ótima que aumente o tempo de vida das baterias com uso de no máximo uma descarga diária.

Palavras chaves: Baterias, Deslocamento de carga, Corte de pico, Sistemas de Armazenamento de Energia.

ABSTRACT

Increasingly, the use of batteries for the use of energy from renewable sources, peak cuts, shifting demand for times when energy is cheaper, in cases of large storerooms, as well as improving the quality indices of the energy supplied by the concessionaire. Based on this scenario, the present study evaluates the most efficient way of using batteries for the case of consumers who use differentiated charging, Blue or Green Rate. The result of the study that was done based on the load profile of a phase of the CJ block belonging to the Federal University of Campina Grande showed that there are two schedules of high peak demand between 11h and 17h30min, making the use of energy unfeasible for charging the batteries. Finally, the study used previous work methodologies to size the bank of batteries that can be used for peak cutting of the studied load profile. The methodology relates the useful life in a cycling regime with the useful life in flotation to find an optimum discharge depth that increases the life of the batteries with the use of at most one daily discharge.

Keywords: Batteries, Load shifting, Peak Shaving, Energy Storage System,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Uso do deslocamento de demanda.....	13
Figura 2.1: Exemplo de descolamento de carga.....	16
Figura 2.2: Exemplo de corte de pico.....	17
Figura 2.3: Pilha de volta.....	18
Figura 2.4: Bateria de chumbo-ácido e suas partes constituintes.....	20
Figura 2.5: Influência da temperatura na vida útil da bateria.....	21
Figura 2.6: Possibilidade de ciclos em função da profundidade de descarga.....	22
Tabela 2.2: Características dos métodos de carga.....	25
Figura 2.7: Método a dois níveis de tensão.....	26
Figura 3.1: Bloco e modelo da bateria disponível no <i>Simulink/MATLAB</i>	28
Figura 3.2: Sistema simulado.....	30
Figura 3.3: Parâmetros de ajuste do bloco <i>Battery</i>	31
Figura 3.4: Bloco Chave 1 e 2.....	32
Figura 3.5: Bloco 'Carga CC variável'.....	33
Figura 3.6: Configuração ideal de sistema.....	34
Figura 4.1: Consumo de Potência Ativa na Fase B – Bloco CJ.....	36
Figura 4.2: Curva de carga do bloco CJ com corte de pico.....	38
Figura 4.3: Tarifa horo-sazonal azul.....	38
Figura 4.3: Tarifa horo-sazonal verde.....	39
Figura 4.4: Curva de carga sem bateria.....	40
Figura 4.5: Curva de carga com bateria.....	40
Figura 4.6: Número de Ciclos em Função da Profundidade de descarga.....	42
Figura 4.7: Ciclos em função da profundidade de descarga bateria	43
Figura 4.8: Parâmetros do bloco que compõe o limitador de carga/descarga.....	44
Figura 4.9: Curva de carga da demanda excedente.....	45
Figura 4.10: Comportamento dos parâmetros da bateria na simulação.....	45
Figura 4.11: Comportamento dos parâmetros da bateria na carga.....	47
Figura 4.12: Bloco <i>Battery</i> com parâmetro de temperatura.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características dos tipos de baterias mais comuns.....	19
Tabela 2.2: Características dos métodos de carga.....	25
Tabela 4.1: Dados operacionais da bateria 12MF105.....	41
Tabela 4.2: Parâmetros do banco de bateria.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A Ampere

Ah Ampere.hora(Capacidade)

DOD *Depth Of Discharge*

h hora (tempo)

SAEBs Sistema de Armazenamento de Energia com Baterias

SAE Sistema de Armazenamento de Energia

SEP Sistema de Elétrico de Potência

SOC *State Of Charge*

VOC *Open Circuit Voltage*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Aplicações de sistemas de armazenamento de energia com baterias (SAEBs)	16
2.1.1	Deslocamento de carga	16
2.1.2	Corte de pico	17
2.2	Baterias	17
2.2.1	Baterias Recarregáveis	18
2.2.2	Baterias de Chumbo-Ácido	19
2.2.3	Terminologias Utilizadas em Baterias	22
2.2.3.1	Capacidade Nominal	22
2.2.3.2	Estado de Carga (SOC)	23
2.2.3.3	Profundidade de Descarga (DOD)	23
2.2.3.4	Tensão de Circuito Aberto (VOC)	23
2.2.3.5	Tensão de Corte	23
2.2.3.6	Tensão de Flutuação	24
2.2.3.7	Resistência Interna	24
2.2.4	Carga em baterias de chumbo-ácido	24
2.2.5	Limitador de carga/descarga	26
2.3	MATLAB®	27
3	MODELAGEM DE CARGA E DESCARGA DA BATERIA	28
3.1	Carga	28
3.2	descarga	29
3.3	Sistema simulado	30
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	35
4.1	Perfil de Carga	35
4.2	Definição de estudo de caso	36
4.2.1	Tarifação para consumidores de alta tensão	37
4.3	Banco de baterias	40
4.3.1	Dimensionamento do bando de baterias	40
4.4	Quantidade de baterias necessárias para atender a potência excedida	42
4.5	Simulação para corte de pico com SAEB	44
4.5.1	Comportamento do SOC	46
4.5.2	Comportamento da tensão na bateria	46

4.5.3	Comportamento da corrente na bateria.....	46
4.5.4	Carregamento da bateria.....	46
4.5.5	Discussão dos resultados	48
5	CONCLUSÃO	50
5.1	Trabalho futuros	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

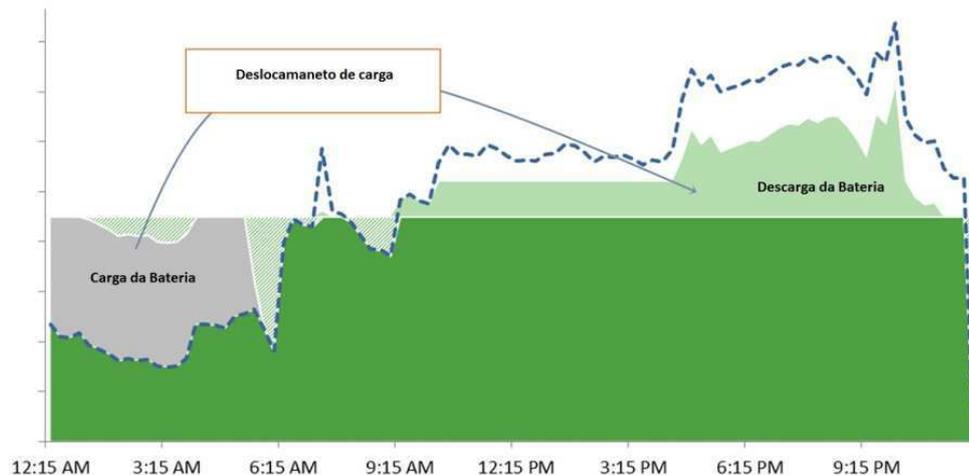
É indiscutível que a demanda por energia só faz crescer ao longo dos anos. Isso está diretamente ligado à evolução demográfica e tecnológica da sociedade. Por isso, é cada vez maior a procura por novas fontes de geração energia. É dentro desse contexto que os Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE), estão ganhando mercado, visto que eles podem vir a ser uma solução promissora, devido sua capacidade de armazenamento para serviços como, deslocamento de carga, corte de pico ou continuidade de energia.

O uso de bateria para armazenamento em grande escala de energia está se tornando cada vez mais atrativo, em virtude do surgimento de novas tecnologias que vem aumentando seu poder de armazenamento e apresentando sucessivas reduções em seus custos. Um exemplo de investimento nesse aspecto é o da empresa *Tesla* está investindo na construção de baterias domésticas e utilitárias com alto nível de armazenamento e pequeno tamanho.

Em países desenvolvidos, como Estados Unidos, o armazenamento de energia em horários fora de pico para uso em picos do sistema, já é realidade. É uma forma de se suprir o aumento da demanda postergando investimento em transmissão e distribuição, o chamado *time-shifting*.

As baterias são compostas por elementos químicos que tem tempo de vida limitado, e se usadas de forma não eficiente duram menos e são descartas rapidamente, gerando impacto financeiro e ambiental. Diante disso, e das situações referenciadas anteriormente este trabalho de conclusão de curso busca avaliar a melhor configuração do uso da bateria para deslocamento de carga e corte de pico. Na figura 1.1 é possível observar um exemplo de deslocamento de carga.

Figura 1.1: Uso no deslocamento de carga



Fonte: Adaptado de (Bloomenergy,2018)

Apesar de não ser tema deste trabalho, outro mercado que está crescendo muito e refletindo no uso de baterias é o de sistemas fotovoltaicos. E que segundo apontamentos da Agência Internacional para Energias Renováveis (*Renewable Energy Agency, 2017*), impactará diretamente no preço das baterias nos próximos anos, chegando a ter uma redução em torno de 50% até 2030. (FARIAS, 2018).

No desenvolvimento do trabalho foram usados dados colhidos através do servidor disponibilizado pelo do meu orientador, o qual faz parte de um projeto maior que monitora e contabiliza dados de potência ativa, reativa e fator de potência de alguns prédios da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Esses dados foram tratados, visto que algumas leituras estavam faltando, para posterior uso no *software MATLAB/Simulink*, no qual serão feitas as simulações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma contextualização do assunto em estudo, no que se dizem respeito às formas de uso de baterias, bem como o tipo de bateria utilizada no desenvolvimento do trabalho, características construtivas e funcionais, suas aplicações, vida útil, efeito da carga e descarga no desempenho e *software* utilizado nas simulações computacionais, além de tópicos co-relacionados.

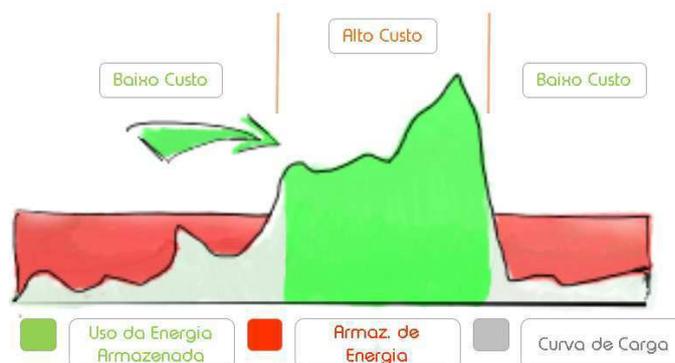
2.1 APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA COM BATERIAS (SAEBS)

Os sistemas de armazenamento de energia com baterias conseguem fornecer energia para diferentes tipos de aplicações. Neste trabalho a utilização de baterias será direcionada particularmente para deslocamento de carga e corte de pico. Esse último simulado em *software*.

2.1.1 Deslocamento de carga

O deslocamento de carga, ou chamado serviço de arbitragem acontece quando se armazena energia em períodos de baixo custo, utilizando posteriormente em durantes períodos onde a energia está mais barata. Gyuk et al. (2013).

Figura 2.1: Exemplo de descolamento de carga

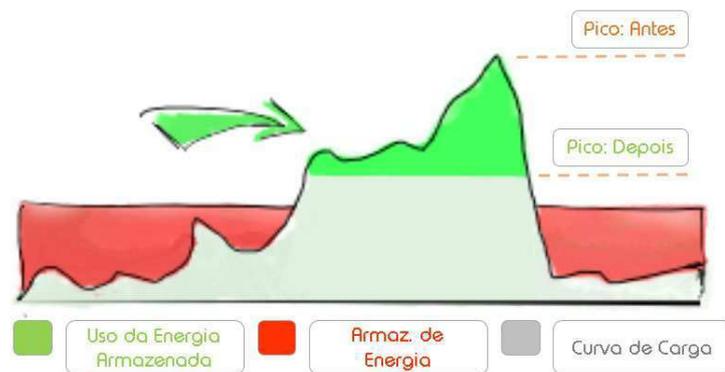


Fonte: FARIAS 2018

2.1.2 Corte de pico

O chamado corte de pico, do inglês *Peak Shaving*, consiste em utilizar a energia armazenada para deslocar ou atrasar a demanda de energia elétrica e dessa forma reduzir o pico. Esse tipo de utilização é indicada para consumidores que trabalham com tarifação baseada em demanda contratada. Dado que de 40% a 50% das contas elétricas de consumidores comerciais e industriais podem consistir em cobrança de demanda de ultrapassagem em consequência do uso de equipamentos que demandam altas potências em breves períodos.

Figura 2.2: Exemplo de corte de pico



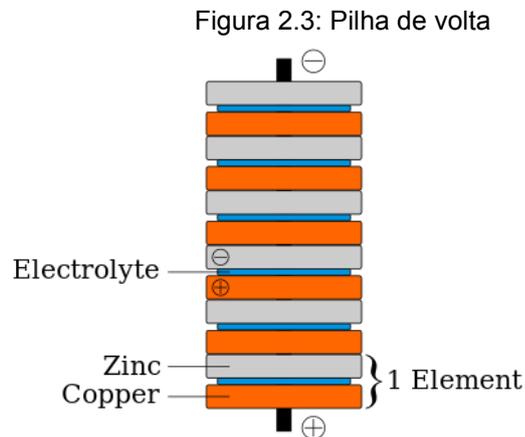
Fonte: FARIAS 2018

Muitos consumidores comerciais e indústrias utilizam geradores a óleo para o corte de pico. No entanto o emprego de SAEBs para essa função, principalmente em curtos intervalos de alta demanda, pode ser viável, garantindo assim a atenuação dos custos com excesso de potência.

2.2 BATERIAS

Os historiadores datam o surgimento da primeira bateria por volta de 1800. Sua invenção é atribuída a Alessandro Volta, professor de física na Universidade de Pavia, Itália. Volta realizou testes e conseguiu construir um dispositivo que transformava energia química em elétrica, o mesmo recebeu o nome de pilha de Volta. (M. DELL; A. J. RAND, 2001).

Na construção da pilha de Volta (figura 2.3) foram utilizados discos de zinco e prata intercalados por um material poroso molhado com água do mar, todos empilhados, por isso esse dispositivo recebeu o nome de pilha. Por fim, em suas extremidades foram conectadas a fios condutores.



Fonte: Wikipédia (disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pilha_de_Volta>)

Com o passar dos anos, avanços tecnológicos e procura por fontes de armazenamento as baterias se tornaram componentes vitais em dispositivos eletrônicos, sistemas fotovoltaicos e eólicos.

2.2.1 Baterias Recarregáveis

As baterias recarregáveis são as mais utilizadas em sistemas de armazenamento de energia devido sua capacidade de recarga, diferente das não recarregáveis que após o uso precisam ser descartadas.

As características e parâmetros de funcionamento dos tipos mais comuns de baterias recarregáveis são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Características dos tipos de baterias mais comuns

	Íons de lítio	Chumbo-ácido	Níquel-hidreto metálico	Níquel-cádmio
Ciclos de vida	400 - 600	250 - 500	300 - 600	300 - 700
Eletrólito	Polímeros orgânicos	H ₂ SO ₄	KOH	KOH
Densidade de energia (Wh/kg)	90 - 150	20 - 40	40 - 90	30 - 50
Densidade de energia volumétrica (Wh/m³)	230 - 330	50 - 120	150 - 320	100 - 150
Custo	Baixo	Baixo	Médio	Médio
Temperatura de operação (°C)	-20° a +50°	-15° a +50°	-20° a +60°	-20° a +50°
Eficiência (%)	90-95	80-90	80-90	60-70
Manutenção	Baixa	Muito Baixa	Alta	Alta

Fonte: (Adaptado de LUQUE, HEGEDUS, 2018)

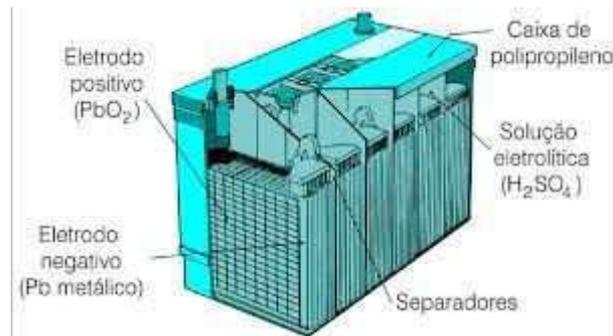
Na escolha da bateria para uma dada aplicação é fundamental atentar-se aos parâmetros citados na Tabela 2.1, no sentido de observar qual tecnologia de bateria apresentará o melhor desempenho.

Como as baterias de chumbo-ácido já têm tecnologia consolidada, apresentam grande escala de produção, vasta aplicação e benefícios como baixo custo e fácil manutenção, que por sua vez superam desvantagens como baixa densidade de energia, todo o trabalho será baseado nesse tipo de bateria.

2.2.2 Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias do tipo chumbo-ácido são as recarregáveis mais utilizadas para armazenamento de energia devido seu baixo custo e alto desempenho. Nestas baterias as células têm chumbo e óxido de chumbo como eletrodos e ácido sulfúrico como eletrólito (FERREIRA, 2015). A Figura 2.4 apresenta a bateria de chumbo-ácido e suas partes constituintes.

Figura 2.4: Bateria de chumbo-ácido e suas partes constituintes



Fonte: (BOCCHI, FEERRACIN, BIAGGIO, 2000)

Não é recomendado descarregar totalmente as baterias de chumbo-ácido, ou seja, até que a tensão nos terminais atinja zero volt, uma vez que esse procedimento pode impossibilitar a recarga e encurtar a vida útil da bateria. Já no que se refere ao processo de carga, na bateria chumbo-ácido deve ser realizado com baixas corrente, o que leva a um tempo de carga maior (PEREIRA, 2016).

As baterias de chumbo-ácido são classificadas com base em suas características construtivas. Os principais tipos são: baterias seladas e baterias ventiladas, ambas serão abordadas nos tópicos a seguir.

- Baterias ventiladas ou abertas (VLA)

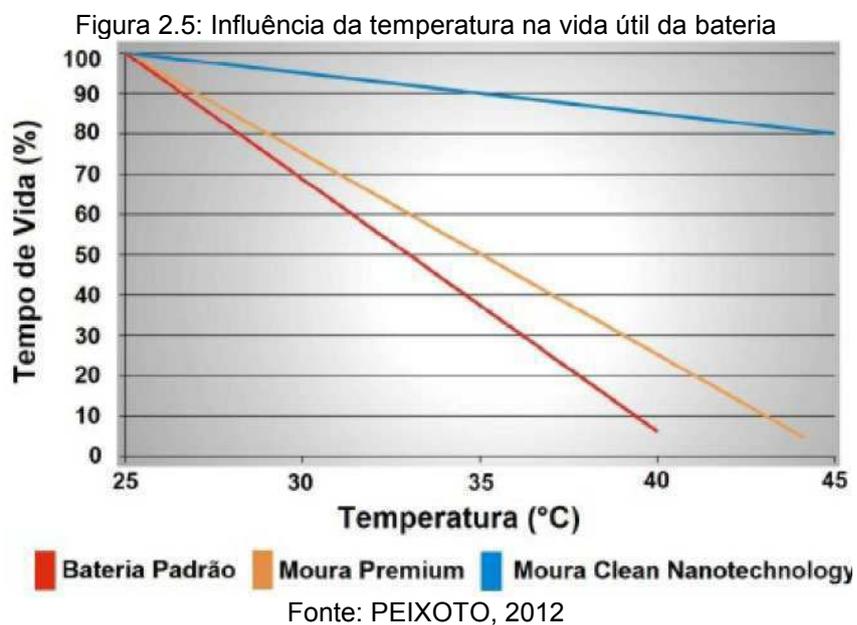
Nas baterias VLA o eletrólito é líquido e dentro da célula. Esse tipo de bateria necessita de manutenção recorrente, devido a eletrolise da água que faz com que o oxigênio e o hidrogênio sejam liberados na forma gasosa. Por isso a necessidade de adição de água durante sua vida útil. E como a bateria VLA emite uma quantidade relevante de gases, ela não pode ser instalada próxima a equipamentos eletrônicos. Apesar de ter alta durabilidade, elas têm alto custo e precisam ser montadas com a tampa virada para cima para não ocorrer o risco de vazamento de eletrólito (BATTERY, 2018).

- Baterias seladas ou reguladas por válvulas (VLRA)

As baterias seladas apresentam eletrólito imobilizado na forma de gel ou absorvido por um separador de microfibras de vidro, utilizando válvula de alívio de pressão que tem como função limitar a fuga de gases originários dos ciclos de carga

e descarga. Esse tipo de bateria foi desenvolvido para minimizar as manutenções, não necessitando de reposição de água, diferente do tipo VLA, dado que o ciclo de recombinação entre oxigênio e hidrogênio reduzem a perda do líquido (BATTERY, 2018).

Alguns fatores influenciam diretamente no tempo de vida útil das baterias de chumbo-ácido, um deles é a temperatura. Como é possível observar na figura 2.5, quando a bateria trabalha com elevadas temperaturas a vida útil dela diminui acentuadamente.



Outra situação a ser observada é que nesse tipo de bateria o número de ciclos é inversamente proporcional a profundidade de descarga. Como é visto na Figura 2.6, quanto maior a profundidade de descarga, menor o número de ciclos da bateria e consequentemente o tempo de vida útil.

Figura 2.6: Possibilidade de ciclos em função da profundidade de descarga



Fonte: FREEDOM, 2018

2.2.3 Terminologias Utilizadas em Baterias

Para analisar corretamente o funcionamento de uma bateria é necessário conhecer suas principais terminologias. As descrições de alguns itens fundamentais ao conteúdo estão descritos e comentados nesse tópico.

2.2.3.1 Capacidade Nominal

A capacidade nominal indica a quantidade de energia que a bateria possui quando está completamente carregada. Ela mede a eficiência da bateria armazenar ou entregar energia carga e é expressa comumente em Ampere-hora (Ah). Estima quanto tempo em horas à bateria levará para descarregar com uma determinada corrente de descarga em amperes, ou seja, quanto maior a capacidade de armazenamento de energia da bateria, maior é sua autonomia.

Podemos avaliar a capacidade de uma bateria através da equação (1), utilizando um valor constante para corrente de descarga.

$$C = I \cdot t \quad (1)$$

Onde:

C = Capacidade nominal (Ah)

I = Corrente de descarga (A)

t = Tempo (h)

No entanto, muitas aplicações não descarregam a bateria de forma constante. E o modo como a bateria descarrega afeta diretamente a tensão de descarga e o tempo de duração. Como a corrente varia normalmente durante a descarga, utilizar a equação (1) para o cálculo da capacidade produzirá uma resposta errada. Dessa forma, a capacidade nominal da bateria é obtida integrando a corrente produzida pela bateria ao longo do tempo de descarga (PEREIRA, 2016).

2.2.3.2 Estado de Carga (SOC)

O estado de carga (SOC, do inglês, *State of Charge*) é o parâmetro utilizado para informar a carga restante de uma bateria. Ele varia entre 0% e 100% , onde em 0% a bateria está vazia e 100% completamente carregada. O estado de carga deve ser estimado com a maior precisão possível, uma vez que através dele é possível proporcionar um maior nível de proteção, evitando situações que coloquem a vida útil da bateria em risco.

2.2.3.3 Profundidade de Descarga (DOD)

O DOD (*Depth of Discharge*) é definido como a porcentagem de carga que é retirada da bateria em relação a sua capacidade total carregada em um ciclo de funcionamento.

2.2.3.4 Tensão de Circuito Aberto (VOC)

VOC é a tensão nos terminais de uma bateria quando a mesma não está carregando nem descarregando, ou seja, encontra-se em "repouso". Quando é aplicada por fonte externa uma tensão maior que a de circuito aberto nos terminais da bateria acontece o carregamento, caso a tensão seja menor a bateria descarregará.

2.2.3.5 Tensão de Corte

Tensão de corte é a menor tensão que uma bateria pode alcançar em operação. Descargas abaixo desse valor causam sulfatação na bateria, além de

outros danos e diminuição de sua vida útil. A tensão de corte é fornecida pelo manual do fabricante.

2.2.3.6 Tensão de Flutuação

Tensão de flutuação é a tensão que uma fonte externa pode aplicar indefinidamente à bateria sem qualquer dano a ela. Caso a bateria esteja totalmente carregada, a mesma ficará em estado de equilíbrio sem fornecer corrente à carga. É como se a bateria estivesse "flutuando", desconectada.

2.2.3.7 Resistência Interna

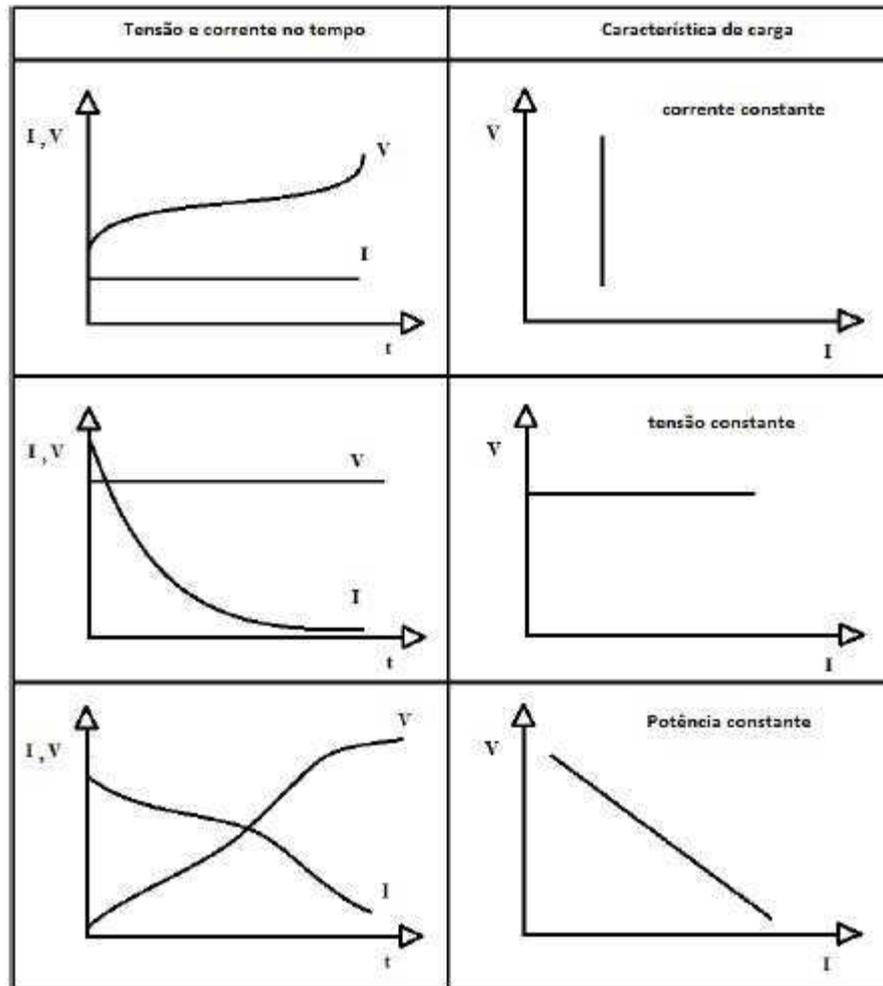
A corrente elétrica quando flui através da bateria encontra a resistência interna. Essa resistência depende de alguns fatores como: desenho da célula, idade, condição e construção. É por esse motivo que a tensão medida nos terminais entre as células é menor que a real. Aspectos como: descarga completa e profunda, temperatura e sulfatação aumentam a resistência interna da bateria.

2.2.4 Carga em baterias de chumbo-ácido

O modo como a bateria é carregada também influencia em sua vida útil e eficácia. Existem vários métodos de carregamento e a escolha de um deles depende da aplicação da bateria, tensão constante é o método mais aplicado (ARAUJO, 2017; PEREIRA, 2016).

Segundo (BASTOS, 2013), são cinco os métodos mais vistos na literatura: corrente constante tensão constante, potência constante, corrente pulsada e métodos mistos que alternam entre os outros métodos durante a carga. Na Tabela 2.2 são apresentadas as características dos métodos de carga.

Tabela 2.2: Características dos métodos de carga



Fonte: BASTOS, 2013.

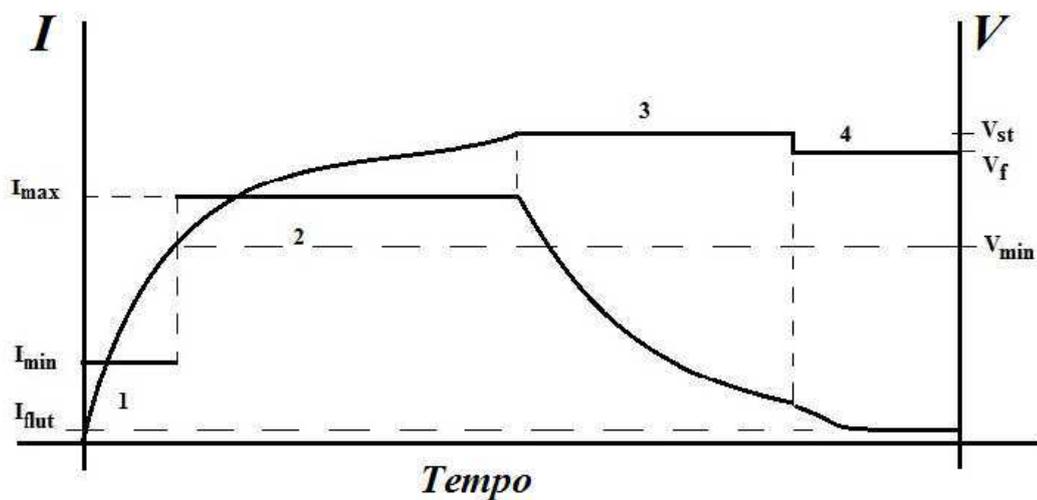
No método de tensão constante a tensão se mantém constante, enquanto a corrente varia durante a carga. Esse método deve ser utilizado apenas para curtos intervalos de tempo, em virtude de a corrente tender a alcançar valores elevados, exigindo monitoramento da temperatura para evitar superaquecimento (BASTOS, 2012). É um método que possui facilidade de implementação por isso é bastante utilizado para recarga de baterias estacionárias.

Já no método de corrente constante, que é o que apresenta melhor resultado, é injetada uma corrente limitada na bateria, enquanto se gerencia a tensão durante o carregamento, com a finalidade de evitar sobrecarga.

O método de potencia constante é indicado somente para pequenos intervalos de tempo com monitoramento da temperatura. Diferente do método tensão constante a potencia injetada nesse método aumenta com o carregamento. Desse modo, as perdas ôhmicas são maiores quando relacionada com o método de tensão constante (BASTOS, 2013).

No caso dos métodos mistos, o mais aplicado é o método a dois níveis de tensão, o qual se baseia na junção das características do método de tensão constante e corrente constante de forma alternada, com propósito de utilizar as melhores características de cada um (BASTOS, 2013). Na figura 2.7 é representado o método a dois níveis de tensão.

Figura 2.7: Método a dois níveis de tensão



Fonte: BASTOS, 2013

2.2.5 Limitador de carga/descarga

O processo de carga e descarga de uma bateria necessita de monitoramento para evitar que a bateria seja sobrecarregada ou descarregada além do adequado, para manter sua eficiência e garantir um longo período de vida útil. Quem faz o papel desse limitador é o controlador de carga. Proteção de sobrecarga e de descarga excessiva, gerenciamento do nível de carga e controle de recarga são funções desse equipamento.

2.3 MATLAB®

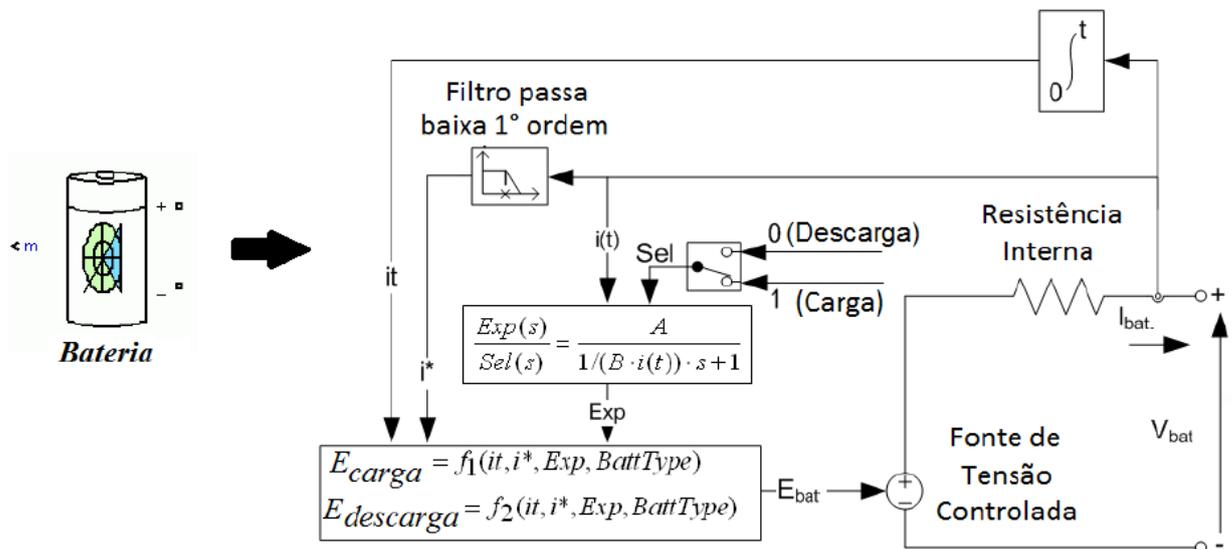
O MATLAB®, ferramenta pertencente à *MathWorks, Inc.*, é bastante empregado no meio acadêmico. Ele permite a realização de cálculos matemáticos, criação de gráficos, análise de dados e processamento de sinais.

O ambiente *Simulink* oferece vasta biblioteca, a qual pode ser utilizada para simulações e análises em teoria de controle, processamento digital de sinais e projetos na área elétrica, em razão disso e do contato que temos com ele durante a vida acadêmica, ele foi escolhido para a realização das simulações.

3 MODELAGEM DE CARGA E DESCARGA DA BATERIA

Neste capítulo é apresentada a modelagem de carga e descarga de uma bateria de chumbo-ácido através do sistema constituído por um modelo dinâmico genérico de bateria do *MATLAB/Simulink*, que representa os mais comuns tipos de baterias usadas na atualidade (PEREIRA, 2016). O circuito equivalente da bateria que o bloco modela é apresentado na figura 3.1.

Figura 3.1: Bloco e modelo da bateria disponível no *Simulink/MATLAB*



Fonte: BASTOS, 2013

O sistema simulado também é composto por uma carga variável, uma fonte DC e um controlador de carga e descarga da bateria.

3.1 CARGA

No modelo estudado cada de bateria sua característica relacionada ao fim de carga. Nas baterias de chumbo ácido, ao chegar à carga máxima a tensão aumenta abruptamente. Sendo essa característica modelada pela resistência de polarização. Essa resistência aumenta até o ponto em que a bateria está

aproximadamente carregada. Ao atingir esse ponto a i_t se iguala a zero e resistência de polarização subitamente (PEREIRA, 2016).

A resistência de polarização é dada pela seguinte equação:

$$\text{Resistência de polarização} = \frac{k_1}{i_t - 0,1.Q} \quad (2)$$

3.2 DESCARGA

O modelo estudado que, é o de Shepherd, modelada com precisão a dinâmica da tensão no momento que a corrente de descarga varia com o tempo (Pereira, 2016).

O comportamento de descarga da bateria de chumbo ácido é descrito pela equação:

Modelo de descarga ($i^* > 0$)

$$f_2(i_t, i^*, Exp) = E_0 - K_1 \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i^* - K_2 \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + L^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (3).$$

Onde:

$Exp(s)$ = Exponencial (V) ;

$Sel(s)$ = Representa o modo da bateria.;

$Sel(s) = 0$ durante a descarga da bateria,

$Sel(s) = 1$ durante a carga da bateria.

K_1 = Resistência de Polarização (Ω);

K_2 = Constante de polarização (V/Ah) ;

i^* = Dinâmica de corrente de baixa frequência (A);

i = Corrente da Bateria (A);

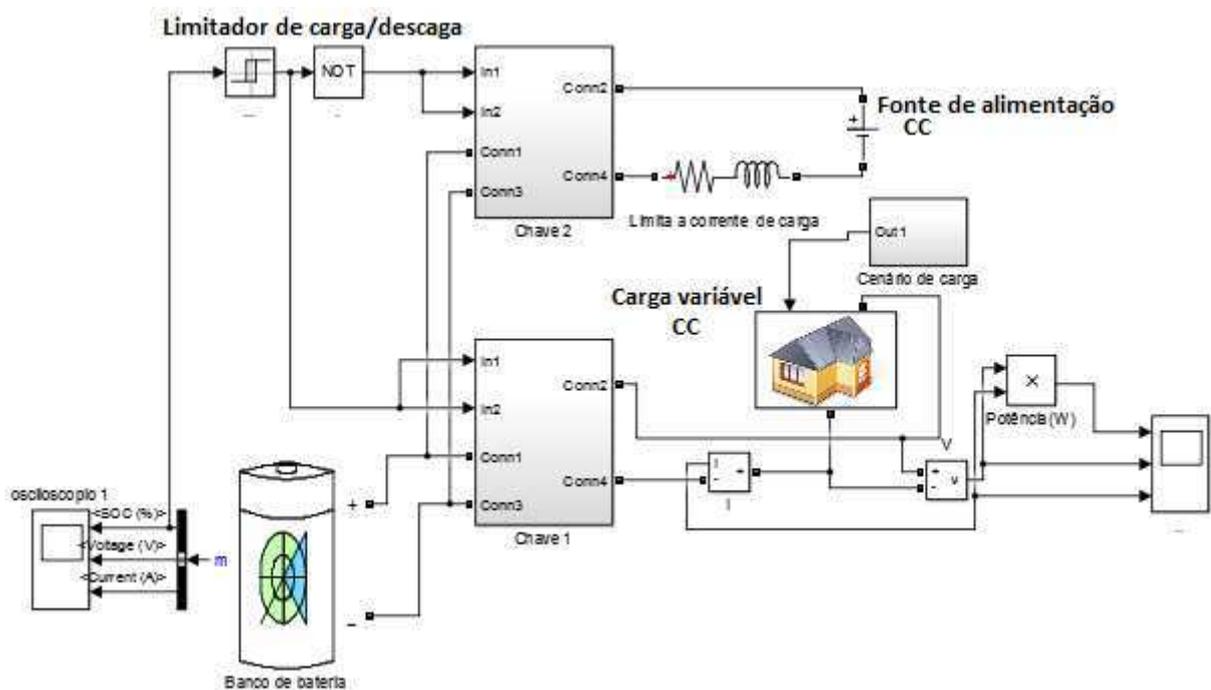
i_t = Capacidade extraída (Ah);

Q = Capacidade máxima da bateria (Ah).

3.3 SISTEMA SIMULADO

Para analisar carga e descarga da baterias foi implementado no *software MATLAB/Simulink* um sistema composto por bateria, carga e outros dispositivos complementares. Para resolução das equações de estado do sistema, as quais foram mostradas anteriormente, e maior rapidez das simulações foi utilizado o método de integração *ode23s stiff/mod.Rosenbrock* de 2ª ordem com tolerância relativa de 1ms.

Figura 3.2: Sistema simulado



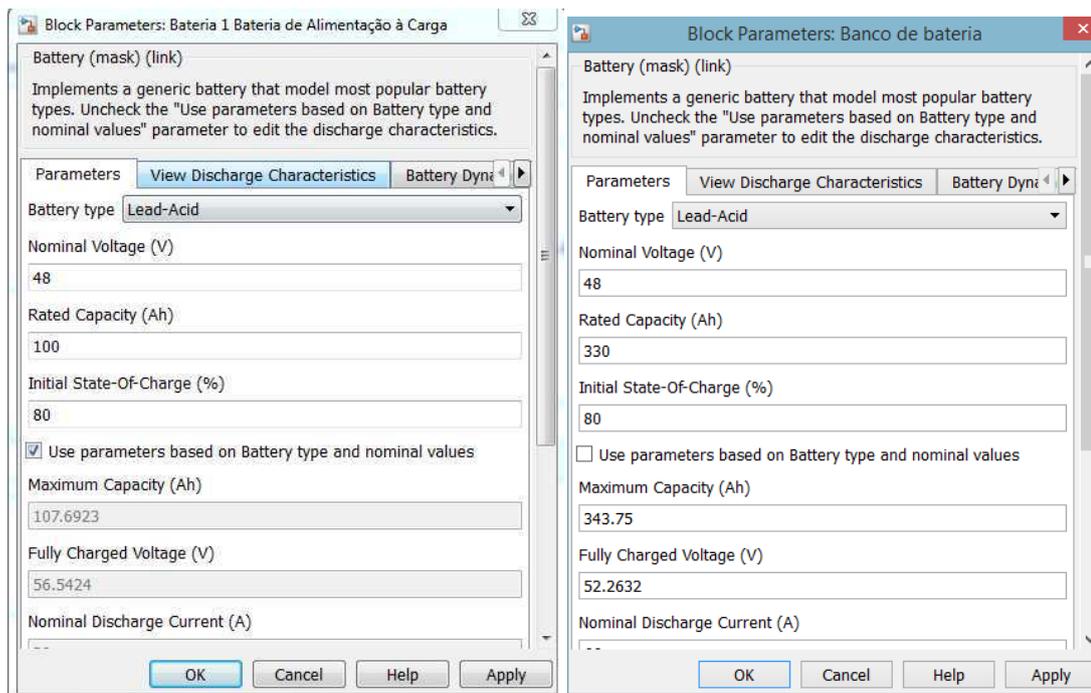
Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2016)

O sistema é constituído pelos blocos por nomeados de: 'Banco de bateria', 'Chave1', 'Chave 2', 'Carga CC variável', 'Limitador de carga/descarga', 'Fonte de alimentação' e 'Limitar de corrente de carga'.

Para compor o 'Banco de bateria' desse sistema foi utilizado apenas um bloco do elemento *Battery* pertencente à biblioteca do *Simulink*, em razão de, ao se fazer testes usando vários elementos para alcançar a configuração desejada não foi notado nenhuma diferença no comportamento da bateria.

Esse bloco conta com uma interface bastante didática que permite ajustes da bateria, deixando a configuração a critério do usuário. Os principais parâmetros são: tipo de bateria, tensão nominal, capacidade de corrente e SOC. Assim como é apresentado na figura 3.3.

Figura 3.3: Parâmetros de ajuste do bloco *Battery*



Fonte: A autora

O parâmetro estado inicial de carga (SOC) é de grande relevância para esse estudo. Ele é utilizado como condição inicial para simulação e pode ser variado de 0% a 100%. Quando a bateria estiver com SOC de 0% ela está totalmente descarregada e quando estiver com 100% ela estará completamente carregada.

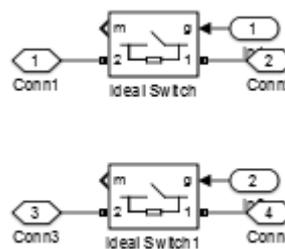
A seleção do item 'Usar Parâmetros com Base no Tipo de Bateria e Valores Nominais' possibilita a edição dos campos:

- Zona exponencial, Tensão (V), Capacidade (Ah);
- Capacidade (Ah) à tensão nominal;
- Corrente nominal de descarga (A);

- Resistência interna (Ω);
- Capacidade máxima (Ah);
- Tensão máxima de carga (V).

Os blocos Chave 1 e 2 controlam a comutação do carregamento do 'Banco de bateria' e do descarregamento do banco face a carga. Eles são compostos por duas chaves cada um, que podem tomar valores de gate entre 0 e 1, aberto e fechado respectivamente.

Figura 3.4: Bloco Chave 1 e 2

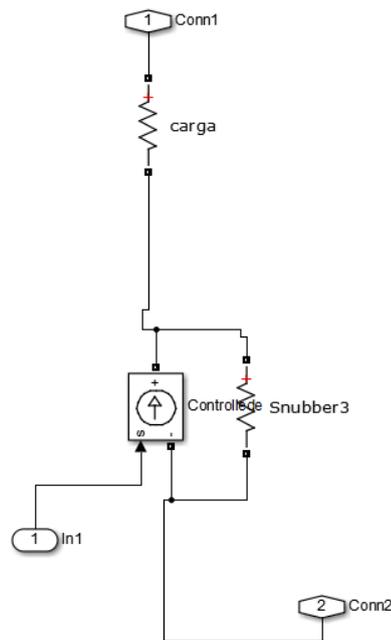
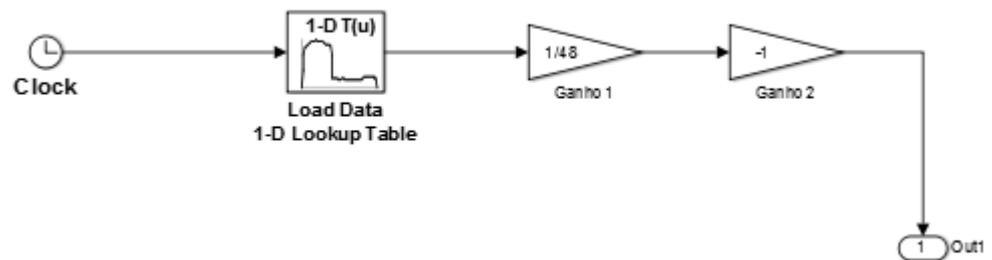


Fonte: A autora

A alimentação do '*Banco de bateria*' é feita com uma fonte de alimentação CC, o que caracteriza o método de carregamento de tensão constante.

O bloco 'Carga CC variável' é integrado por alguns competentes elétricos e o cenário de carga que traz o perfil de curva que se deseja simular. A figura 3.5 ilustra esses elementos.

Figura 3.5: Bloco 'Carga CC variável'



Fonte: A autora

O 'Limitador de carga/descarga' formado pelos blocos *NOT* e *Relay* permite estabelecer valores limites de SOC, tanto para carga, quanto para descarga do 'Banco de bateria'.

Para simular um cenário o mais próximo possível do real, tendo em consideração do uso de baterias na redução de picos demanda, seria necessário o sistema simulado conter outros elementos, como: rede, inversor, controlador de carga e conversores. Porém, para facilitar a criação do modelo e acelerar as simulações esses equipamentos não foram implementados. Ainda assim as simulações são válidas, dado que o trabalho visa observar a dinâmica das baterias na carga e descarga.

Figura 3.6: Configuração ideal de sistema



Fonte: A autora

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste capítulo serão apresentadas as simulações computacionais, estudo de caso e resultados obtidos envolvendo o sistema implementado no *MATLAB/Simulink* visto no capítulo anterior. Iremos observar o comportamento de carga e descarga da bateria de chumbo-ácido mediante algumas situações impostas.

O modelo simulado permite à configuração de características técnicas ligadas a bateria utilizada. A carga conectada a bateria pode ser modificada a partir de dados que configurem a curva de potência desejada, independente da tensão de alimentação da mesma. A fonte de tensão pode ser ajustada de acordo com as configurações de alimentação da bateria a ser carregada.

O sistema funciona da seguinte forma: o 'Banco de bateria' é descarregado pela carga até um limite de SOC pré-definido, quando esse SOC é alcançado a carga é desligada e a fonte entra carregando a bateria até o limite de SOC superior. Esse ciclo é repetido até o fim do tempo de simulação.

4.1 PERFIL DE CARGA

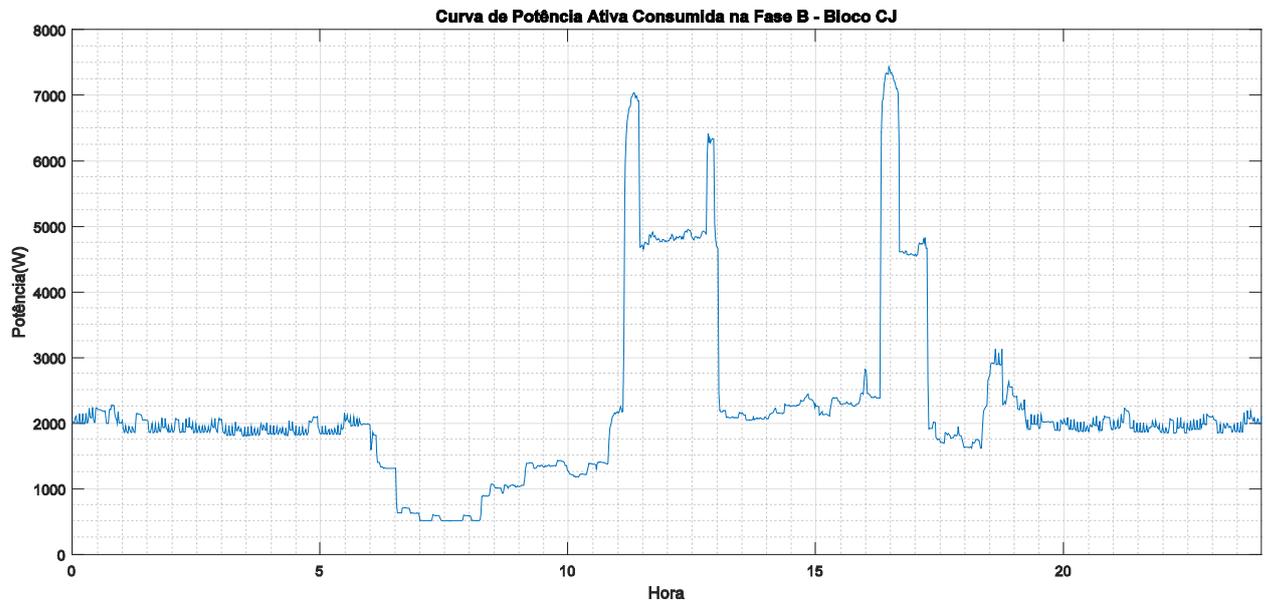
Para representar o perfil de carga diária, nas simulações foram usados dados coletados através do medidor de energia elétrica instalado no bloco CJ em consequência do projeto SCIKE Paraíba, que é uma parceria entre a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Universidade Federal da Paraíba, Prefeitura Universitária (UFCG) e empresas alemãs do convênio SCIKE. Esse medidor é capaz de medir potência ativa, reativa e fator de potência, os dados são enviados para um servidor na internet que os armazena (MEDEIROS, 2018).

Devido a algumas dificuldades e limitações do *software* foi considerado a curva de potência ativa de apenas uma fase do sistema trifásico instalado no bloco CJ.

A figura 4.1 é apresenta a curva de consumo de potência ativa do dia 23 de novembro de 2018 da fase B no bloco CJ. É possível observar que ocorre um

maior consumo de energia nos intervalos que vão 11 horas até 13 horas e 16h30min até 17h30min, totalizando um período de pouco mais de 6 horas.

Figura 4.1: Consumo de Potência Ativa na Fase B – Bloco CJ



Fonte: A autora

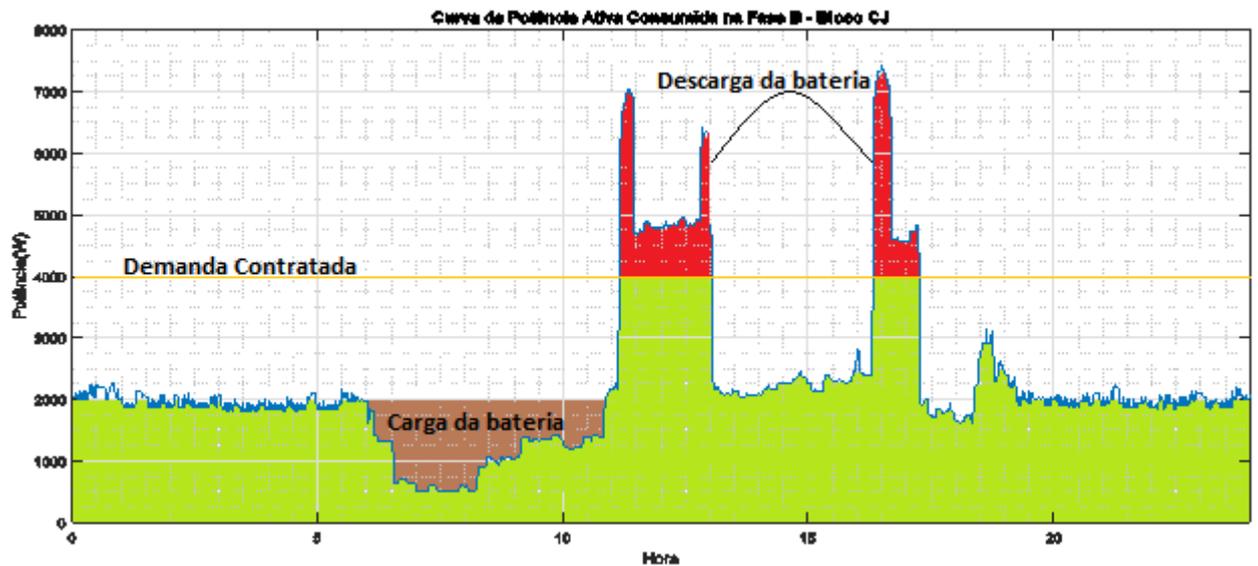
4.2 DEFINIÇÃO DE ESTUDO DE CASO

Nesse trabalho será realizado um estudo em cima da curva de carga citada. Como a UFCG é um consumidor diferenciado, segundo (MEDEIROS, 2018) pode ser classificado como Poder Público Federal, a tarifação também é calculada de forma diferenciada. Dessa forma seria possível usar SAEBS (Sistemas de Armazenamento de Energia com Baterias) de duas maneiras, para corte de pico e deslocamento de demanda.

Como os horários de maior consumo vistos na curva de carga da figura 4.2 estão fora do horário de pico da concessionária, que na Energisa Borborema (Energisa, 2017) compreende o período de 17h30min até 20h29min excluindo sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e feriados nacionais, esse caso será desprezado por não parecer impactar tanto nos

custos de energia e também pela falta de informação relacionada à tarifação. Por isso, as simulações aqui realizadas abordarão apenas o caso de corte de pico.

Figura 4.2: Curva de carga do bloco CJ com corte de pico



Fonte: A autora

4.2.1 Tarifação para consumidores de alta tensão

A Energisa pratica duas modalidades de tarifação para consumidores de alta tensão, consumidores classe A. São elas: tarifa azul e tarifa verde. Elas apenas diferem a forma como é calculada a demanda, porém custo de energia ativa, excesso de reativos e os todos os impostos são calculados da mesma maneira.

Figura 4.3: Tarifa horo-sazonal azul



Fonte: Perfectum Engenharia(Disponível em <http://www.perfectum.eng.br/PDF/Ponta.pdf>)

Figura 4.3: Tarifa horo-sazonal verde



Fonte: Perfectum Engenharia(Disponível em <http://www.perfectum.eng.br/PDF/Ponta.pdf>)

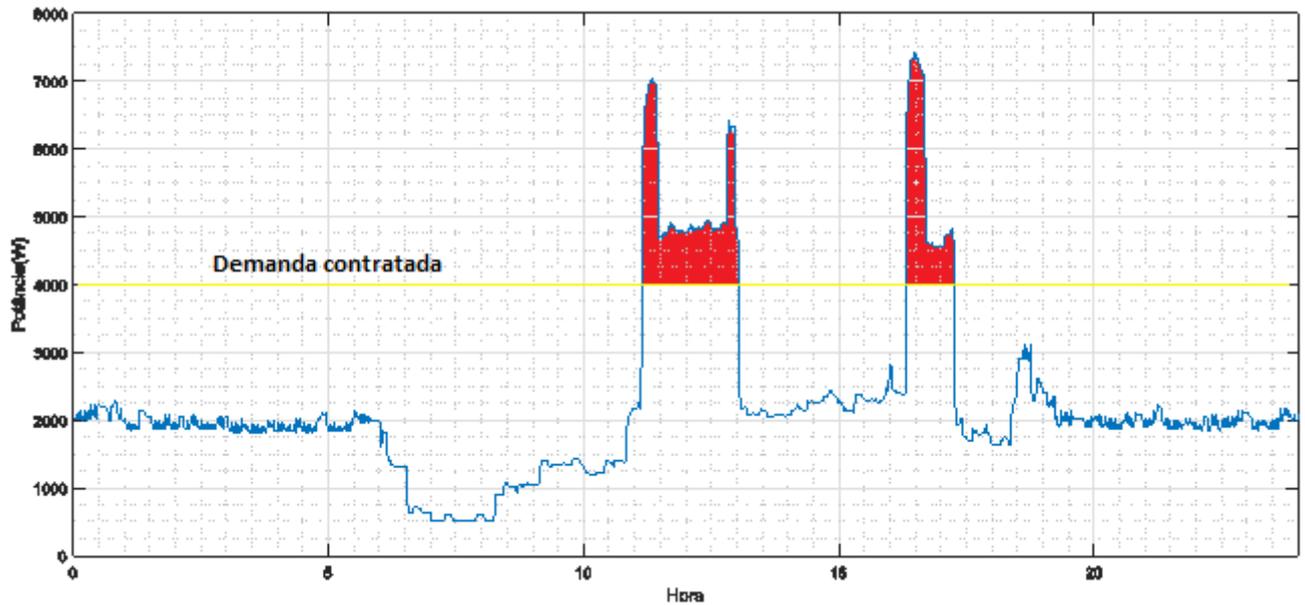
É então que entra a demanda contratada (dada em kW), que é a demanda ativa estipulada em contrato entre cliente e distribuidora, a qual deve ser entregue de forma contínua ao consumidor, que por sua vez paga a mesma integralmente usando a ou não durante o período de faturamento. Sendo assim, existe energia ociosa, sendo paga sem uso.

No caso da demanda medida ser maior que a contratada, seja em horário fora de ponta ou não é aplicado um custo adicional chamado, *demanda de ultrapassagem*. Segundo (MEDEIROS, 2018) o valor a ser pago para cada kW excedido é três vezes maior. Em alguns casos os custos mensais de um consumidor inserido em algum desses tipos de modalidades de tarifação chegam a ser bem consideráveis, por isso o uso de baterias ajudaria a cortar o pico de demanda excedente e conseqüentemente baratear a conta de energia.

Como não se tem a informação sobre a demanda contratada pela UFCG e muito menos a demanda contratada do bloco CJ, estipulou-se um valor de 4kW , apenas para fins de cálculo do banco de bateria. As figuras 4.4 e 4.5 apresentam a curva de carga do bloco CJ antes e depois do corte de pico.

- Sem baterias

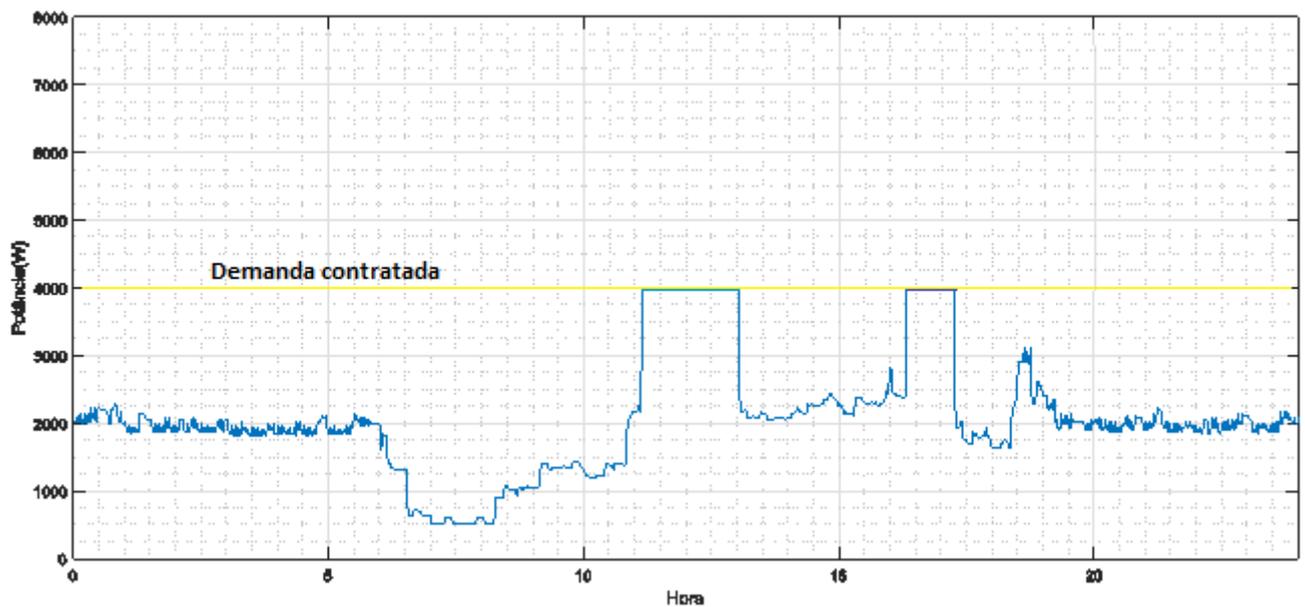
Figura 4.4: Curva de carga sem bateria



Fonte: A autora

- Com baterias

Figura 4.5: Curva de carga com bateria



Fonte: A autora

4.3 BANCO DE BATERIAS

Os dados das baterias utilizados nas simulações e dimensionamento foram obtidos a partir do manual do fabricante da bateria de chumbo-ácido 12MF105 MOURA, e encontra-se na Tabela 4.1. Sendo essa bateria desenhada para ciclagem em altas temperaturas. Para esse modelo de bateria o fabricante recomenda recarga com tensão constante e corrente variável, usando carregadores inteligentes. Sendo a corrente máxima de 25% da capacidade nominal da bateria (MOURA). Contudo, em casos excepcionais pode ser usado o método de corrente constante, desde que se obedeça às seguintes considerações:

- A tensão de recarga não deve ultrapassar 14,1V/monobloco;
- A corrente máxima de carga não pode extrapolar 10% da capacidade da bateria.

Tabela 4.1: Dados operacionais da bateria 12MF105

	Chumbo-ácido
Tensão Nominal	12 V
Capacidade	105 Ah
Corrente máxima de carga	26,25 A
Tensão de Flutuação	13,8V +/- 0,2 V a 25°C
Tensão de Recarga	14,40 +/- 0,1 V a 25°C
Tensão de Corte	10,5 V
Vida Útil em Flutuação	4 anos

Fonte: MOURA

4.3.1 Dimensionamento do banco de baterias

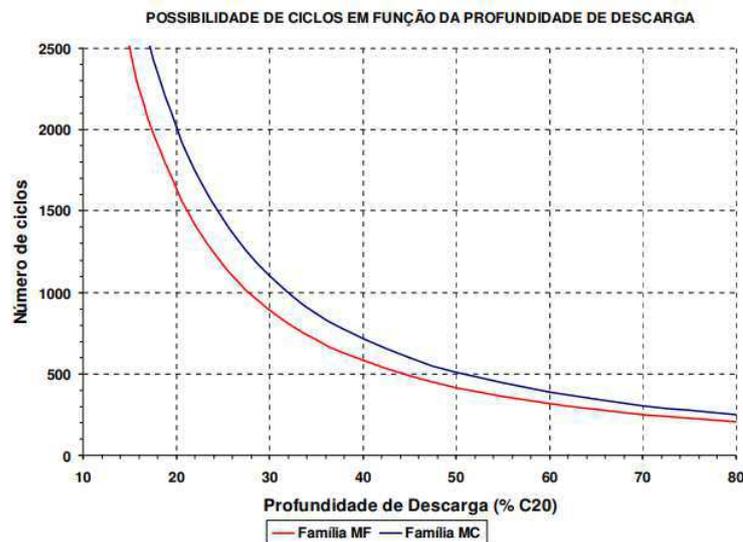
O dimensionamento do banco de baterias para atender as situações de pico da carga apresentada anteriormente, foi feito com objetivo de otimizar ao máximo a expectativa de vida das baterias.

O critério utilizado no dimensionamento foi estabelecido como aquele em que a bateria entrega a maior quantidade de energia no decorrer de sua vida útil. Diante disso, cada banco de bateria foi dimensionado de modo que sua expectativa de vida em operação cíclica, ou seja, com uma frequência acentuada de descargas profundas seja muito próxima da expectativa de vida em flutuação (operação *Stand-by*), como sugere (CAMARGO, 2014).

Para estabelecer o dimensionamento foi utilizada a Figura 4.6 que relaciona o número de ciclos com a profundidade de descarga da bateria. Essa informação permite calcular, segundo fabricante, quantos ciclos a bateria deveria suportar até o fim de sua vida útil.

Na Figura 4.6 é possível observar que quanto menor a profundidade de descarga, maior o número de ciclos a bateria pode oferecer até o fim de sua vida útil. Lembrando que o banco de baterias deve sofrer apenas uma descarga diária.

Figura 4.6: Número de Ciclos em Função da Profundidade de descarga

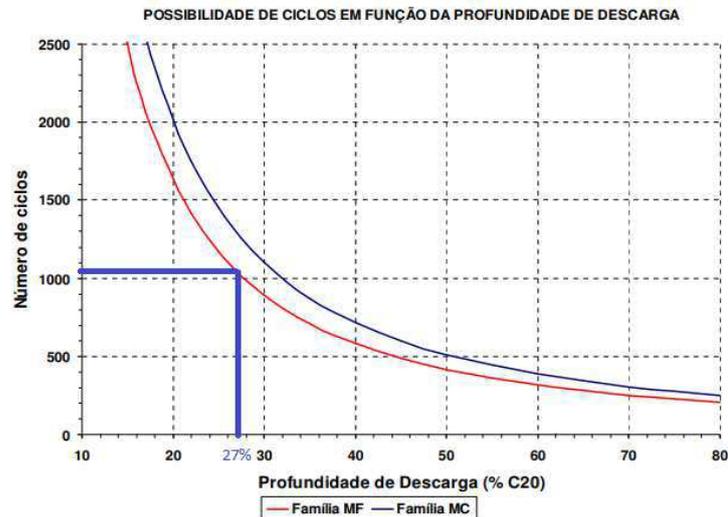


Fonte: MOURA, 2018

Nos cálculos foi considerado o número de dias no ano sem finais de semana (aproximadamente 260) em que a bateria sofreria descargas, bem como o tempo de vida útil mencionado pelo fabricante, no caso 4 anos. Logo, para atender o critério de dimensionamento, o número de ciclos será de 1040 (260 ciclos por ano

vezes 4). Correlacionando esse número de ciclos com a curva da família MF (em vermelho na figura 4.7), encontramos a profundidade de descarga ideal de aproximadamente 27%, a figura 4.7 apresenta esse valor.

Figura 4.7: Ciclos em função da profundidade de descarga bateria



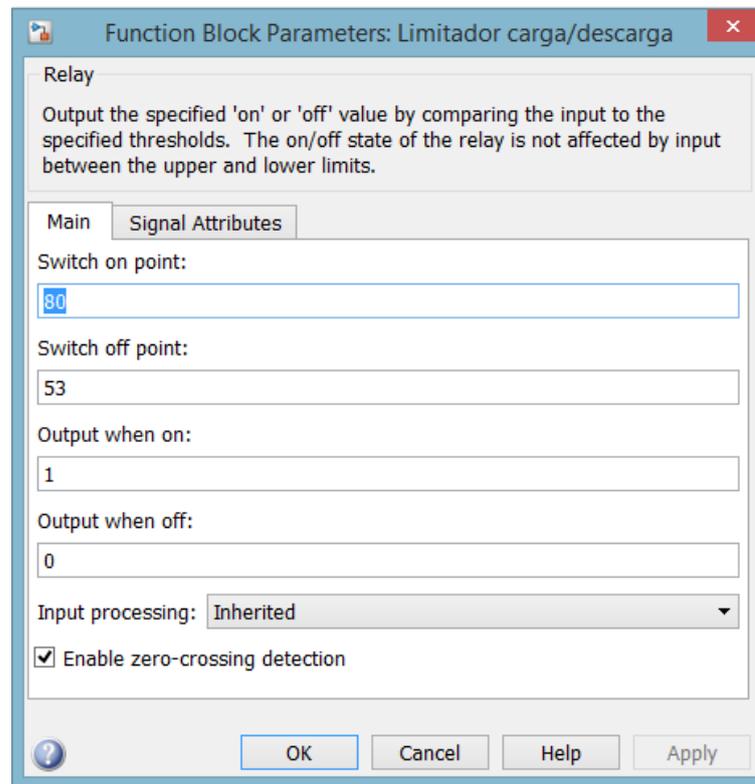
Fonte: adaptada de (MOURA 2018)

A energia que pode ser fornecida por esse tipo de bateria, em ciclagem, para a profundidade de descarga de 27% é: $105 \text{ Ah} \times 12 \text{ V} \times 1040 \times 0,27 = 353,808 \text{ kWh}$. Já energia máxima que uma bateria desse tipo pode fornecer em um ciclo será: $105 \text{ Ah} \times 12 = 1,26 \text{ kWh}$, porém para a profundidade de descarga de 27% a energia será $340,2 \text{ Wh}$.

4.4 QUANTIDADE DE BATERIAS NECESSÁRIAS PARA ANTENDER A POTÊNCIA EXCEDIDA

O cálculo da quantidade de bateria foi feito através de simulação no software *MATLAB/Simulink*, seguindo o critério de otimização dos ciclos de vida da bateria, ou seja, da profundidade de descarga máxima do 'Banco de bateria' ser de 27%, que por sua vez é limitada pelo bloco 'Limitador de carga/descarga'. Ao chegar ao SOC de 53% a chave que alimenta a carga abre, desconectando a mesma da bateria.

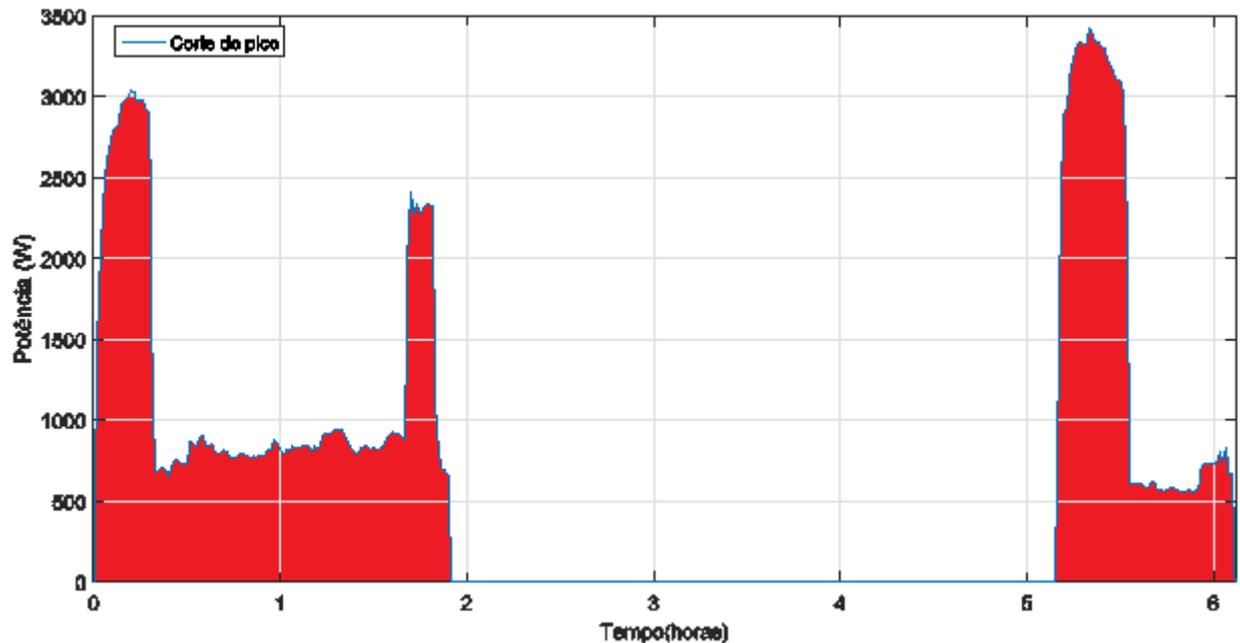
Figura 4.8: Parâmetros do bloco que compõe o limitador de carga/descarga



Fonte: A autora

Para o cálculo foi feito um corte na curva de carga estudada a partir dos 4 kW estipulado como pode ser visto figura 4.4 de forma a usar apenas a potência excedida para a descarga da bateria. Uma nova curva de carga é encontrada como é possível observar na figura 4.9.

Figura 4.9: Curva de carga da demanda excedente



Fonte: A autora

Por meio das simulações foi possível observar que para suprir a potência excedente seria necessário um banco de bateria com capacidade de 315 Ah. O que leva a um arranjo de 3 fileiras de baterias, cada uma com 4 baterias em série para se obter 48V e 315 Ah, chegando ao total de 12 baterias de 105 Ah e 12 V.

É válido destacar que na simulação foi usado apenas um bloco de bateria que foi considerado equivalente ao banco encontrado anteriormente, tendo em vista que foi testada a configuração de banco e o mesmo se comportou igualmente ao bloco com mesmos parâmetros.

4.5 SIMULAÇÃO PARA CORTE DE PICO COM SAEB

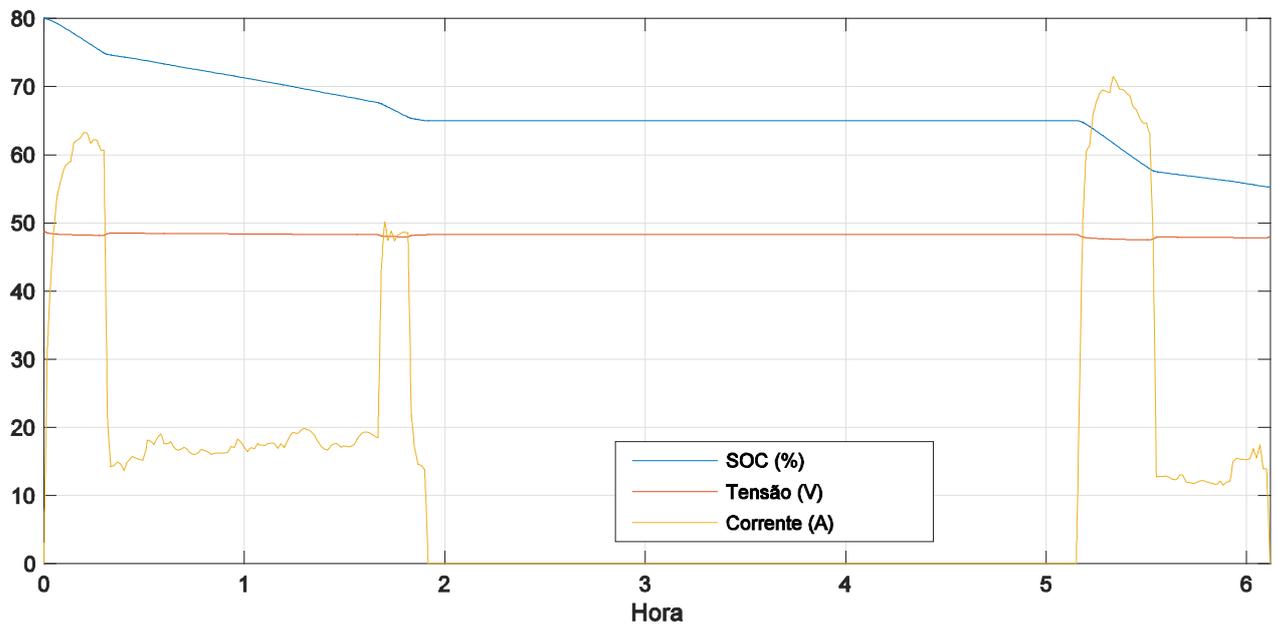
Na simulação computacional é possível observar o comportamento da bateria, na carga e descarga sendo considerados os parâmetros calculados anteriormente e vistos na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros do banco de bateria

Tensão	48	V
Capacidade de Corrente	315	Ah
Limite superior SOC	80	%
Limite inferior SOC	53	%

Fonte: A autora

Figura 4.10: Comportamento dos parâmetros da bateria na descarga



Fonte: A autora

O bloco *Battery*, após a simulação, retorna três parâmetros que definem o comportamento da bateria na carga e descarga, são eles: SOC, tensão e corrente.

No gráfico da figura 4.10 a linha azul representa o SOC, a laranja a tensão e amarela a corrente na bateria. No tempo de ocorrência do pico que dura pouco mais de 6 horas é possível ver o comportamento da bateria através dos parâmetros citados acima.

4.5.1 Comportamento do SOC

Observe que neste no início da simulação SOC mostra uma descarga mais rápida devido o primeiro pico ter uma potência alta. Logo depois ele cai quase que constante até curva chegar a zero e a bateria não precisar mais suprir a carga. É possível ver que o SOC estabiliza em 55%, 2% a mais do que o limite inferior de SOC desejado. Isso mostra que o 'banco de bateria' calculado atende a carga sem ultrapassar o valor estipulado de profundidade de descarga.

4.5.2 Comportamento da tensão na bateria

Na figura 4.10 verifica-se que a tensão no banco de bateria sofre uma leve variação nos períodos de descarga, oscilando entre 48,7 V e 47,5 V. Valores esses bastante aceitáveis já que a carga é alimentada com 48 V.

4.5.3 Comportamento da corrente na bateria

A corrente na bateria segue o comportamento da curva de carga. Tendo em vista que a bateria descarrega de acordo com a curva de potência, quando a potência da carga é maior, a corrente solicitada ao do banco também é. O maior valor de corrente de descarga é de 71,45 A.

4.5.4 Carregamento da bateria

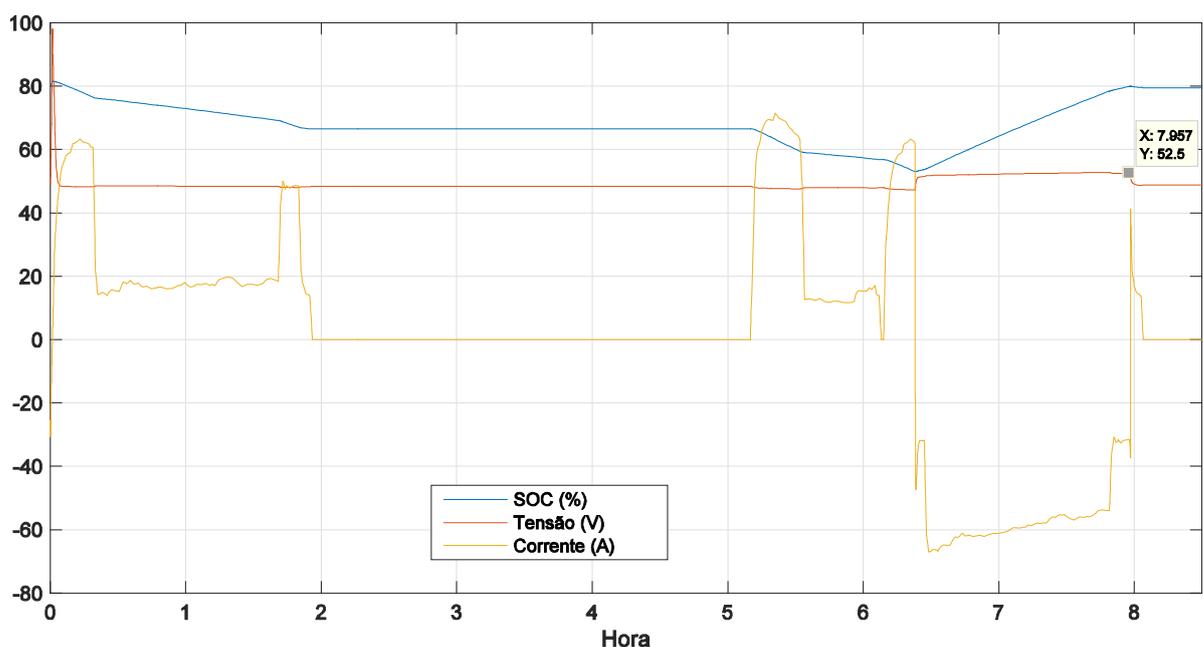
A forma como a bateria é carregada também influencia no seu tempo de vida útil, por isso, é importante usar controladores de carga para que ela seja carregada da forma mais eficiente possível. Nesse estudo, para simplificar a construção do modelo não foi usado controlador de carga, apenas um limitador, define limites para o SOC da bateria, controlando apenas a profundidade de descarga.

Como a região Nordeste, onde se encontra a UFCG, tem uma ótima incidência solar o uso de sistema fotovoltaico para carregar as baterias seria uma opção. Porém, observando o perfil de carga estudado percebe-se que o horário de maior irradiação solar da região bate com o intervalo do horário que ocorre os picos de consumo. Logo, carregar o banco de bateria nesse mesmo horário não seria possível, já que o mesmo teria que estar pronto para ser descarregado. O ideal seria carregar a bateria em horários de energia ociosa.

No caso da curva de carga do bloco CJ, a partir da 20 horas e antes das 10 horas da manhã a potência consumida é praticamente constante, ficando muito abaixo da demanda contratada estipulada. Em função disso, esse seria o melhor horário para recarga do banco de bateria, utilizando a própria energia da distribuidora, que nesta simulação equivale à fonte de tensão CC.

A carga da bateria do sistema simulado foi feita com o método de tensão constante, como é convencionado pelo fabricante (MOURA). Para simular a carga após um ciclo de uso duplicou-se a curva da figura 4.9 para que quando a bateria alcançasse o SOC de 53% ela prontamente começasse a carregar fora horário de pico. A figura 4.11 apresenta o comportamento da tensão, corrente e SOC na bateria.

Figura 4.11: Comportamento dos parâmetros da bateria na carga



Fonte: A autora

Note que quando a bateria começa a carregar ela leva aproximadamente 2 horas para alcançar a carga total. A tensão varia entre 51 V e 52.3 V valores que estão dentro da recomendação de +/- 0,1V da tensão de recarga que é para o conjunto de baterias é de 55,2 V. Já a corrente quando a bateria está recarregando, prontamente fica negativa alcançando um valor máximo de - 67 A, o que também fica dentro dos parâmetros estipulados pelo fabricante onde a corrente de carga máxima pode ser de 25% da capacidade da bateria, considerando um conjunto com 8 baterias.

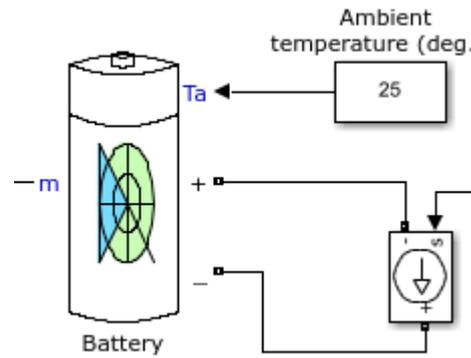
4.5.5 Discussão dos resultados

Diante dos resultados apresentados nas sessões anteriores, constatou-se que o sistema simulado pode ser usado para avaliar o comportamento de baterias diante de cargas variáveis, com a possibilidade do uso de dados referentes a curvas de potência reais.

Como já foi dito, para facilitar à construção do modelo simulado, a carga foi considerada CC e com alimentação de 48 V. Entretanto, a alimentação pode ser mudada no bloco 'cenários de carga', e configurada de acordo com a tensão desejada.

A temperatura influencia diretamente no tempo de vida útil das baterias, no entanto o "software" tem limitações e não leva em consideração esse aspecto em três tipos de baterias que ele modela. Essa análise apenas pode ser feita quando se usa o tipo de bateria *Lithium-Ion*, que também possibilita simular o efeito do envelhecimento. Dessa forma análise se tornaria mais completa.

O corte de pico nesse estudo foi feito manualmente mediante do tratamento dos dados relativos à curva de potência utilizada, mas com estudos mais aprofundados, ou mesmo utilização de outros softwares é possível efetuar esse corte assim que a o pico ultrapassar a demanda contratada.

Figura 4.12: Bloco *Battery* com parâmetro de temperatura

Fonte: *MATLAB/Simulink*

O ato que relaciona ciclos de carga/descarga com profundidade de descarga na curva número de ciclo versus profundidade de descarga para achar uma porcentagem máxima de descarga que garanta um maior tempo de vida útil da bateria, aparentemente pode ser eficiente, porém, precisa ser comprovada experimentalmente.

5 CONCLUSÃO

Diante do aumento da procura energética, o armazenamento de energia por meio de baterias vem se tornando uma temática cada vez mais atual. Por isso, o estudo do uso eficiente de baterias se torna importante frente ao aumento significativo de aplicações, sejam elas em sistemas integrados com a rede elétrica ou não.

No decorrer do trabalho foi visto que para o caso do perfil de carga estudado existia uma inviabilidade na ocorrência de usar um sistema fotovoltaico para o carregamento do banco de baterias, entretanto, esse é apenas um tipo de perfil. Existem vários perfis de carga que podem se comportar de forma diferente, viabilizando o uso desse tipo de geração de energia, que atualmente só faz crescer.

Com relação à tensão na carga, foi constatada uma pequena variação, porém dentro dos parâmetros aceitáveis. Já a variação na potência da carga teve uma pequena oscilação, como era se esperar.

Como a bateria utilizada na simulação não tem memória, ou seja, a cada ciclo ela volta a sua plena condição, não foi possível fazer simulações para um horizonte maior de ciclos de carga e descarga.

Outro fator que foi desprezado nas simulações foi efeito da temperatura, que em casos reais afetam consideravelmente o tempo de vida da bateria.

É indiscutível que existem vantagens e desvantagens para uso de SAEBs. Muitas vezes pode não ser economicamente viável a implantações para corte de pico ou deslocamento de carga. No entanto, a implantação desses sistemas, tanto para o caso de poder público como para consumidores industriais pode vir a se tornar fundamental em diversos níveis do SEP brasileiro, principalmente com o avanço das tecnologias implementadas em novos tipos de baterias que a cada dia aumentam mais seu poder de armazenamento.

5.1 TRABALHO FUTUROS

É evidente que muitos estudos ainda precisam ser feitos para se obter uma abordagem mais precisa do uso de baterias de forma eficiente no deslocamento de carga ou corte de pico. Dentre algumas sugestões de trabalho futuros estão:

- Comparar resultados encontrados na simulação com experimentais;
- Estudo de outros tipos de curvas de consumo referentes a diferentes classes de consumidores;
- Viabilidade econômica frente a um horizonte de maior de tempo;
- Readaptação do modelo com inserção de controlador de carga, interligação com rede de distribuição e sistema fotovoltaico. Introdução de equipamentos como inversor e conversor que permitam uma dinâmica mais completa de um cenário real;
- Estudo e implementação de equipamentos e que identifiquem o pico assim que ele ocorra impedindo a ultrapassagem de demanda, e conseqüentemente multas;
- Modelagem com outras tecnologias de baterias alternativas à de chumbo ácido.
- Implementação de outros métodos de carga, visto que o utilizado pode elevar a corrente a níveis muito altos e conseqüentemente aumentar a temperatura, levando a bateria a aquecimento exagerado.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, Danielly Norberto. **Sistema de Monitoramento de Baterias Carregadas por Painéis Solares**. Campina Grande, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2017.

BASTOS, Renan Fernandes. **Sistema de Gerenciamento para Carga e Descarga de Baterias (Chumbo-Ácido) e para Busca do Ponto de Máxima Potência Gerada em Painéis Fotovoltaicos Empregados em Sistemas de Geração Distribuída**. São Carlos, 2013. Dissertação (Mestrado) - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2013.

BATTERY. Disponível em: <<http://www.battery.co.za>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

BATTERY. **Mathworks**. Disponível em: <<https://fr.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/battery.html>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

FERREIRA, Douglas Silva Nunes. **Estudo Comparativo Entre Modelos Computacionais e Resultados Experimentais na Carga e Descarga de Baterias de Chumbo-Ácido**. Alegrete, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica.) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA, 2015.

FREEDOM. **Manual Técnico Bateria estacionária**. 2018.

M. DELL, Ronald; A. J. RAND, David. **Understanding Batteries**. Reino Unido, 2001.

O. Tremblay and L. A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications," *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 289–298, 2009.

MEDEIROS, Yuri Loia de. **Quantificação do Consumo de Energia**. Campina Grande, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, 2018.

Mundo e Educação. **Pilha de Alessandro Volta**. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/pilha-alessandro-volta.htm>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

OLIVEIRA FARIAS, Hércules Eduardo. **ANÁLISE TÉCNICA DO IMPACTO DO USO DE BATERIAS EM SISTEMAS CONECTADOS À REDE APLICADO EM DIFERENTES CLASSES DE CONSUMO**. Santa Maria. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA, 2018.

PEIXOTO, Rafael Lima. **Monitoramento da Descarga de Bateria com o Uso de Microprocessador ARM**. Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso () - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

PEREIRA, Nuno Miguel Couto. **Simulação de Regimes de Carga e Descarga em Baterias**. Lisboa, 2016. Dissertação (Mestrado) - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, 2016.

PILHA de Volta. **Wikipédia**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pilha_de_Volta>. Acesso em: 19 nov. 2018.

Renewable Energy Agency. Disponível em: <<http://www.renewableenergyagency.com/>>. Acesso em: 28 nov. 2018