

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Rômulo Navega Vieira

**Estudo de um Conversor CC-CC Bidirecional na
Conexão de uma Microrrede CC a um
Dispositivo de Armazenamento**

João Pessoa

2019

Rômulo Navega Vieira

**Estudo de um Conversor CC-CC Bidirecional na Conexão
de uma Microrrede CC a um Dispositivo de
Armazenamento**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal da Paraíba como exi-
gência para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Nady Rocha

João Pessoa

2019

© Rômulo Navega Vieira

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V658e Vieira, Rômulo Navega.

Estudo de um Conversor CC-CC Bidirecional na Conexão de
uma Microrrede CC a Dispositivo de Armazenamento /

Rômulo Navega Vieira. - João Pessoa, 2019.

75 f. : il.

Orientação: Nady Rocha.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Conversor estático CC-CC. 2. Banco de baterias. 3.
Fonte de energia renováveis. I. Rocha, Nady. II. Título.

UFPB/BC

Rômulo Navega Vieira

Estudo de um Conversor CC-CC Bidirecional na Conexão de uma Microrrede CC a um Dispositivo de Armazenamento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Paraíba como exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. João Pessoa, 03 de Maio de 2019:

Prof. Dr. Nady Rocha
Orientador

Prof. Dr. Lucas Vinícius Hartmann
Avaliador 1

Prof. Dr. Fabiano Salvadori
Avaliador 2

João Pessoa
2019

Agradecimentos

Ao meu querido pai, minha fonte de inspiração, paz, serenidade e paciência. Levo comigo todos os seus ensinamentos diários e sua incrível companhia. Agradeço a ti por tudo, por acompanhar e me guiar em todos os passos da minha vida.

À minha amada mãe por sempre acreditar e confiar em mim. Os meus melhores sentimentos à esta pessoa, pois sem ela, eu jamais teria conseguido trilhar esta jornada. Agradeço por sempre me proporcionar o melhor, por lutar pelas minhas causas e por todo carinho a mim dedicado.

Ao meu irmão Yuri, por ser meu suporte. Você é o exemplo de que irmandade não precisa haver muitas falas, pois poucas palavras já dizem tudo. Você é uma pessoa muito especial para mim e desejo a você, o maior dos espetáculos que a vida tem a oferecer. Conte comigo para tudo.

À Thaine por todo o amor. Se fez presente em toda minha vida acadêmica, foi sem dúvida uma pessoa fundamental. Agradeço a você por todo carinho e atenção, por sempre estar ao meu lado nos bons e maus momentos, me ajudando e me fazendo enxergar o lado bom em todas as coisas da vida. Que este trabalho seja apenas mais uma de nossas vitórias juntos.

Sou imensamente grato ao professor Nady por ter estado sempre disponível, com toda a paciência do mundo, para me auxiliar desde a idealização inicial ao desenvolvimento deste trabalho. Sem ele, nada teria sido possível.

Por último, agradeço aos meus amigos que vibraram com as minhas conquistas até aqui como se fossem próprias. Sou grato pelo tempo que cada um dedica a mim diariamente, pelas palavras de apoio e conforto quando necessárias e pelo entusiasmo de sempre. Um agradecimento especial a Alan, Ribeiro, Beco, Savio e Lucas. Foram indispensáveis durante toda minha jornada acadêmica. Desejo a vocês muitas noites de sono dormidas, que faltaram nesses anos de curso. Tem que respeitar nossa historia!

*“Algumas vezes você ganha, outras vezes você aprende.
(Autor desconhecido)*

Resumo

A geração de energia fotovoltaica é uma das formas de produção de energia limpa que mais se desenvolve no mundo. No entanto, como qualquer fonte de energia que compõe a matriz energética do planeta, a geração de energia a partir dos raios solares também apresenta problemas. Como a incidência de raios solares sob as placas fotovoltaicas varia durante o dia, é necessário manter o fornecimento de energia menos variável. Neste trabalho, utiliza-se de uma versão do tipo conversor CC-CC *Full-Bridge* bidirecional com capacitores de entrada acoplados que atue como controlador de carga. A função deste conversor será estocar o excedente de energia nas baterias em momentos de elevada geração e utilizar esta energia em momentos de baixa produção para manter a tensão na microrrede CC dentro dos limites estipulados. Inicialmente, serão exibidos alguns modelos de conversores CC-CC, modelos elétricos equivalentes e métodos de carga de uma bateria. Em seguida, discute-se o dimensionamento de componentes para um exemplo de projeto e implementa-se a simulação do conversor CC-CC bidirecional para comprovar a análise realizada. Para controle do sistema, serão utilizados controladores do tipo PI implementados digitalmente.

O trabalho apresenta desde da teoria conceitual aos resultados fornecidos por simulação digital. Foi possível verificar o comportamento operacional da sistema de forma estável e comprovando a importância de sua implementação.

Palavras-chave: Microrrede CC, Controlador de carga, Banco de baterias, Geração fotovoltaica.

Abstract

The photovoltaic energy generation is a clean energy matrix increasingly developed around the world. However, as any other energy matrix in the world, the generation of energy from sunlight faces a few problems. Since the solar incidence on the photovoltaic panels varies throughout the day, it is necessary to maintain the energy more stable. This research proposes a version of the *Full-Bridge* bidirectional DC-DC converter with jointed input capacitors that works as a charge controller. The objective of this converter is to storage the excess of energy on the batteries in moments of high generation of power and use it in moments of low production, to maintain the DC micro-grid tension in the limits stipulated. Initially, a few models of DC-DC converters will be exhibited, equivalent electrical models and methods of battery charge. Afterwards, the dimensioning of components for an example design is discussed and the simulation of the bidirectional DC-DC converter is done to confirm the analysis performed. For system control, it will be used digitally implemented PI controllers.

The work presents from the conceptual theory to the results provided by digital simulation. It was possible to verify the operational behavior of the system in a stable manner, proving the importance of its implementation.

Keywords: DC-DC Micro-Grid, Charge Controller, Battery Bank, Photovoltaic Generation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Conceito de Geração Distribuída	29
Figura 2 – Configuração de um sistema experimental em laboratório.	32
Figura 3 – Topologias básicas dos conversores CC-CC: (a) conversor <i>Buck</i> e (b) conversor <i>Boost</i>	34
Figura 4 – Diagrama de blocos de uma micro-rede CC.	35
Figura 5 – Conversor <i>Push-Pull</i>	37
Figura 6 – Conversor <i>Half-Bridge</i> ou meia ponte.	39
Figura 7 – Conversor <i>Full-Bridge</i> ou ponte completa.	40
Figura 8 – Conversor <i>Full-Bridge</i> ou ponte completa não-isolado escolhido.	42
Figura 9 – Elementos básicos de uma bateria.	43
Figura 10 – Modelo elétrico simplificado.	45
Figura 11 – Modelo elétrico de primeira ordem.	46
Figura 12 – Modelo elétrico equivalente de Thévenin.	46
Figura 13 – Modelo elétrico de carga e descarga.	47
Figura 14 – Curvas de corrente e tensão no processo de recarga da bateria com método de tensão constante e corrente limitada.	49
Figura 15 – Sistema proposto do conversor CC-CC <i>Full-Bridge</i> e Banco de baterias.	51
Figura 16 – Características de auto descarga da bateria EVH 12240	54
Figura 17 – Circuito utilizado para obter o valor da capacitância para modelo das baterias.	56
Figura 18 – Modelo elétrico equivalente do banco de baterias.	57
Figura 19 – Estratégia de modulação.	59
Figura 20 – Fluxograma de controle para ações do conversor CC-CC bidirecional <i>Full Bridge</i>	64
Figura 21 – Esquemático de controle.	65
Figura 22 – Circuito equivalente do conversor bidirecional utilizado para modelagem orientada ao controle de corrente.	66
Figura 23 – Circuito equivalente utilizado para a modelagem orientada ao controle de tensão v_{Bat}	67
Figura 24 – Sistema utilizado para simulação de carga e descarga do banco de baterias.	69
Figura 25 – Circuito utilizado para simulação do sistema.	71
Figura 26 – Curvas de corrente e tensão do banco de baterias.	72
Figura 27 – Mudança do modo de operação do conversor de 1 para 2.	73
Figura 28 – Modo de operação do conversor em 3 e mudança de operação do con- versor de 3 para 4.	74
Figura 29 – Curvas de tensão do barramento CC e banco de baterias.	75

Figura 30 – Curvas de tensão do barramento CC e banco de baterias com descarga habilitada.	77
Figura 31 – Curvas de tensão do barramento CC e banco de baterias com descarga desabilitada.	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações da bateria EVH 12240	52
Tabela 2 – Características de descarga com corrente constante por célula da bateria EVH 12240.	55
Tabela 3 – Relação entre tensão de descarga da bateria por célula e corrente de descarga.	55
Tabela 4 – Valores de capacitância obtidos para o modelo bateria.	56
Tabela 5 – Possibilidades de chaveamento das tensões de polo V_{10}^*	58
Tabela 6 – Tensões de saída V_{12}^*	60
Tabela 7 – Valores dos ganhos dos controladores do modo <i>Buck</i>	68
Tabela 8 – Valores dos ganhos dos controladores do modo <i>Boost</i>	68
Tabela 9 – Valores obtidos para o banco de baterias, conversor CC <i>Full-Bridge</i> e barramento CC	68
Tabela 10 – Valores utilizados como referência para carga e descarga do banco de baterias	69
Tabela 11 – Modos de operação do conversor - Modo <i>Buck</i>	72
Tabela 12 – Valores RMS das correntes e tensões para as etapas de carga - Modo <i>Buck</i>	75
Tabela 13 – Valores RMS das correntes e tensões para as etapas de descarga - Modo <i>Boost</i>	76
Tabela 14 – Modos de operação do conversor - Modo <i>Boost</i>	77

Lista de abreviaturas e siglas

AE	Armazenamento de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CA-CC	Conversão de corrente alternada para corrente contínua
CC	Corrente Contínua
CC-CC	Conversão de corrente contínua para corrente contínua
CEDC	Capacitores elétricos de dupla camada
DAE	Dispositivos de armazenamento de energia
ER	Energia renovável
FF	Fonte fotovoltaica
FV	Fotovoltaico
GD	Geração distribuída
HV	<i>High voltage</i> - Alta tensão
LV	<i>Low voltage</i> - Baixa tensão
MR	Micro-rede
PWM	<i>Pulse with modulation</i>
RMS	<i>Root means square</i> - Raiz do valor quadrático médio
UPS	<i>Uninterruptible power supply</i>
UA	Unidades de armazenamento
SOC	<i>State of charge</i> - Estado da carga
PI	Proporcional-Integrativo

Lista de símbolos

C	Capacitor
D	Razão cíclica
i_{BAT}	Corrente de bateria
i_{CARGA}	Corrente de carga
K_i	Ganho Integral
K_p	Ganho Proporcional
L	Indutor
N_s	Número de espiras secundário
N_p	Número de espiras primário
R	Resistor
R_S	Resistência interna
R_P	Resistência de auto-descarga
C_B	Capacitância de
$V_{10,20,12}^*$	Tensões de polo do conversor
V_{Bat}	Tensão de bateria
V_{Barr}	Tensão de barramento
V_{CARGA}	Tensão de carga
V_{in}	Tensão de entrada
V_{FLOT}	Tensão de flutuação
V_o	Tensão de saída

Sumário

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	Problemática	24
1.3	Objetivos	25
1.3.1	Objetivo Geral	25
1.3.2	Objetivos Específicos	25
1.4	Organização do Trabalho	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	Geração Distribuída	27
2.2	Micro Rede CC	29
2.3	Conversores Estáticos CC-CC	33
2.3.1	Conversores isolados	36
2.3.1.1	Conversor <i>Push-Pull</i>	36
2.3.1.2	Conversor <i>Half-Bridge</i>	38
2.3.1.3	Conversor <i>Full-Bridge</i>	38
2.3.2	Conversores não-isolados	40
2.3.2.1	Conversor Buck	40
2.3.2.2	Conversor Boost	40
2.3.3	Modelo de Conversor Escolhido	41
2.4	Modelagem da Bateria	42
2.4.1	Introdução às baterias	42
2.4.2	Tipo de baterias	43
2.4.3	Modelo elétrico da bateria	44
2.4.4	Método de carga de baterias	47
2.5	Controladores	48
2.6	Resumo do Capítulo	50
3	PROJETO DO CONVERSOR <i>FULL-BRIDGE</i> BIDIRECIONAL	51
3.1	Projeto do Banco de Baterias	52
3.1.1	Cálculo da Resistência Interna R_S	53
3.1.2	Cálculo da Resistência de Auto-Descarga R_P	53
3.1.3	Cálculo da Capacitância de Descarga C_B	54
3.1.4	Modelo Elétrico do Banco de Baterias	57
3.2	Estratégia de Modulação	57
3.3	Projeto do Conversor CC-CC <i>Full-Bridge</i>	60

3.3.1	Cálculo do Filtro LC	60
3.3.2	Cálculo do Filtro C_{HV}	61
3.3.3	Cálculo da Resistência de Carga R_{HV}	61
3.4	Modelagem e Projeto de Controladores	61
3.4.1	Modelagem Orientada ao Controle de Corrente no Indutor	65
3.4.2	Modelagem Orientada ao Controle de Tensão	67
3.4.3	Ganhos de controladores	68
3.5	Modelo Completo	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
4.1	Modo <i>Buck</i>	72
4.2	Modo <i>Boost</i>	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Por muitos anos, o setor energético global têm mostrado sinais de colapso. No Brasil, esta situação se tornou crítica nos últimos anos. A demanda por energia elétrica vem crescendo exponencialmente, e os recursos hídricos - o maior recurso de energia elétrica do Brasil - apresenta sinais de exaustão, resultando em um aumento nos custos e riscos que ameaçam o racionamento na maioria das maiores cidades do país. Devido ao rápido crescimento de carga, a necessidade de aumentar a geração de energia elétrica convencional provoca um esgotamento contínuo da reserva de combustíveis fósseis. Neste cenário, a maioria dos países buscam recursos energéticos renováveis e não convencionais como uma alternativa para a crise energética mundial (KAZI, 2016).

Segundo (ROSEMBACK, 2004), o Sol fornece $1,5 \times 10^{18}$ kwh de energia na forma de luz e calor para a terra anualmente, correspondendo a cerca de 10.000 vezes o consumo do planeta considerando o mesmo periodo, além de ser uma fonte inesgotável de energia, considerando a escala de tempo terrestre. Observando estes dados percebe-se que o Sol é a fonte de energia mais importante do planeta, pois emite uma imensa quantidade de energia. Vale lembrar ainda que (REIS, 2012) afirma que a maioria das fontes de energia são, em última instância, derivadas do Sol, visto que o ciclo da água (hidrelétrica), radiação solar que gera ventos (eólica) e petróleo, carvão e gás natural (combustíveis fósseis) são provenientes do mesmo.

Para captar a energia advinda do Sol e transformá-la em energia elétrica, a qual é mais fácil de ser transportada, são utilizadas painéis fotovoltaicos. Estes painéis utilizam o efeito fotovoltaico, que foi descoberto por Edmund Becquerel, em 1839, e pode ser explicado como o surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor, chamada Célula Fotovoltáica, produzida pela absorção dos raios solares, afirma (ROSEMBACK, 2004). Logo, um painel fotovoltaico nada mais é que um conjunto de várias Células Fotovoltáicas conectadas.

A primeira utilização de captação de energia fotovoltaica foi em lugares onde a energia não estava disponível, como no espaço, comenta (SILVA, 2004). O autor ainda cita que no primeiro teste este tipo de geração decepcionou e muito, só vindo reverter essa situação com Joseph Lindmeyer, no início da década de setenta, o qual conseguiu aumentar a eficiência das células, sendo que atualmente as células produzidas a nível industrial contam com uma eficiência típica de 15%, enquanto as melhores células produzidas chegam a quase 40%, porém sendo inviáveis para a produção em massa, segundo (BRITO; SILVA,

2006). Após isso, essa tecnologia só sofreu avanços e tende a continuar neste percurso. Porém, (ROSEMBACK, 2004) aponta que o custo de produção de painéis fotovoltaicos ainda é alto comparado a outros métodos de geração, mas pode aumentar muito a sua inserção no mercado visto que as outras fontes de energia poderão esgotar-se.

1.2 Problemática

A produção de energia utilizando os raios solares depende principalmente da incidência destes sobre o painel fotovoltaico. Visto que a passagem de nuvens, a mudança das estações do ano, chuvas e mudanças de dia para noite afetam diretamente o nível de insolação dos painéis, a produção de energia utilizando essa tecnologia também sofre grandes variações, tendo momentos de muita insolação, conseqüentemente muita geração, e momentos de baixa ou nenhuma insolação, acarretando numa geração baixa ou quase nula. Assim sendo, a quantidade de energia gerada dificilmente coincidirá com a quantidade demandada pela carga elétrica.

Um método para contornar este problema é a utilização de baterias para armazenar a energia quando a produção for superior à demanda.

Segundo (REIS, 2012), nos sistemas fotovoltaicas a bateria serve para armazenar a energia produzida e não consumida em períodos de excesso de insolação, para que possa ser posteriormente utilizada em períodos de baixa insolação ou durante a noite, de forma a garantir o fornecimento constante de energia. Porém, deve-se levar em consideração que o banco de baterias pode representar até 15% dos custos iniciais de instalação do sistema fotovoltaico ou até 46% considerando-se a manutenção das baterias.

Para conectar as baterias ao barramento CC do painel fotovoltaico é necessária adaptação das tensões, visto que o conjunto de baterias atua com tensão diferente da tensão que existirá no barramento CC da geração solar. Esta adaptação é realizada através de um conversor CC-CC.

Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo estudar a conexão de uma micro-rede a um dispositivo de armazenamento de energia, por meio de um conversor bidirecional CC-CC. Esta análise busca construir um bloco de controle robusto conectado ao conversor CC-CC para suprir as demandas de carga da microrrede levando em consideração o armazenamento de energia da bateria.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

A proposta da presente pesquisa consiste em dimensionar um conversor bidirecional CC-CC do tipo *Full Bridge*, visando o controle e avaliação de desempenho de uma micro-rede CC conectada a um dispositivo de armazenamento de energia. Sua função será adaptar os níveis de tensão do barramento para níveis de tensão aceitáveis para as baterias trabalharem com segurança e suprir a demanda de potência para a micro-rede CC caso haja um desligamento da rede principal.

1.3.2 Objetivos Específicos

No desenvolvimento deste trabalho foram estabelecidos os seguintes objetivos a serem cumpridos:

1. Revisão literária sobre conversores CC-CC isolados, não-isolados e bidirecionais;
2. Verificação da potência de trabalho comumente utilizada para os conversores analisados no item anterior, visto que a potência que estará envolvida no projeto final será 4600W;
3. Projeto de um banco de baterias a ser utilizado como dispositivo de armazenamento.
4. Projeto de um conversor bidirecional CC-CC para conexão da micro-rede CC à um banco de baterias.
5. Análise dos resultados apresentados.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo foi realizada uma breve introdução, com a abordagem do tema a ser tratado e a motivação do objetivo desta pesquisa. Os objetivos gerais e específicos que se desejam alcançar foram então apresentados.

No segundo capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica aprofundada sobre a geração distribuída e microrrede CC, conhecendo sua história e seu desenvolvimento atual. Em seguida é apresentado uma introdução aos conversores estáticos CC-CC, modelos de baterias e por ultimo, apresentação do controlador PI.

No terceiro capítulo é exposto o desenvolvimento do trabalho, com o projeto do banco de baterias, dos componentes do conversor CC-CC escolhido, estratégia de modulação adotada e uma prévia do sistema final aplicado á simulação.

No capítulo quatro, são apresentados os resultados obtidos pelas simulações realizadas e a análise dos mesmos, de forma a comprovar o funcionamento do sistema.

No quinto capítulo será apresentada uma conclusão sobre o que foi realizado durante a elaboração deste trabalho, os objetivos que foram alcançados e as contribuições deste trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Geração Distribuída

As fontes renováveis são a grande aposta da humanidade para a produção de energia em tempos onde a sustentabilidade e a preocupação com o meio ambiente passaram a ser cada vez mais priorizados, assim como a qualidade de energia elétrica. Dentre as fontes renováveis de energia disponíveis, a energia solar se destaca como uma das mais sustentáveis e que causa menor impacto sobre o meio ambiente (VILLALVA, 2013). Neste contexto, a geração distribuída (GD) é definida como uma fonte de geração conectada diretamente à rede de distribuição ou ao consumidor final, podendo vir a ser a solução para sistemas elétricos, em virtude de suas características, tais como: maior eficiência, menor custo de geração, confiabilidade, descongestionamento de linha de transmissão, diminuição do impacto ambiental e etc.

Embora na literatura haja diferentes definições sobre geração distribuída, o conceito é praticamente o mesmo entre diversos autores. Segundo (ACKERMANN; ANDERSSON; SODER, 2000), geração distribuída pode ser tratada como a geração de energia em pequena escala (micro ou minigeração) de forma descentralizada, podendo vir de uma variedade de fontes e tecnologias instaladas por um consumidor de energia elétrica que está ligado ao sistema de distribuição da rede, ou seja, é uma fonte de energia elétrica ligada diretamente ao sistema de distribuição, como exibido na Figura 1.

Uma das formas mais frequentes de geração distribuída é realizada pela inserção de energia solar fotovoltaica e/ou eólica nos sistemas de distribuição. Essa introdução de energia no sistema elétrico pode provocar uma mudança de paradigma (descentralização da geração) na configuração das redes de distribuição que possuem tradicionalmente grandes volumes de geração de forma centralizada (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

A expansão da geração distribuída (Microgeração) requer estudos apropriados e análises minuciosas dos sistemas de distribuição para poder conectar as fontes utilizadas na GD (ACKERMANN; ANDERSSON; SODER, 2000). É importante observar que a apropriada conexão destas fontes de geração distribuída à rede deve ser de maneira ordenada com estudos elétricos prévios sobre a localização, potência gerada e/ou horas de atuação. Esses estudos podem determinar uma significativa melhoria das características técnicas e econômicas em um sistema elétrico, tanto na resolução de problemas operacionais já existentes quanto ao planejamento de novas redes elétricas (DUGAN; MCDERMOTT; BALL, 2000; DUGAN; PRICE, 2004). Entretanto, a entrada dessas novas fontes de energia sem o devido estudo tende a causar vários transtornos ao sistema, acarretando problemas

ambientais, regulatório e operacional, sendo estes aspectos, constantemente, analisados na atual realidade das concessionárias de energia elétrica.

Segundo (BRAUN-GRABOLLE, 2010), a diferença entre GD e geração convencional (geração centralizada) consiste no fato de que a GD entrega a energia diretamente a rede de distribuição onde está localizado o consumidor final, permitindo assim aliviar as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. Além disso, esse tipo de geração não implica em dimensões de geração máxima ou mínima, podendo ser formada por unidades de baixa e/ou alta potência de geração. Logo o consumidor da GD pode estar localizado em uma região industrial, em um prédio comercial ou regiões remotas.

O *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), define a GD como uma unidade de geração com instalações suficientemente pequena em relação as grandes centrais de geração, permitindo sua conexão em um ponto próximo a rede elétrica existente junto aos centros de carga (IEEE, 2008).

O *Conseil International Grands Réseaux Electriques* (CIGRE) define GD como unidades de geração com capacidade máxima de 50 MW a 100 MW, que geralmente são conectadas as rede de distribuição e que não tem geração centralizada (CIGRE, 2008).

No Brasil, GD é definida por meio do decreto n: 5.163 em julho de 2004 sendo definida da seguinte forma (PRESIDÊNCIA, 2004):

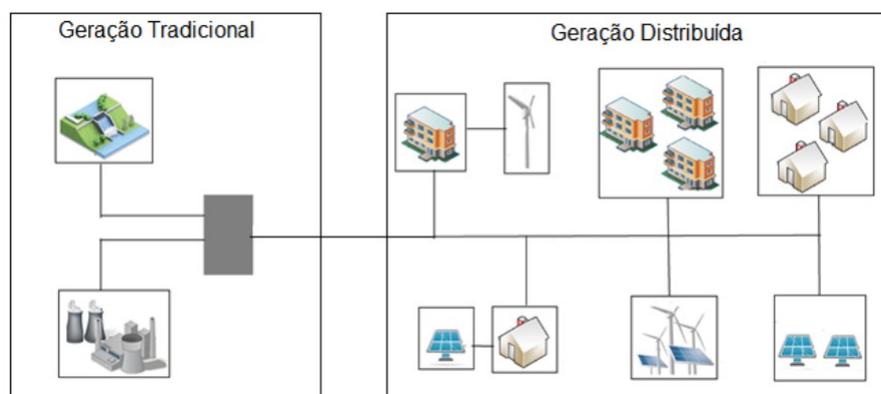
"Art.14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados (...), conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquele proveniente de empreendimento:

- (1) - Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW;
- (2) - Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, (...)"

A GD oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico e benefícios ao usuário para o sistema de abastecimento de eletricidade, visto que a disposição da unidade de geração perto do local de consumo permite a diminuição das perdas associadas ao transporte de energia elétrica e melhoria do perfil de tensão, além de uma maior diversificação das tecnologias empregadas para produção de energia elétrica, principalmente proporcionando bem-estar e melhor qualidade de vida com introdução de fontes limpas de energia (OLADE, 2011).

De acordo com (VILLALVA, 2013) as fontes de energia solar fotovoltaica e eólica são as fontes alternativas com maior potencial de utilização para geração distribuída de eletricidade em termo ambiental. A utilização das GDs, podem e devem contribuir na redução das emissões de gás de efeito estufa.

Figura 1 – Conceito de Geração Distribuída



Fonte: Adaptada de Villalva (2013).

2.2 Micro Rede CC

É bem sabido que a inserção de muitas unidades de geração distribuída afeta os níveis de potência da rede elétrica. Muitos pesquisadores estudam as microrredes CC (do inglês *microgrids*) com sistemas práticos experimentais e têm concluído que a utilização de energia renováveis baseada em *microgrids* aparenta ser o melhor caminho para a sua exploração e a redução dos riscos ambientais gerados pelos combustíveis fósseis (KAKIGANO et al., 2010).

As microrredes são redes de abastecimento em pequena escala, projetadas para fornecer energia para uma pequena comunidade, como um conjunto habitacional, ou uma comunidade acadêmica ou pública, como uma universidade ou escola, ou ainda um local industrial. A microrrede é uma rede de distribuição ativa porque é um conglomerado de sistemas de geração distribuídas (GDs) e diferentes cargas em níveis de tensão de distribuição. Os geradores ou micro-fontes empregadas neste rede de abastecimento são geralmente renováveis, integradas para gerar energia na tensão de distribuição. As diferenças principais entre a microrrede CC e um sistema de potência convencional podem ser enumeradas da seguinte maneira (CHOWDHURY; CHOWDHURY; CROSSLEY, 2009).

1. As unidades de geração são de capacidade e potência muito menor com respeito à geradores instalados em sistemas de potência convencionais.
2. A potência gerada na tensão de distribuição pode ser diretamente alimentada à rede de distribuição da concessionária.
3. As unidades de geração são normalmente instaladas próximas as instalações dos clientes para que as cargas elétricas/ térmicas possam ser supridas eficientemente

com tensão satisfatória e perfil de frequência e perdas de linhas insignificantes.

Uma microrrede pode ter a extensão de uma única casa ou município, no entanto, independentemente da dimensão geográfica, compartilham da mesma filosofia e dos mesmos elementos:

- Geração distribuída;
- Conversores estáticos;
- Cargas;
- Dispositivos de armazenamento de energia;
- Controladores;
- Ponto de acoplamento comum.

Estas *microgrids* adotam o sistema de distribuição CA como sendo o principal, porém incluem muitas saídas do tipo CC em sua estrutura, tais como as unidades de geração distribuídas e dispositivos de armazenamento de energia, como baterias, células de combustíveis ou super capacitores. Assim sendo, sistemas de distribuição CC do tipo microrrede são bem compatíveis com esses tipos de GDs e unidade de armazenamentos (UAs), e são apontadas como a próxima geração de sistemas de potência (KAKIGANO et al., 2010), no qual podem reduzir perdas por conversão e suprir energia de mais alta qualidade. Decorrente deste fato, a geração distribuída que utilizam de fontes alternativas vem sendo incentivada pelo governo federal por meio de órgão como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) com finalidade de promover soluções para os problemas de fornecimento de energia.

A forma como a microrrede CC é projetada a torna atraente aos olhos de consumidores quando se pensa em suprimento de energia em locais remotos do país, onde a transmissão da rede elétrica nacional ou é dificultada devido a topologia do local ou é interrompida devido as severas condições climáticas.

Do ponto de vista da rede, a principal vantagem é que a microrrede é tratada como uma entidade controlada dentro do sistema de potência. Pode ser operada como uma única carga agregada. Isso garante facilidade no controle e conformidade com regras e regulamentos de rede sem prejudicar a confiabilidade e a segurança da concessionária de energia. Do ponto de vista dos clientes, as microrredes satisfazem localmente suas necessidades elétricas. Elas podem fornecer energia ininterrupta, melhorar a confiabilidade local, reduzir perdas de transmissão e fornecer suporte de tensão local. Do ponto de vista ambiental, as *microgrids* reduzem a poluição ambiental e o aquecimento global por se utilizar de uma tecnologia de baixo carbono.

No entanto, para alcançar uma operação estável e segura, várias questões técnicas, regulatórias e econômicas precisam ser resolvidas antes que as microrredes possam se tornar comuns. Algumas áreas problemáticas que exigiriam a devida atenção são a natureza intermitente e dependente de fontes renováveis e falta de padrões e regulamentação para operar as microrredes CC em sintonia com a concessionária de energia. O estudo de tais questões exigiria extensas pesquisas em tempo real e *off-line* que podem ser adotadas pelos principais institutos de engenharia e pesquisa em todo mundo. Para contornar alguns destes problemas, (Lasseter; Paigi, 2004) propôs um sistema *plug-and-play* e *peer-to-peer* para cada componente da MR (Microrrede).

1. *plug-and-play* tem como objetivo de que o sistema reconheça e configure automaticamente qualquer dispositivo que seja instalado em algum ponto da microrrede, sem exigir alteração dos controladores de forma manual.
2. *peer-to-peer* assegura que nenhum elemento seja crítico na operacionalização da microrrede. Isto significa que a MR se mantém ativa mesmo com a perda de qualquer componente, tais como um motor, um dispositivo de armazenamento ou conversor de potência, o que facilita processos de manutenção e reparos preventivos de cada componente. Logo, nenhum componente é essencial para manter o sistema operacional.

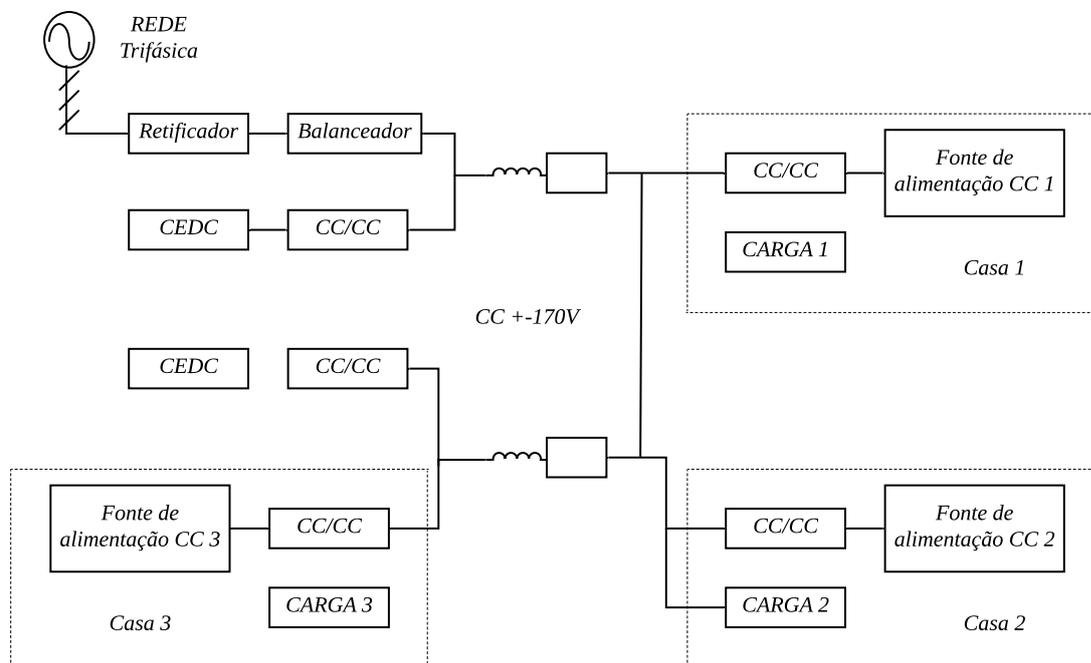
Durante perturbações, essas microrredes CC podem se desconectar do sistema principal e operar autonomamente por meio da geração local suprindo suas cargas correspondentes. Essa capacidade de desconexão da rede principal (ilhamento intencional) e operação autônoma provê uma confiabilidade superior ao do sistema tradicional. Características como essas fazem das MRs uma boa solução para expansão e redução de impactos ambientais, visto que as fontes de energia distribuídas geralmente são menos agressivas ao meio ambiente. Exemplos de fontes de energia distribuída são microturbinas, células a combustível, geradores eólicos e FV (fotovoltaicos). Uma vantagem importante dessa arquitetura é a possibilidade de inserção de tecnologias que combinam a produção de calor e energia. Durante a geração de energia, o calor produzido pode ser aproveitado em processos que necessitam de energia e calor, *combined heat and power* (CHP). Essa técnica, também chamada de cogeração, pode atingir 80% de eficiência quando a geração é próxima às cargas que necessitam de energia térmica (SHIPLEY et al., 2008).

Geralmente, os sistemas de energia são projetados de tal maneira que o pico de carregamento possa ser atendido por fontes já existente. Entretanto, com o crescimento da demanda, o atendimento a esses picos tem levado os sistemas aos seus limites operacionais, aumentando sua vulnerabilidade quanto à estabilidade dinâmica. O uso das microrredes CC não só alivia o carregamento das linhas de transmissão, com a instalação de geração eletricamente próxima às cargas (reduzindo fluxos e os circuitos de distribuição), como também leva a conseqüente redução de perdas. Sua existência também pode minimizar

o impacto das falhas individuais já que, em um evento de desligamento involuntário, as micro-redes podem suprir certas áreas, evitando que o problema atinja uma grande extensão.

Em (KAKIGANO et al., 2010), uma microrrede CC é proposta para um complexo residencial. Nesta síntese, um novo modelo de controle de tensão que combina lógica *fuzzy* além do controle de programação de ganho para gerenciar a energia armazenada é posto em pauta. Para representar o desempenho de uma residência, cada domicílio é composto pelos seguintes elementos:

Figura 2 – Configuração de um sistema experimental em laboratório.



Fonte: Adaptado de (KAKIGANO et al., 2010) e Autoria própria.

1. Fonte de alimentação CC, simulando a injeção de potência de um motor a gasolina ou célula de combustível, conectado a microrrede através de um conversor CC-CC;
2. Carga emulando o comportamento energético de uma residência comum;
3. Dois bancos de capacitores de dupla camada (CEDC), simulando o comportamento de um dispositivo de armazenamento de energia conectado a microrrede através de um conversor CC-CC.

O sistema prático desenvolvido experimentalmente é observado na Figura 2. Neste análise de comportamento da microrrede CC, (KAKIGANO et al., 2010) consideraram

duas possibilidades de interconexão entre o sistema AC principal e a microrede do complexo residencial.

1. **Microrrede CC conectada ao sistema de distribuição CA principal:** Neste modo de operação, o consumo de potência é suprido pela rede principal. A tensão de distribuição é controlada pelo retificador principal e um computador supervisor altera o número de unidades geradoras (fontes de alimentação CC) em funcionamento com o objetivo de que a potência demandada pelo complexo residencial esteja abaixo da demanda contratada.
2. **Microrrede CC operando em ilhamento ou desconectada do sistema de distribuição:** Neste modo de atuação, ocorre o monitoramento da energia armazenada nos bancos de capacitores. Caso esta energia esteja maior do que o limite máximo, o sistema diminui o número de unidades geradoras, e o *déficit* de potência, que antes era compensado pelas unidades geradoras, é suprida pelos bancos, o que acarretará no seu descarregamento. Caso a energia armazenada nos bancos ultrapasse um limite mínimo, o sistema aumenta a potência injetada no sistema, aumentando o número de unidades geradoras. Este ciclo se repete continuamente neste modo de operação.

Ao final, os resultados de simulação mostraram que o método proposto realizou o controle de regulação de tensão CC e o controle de balanceamento de energia simultaneamente.

2.3 Conversores Estáticos CC-CC

Conversores estáticos CC-CC são dispositivos que têm função receber um nível de tensão ou de corrente contínua em seus terminais de entrada e ajustar para um valor desejado nos terminais de saída.

"Os conversores estáticos podem operar no modo tensão ou no modo corrente. No modo tensão a variável de controle é a tensão de saída e o conversor opera como uma fonte de tensão. No modo corrente a variável de controle é a corrente de saída e o conversor opera como uma fonte de corrente equivalente." (ROSEMBACK, 2004).

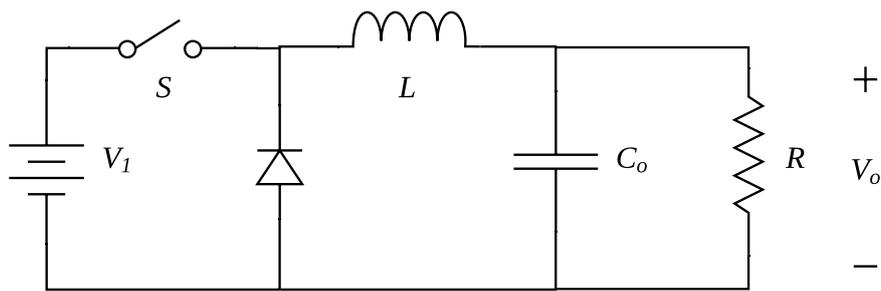
Segundo (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003), existem duas topologias básicas para os conversores CC-CC: conversor abaixador de tensão, *Buck* ou *Step Down* e o conversor elevador de tensão, *Boost* ou *Step Up*, sendo os outros conversores apenas combinações destes já citados. A Figura 3 exhibe ambas as topologias básicas para os conversores. Nesta figura, S representa a chave semicondutora, L é um indutor para ora

armazenar e ora fornecer energia para a carga, C_o é um capacitor que funciona como filtro na saída, R é uma resistência que simboliza a carga do sistema, V_o é a tensão de saída, $I_L(t)$ é a corrente que passa no indutor e V_i é a tensão de entrada.

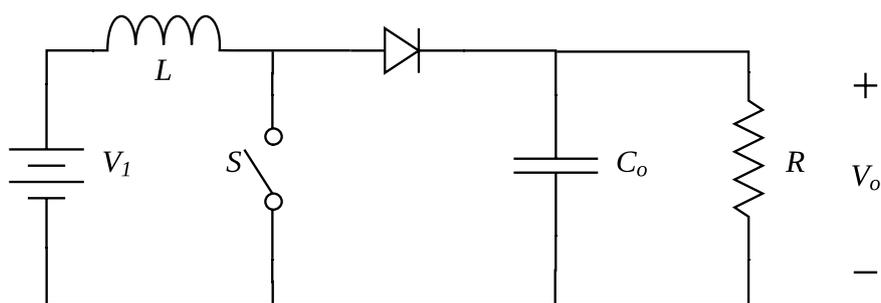
"Os conversores CC-CC podem ter dois diferentes modos de operação: condução de corrente contínua e condução de corrente descontínua."(MOHAN et al., 2003, p.163).

A determinação do modo de operação depende da corrente $I_L(t)$ que circula no indutor L , sendo que no primeiro modo a corrente $I_L(t)$ é sempre maior que zero durante o período de chaveamento e no segundo modo a corrente $I_L(t)$ é igual a zero por alguns instantes.

Figura 3 – Topologias básicas dos conversores CC-CC: (a) conversor *Buck* e (b) conversor *Boost*



(a)



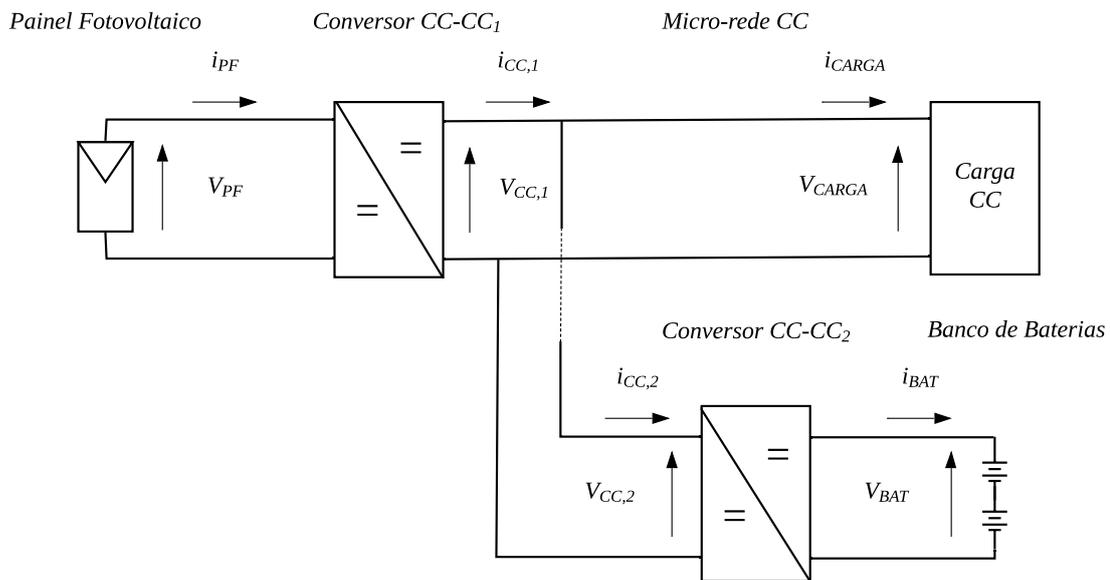
(b)

Fonte: Autoria própria

A função do conversor neste projeto será de adaptação dos níveis de tensão do barramento CC da geração fotovoltaica e o banco de baterias a ela associado. Um conversor CC-CC pode ter outras aplicações dentro da geração de energia fotovoltaica, como, por

exemplo, servir como controlador de carga operando no ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos, sempre fazendo com que o painel atue no ponto no qual a geração seja a melhor possível para a temperatura e insolação atuais, segundo (REIS, 2012). Para executar tal função, o dispositivo é instalado entre os painéis fotovoltaicos e o barramento CC, enquanto para atuar ajustando os níveis de tensão para as baterias, ele é instalado entre o barramento CC e as baterias. Ambas aplicações são demonstradas na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de blocos de uma micro-rede CC.



Fonte: Autoria própria

Os conversores CC-CC podem ser divididos em isolados e não isolados. A diferença básica entre eles está no fato de que existe conexão elétrica entre a entrada e a saída dos não isolados enquanto isso não ocorre nos isolados. Segundo (HART, 2011), o fato de existir esta conexão elétrica nos não isolados é uma desvantagem, visto que se a entrada estiver aterrada, a saída conseqüentemente estará. Uma solução para este problema é utilizar um transformador para isolar a entrada da saída, caso exista um conversor CA-CC no conversor, visto que o transformador necessita de corrente alternada para funcionar adequadamente. Todavia, caso a frequência do transformador seja baixa, este requer um núcleo magnético maior, mais pesado e mais caro, o que tornaria mais difícil o processo. Porém, nem todas as aplicações requerem um isolamento entre entrada e saída, então é necessário analisar cada caso para decidir se haverá ou não este isolamento.

Um método mais eficiente de prover esta isolação, de acordo com (HART, 2011), é utilizar esquemas envolvendo chaveamento. Como a frequência de chaveamento será muitas vezes maior que a frequência da fonte, o transformador poderá ser menor e mais barato.

Além da isolação elétrica adicionada pelo transformador, ele também fornece flexibilidade entre a entrada e a saída com a variação da relação de espiras nos seus dois enrolamentos. Outra situação interessante é que o uso de vários enrolamentos, conversores com este modo de ação podem ter várias tensões de saída.

Quando o estudo se limita ao caso de conversores CC-CC não isolados, um elemento indutor se torna essencial. Ele será empregado, basicamente, de duas formas: como filtro na tensão de saída do conversor, em conjunto com capacitores de saída, ou como elemento armazenador de energia. Caso o conversor seja do tipo *Boost* será utilizado, obrigatoriamente, elementos indutores operando no modo de armazenamento de energia.

2.3.1 Conversores isolados

As análises sobre os conversores CC-CC isolados a seguir tem como objetivo destacar e avaliar algumas características para auxiliar na escolha posterior do conversor a ser utilizado no projeto, além de averiguar qual potência na qual o conversor é normalmente utilizado

2.3.1.1 Conversor *Push-Pull*

"O conversor *Push-Pull* é na verdade, um arranjo de dois conversores *Forward* trabalhando em contra-fase."(POMILIO, 2010).

O conversor *Push-Pull* apresenta isolação galvânica entre a entrada e a saída através de um transformador, porém o *Push-Pull* dispõe de duas chaves, portanto, para alcançar o modelo matemático do conversor é necessário considerar três momentos distintos, sendo o primeiro momento considerando as duas chaves abertas, e dois momentos considerando uma aberta e uma fechada.

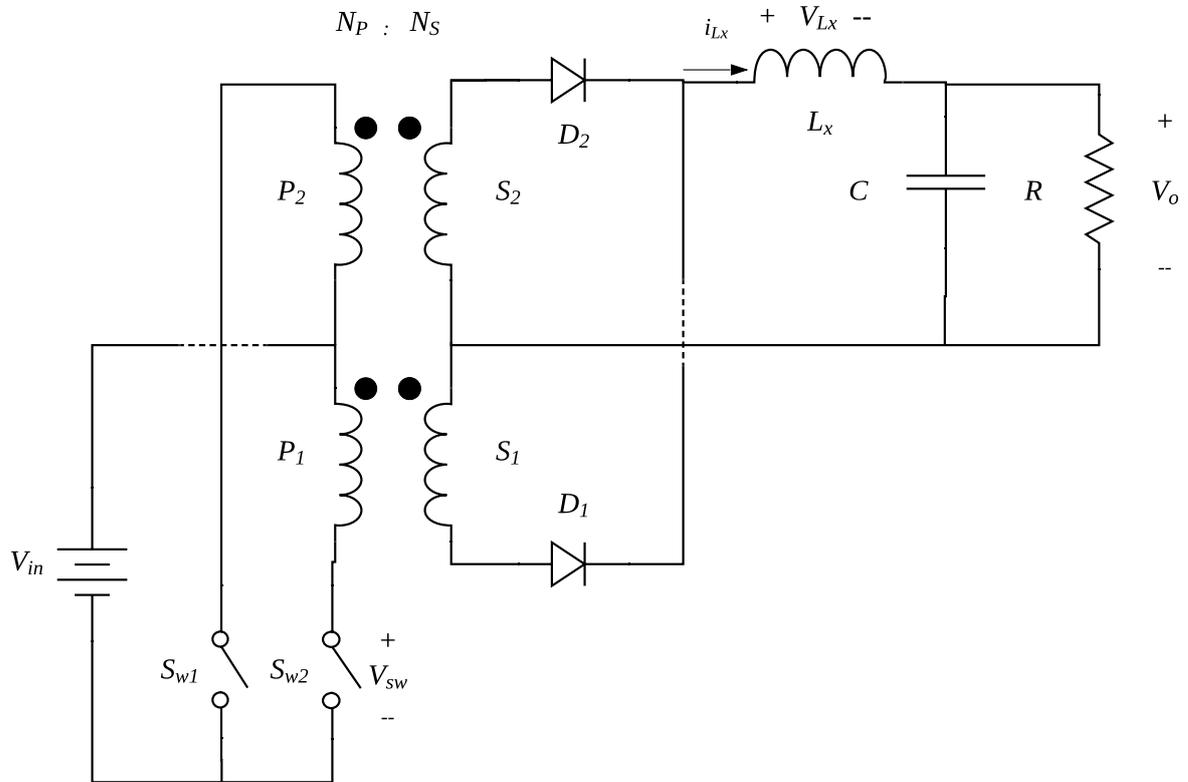
Alguns problemas deste conversor, segundo (POMILIO, 2010), são o fato de que o ciclo de trabalho, ou duty cycle, ser menor que 0,5, evitando a condução simultânea das chaves semicondutoras, além de que as chaves devem suportar o dobro da tensão de entrada. Segundo (POMILIO, 2010) ainda existe o risco de saturação do transformador caso o chaveamento das chaves não sejam idênticos, o que garante uma tensão média nula aplicada ao primário do transformador.

As equações utilizadas para projetar um conversor *Push-Pull* serão descritas a seguir. O equacionamento completo pode ser encontrado em (HART, 2011).

A função de transferência pode ser definida como:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \frac{N_s}{N_p} \quad (2.1)$$

Os valores do indutor L_x e do capacitor C são dados respectivamente por:

Figura 5 – Conversor *Push-Pull*.

Fonte: Adaptado de (HART, 2011)

$$L_x = \frac{V_o(\frac{1}{2} - D)}{\Delta I_{Lx} f} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{(1 - 2D)V_o}{32\Delta V_o L_x f^2} \quad (2.3)$$

O *Duty Cycle* é representado pela variável D , sendo a razão cíclica de cada chave. N_P e N_S são o número de espiras do primário e do secundário, respectivamente. ΔI_{Lx} representa a variação de corrente no indutor L_x desejada, ΔV_o a variação de tensão de saída e f a frequência de chaveamento das chaves semicondutoras que compõem o conversor.

A aplicação para o conversor *Push-Pull* são as de pequena potência (10^2W), visto que propicia um mau aproveitamento do transformador e dificulta o emprego de técnicas para evitar saturação do núcleo devido à desigualdade entre tempos de comutação dos interruptores, afirma Barbi (2001).

2.3.1.2 Conversor *Half-Bridge*

O conversor *Half-Bridge* ou conversor meia-ponte, como também é conhecido, é uma adaptação do conversor *Push-Pull*, visto que o lado da carga do transformador permanece igual, modificando somente a região de entrada. O circuito do *Half-Bridge* é exibido na Figura 6. A região de entrada é composta por capacitores C_1 e C_2 que são de capacitância e valor igual. A tensão de entrada é igualmente dividida entre os capacitores.

Segundo (POMILIO, 2010), o problema de tensão sobre as chaves é resolvido, pois a tensão máxima aplicada sobre as chaves quando abertas é V_{in} e não $2V_{in}$, como no conversor *Push-Pull*, embora a corrente que circulará pela chave será o dobro. Os capacitores têm função de garantir uma tensão média nula no primário do transformador, porém devem ter valor escolhido para evitar ressonância com o indutor de saída.

As chaves S_{w1} e S_{w2} fecham alternadamente existindo um tempo morto entre o fechamento de uma e a abertura da outra. Este esquema de fechamento das chaves gera uma tensão alternada e pulsante no primário do transformador.

Para projetar os componentes do conversor *Half-Bridge*, as equações utilizadas são as mesmas do conversor *Push-Pull*, exceto para a relação de tensão de entrada e saída, a qual é disposta abaixo:

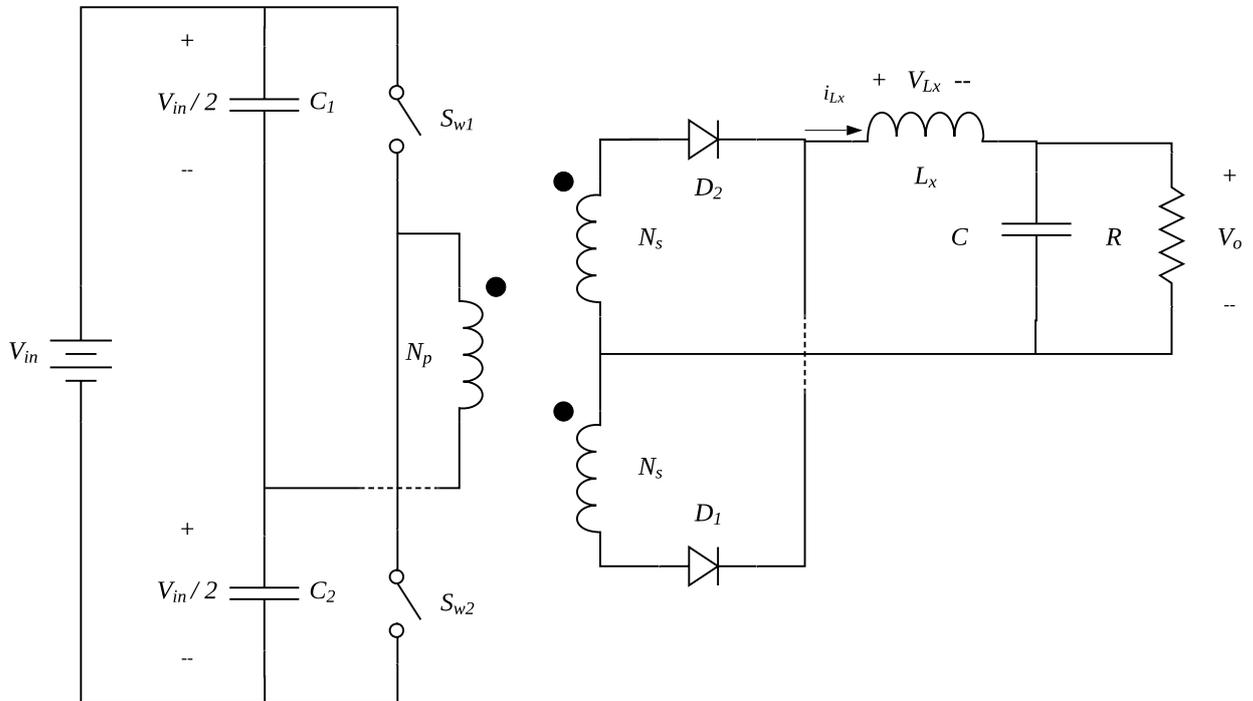
$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \frac{N_s}{N_p} \quad (2.4)$$

A variável D é o *Duty Cycle* de cada chave do inversor, e N_p e N_s são o número de espiras do primário e do secundário, respectivamente. O indutor e o capacitor podem ser definidos a partir das Equações (2.2) e (2.3) do conversor *Push-Pull*, visto que o filtro de saída é igual.

(BARBI, 2001) afirma que a aplicação deste conversor é normalmente recomendada para potências menores que 500W, enquanto para potências maiores o conversor *Full-Bridge* é empregado, visto que ela não exhibe alguns dos problemas que o *Half-Bridge* demonstra.

2.3.1.3 Conversor *Full-Bridge*

Para evitar os problemas de tensão do *Push-Pull* e de corrente do *Half-Bridge*, segundo (POMILIO, 2010), usa-se o conversor *Full-Bridge* ou conversor em ponte completa. O modo de operação é quase igual ao conversor anterior, porém no lugar dos capacitores existem duas chaves extras. O funcionamento é baseado nos pares de chaves, ou seja, as chaves S_{w1} e S_{w4} funcionam em oposição de fase em relação às chaves S_{w2} e S_{w3} , visto que as chaves que formam os pares sempre funcionam de forma idêntica. O circuito referente a este conversor é exibido na Figura 7.

Figura 6 – Conversor *Half-Bridge* ou meia ponte.

Fonte: Adaptado de (HART, 2011)

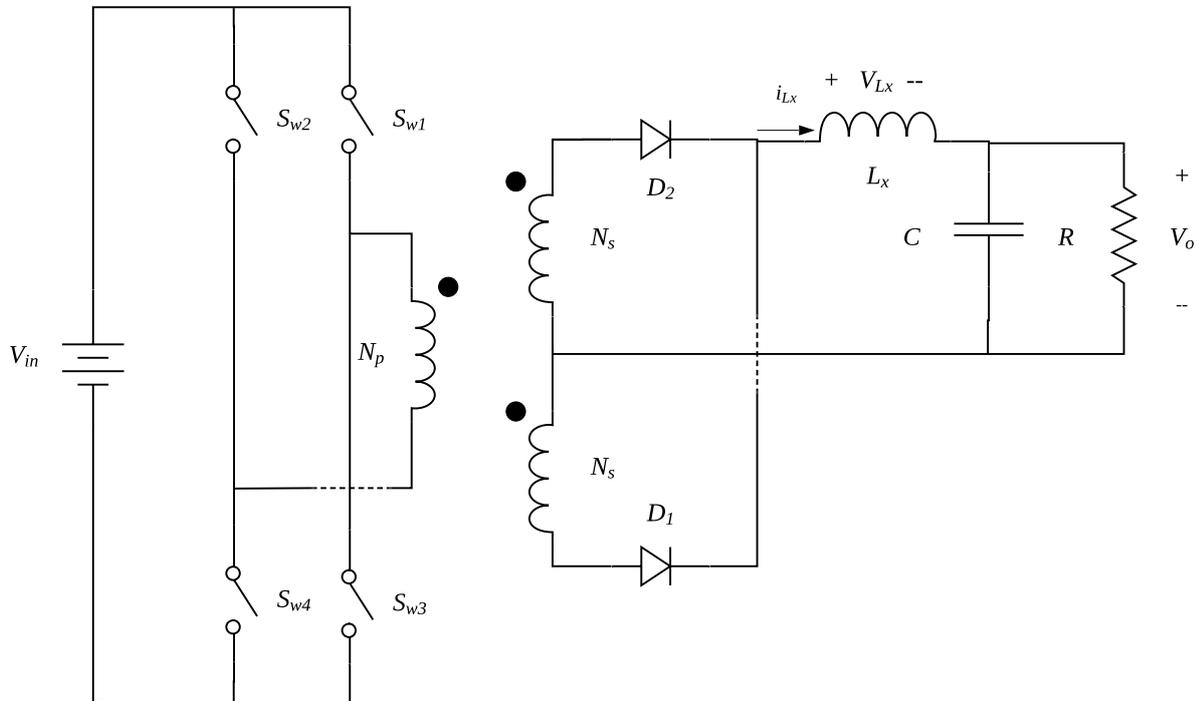
Note que o máximo valor de tensão, segundo (HART, 2011) é de V_{in} ao invés de $2V_{in}$ como no conversor *Push-Pull*. Reduzir o estresse por tensão sobre um par de chave é importante quando a tensão de entrada é de alto valor, dando assim ao conversor *Full-Bridge* uma vantagem.

Outra característica importante do conversor *Full-Bridge*, segundo (POMILIO, 2010), é a redução da corrente das chaves pela adição de mais um braço inversor, esta característica resolve o problema de corrente presente no conversor *Half-Bridge*.

Para projetar um conversor *Full-Bridge*, primeiramente necessita-se da relação entrada/saída do mesmo, a qual é igual à função de transferência do *Push-Pull* e é definida por

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \frac{N_s}{N_p} \quad (2.5)$$

Para especificação dos componentes de saída, pode-se utilizar as mesmas equações que o conversor *Push-Pull* fornece (Equações (2.2) e (2.3)), visto que o filtro de saída de ambos é igual.

Figura 7 – Conversor *Full-Bridge* ou ponte completa.

Fonte: Adaptado de (HART, 2011).

2.3.2 Conversores não-isolados

2.3.2.1 Conversor Buck

O conversor *Buck* ou abaixador de tensão produz uma tensão de saída média menor que a tensão de entrada. Uma das aplicações mais utilizadas neste tipo de conversor, segundo (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003) é o controle de velocidade de motores. Uma análise no Modo de Condução Contínua para este conversor, segundo (HART, 2011), leva a seguinte expressão para a função de transferência:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \quad (2.6)$$

2.3.2.2 Conversor Boost

O conversor *Boost* da Figura 3-b convencional é um dos mais elementares e típicos abordados pela literatura, já que utiliza menor número de componentes. Por isso, será lembrado e descrito como conversor CC-CC elevador ideal, que oferece idealmente alto ganho de tensão. Porém, considerando as resistências parasitas dos componentes do

conversor *Boost* típico, como por exemplo, a resistência dos enrolamentos do indutor, a resistência de condução do MOSFET, e etc, o ganho estático e o rendimento do conversor são significativamente afetados. Embora o ganho teórico elevado é obtido com razão cíclica perto da unidade, o valor da tensão de saída é afetado pela resistência série-equivalente do capacitor, o que resulta numa degradação significativa da eficiência (ERICKSON, 1997; MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Neste conversor o indutor é carregado com o acionamento da chave e transfere sua energia para a saída através da condução do diodo, quando a chave S é desligada. Uma análise no Modo de Condução Contínua para esse conversor leva à seguinte expressão para a função de transferência:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.7)$$

2.3.3 Modelo de Conversor Escolhido

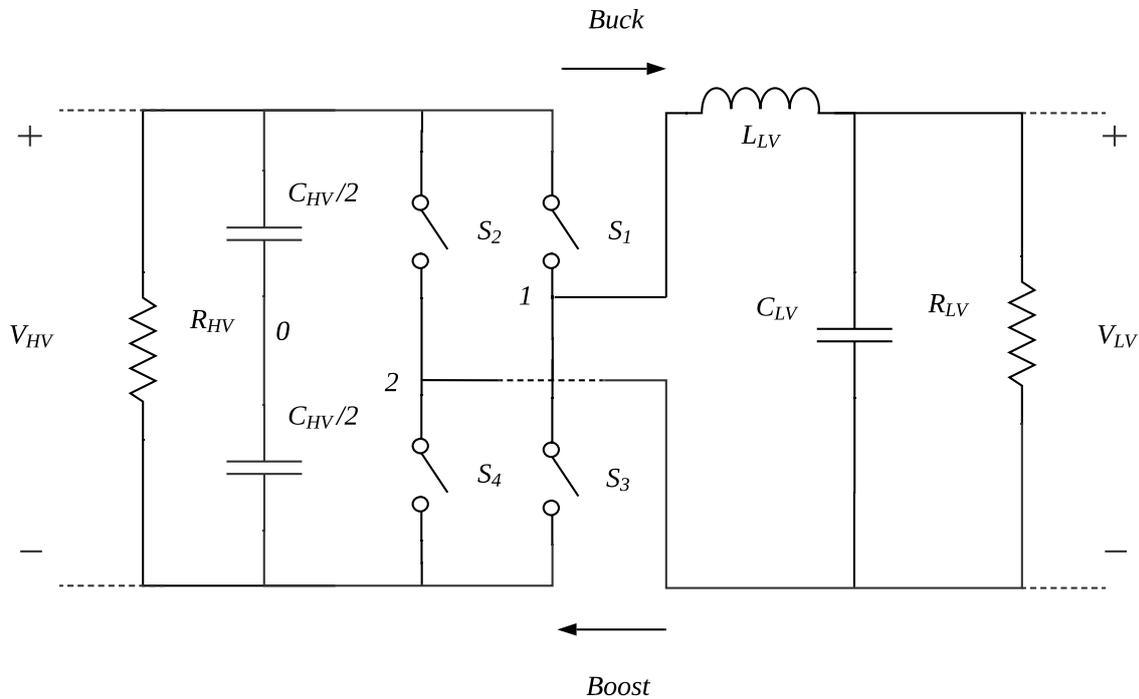
Partindo dos valores informados nas Seções 2.3.1.1 - 2.3.1.3, percebe-se que o modelo mais propício a ser empregado no projeto é o *Full-Bridge* não-isolado, visto que a potência a ser utilizada no trabalho será na ordem de 10^3 *Watts*. Por este motivo, foram pesquisadas diversas topologias dos conversores CC-CC *Full-Bridge* bidirecionais e a que melhor se adaptou ao trabalho foi uma topologia similar à exposta em (POMILIO, 2010), Figura 8, visto que este modelo contém menos dispositivos, facilitando o projeto e também há explicações detalhadas do funcionamento deste conversor.

Nesta topologia, não se faz necessária a isolamento elétrica proveniente pela adição dos transformadores, visto que a carga não precisa estar em outro ponto de acoplamento em relação a entrada, o que reduz os custos e complexidade de um projeto real. Para fins de projeto neste modelo de conversor *Full-Bridge* convencional para calcular os valores do filtro LC, visto que este conversor bidirecional comporta-se da mesma maneira que o convencional, quando se trata no modo *Buck* de operação. Já o cálculo do filtro capacitivo C_{HV} será baseado na variação máxima de tensão (*ripple*) permissível no barramento CC quando o conversor está operando no modo *Boost*, ou seja, na variação de tensão aceita na saída. Para tal, utilizaremos a Equação

$$C = \frac{I_{CC}}{f \cdot V_{ripple}} \quad (2.8)$$

Onde f é a frequência de chaveamento das chaves semicondutoras, V_{ripple} a variação máxima de tensão aceita no barramento CC e I_{CC} a corrente circulante no barramento CC.

Figura 8 – Conversor *Full-Bridge* ou ponte completa não-isolado escolhido.



Fonte: Adaptado de (POMILIO, 2010).

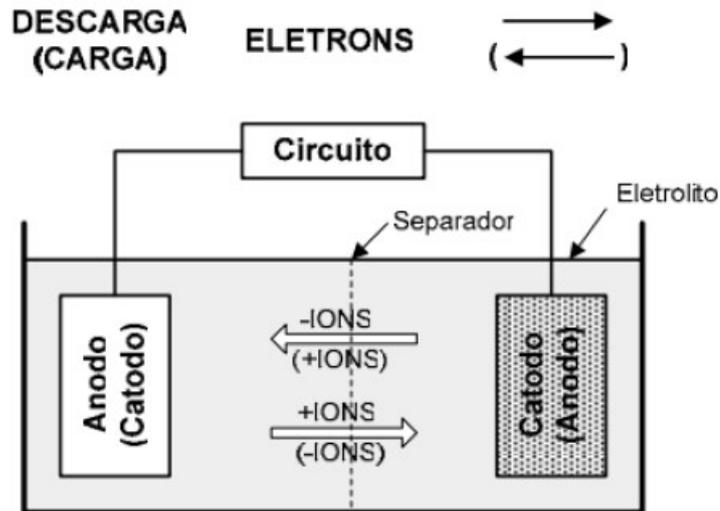
2.4 Modelagem da Bateria

2.4.1 Introdução às baterias

Segundo (LAZZARIN, 2006), pode-se definir o conceito elétrico de uma bateria como sendo um elemento que armazena energia elétrica em forma de energia química, sendo que esta energia pode ser estocada ou fornecida, porém nunca produzida pela bateria. O funcionamento das baterias dá-se por meio da chamada oxirredução, ou seja, a junção do fenômeno da oxidação (processo de liberar elétrons) com o fenômeno da redução (processo de consumir elétrons). (LAZZARIN, 2006) explica que uma bateria consiste de quatro elementos básicos, sendo eles: um ânodo feito com material que sofrerá oxidação, um cátodo feito com um material que sofrerá redução, um eletrólito e um separador. O esquema básico para montagem das baterias é mostrado Figura 9.

(LAZZARIN, 2006) explana ainda que o processo de transformação da energia eletroquímica em energia elétrica (descarga da bateria) se dá da seguinte maneira: o ânodo fornece elétrons para oxidação, gerando íons positivos. Do mesmo modo, íons negativos serão gerados no cátodo quando este receber os elétrons. Estes íons podem fluir livremente

Figura 9 – Elementos básicos de uma bateria.



Fonte: (LAZZARIN, 2006)

graças ao separador que existe entre o cátodo e o ânodo, enquanto o fluxo de elétrons é forçado pelo circuito externo, completando o sistema.

No processo de descarga, o terminal negativo é o ânodo e o positivo é o cátodo. Já no processo de carga, no caso de uma bateria recarregável, o ânodo vira o terminal positivo e o cátodo, negativo.

Segundo (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000), as baterias podem ser divididas em primárias e secundárias. As primárias são de uso único, ou seja, essencialmente não recarregáveis. Como exemplo pode-se citar as de zinco/dióxido de manganês, zinco/dióxido de prata, lítio/dióxido de enxofre, etc. Já as secundárias são recarregáveis, ou seja, podem ser reutilizadas várias vezes. No entanto, para ser considerada secundária a bateria deve suportar 300 ciclos completos de carga e descarga com 80 % da sua capacidade. Estas são usadas principalmente em aplicações que requerem alta potência, ou seja, maiores correntes em um baixo período de tempo. Como exemplo têm-se as baterias de cádmio/óxido de chumbo (ou chumbo ácido, como é comumente chamada), íons de lítio, etc. Neste trabalho o foco será nas baterias secundárias, visto que pretende-se que a bateria seja recarregável, pois estas são utilizadas em UPS (*Uninterruptible Power Supply*).

2.4.2 Tipo de baterias

Existem muitos tipos de bateria em relação aos materiais a que compõe (ânodo e cátodo). Alguns já foram citados anteriormente, como zinco/dióxido de manganês, zinco/dióxido de prata, íons de lítio, cádmio/óxido de níquel, entre outras. Para decisão

entre as várias opções, levou-se em consideração principalmente o preço, facilidade de acesso, robustez e adequação ao sistema. Nestes quesitos, destacou-se a bateria do tipo chumbo ácido, a qual é muito comum e bastante utilizada para várias aplicações.

A bateria de chumbo ácido apresenta uma característica diferente que é (BOCCHI; FERRACIN; BIAGGIO, 2000). O autor afirma também que este chumbo é geralmente recolhido das baterias exauridas, visto que o Brasil não dispõe de minas desse metal e seu preço é relativamente alto. Entretanto, o método utilizado para recolher este metal das baterias contamina a atmosfera com óxidos de enxofre e com partículas de chumbo. Além disso, como estas baterias contêm chumbo, um metal pesado e tóxico, elas representam risco para o meio ambiente.

Além destas divisões, pode-se também classificar a bateria de acordo com o tipo de descarga ao qual ela estará sujeita. As possibilidades, segundo (LAZZARIN, 2006), são as seguintes:

(1) Automotiva: principal função deste tipo de bateria é dar partida ou ignição de veículos. Para isto, uma elevada corrente em um curto período de tempo é necessária. As placas destas são muito finas (1mm) e tem área grande, além de serem projetadas para não descarregar mais que 5% de sua capacidade total. Uma descarga de 80% de sua carga nominal pode danificá-las totalmente em 30 a 50 ciclos.

(2) Tracionárias ou ciclo profundo: diferente das automotivas, estas são projetadas para perder até 80% de sua capacidade centenas ou até milhares de vezes durante sua vida útil. Para isto, suas placas são mais espessas que as placas automotivas (4.2mm). São utilizadas em empilhadeiras, veículos de tração e alimentação de emergência. Comercialmente falando, podem ser encontradas como baterias de grande volume e tensões de 48V, no mínimo.

(3) Estacionárias: as características das placas deste modelo são um meio-termo entre as duas anteriores, ou seja, nem tão grossas, porém nem tão finas. Estas são muito utilizadas no suprimento de potência ininterrupto e como são projetadas para não serem movidas, leva-se e conta no projeto a minimização da sulfatação ("recristalização dos finos cristais $PbSO_4$ em grânulos de $PbSO_4$. Ocorre durante longos períodos de baixo estado de carga. Reduz os volumes de chumbo e eletrólito. Conseqüentemente, as capacidades de carga e de fornecimento de energia se reduzem"(LAZZARIN, 2006).

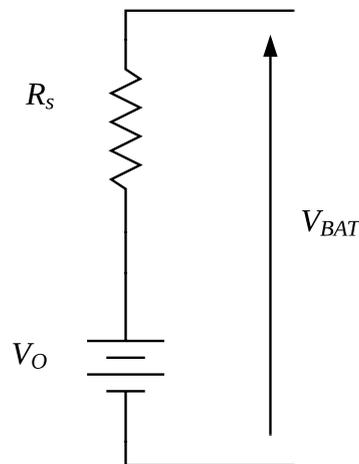
2.4.3 Modelo elétrico da bateria

Segundo (SEGUEL, 2009), encontrar um modelo elétrico ou matemático que descreva a resposta dinâmica de uma bateria não é simples, visto que suas reações químicas não são lineares e sofrem variações de acordo com vários fatores inter-relacionados, como a temperatura, estado de carga, aspectos construtivos, entre outros. Dentre os modelos

mais simples, os quais desprezam vários fatores da bateria, porém mais fáceis de serem implementados e os modelos mais sofisticados, porém mais complexos de se implementar. Os modelos demonstrados a seguir são os mais comuns de se encontrar. A explicação dos mesmos foi baseada no trabalho de (SEGUEL, 2009).

O modelo mais simples é mostrado na Figura 10, onde a bateria é representada por uma resistência R_i , a qual representa a resistência interna da bateria, em série com uma fonte de tensão ideal V_o , que representa a tensão de circuito aberto. Este modelo é simples e fácil de ser implementado, no entanto não permite estudar fenômenos próprios das baterias, tais como a capacidade de carga e descarga.

Figura 10 – Modelo elétrico simplificado.

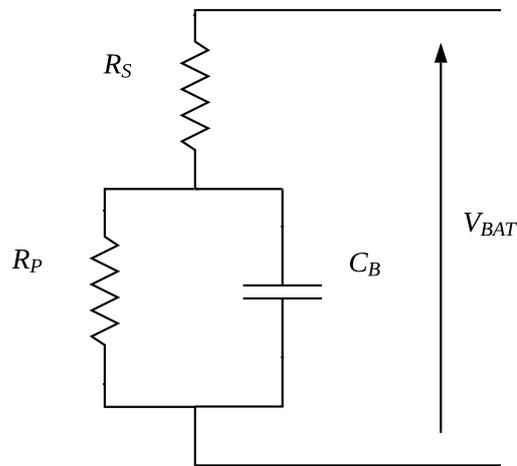


Fonte: Adaptado de (SEGUEL, 2009).

A Figura 11 mostra um modelo um pouco mais refinado que o primeiro, porém ainda simples. Este modelo é uma aproximação de primeira ordem da bateria, onde o capacitor C_b representa a capacidade de carga e descarga da bateria, o resistor R_p a auto-descarga da bateria e o resistor R_s a resistência interna. O valor de R_p é elevado, visto que a auto-descarga da bateria é um processo lento. Já a resistência R_s tem um valor baixo, pois o valor da resistência interna da bateria é pequena. Neste modelo, a inclusão da malha RC permite simular fenômenos transitórios tanto na carga quanto na descarga da bateria, mesmo sendo um modelo simples.

O próximo modelo, apresentado na Figura 12, apresenta o circuito equivalente de Thévenin de uma bateria. Este modelo conta com uma tensão de circuito aberto V_o , a resistência interna R_s e uma tensão em sobretensão, a qual surge com a combinação da resistência R_p com o condensador C_b . Este circuito permite verificar quais os principais elementos que condicionam o funcionamento das baterias. Entretanto, utilizar o modelo

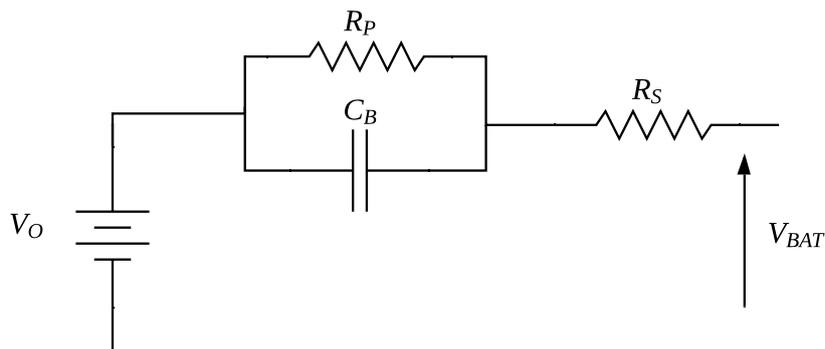
Figura 11 – Modelo elétrico de primeira ordem.



Fonte: Adaptado de (SEGUEL, 2009).

equivalente de Thévenin em simulações produz resultados poucos válidos, visto que realiza uma aproximação deficiente dos diferentes parâmetros, por considerá-los constantes, quando na verdade variam de acordo com o estado de carga, taxa de carga e descarga, capacidade de armazenamento da bateria e da temperatura.

Figura 12 – Modelo elétrico equivalente de Thévenin.

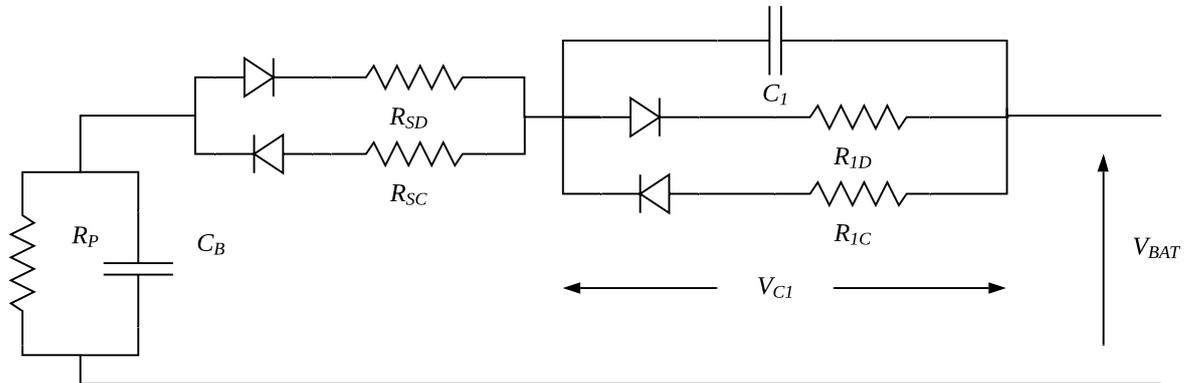


Fonte: Adaptado de (SEGUEL, 2009).

O último e mais sofisticado modelo é chamado de modelo de carga e descarga, exibido na Figura 13. Neste circuito os componentes presentes em V_{c1} que representam sobretensão, as resistências R_{sc} e R_{sd} , a resistência interna R_p de auto-descarga e C_b a capacidade de carga e descarga. Este modelo resulta em valores satisfatórios, porém necessita de vários testes físicos na bateria para determinar os valores de todos os parâmetros envolvidos no

circuito, o que, em alguns casos, impossibilita sua utilização.

Figura 13 – Modelo elétrico de carga e descarga.



Fonte: Adaptado de (SEGUEL, 2009).

2.4.4 Método de carga de baterias

De acordo com (SEGUEL, 2009), providenciar um carregamento completo para a bateria exige do controlador uma estratégia de controle na qual seja possível carregar rapidamente a bateria, dentro de seus limites, visto que o período de insolação (nos casos em que a bateria é utilizada em sistemas fotovoltaicos) é limitado. Para isso é recomendado utilizar o método de carga por tensão constante e limitação de corrente.

O autor explica que o processo de carga é geralmente dividido em três etapas para se obter uma rápida, segura e completa recarga da bateria. A primeira etapa é região de carga profunda (*Bulk charge*) a segunda é a região de sobrecarga (*Over charge*) e a terceira é a região de flutuação (*Float charge*). A Figura 14 mostra a corrente e tensão durante o processo de carga da bateria para cada região.

(1) - Região 1: Segundo (SEGUEL, 2009), quando a bateria encontra-se descarregada, esta chega a um nível mínimo de tensão $V_{Bat,MIN}$ (geralmente 10,5V para baterias de chumbo ácido de 12V). Neste momento é fornecida uma corrente de carga constante I_{BULK} , não podendo ser uma corrente muito elevada para evitar aquecimento excessivo e desgaste prematuro da bateria, normalmente limitada em 40% do valor da capacidade da bateria ou por um valor determinado pelo fabricante. Esta região ficará ativa até o momento em que a tensão da bateria atinja um valor de sobrecarga V_{OCH} , normalmente 14,4V para baterias de chumbo-ácido de 12V.

(2) - Região 2: Após a corrente ser mantida constante, agora será a tensão que será controlada no valor de V_{OCH} . A partir deste momento, a corrente começará a decrescer.

Quando a corrente for menor que I_{TRICK} (geralmente 1% da capacidade da bateria), este estágio de carga estará concluído. Usualmente este estágio de carga é sutil e apresenta uma transição rápida.

(3) - Região 3: Com a corrente em um valor muito baixo ou por um breve período negativa, a tensão aplicada será reduzida de V_{OCH} para $V_{Bat,FLOT}$ (normalmente 13,5V para baterias de chumbo-ácido de 12V). A corrente remanescente (I_{FLOT}) após este estágio é responsável apenas por compensar a auto descarga da bateria. Nesta condição pode-se dizer que a bateria esta carregada.

(MOTA et al., 2012) explica que o método de carga apresentado até aqui pode ser melhorado adicionando mais uma região de carga ou Região 0. Esta nova região será utilizada somente quando a bateria sofrer uma descarga além da tensão mínima, caracterizando uma descarga profunda (quando a bateria é descarregada além do valor mínimo de tensão, podendo danificá-la e reduzir muito sua vida útil, caso a bateria não seja projetada para isso).

(4) - Região 0: Neste caso, uma região com corrente constante I_{TC} (normalmente 1% a 1.5% da capacidade da bateria) é adicionada anteriormente à região com corrente constante de valor I_{BULK} . Esta etapa permanece até que a tensão da bateria atinja o valor mínimo $V_{Bat,MIN}$. As curvas de tensão e corrente considerando descarga profunda são exibidas na Figura 14.

2.5 Controladores

Devido à variação de capacidade da bateria de acordo com o tempo de descarga e às diversas etapas que envolvem a carga da bateria, precisa-se de um sistema que varie o ciclo de trabalho das chaves de acordo com a alteração do estado de carga das baterias. Por este motivo, será utilizado um sistema em malha fechada.

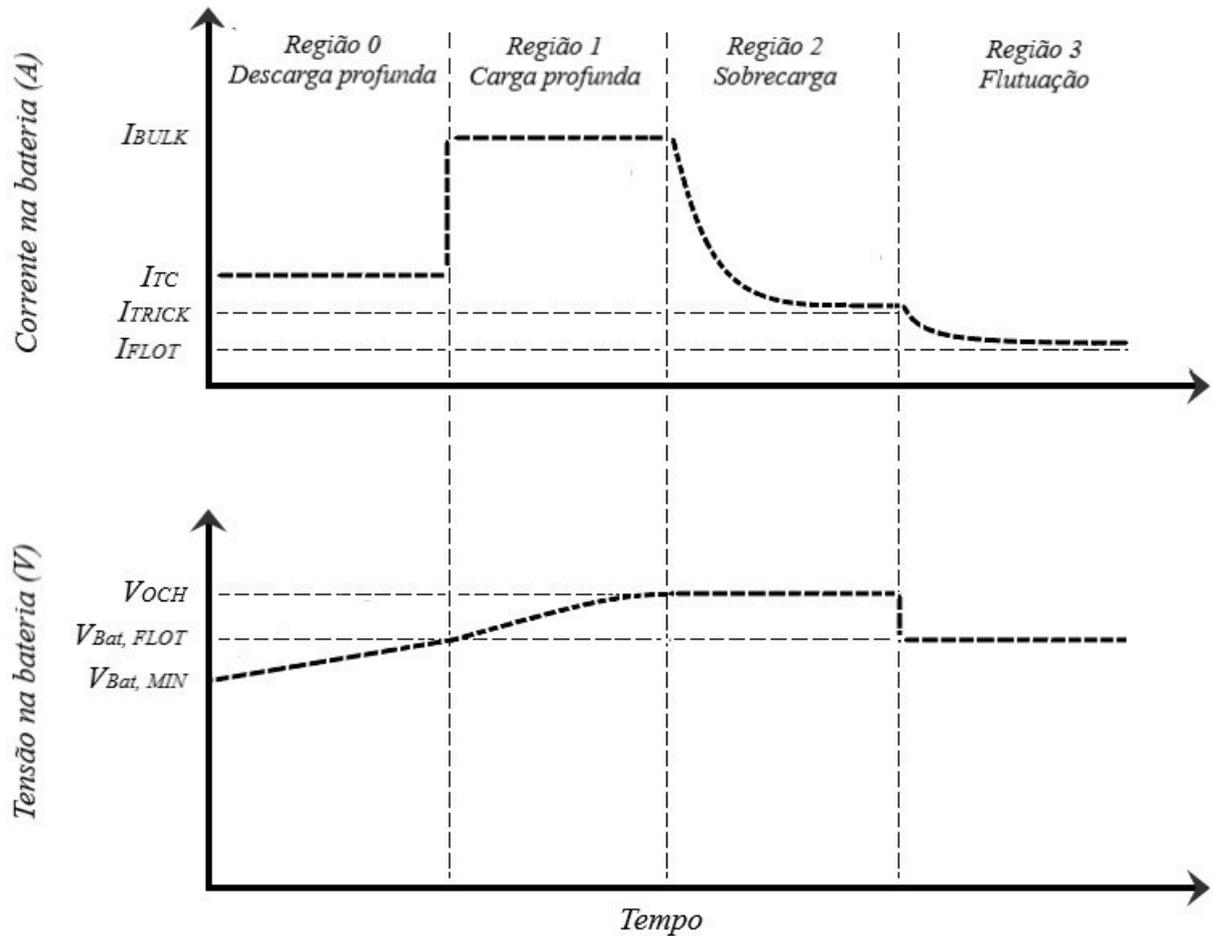
Vários são os métodos de controle utilizados atualmente, como avanço de fase, atraso de fase, avanço e atraso de fase, controladores proporcionais (P), integrais (PI), proporcionais, integrais e derivativos (PID), dentre outros. Foi optado por um controlador proporcional, integral (PI), pois este apresenta uma implementação não muito complexa, gera um erro nulo em regime permanente e diminui o tempo de resposta.

As ações de controle PI funcionam da seguinte maneira:

(1). Proporcional: de acordo com (BAZANELLA; JR., 2000), quanto maior for o ganho da ação proporcional, menor será o erro em regime permanente e maior será a oscilação transitória do sistema. Este controlador não irá zerar o erro em regime e caso o ganho aplicado no mesmo seja muito elevado, pode levar o sistema a instabilidade.

(2). Integral: (BAZANELLA; JR., 2000) afirma que a ação integral permite obter

Figura 14 – Curvas de corrente e tensão no processo de recarga da bateria com método de tensão constante e corrente limitada.



Fonte: Adaptado de (SEGUEL, 2009) e Autoria própria.

um erro em regime permanente. No entanto, a introdução deste controlador tende a piorar a instabilidade relativa do sistema em malha fechada ou até torná-lo instável. Por este motivo, o controle integral geralmente não é utilizado de maneira isolada.

A função de transferência de um controlador Proporcional-Integrativo (PI) é:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{sK_p + K_i}{s} = K_p \frac{s + K_i/K_p}{s} = \frac{K_c(s + z)}{s} \quad (2.9)$$

Onde, as variáveis K_c e z são relacionadas com as constantes integrativa e derivativa por:

$$K_c = K_p \quad (2.10)$$

$$z = \frac{K_i}{K_p} \quad (2.11)$$

2.6 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas informações sobre conversores CC-CC e revisões bibliográficas acerca de alguns conversores CC-CC isolados e de um conversor CC-CC isolado e bidirecional, o qual foi selecionado por suas características de operação serem melhores para projeto. Além disso, um estudo sobre baterias foi feito, passando por seus tipos, circuitos elétricos equivalentes e métodos de carga das mesmas. Posteriormente, também foi executado um estudo sobre controladores, sendo enfatizado o controlador PID na sua forma digitalizada.

No próximo capítulo serão abordados os projetos dos componentes que envolvem o conversor, o banco de baterias e o barramento CC e a estratégia de controle adotada para definir a direção do fluxo de energia do conversor.

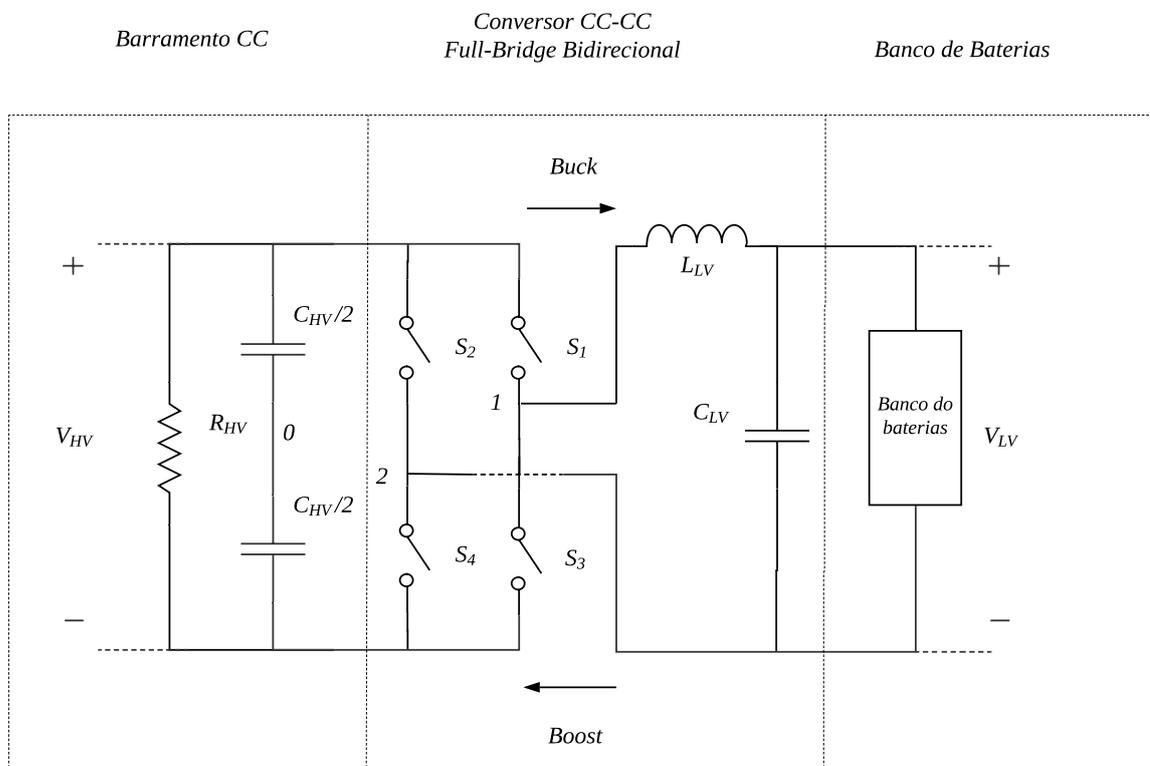
3 PROJETO DO CONVERSOR *FULL-BRIDGE* BIDIRECIONAL

Neste capítulo serão demonstrados os cálculos e processos para desenvolver o trabalho. O projeto será dividido em duas partes: projeto do banco de baterias e projeto do conversor CC-CC *Full Bridge*, no qual inclui o projeto de filtros. Posteriormente será exibido o conjunto completo e os resultados obtidos serão expostos no próximo capítulo. O sistema prévio, cujo componentes serão determinados é exposto na Figura 15.

Os valores estipulados para os projetos a seguir são:

1. $V_{Bat} = V_{Low,Voltage} = 192V$;
2. $V_{barr} = V_{High,Voltage} = 384V$;
3. $I_{barr} = 12A$;
4. $f_{chav} = 15kHz$;

Figura 15 – Sistema proposto do conversor CC-CC *Full-Bridge* e Banco de baterias.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Projeto do Banco de Baterias

Para iniciar o projeto do banco de baterias deve-se primeiramente definir qual bateria será utilizada como base de dados e informações. Para tal, optou-se pela bateria EVH 12240 de 24Ah e 12V, visto que esta bateria é utilizada em laboratórios da UFPB - Campus I e UFCG e facilitaria a utilização da mesma caso se desenvolvesse o trabalho na prática.

As especificações da bateria EVH 12240 para temperatura de 25°C são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações da bateria EVH 12240

Células por unidade	6
Tensão nominal por unidade	12V
Resistência interna aproximada	8,6mΩ
Tensão de flutuação média por unidade	13,65V
Equalização e Ciclo de Serviço por unidade	14,4V
Máxima corrente de carregamento	7,2A

Fonte: Adaptado de CSB Battery().

O modelo elétrico equivalente que será utilizado é o exposto na Figura 11, visto que este modelo é simples para simular eventos transitórios, não havendo assim uma grande perda de informações. Para obter o valor de R_P , R_S e C_b foram utilizadas informações disponíveis no *datasheet* da bateria.

O primeiro passo no projeto do banco de baterias é definir o número de baterias (N_{bat}) que serão necessárias para obter a tensão desejada. Para isto, dividi-se a tensão do lado de baixa tensão do conversor, onde o banco de baterias está localizado, pela tensão de cada bateria.

$$N_{bat} = \frac{V_{Low,Voltage}}{V_{Bat,Alone}} = \frac{192}{12} \quad (3.1)$$

$$N_{bat} = 16 \quad (3.2)$$

É preciso averiguar se haverá necessidade de mais um conjunto de 16 baterias em paralelo para suprir a corrente demandada pelo barramento no modo *Boost* (descarga) de operação. No barramento CC circulará uma corrente de 12A com tensão de 384V, resultando numa potência de 4608W. Partindo de que V_{Bat} do banco de baterias seja 192V e de que a potência de entrada deve ser igual à potência de saída, a corrente necessária no conjunto de baterias é:

$$I_{Bat} = \frac{P_{Bat}}{V_{Bat}} = \frac{4608}{192} \quad (3.3)$$

$$I_{Bat} = 24A \quad (3.4)$$

Com isso verifica-se que apenas um conjunto de 16 baterias em série é capaz de alimentar o barramento por um período de tempo, visto que a capacidade da bateria EVH 12240 é $C = 24Ah$. Como o tempo de fornecimento de energia não é o escopo do trabalho, apenas um conjunto será utilizado. Porém, caso fosse necessário um tempo maior de fornecimento, mais conjuntos poderiam ser utilizados em paralelo, diminuindo a corrente de descarga de cada grupo de bateria e, assim, aumentando o tempo em que estas conseguem prover energia.

3.1.1 Cálculo da Resistência Interna R_S

Após calcular o número total de baterias que serão necessárias para suprir a demanda de energia, necessita-se dos valores para o modelo elétrico de primeira ordem (Figura 11). Para isto, os cálculos serão iniciados pela resistência interna R_S , a qual é a mais simples de ser obtida, visto que, de acordo com CSB Battery (), o valor da resistência interna de cada bateria é aproximadamente $8,6m\Omega$. Dito isso, para obter o valor final de R_S , basta multiplicar no número total de baterias em série com o valor da resistência interna de cada, resultando em:

$$R_S = N_{Bat} * 8,6 * 10^{-3} \quad (3.5)$$

$$R_S = 137,6m\Omega \quad (3.6)$$

3.1.2 Cálculo da Resistência de Auto-Descarga R_P

Para calcular a resistência de auto-descarga, representada por R_P , utilizou-se a Figura 16. Este gráfico mostra a capacidade de retenção da bateria pelo tempo em que ela está em uso, ou seja, a taxa de auto-descarga da mesma. Para achar um valor de resistência que seja equivalente à curva (utilizou-se $25^\circ C$ como base de temperatura), tomou-se como base um tempo de estoque de 6 meses, pois neste ponto a capacidade da bateria está em aproximadamente 80%. Partindo deste ponto, tem-se que:

$$C = 24Ah \Rightarrow 80\%C = 19,2Ah \quad (3.7)$$

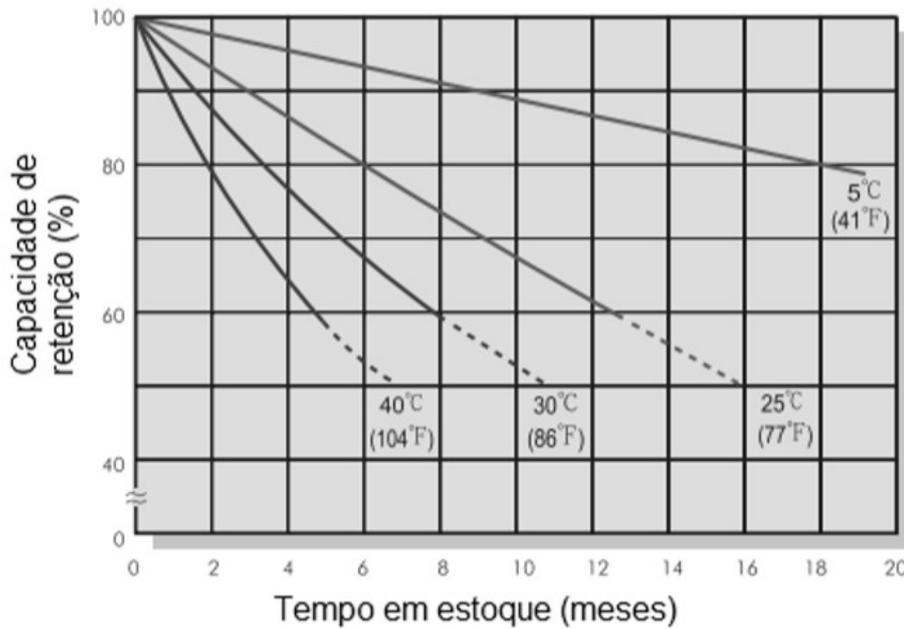
Logo

$$C_{Perdida} = C_{Total} - 80\%C = 24 - 19,2 = 4,8Ah \quad (3.8)$$

Então

$$\frac{4,8Ah}{6meses} = \frac{0,8Ah}{1mes} = \frac{0,8 * 1000mAh}{30 * 24h} = 1,111mA \quad (3.9)$$

Figura 16 – Características de auto descarga da bateria EVH 12240



Fonte: Adaptado de CSB Battery ().

Esse resultado diz que uma corrente de 1,111mA circulando por uma resistência resultará numa perda de 4,8Ah num período de 6 meses, portando utilizando a Lei de Ohm e tensão de 192V do conjunto de baterias tem-se que:

$$V = RI \Rightarrow R_P = \frac{192}{1,111mA} \Rightarrow R_P = 172,8k\Omega \quad (3.10)$$

3.1.3 Cálculo da Capacitância de Descarga C_B

Por fim, para obter-se o valor da capacitância, foram utilizadas as Tabelas 2 e 3, exibidas a seguir.

O valor de flutuação médio do banco de baterias representa o valor final de tensão após um ciclo de carga e o valor de descarga representa o valor final de tensão após um ciclo de descarregamento no banco. Este valor de descarga de 1,60V para cada célula resulta num valor total de 153,6V para as 16 baterias, visto que em cada bateria existem

6 células. O valor de flutuação médio para o banco de baterias resulta em um valor de 218,4V, visto que o valor de flutuação médio para cada célula é de 2,275V, segundo a CSB Battery ()).

Na primeira tabela, vê-se a relação entre tensão de descarga da bateria por célula e tempo de utilização dada através da corrente de descarga, ou seja, para uma corrente de descarga de 29,9A durante 30 minutos, por exemplo, obteve-se uma queda do valor de flutuação (218,4V/total ou 2,275V por célula) para o valor de descarga (153,6V/total ou 1,6V por célula) do banco de baterias. Na segunda tabela, vê-se a relação entre a tensão de descarga da bateria por célula e a corrente de descarga utilizada.

Tabela 2 – Características de descarga com corrente constante por célula da bateria EVH 12240.

F.V/Time	30MIN	45MIN	60MIN	90MIN	2HR	3HR	4HR	5HR	10HR	20HR
1,60V	29,9	22,0	17,7	13,0	10,3	7,50	5,84	4,84	2,57	1,31
1,67V	29,6	21,7	17,5	12,9	10,2	7,44	5,83	2,56	3,80	1,30
1,70V	29,4	21,6	17,4	12,8	10,1	7,41	5,82	2,55	3,79	1,29
1,75V	29,0	21,3	17,2	12,7	10,0	7,32	5,74	4,73	2,52	1,28
1,80V	28,4	21,1	17,0	12,5	9,98	7,16	5,65	4,64	2,49	1,27
1,85V	27,0	20,2	16,2	11,9	9,56	6,85	5,44	4,47	2,34	1,17

Fonte: Adaptado de CSB Battery()

Tabela 3 – Relação entre tensão de descarga da bateria por célula e corrente de descarga.

Tensão Final de Descarga por Célula	1,75	1,70	1,60	1,30
Corrente de Descarga	$0,2C > (A)$	$0,2C < (A) < 0,5C$	$0,5C < (A) < 1,0C$	$(A) > 1,0C$

Fonte: Adaptado de CSB Battery().

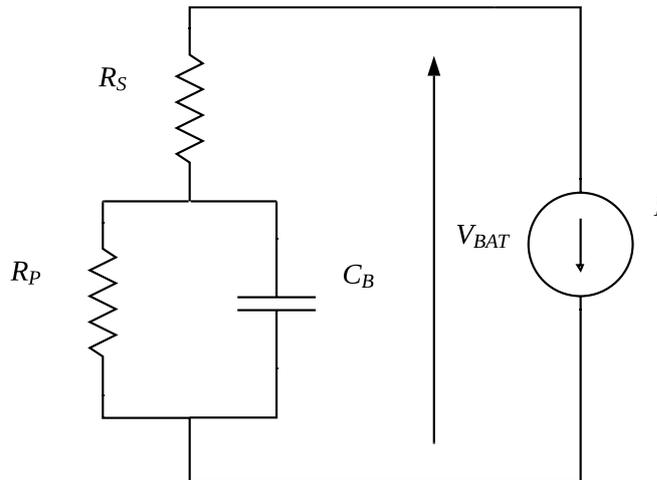
Para obter o valor do capacitor que compõe o modelo elétrico, primeiramente utilizou-se a Tabela 3 para definir qual será a tensão de descarga do banco de baterias a ser utilizada em relação à corrente de descarga. Como mostrado na Equação 3.4, a corrente de descarga necessária será de 24Ah. Observando novamente a tabela, percebe-se que uma corrente de descarga de 24A se encaixa no terceiro e no quarto caso ($0,5C < (A) < 1,0C$ e $(A) > 1,0C$), visto que a capacidade C da bateria é 24Ah. Optou-se pelo terceiro caso pois o valor de descarga de 1,60V para cada célula também está disponível na Tabela 2.

Após definir um valor de descarga para cada célula da bateria, precisou-se replicar os valores de corrente exibidos na primeira linha da Tabela 2. Para isto foi simulado o circuito mostrado na Figura 17. Com este circuito pôde-se aplicar uma corrente de descarga constante no modelo que representa o banco de baterias e verificar qual será a variação da tensão após o fim do tempo estipulado na tabela.

Utilizando o *software* de simulação digital e utilizando uma tensão V_{Bat} inicial de 218,4V, visto que esta é a tensão após o carregamento completo da bateria, aplicou-se

uma corrente I de descarga de 29,9A e mediu-se a tensão V_{Bat} do banco de baterias após um tempo de simulação de 30min. Após alguns testes, percebeu-se que o capacitor C_B , com capacitância de 850F teve uma variação de tensão de 218,4V para 153,6V, que seria a queda de tensão esperada de acordo com a Tabela 2 em 30 minutos . O mesmo foi executado para os demais pontos da Tabela 2 e obteve-se a Tabela 4.

Figura 17 – Circuito utilizado para obter o valor da capacitância para modelo das baterias.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Valores de capacitância obtidos para o modelo bateria.

Corrente de Descarga (A)	Capacitância (F)
29.9	850
22.0	970
17.7	1000
13.0	1100
10.3	1100
7.50	1200
5.84	1200
4.84	1300
2.57	1400
1.31	1500

Fonte: Autoria própria.

Como o valor desta capacitância não irá alterar o funcionamento do conversor, apenas o tempo de carga e descarga do banco de baterias e este não é o foco principal deste trabalho, foi feita uma média dentro os valores obtidos de capacitância e obteve-se um valor de:

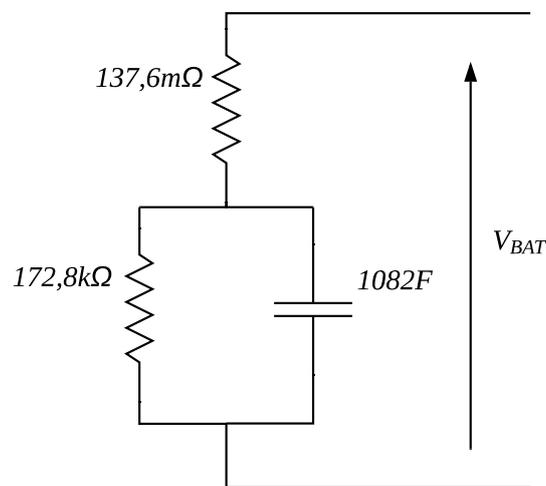
$$C_B = \frac{850 + 970 + 1000 + 1100 + 1200 + 1200 + 1300 + 1300 + 1400 + 1500}{10} \quad (3.11)$$

$$C_B = 1082F \quad (3.12)$$

3.1.4 Modelo Elétrico do Banco de Baterias

A partir dos resultados de resistência interna R_S , resistência de auto-descarga R_P e capacitância de descarga C_B , chegou-se ao modelo elétrico equivalente do banco de baterias apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Modelo elétrico equivalente do banco de baterias.



Fonte: Autoria própria.

3.2 Estratégia de Modulação

Na Figura 15, observando o lado de alta tensão do conversor V_{HV} , a microrrede CC é conectada aos capacitores de acoplamento e a uma carga, para emular o comportamento de potência de um sistema. O lado de baixa tensão V_{LV} é conectado ao modelo equivalente do banco de baterias com filtro LC passa-baixas de saída. O modo de operação do conversor é o mesmo para as etapas de *Buck* e *Boost* do controlador de carga proposto.

As chaves S_1 e S_4 e S_2 e S_3 compõem dois braços inversores, sendo que as chaves S_1 e S_3 são complementares, assim como as chaves S_2 e S_4 . A estratégia de controle deve considerar um tempo morto entre a comutação destas chaves, afim de evitar um curto-circuito na fonte de alimentação.

O sinal de chaveamento das chaves, que determinará a tensão de saída, é obtido comparando uma portadora triangular de alta frequência (V_{tri}) com o sinal de controle

de cada polo V_{10}^* e V_{20}^* , ou ainda com a tensão de saída V_{12}^* . O sobrescrito "*" representa variáveis de referência. Um modelo binário pode ser deduzido que representará os estados da chave. Como as chaves estão em oposição de fase, pode-se escrever

$$S_3 = \overline{S_1} \quad (3.13)$$

$$S_4 = \overline{S_2} \quad (3.14)$$

Logo considerando a possibilidade de chaveamento inicial de

$$S_1 = 1; S_2 = 0 \Rightarrow S_3 = 0; S_4 = 1 \quad (3.15)$$

Isto implicará em uma tensão de polo

$$V_{10}^* = \frac{E}{2} \quad (3.16)$$

De maneira análoga, o mesmo pode ser realizado para as outras possibilidades de chaveamento de S_1 , S_2 , S_3 e S_4 , o que resulta no resultado mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 – Possibilidades de chaveamento das tensões de polo V_{10}^*

S_1	S_2	V_{10}^*
0	0	0
0	1	-E/2
1	0	E/2
1	1	0

Fonte: Autoria própria.

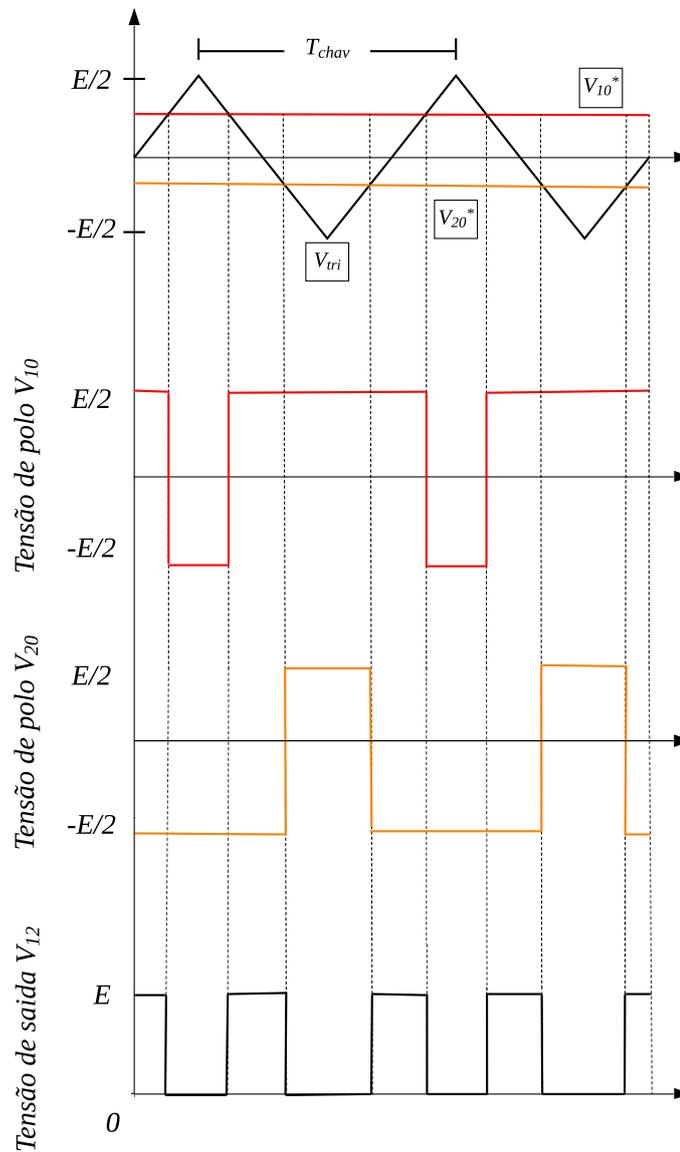
Com todas as possibilidades de saída para a tensão de polo V_{10}^* , o mesmo procedimento de determinação de tensão de polo é realizado para V_{20}^* . Outra observação é que a frequência de chaveamento do conversor é igual a frequência da portadora de alta frequência.

Com ambos resultado obtidos, a tensão de saída de um conversor *Full-bridge* é

$$V_{12}^* = V_{10}^* - V_{20}^* \quad (3.17)$$

Isto implica que a tensão de saída dependerá exclusivamente dos estados de saída das chaves, assumindo valores de 0, $+E$ e $-E$. A depender da referência utilizada no sinal de controle, a tensão média de saída pode assumir valores de $-E \leq V_{12}^* \leq +E$. Uma análise completa dos estados de chave, das tensões de pólo e da tensão de saída pode ser

Figura 19 – Estratégia de modulação.



Fonte: Autoria própria.

construída na Tabela 6. O resultado desta estratégia de modulação pode ser observado na Figura 19.

Uma forma útil que será utilizada na estratégia de modulação deste trabalho é escrever as tensões de polo em função da tensão de saída, isto pode ser observado nas Equações (3.18) e (3.19).

$$V_{10}^* = +\left(\frac{V_{12}^*}{2}\right) \quad (3.18)$$

Tabela 6 – Tensões de saída V_{12}^* .

S_1	S_2	V_{10}^*	V_{20}^*	V_{12}^*
0	0	0	0	0
0	1	$-E/2$	$E/2$	$-E$
1	0	$E/2$	$-E/2$	$+E$
1	1	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

$$V_{20}^* = -\left(\frac{V_{12}^*}{2}\right) \quad (3.19)$$

3.3 Projeto do Conversor CC-CC *Full-Bridge*

Esta etapa do trabalho envolve o projeto de um filtro LC, de um filtro C. O funcionamento deste conversor e as equações necessárias para o projeto do mesmo estão expostas na Seção 2.3.

3.3.1 Cálculo do Filtro LC

Para calcular os valores do filtro LC no lado de baixa tensão, segundo (HART, 2011), composto por L_{LV} e C_{LV} da Figura 8, primeiramente necessitou-se do valor do ciclo de trabalho (D) que será utilizado.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \Rightarrow D = \frac{V_o}{2V_{in}} \quad (3.20)$$

Como V_o é igual a 192V e V_{in} vale 384, então

$$D = \frac{192}{2 \cdot 384} \Rightarrow D = 0.25 \quad (3.21)$$

Com o valor de D definido, foram utilizadas as Equações (2.2) e (2.3) para obter o valor de L_{LV} e C_{LV} .

Utilizando a corrente máxima de carga do banco de baterias (7.2A de acordo com CSB Battery ()) e estipulando uma variação de 10% para esta corrente, tem-se que, a partir da Equação (2.2).

$$L_{LV} = \frac{V_o(\frac{1}{2} - D)}{\Delta I_L f_{chav}} = \frac{192(0,5 - 0,25)}{10\% \cdot 7,2 \cdot 15 * 10^3} \quad (3.22)$$

$$L_{LV} = 4,44mH \quad (3.23)$$

Com o valor do indutor calculado e estipulando uma variação de tensão de 10% para V_o , pode-se chegar ao valor do capacitor, o qual será

$$C_{LV} = \frac{(1 - 2D)V_o}{32\Delta V_o L f_{chav}^2} = \frac{(1 - 2 \cdot 0,25) \cdot 192}{32 \cdot 10\% \cdot 192,4 \cdot 444 \cdot 10^{-3} \cdot (15 * 10^3)^2} \quad (3.24)$$

$$C_{LV} = 0,156\mu F \quad (3.25)$$

Logo, o filtro LC do lado de baixa tensão do conversor terá valores de indutância de $4.444mH$ e capacitância de $0.156\mu F$.

3.3.2 Cálculo do Filtro C_{HV}

Para projetar o filtro puramente capacitivo utilizado no lado correspondente a microrrede CC, foi utilizada a Equação (2.8), como explicado na Seção 2.3. Estipulando uma variação de 1%, tem se que:

$$C_{HV} = \frac{I_{CC}}{f_{chav} \cdot V_{ripple}} = \frac{12}{15 \cdot 10^3 \cdot 1\% \cdot 384} \quad (3.26)$$

$$C_{HV} = 208\mu F \quad (3.27)$$

3.3.3 Cálculo da Resistência de Carga R_{HV}

A resistência R_{HV} deve se comportar como o barramento CC, ou seja, permite que haja uma corrente de $12A$ circulando por um barramento de $384V$. Logo, utilizando-se da Lei de Ohm, obtém-se

$$V = R_{HV}I \Rightarrow R_{HV} = \frac{V}{I} = \frac{384}{12} \quad (3.28)$$

$$R_{HV} = 32\Omega \quad (3.29)$$

3.4 Modelagem e Projeto de Controladores

Como visto anteriormente, este conversor possui duas etapas distintas de operação, modo *Boost* e *Buck*. Durante a etapa *Boost* o controle do conversor irá permitir a descarga do banco de baterias e durante a etapa *Buck* o banco de baterias é carregado através da micro-rede CC.

A direção do fluxo de energia depende de dois fatores, a tensão no barramento CC V_{Barr} e o estado de carga SOC (do inglês *State Of Charge*) do banco de baterias. De acordo com (ROSEMBACK, 2004), a potência P_{Barr} do barramento CC pode variar, visto que, como se trata de uma microrrede CC, a insolação sob os painéis solares é diferente para cada etapa diária ou devido a locais de instabilidade. Do mesmo modo, a potência P_{Cargas} consumida pelas cargas alimentadas pelo sistema fotovoltaico também apresenta uma grande variação. O autor explica que o estado de carga, o qual indica a capacidade disponível do banco de baterias expressa em porcentagem da capacidade nominal, é diretamente influenciado pela diferença entre P_{Barr} e P_{Cargas} . No entanto, (ROSEMBACK, 2004) afirma que o SOC pode ser estimado através da tensão V_{bat} do banco de baterias.

Portanto, as variáveis necessárias para decidir qual será a direção do fluxo de energia no conversor são as tensões V_{Barr} e V_{Bat} . Apenas estas duas variáveis são suficientes, pois V_{Bat} é uma estimativa do estado de carga das baterias e V_{Barr} informará se é possível efetuar a carga das baterias ou se é necessária potência do banco para manter a tensão do barramento CC dentro dos limites aceitáveis. Para verificar isso, é preciso observar as potências P_{Barr} e P_{Cargas} . Se a potência no barramento é maior que a potência nas cargas, existe potência excedente que pode ser entregue às baterias. Caso V_{Barr} diminua com o tempo, quer dizer que a diferença entre P_{Barr} e P_{Cargas} é negativa, ou seja, a carga está demandando mais potência do que a produzida, não havendo potência excedente para ser entregue ao banco.

Estipulando um limite mínimo $V_{Barr,MIN}$ para a tensão do barramento CC, um limite mínimo $V_{Bat,MIN}$ e um valor final de carga $V_{Bat,FLOT}$ para a tensão do banco de baterias, pode-se ter as seguintes combinações para definir a direção do fluxo de energia.

1. $V_{Barr} \geq V_{Barr,MIN}$ e $V_{Bat} \geq V_{Bat,MIN}$: Caso a tensão das baterias esteja abaixo da tensão $V_{Bat,FLOT}$, as baterias estão sendo carregadas. Caso V_{Bat} seja maior que $V_{Bat,FLOT}$ o banco de baterias está carregado ou está em processo de carga igual a V_{OCH} . Em ambos os casos, o fluxo de energia será do barramento para o banco;
2. $V_{Barr} \geq V_{Barr,MIN}$ e $V_{Bat} \leq V_{Bat,MIN}$: Neste caso, as baterias seguiram uma descarga profunda. As baterias serão carregadas seguindo as curvas da Figura 14, pois este modelo de recarga considera a descarga profunda;
3. $V_{Barr} < V_{Barr,MIN}$ e $V_{Bat} \geq V_{Bat,MIN}$: Com estes valores de tensão sobre o barramento, o conversor deve descarregar as baterias de modo a manter a tensão no barramento CC dentro dos limites;
4. $V_{Barr} < V_{Barr,MIN}$ e $V_{Bat} < V_{Bat,MIN}$: Neste caso, as baterias estão descarregadas e o barramento está com falta de energia, ou seja, o conversor entrará em modo

de espera até que a tensão no barramento seja estabelecida e as baterias sejam carregadas.

Utilizando o segundo método de carga explicado na Seção 2.4.4, representado pela Figura 14, pode-se perceber que as variáveis a serem monitoradas pelo algoritmo de controle serão a corrente I_{Bat} do banco de baterias, sendo esta considerada positiva ao entrar no banco e negativa ao sair, a tensão V_{Bat} nas mesmas e a tensão V_{Barr} do barramento CC.

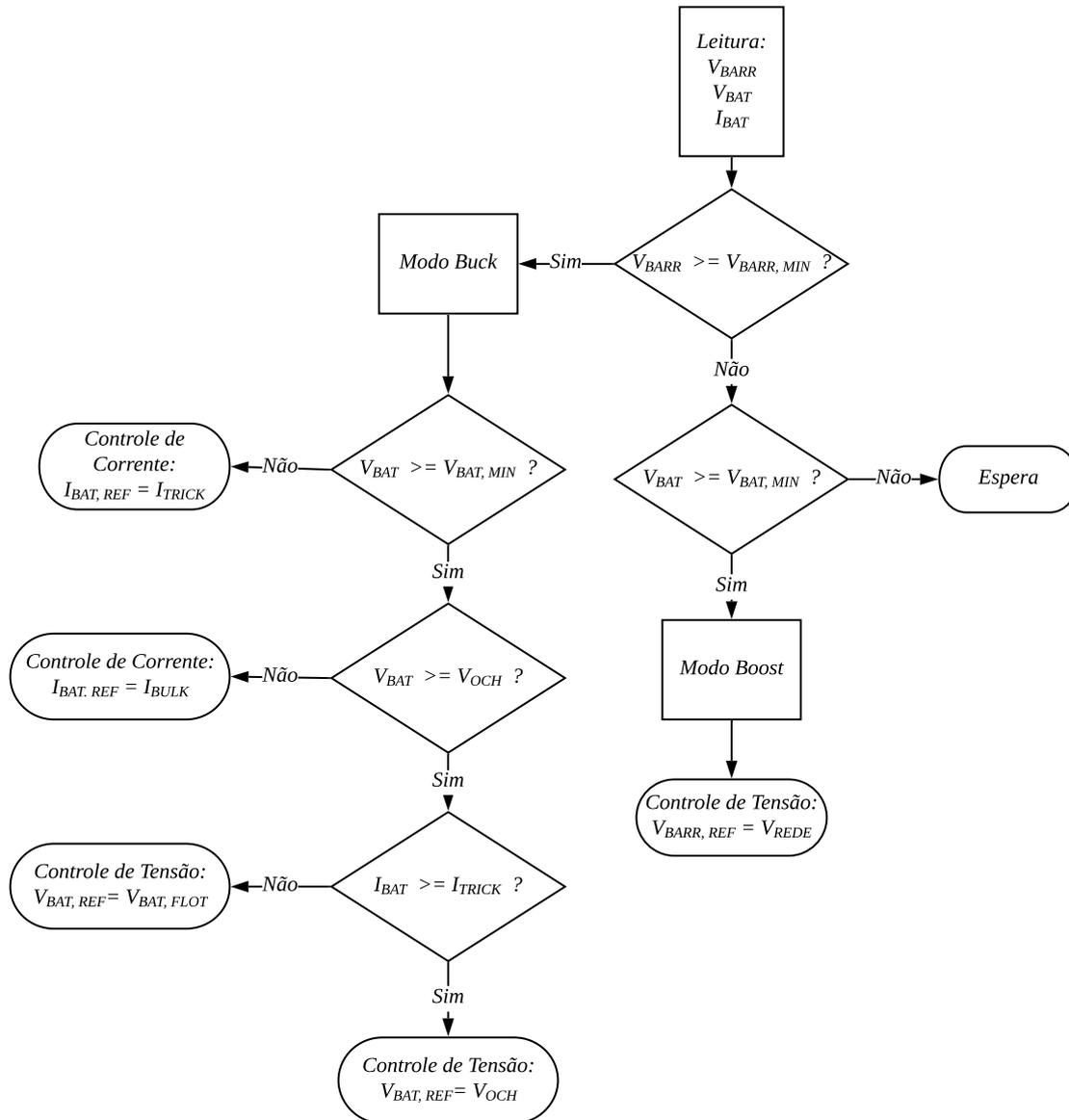
Definidas as variáveis necessárias e as possíveis combinações das mesmas para determinar a direção do fluxo de energia no conversor, pode-se gerar um fluxograma de controle, o qual é exibido na Figura 20, para mostrar quais serão as ações tomadas pelo controlador de modo a carregar ou descarregar o banco de baterias ou ficar num modo espera. Neste fluxograma, após definida qual será a ação de controle tomada pelo controlador (controle de tensão, controle de corrente ou espera), o controlador inicia verificação dos valores de V_{Barr} , V_{Bat} e I_{Bat} novamente e a nova ação de controle será definida. Este processo irá se repetir indefinidamente.

Pode-se imaginar que num sistema mais complexo haveria algum tipo de supervisão sobre esse sistema, tal como verificar se a bateria sofreu uma descarga profunda, permitir ou não a descarga profunda das baterias dependendo da situação da carga, se esta realiza numa aplicação crítica ou não, permitir ou não a carga da bateria, o que pode ser útil dependendo do preço da energia, por exemplo, visto que pode-se estocar energia em horários fora de ponta e vender essa mesma energia por um valor mais alto em períodos de ponta, entre outros. Para isso, foi incluso um sinal C_{Carga} chamado Comando de Carga, o qual permite ou não a carga da bateria, dependendo do seu nível lógico. Também foi adicionado outro sinal chamado de Comando de Descarga Profunda $C_{Des,Prof}$, o qual permite ou não aplicar uma descarga profunda nas baterias. Por outro lado, foi inserido um sinal de saída que avisa ao sistema de supervisão quando as baterias estão operando em um nível de descarga profunda.

Para gerar o sinal de controle para chaveamento dos dois conjuntos de chave foram utilizados controlador PI. Cada modo de operação (*Boost* ou *Buck*) tem um controlador respectivo. Os controladores foram implementados utilizando a Equação 2.9 e um bloco de controle chamado *Simplified C Block* ou Bloco C Simplificado. Este bloco de controle recebe os valores de tensão e corrente das baterias, tensão do barramento e sinais triangulares referentes as portadoras e retorna o estado das chaves dos semicondutores. O esquemático de controle pode ser observado através da Figura 21.

Para projetar e implementar o controle do conversor *Full-Bridge* é necessário obter as funções de transferência. A razão cíclica é responsável por controlar a corrente no indutor, então a função de transferência utilizada no projeto do controle de corrente é

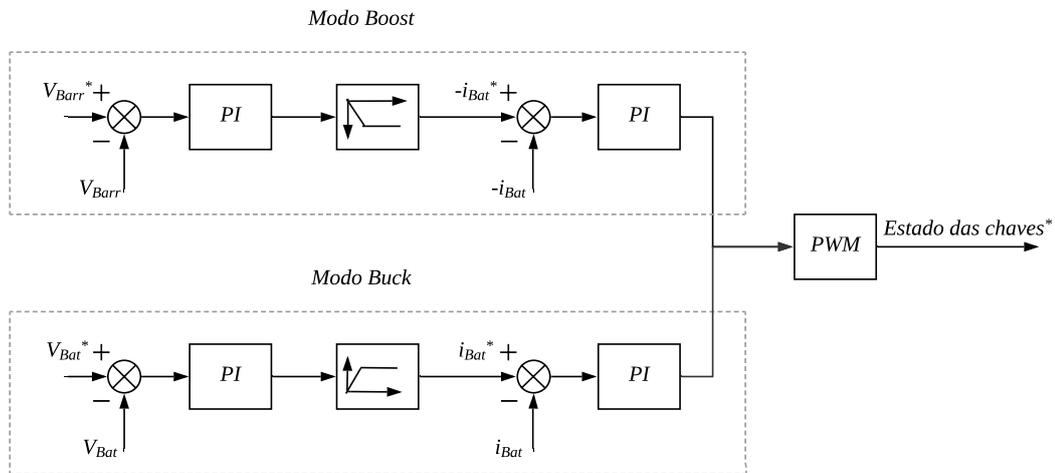
Figura 20 – Fluxograma de controle para ações do conversor CC-CC bidirecional *Full Bridge*.



Fonte: Autoria própria.

$G_i(s) = i_L(s)/d(s)$. Já a tensão V_{Bat} é controlada através da corrente do indutor, então a função de transferência utilizada no projeto do controle de tensão é $G_v(s) = V_{Bat}(s)/i_L(s)$. Essas funções de transferências são obtidas a seguir.

Figura 21 – Esquemático de controle.



Fonte: Autoria própria.

3.4.1 Modelagem Orientada ao Controle de Corrente no Indutor

Segundo (COSTA, 2013) como o conversor bidirecional opera impondo as tensões v_a e v_b e essas tensões são conhecidas, então o conversor pode ser representado por um circuito equivalente, tal como ilustrado na Figura 22. Neste circuito, os arranjos de semicondutores foram substituídos por duas fontes de tensão variáveis no tempo, definidas como

$$v_a(t) = v_{Barr}(t) \cdot d(t), \quad (3.30)$$

$$v_b(t) = v_{Bat}(t) \cdot [1 - d(t)], \quad (3.31)$$

Os valores médios quase instantâneos de v_a e v_b são calculados por

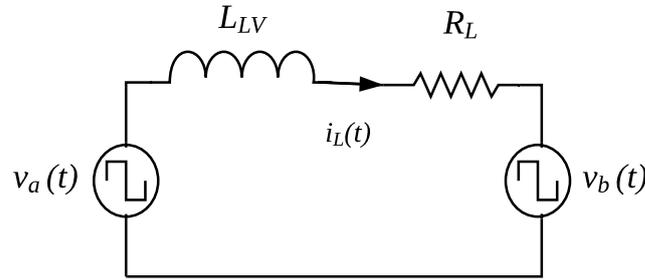
$$\langle v_a(t) \rangle_{T_s} = \langle v_{Barr}(t) \rangle_{T_s} \cdot \langle d(t) \rangle_{T_s} \quad (3.32)$$

$$\langle v_b(t) \rangle_{T_s} = \langle v_{Bat}(t) \rangle_{T_s} \cdot [1 - \langle d(t) \rangle_{T_s}] \quad (3.33)$$

Nota que a resistência intrínseca do indutor é considerada na obtenção do modelo matemático do conversor.

Considerando a corrente positiva no indutor ($i_L > 0$) e analisando o circuito da Figura 22, obtém-se

Figura 22 – Circuito equivalente do conversor bidirecional utilizado para modelagem orientada ao controle de corrente.



Fonte: Autoria própria.

$$v_a(t) - v_b(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} + R_L \cdot i_L(t) \quad (3.34)$$

Portanto, calculando o valor médio quase instântaneo de (3.32) e substituindo em (3.33) e (3.34) no resultado encontrado, chega-se na expressão (3.35)

$$L \cdot \frac{d\langle i_L(t) \rangle_{T_s}}{dt} + R_L \cdot \langle i_L(t) \rangle_{T_s} = \langle v_{Barr}(t) \rangle_{T_s} \cdot \langle d(t) \rangle_{T_s} - \langle v_{Bat}(t) \rangle_{T_s} \cdot [1 - \langle d(t) \rangle_{T_s}] \quad (3.35)$$

Pertubando as variáveis v_{Barr} , v_{Bat} , i_L e d , e em seguida linearizando-a aplicando a transformada de Laplace, obtém-se

$$(s \cdot L + R_L) \cdot \hat{i}_L(s) = (V_{Barr} + V_{bat}) \cdot \hat{d}(s) + \hat{v}_{Barr}(s) \cdot D - \hat{v}_{Bat}(s) \cdot \bar{D} \quad (3.36)$$

Para a primeira aplicação proposta (Modo *Buck*), a tensão de entrada v_{Barr} é constante e a tensão de saída é controlada pelo conversor, através de uma malha lenta de tensão, segundo Costa(2013). Como a dinâmica da malha de tensão v_{Bat} é consideravelmente mais lenta que a dinâmica da malha de corrente, a tensão v_{Bat} pode ser considerada constante. O mesmo pode ser deduzido para a segunda aplicação (Modo *Boost*), considerando o descarregamento da bateria lento, as tensões de entrada e saída do conversor são constantes. Desse modo, considerando as duas aplicações descritas, as perturbações nas tensões v_{Barr} e v_{Bat} podem ser desconsideradas na Equação (3.36), resultando na função de transferência $G_i(s)$, apresentada em (3.37)

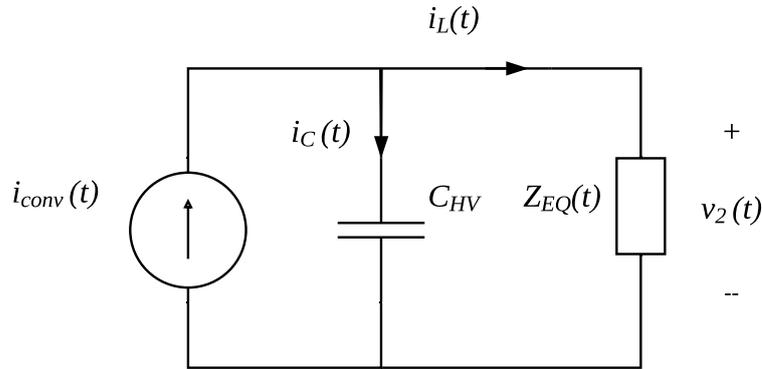
$$G_i(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{V_{Barr} + V_{Bat}}{s \cdot L + R_L} \quad (3.37)$$

É importante ressaltar que a análise considerando corrente negativa no indutor resulta na mesma função de transferência.

3.4.2 Modelagem Orientada ao Controle de Tensão

No modo de operação *Buck*, o estágio de saída é formado por um capacitor em paralelo com o modelo elétrico equivalente do banco de baterias. Do ponto de vista do capacitor, o conversor pode ser substituído por uma fonte de corrente controlada i_{conv} , o circuito equivalente é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Circuito equivalente utilizado para a modelagem orientada ao controle de tensão v_{Bat} .



Fonte: Autoria própria.

A fonte de corrente controlada i_{conv} , que aparece na Figura 23, está relacionada com a corrente i_L através de

$$i_{conv}(t) = i_L(t) \cdot [1 - d(t)] \quad (3.38)$$

O valor médio quase instantâneo desta corrente é dado por

$$\langle i_{conv}(t) \rangle_{T_s} = \langle i_L(t) \rangle_{T_s} \cdot [1 - \langle d(t) \rangle_{T_s}] \quad (3.39)$$

Analisando o circuito mostrado na Figura 23, obtém-se a expressão mostrada em

$$i_{conv}(t) = C_{HV} \cdot \frac{dv_{Bat}(t)}{dt} + \frac{v_{Bat}(t)}{Z_{eq}} \quad (3.40)$$

Onde Z_{eq} representa a impedância equivalente do banco de baterias visto dos terminais do capacitor de alta tensão C_{HV} . Calculando o valor médio instantâneo em (3.40) e substituindo em (3.39) no resultado encontrado, chega-se em

$$\langle i_L(t) \rangle_{T_s} \cdot [1 - \langle d(t) \rangle_{T_s}] = C_{HV} \cdot \frac{d\langle v_{Bat}(t) \rangle}{dt} + \frac{\langle v_{Bat}(t) \rangle}{Z_{eq}} \quad (3.41)$$

Pertubando as variáveis v_2 e d , e em seguida linearizando e aplicando a transformada de Laplace, obtém-se a função de transferência G_v em

$$G_v(s) = \frac{V_{Bat}(s)}{i_L(s)} = \frac{\bar{D}.Z_{eq}}{s.C.Z_{eq} + 1} \quad (3.42)$$

3.4.3 Ganhos de controladores

Os ganhos utilizados nos controladores são exibidos nas Tabelas 7 e 8. Estes valores de ganhos foram obtidos através de testes e aproximações, de modo a obter um valor satisfatório de resposta.

Tabela 7 – Valores dos ganhos dos controladores do modo *Buck*.

Etapa de controle	K_I	K_P
Corrente constante I_{TRICK}	220	96,8
Corrente constante I_{BULK}	220	96,8
Tensão constante V_{OCH}	0,1	100
Tensão constante V_{FLOT}	0,1	1,5

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 – Valores dos ganhos dos controladores do modo *Boost*.

Etapa de controle	K_I	K_P
Tensão constante V_{Barr}	0,1	0,05

Fonte: Autoria própria.

3.5 Modelo Completo

Após determinar os componentes que envolvem o modelo elétrico equivalente da bateria e os componentes do conversor CC-CC bidirecional *Full Bridge*, pode-se utilizar os resultados em conjunto e montar o circuito completo de potência, excluindo a parte de controle, como mostra a Figura 24.

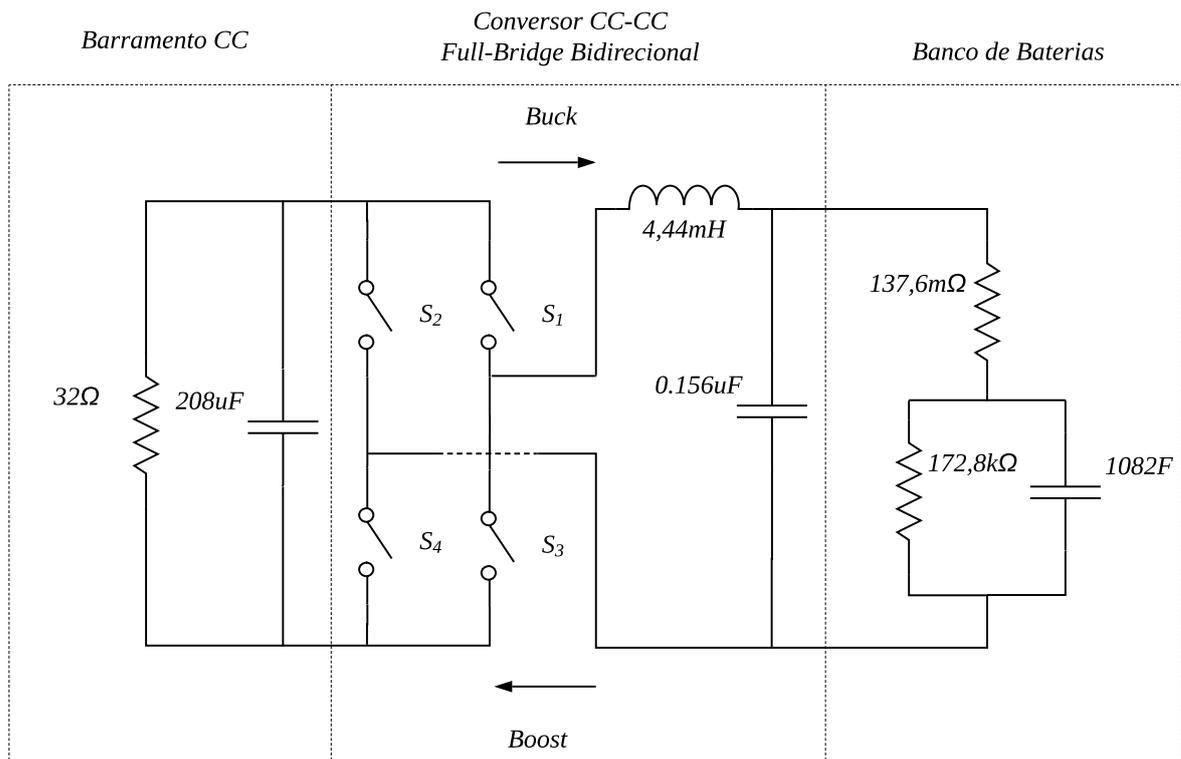
Para melhor organizar os valores obtidos e os valores utilizados como referência, foram criadas as Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Valores obtidos para o banco de baterias, conversor CC *Full-Bridge* e barramento CC

Variável	C_B	R_P	R_S	C_{LV}	L_{LV}	C_{HV}	R_{HV}
Modo Buck	1082F	172.8k Ω	137.6m Ω	0,156 μ F	4,44mH	208 μ F	32 Ω

Fonte: Autoria própria

Figura 24 – Sistema utilizado para simulação de carga e descarga do banco de baterias.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Valores utilizados como referência para carga e descarga do banco de baterias

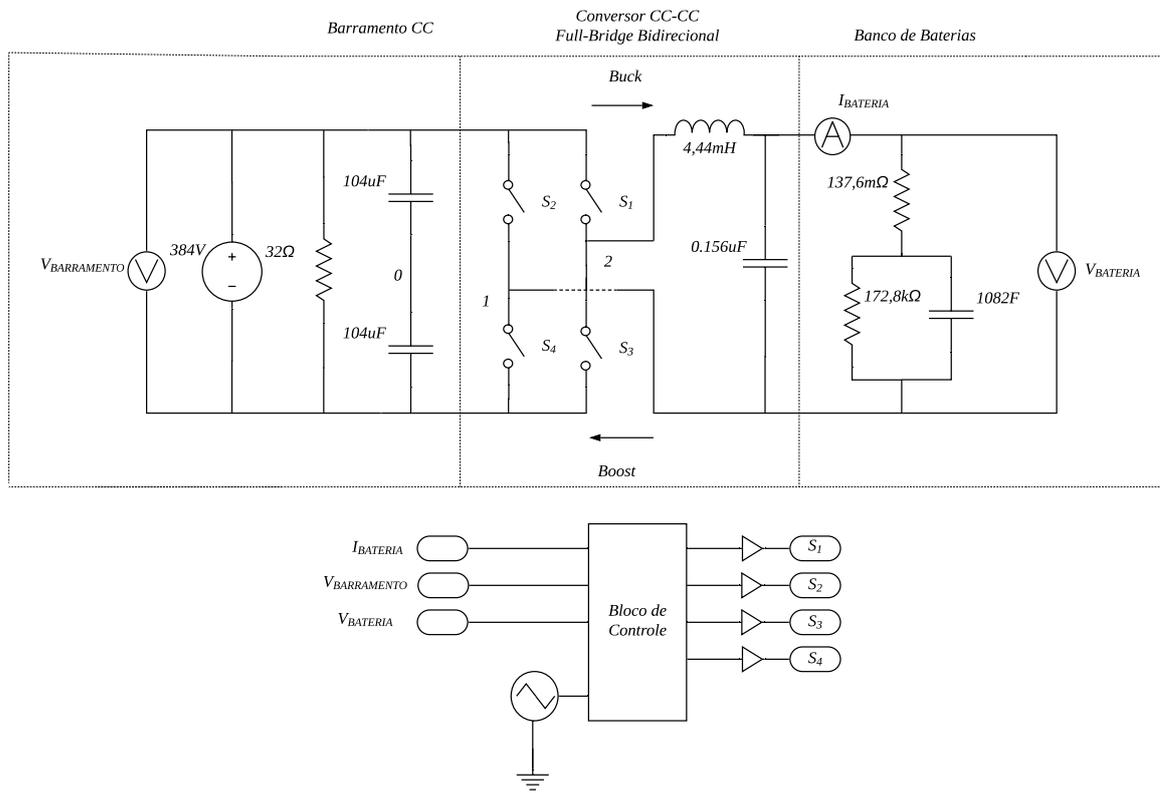
Variável	V_{Barr}	I_{Barr}	V_{Bat}	I_{TRICK}	I_{BULK}	V_{OCH}	$V_{Bat,FLOT}$	$V_{Bat,MIN}$	I_{Bat}
Modo Buck	384V	12A	192V	0.24A	7.2A	230.4V	218.4V	153.6V	24A

Fonte: Autoria própria.

4 Resultados e Discussões

Para simular o sistema exibido na Figura 24, como dito anteriormente, foi realizado uma simulação digital. Para simular o modo *Boost*, as fontes de tensão que representam o barramento CC são removidas. As entradas do bloco de controle são as variáveis lidas (I_{Bat} , V_{Bat} e V_{Barr}) do sistema, juntamente com a portadora triangular de alta frequência. As saídas do bloco de controle determinam os estados das chaves do circuito e uma saída extra para observar o modo de operação do conversor.

Figura 25 – Circuito utilizado para simulação do sistema.



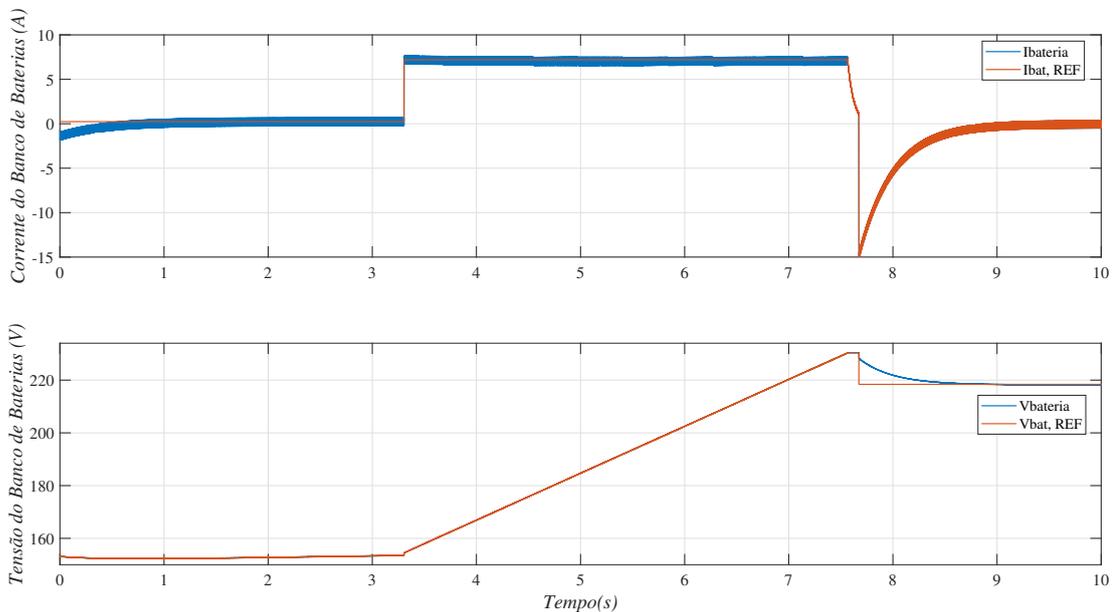
Fonte: Autoria própria.

Os resultados podem ser divididos para os dois modos de operação do conversor: *Buck* e *Boost*. Primeiramente serão exibidos os resultados das simulações do modo *Buck* de operação, ou seja, o modo de carga do banco de baterias. Posteriormente os gráficos resultantes do modo *Boost* serão expostos.

4.1 Modo *Buck*

Analisando a Figura 26 em baixa frequência e comparando-a com a Figura 14, percebe-se que o carregamento da bateria foi executado respeitando o método escolhido. [Para gerar a curva da figura abaixo, a bateria foi iniciada com uma tensão abaixo de $V_{Bat,MIN}$, ou seja, abaixo de 153.6V. Em relação a Tabela 11, o modo de operação do conversor quer se referir à que modo de controle está ativo no momento, ou seja, qual ação de controle o conversor irá realizar no respectivo instante]. Os modos de operação e as ações de controle respectivas estão listados na Tabela 11.

Figura 26 – Curvas de corrente e tensão do banco de baterias.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 11 – Modos de operação do conversor - Modo *Buck*

Modos de operação do conversor	Função do conversor
1	Modo de carga com corrente constante I_{TRICK}
2	Modo de carga com corrente constante I_{BULK}
3	Modo de carga com tensão constante V_{OCH}
4	Modo de carga com tensão constante $V_{Bat,FLOT}$

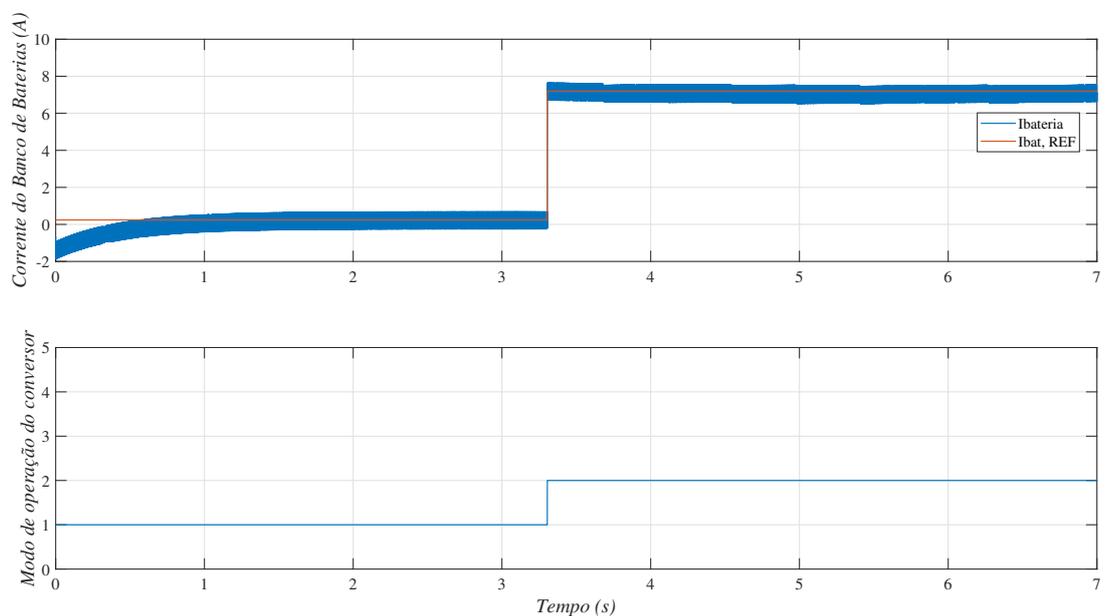
Fonte: Autoria própria.

Para realizar o ensaio, cujo resultado está exposto na Figura 26, o tempo de carga da bateria real não foi respeitado, visto que para rodar uma simulação, seria necessário um tempo muito grande. Como a ação do controlador é igual independente do tempo de carga,

foi utilizado um capacitor de 0,5F no modelo equivalente do banco de baterias. Como o valor do capacitor influencia diretamente na constante de tempo do banco de baterias, o tempo carregamento e descarregamento será conseqüentemente menor.

A partir da Figura 26, foram retiradas as Figuras 27 e 28. Na primeira, o pico de corrente existente quando há mudança do modo de operação do conversor de 1 para 2 está sendo evidenciado, enquanto na Figura 28 é evidenciado o modo de operação 3, que está relacionado à etapa de carga com tensão constante no valor V_{OCH} e a transição para o modo de operação com tensão constante no valor de $V_{Bat,FLOT}$.

Figura 27 – Mudança do modo de operação do conversor de 1 para 2.



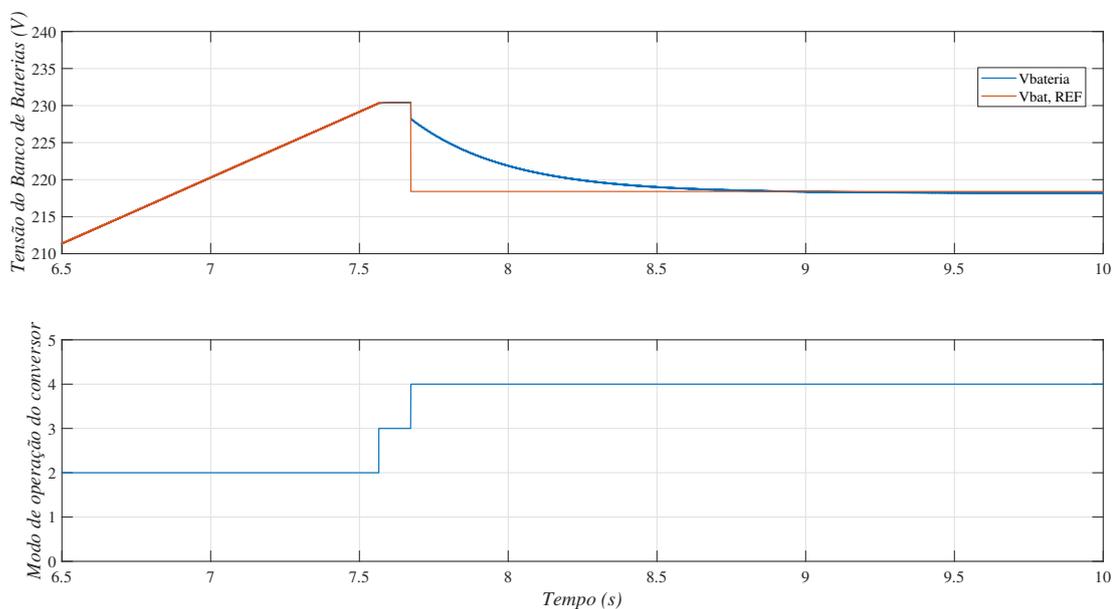
Fonte: Autoria própria.

Como explicado previamente, a carga da bateria pode ser dividida em quatro regiões ou etapas. São elas:

1. **Corrente constante I_{TRICK}** : representada pelo intervalo de tempo em que o conversor está trabalhando no modo de operação 1 na Figura 26. Esta etapa caracteriza uma carga após a bateria sofrer uma descarga profunda. A corrente de carga é mantida constante em 1% da capacidade da bateria (banco de baterias, no caso). Neste projeto, como a capacidade do banco de baterias é $C = 24Ah$, tem-se uma corrente no valor de 0,24A.
2. **Corrente constante em I_{BULK}** : representada pelo intervalo em que o conversor está trabalhando no modo de operação 2. A corrente é mantida em 7,2A, pois esta é a corrente máxima de carga permitida para o modelo de bateria EVH 12240.

3. **Tensão constante em V_{OCH} :** momento em que o conversor atua no modo de operação 3. Neste instante, a tensão é controlada no valor de equalização (14,4V/bateria, ou seja, 230,4V no total) por um breve momento até que a corrente atinja um valor menor que 1% da capacidade das baterias, ou seja, menor que 0,24A. Atingindo este valor, uma etapa transitória será iniciada, em que o valor de tensão está sendo alterado de V_{OCH} para $V_{Bat,FLOT}$. Comparando com a Figura 14, percebe-se que a corrente de bateria apresenta valor negativo em relação ao modelo estudado, esta corrente se faz necessária no sistema, visto que o modelo de bateria utilizado é baseado num capacitor e este necessita fornecer energia para atingir a referência de tensão.
4. **Tensão constante em $V_{Bat,FLOT}$:** momento em que o ciclo de carregamento da bateria está completo. A partir deste instante, a tensão é controlada no valor de flutuação (13,65V/bateria, ou seja, 218,4V no total) até que haja necessidade de fornecimento de potência da micro-rede CC e haja um novo ciclo de descarregamento.

Figura 28 – Modo de operação do conversor em 3 e mudança de operação do conversor de 3 para 4.



Fonte: Autoria própria.

Para verificar se as variáveis estão adequadas aos níveis citados acima, foi utilizada a medição digital. Os valores eficazes (RMS, do inglês Root Mean Square) obtidos através desta estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores RMS das correntes e tensões para as etapas de carga - Modo *Buck*.

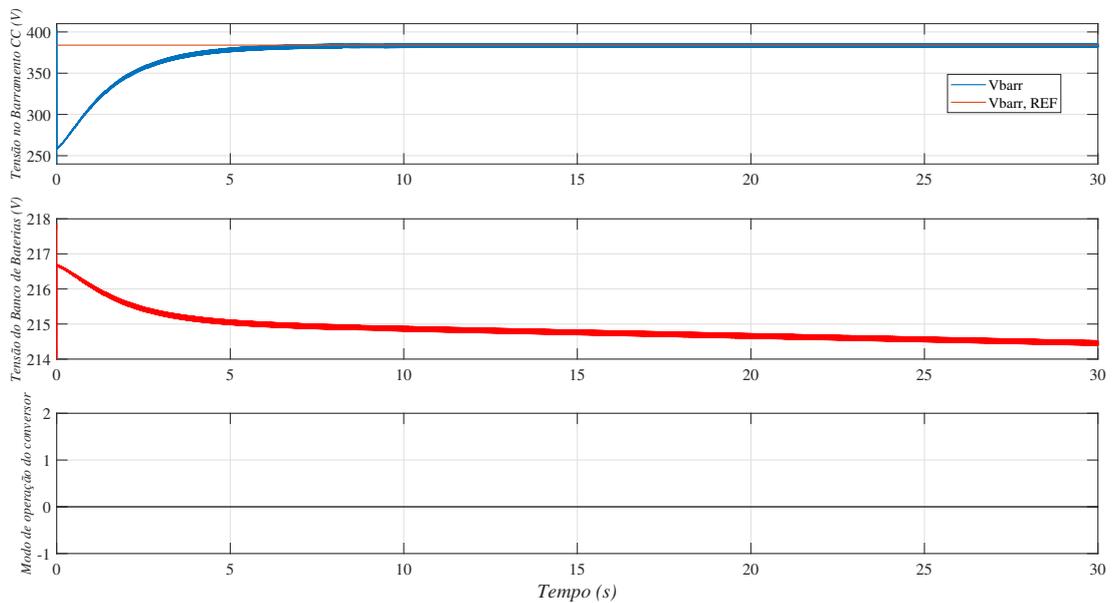
Variáveis controladas	Medição (RMS)
I_{TRICK}	0,24002
I_{BULK}	7,19827
V_{OCH}	230,27391
V_{FLOT}	218,28347

Fonte: Autoria própria.

4.2 Modo Boost

Para o modo de operação *Boost*, os níveis de tensão e corrente serão analisados para verificar se estes estão adequados ao projeto. Para isso, ajustou-se a tensão do banco de baterias para 218,4V e simulou-se o sistema durante 30 segundos (o sistema não foi simulado até as baterias ficarem descarregadas pois iria demorar um tempo demasiadamente grande. O resultado é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Curvas de tensão do barramento CC e banco de baterias.



Fonte: Autoria própria.

Para verificar se os valores estão dentro do esperado, a medição do digital foi utilizada novamente. Os resultados das medições realizadas são mostrados na Tabela 13. O valor de tensão das baterias não foi exibido visto que ele diminui com o tempo.

Analisando a Tabela 13, percebe-se que os valores obtidos na simulação encontram-se dentro dos valores esperados.

Tabela 13 – Valores RMS das correntes e tensões para as etapas de descarga - Modo *Boost*.

Variáveis controladas	Medição (RMS)
I_{Barr}	11,99A
I_{Bat}	21,40A
V_{Barr}	383,91V

Fonte: Autoria própria.

Com o valor da tensão das baterias pode-se estimar quanto tempo elas conseguiriam alimentar o barramento. Analisando a Tabela 2, afirma-se que o tempo que as baterias conseguirão alimentar o barramento CC está entre 30 minutos e 60 minutos. Isso porque é considerada uma tensão final de descarga de 1,60V por célula, o que resulta em 153,6V para o banco de baterias. Como a corrente de descarga oscilará em torno de 24A, o tempo equivalente está dentre 30 e 60 minutos. Para estimar este tempo, basta utilizar uma simples "Regra de três". Para isso necessita-se do valor médio final da tensão V_{Bat} após os 30 segundos, que é de 214,45V.

Como a tensão da bateria no tempo de acomodação de 5s do barramento CC é aproximadamente 215V, então a tensão reduziu-se de 215V para 214,45V, tem-se uma diferença de 0,55V em 25 segundos. Então, se em 25 segundos a tensão diminuiu 0,55V, para diminuir 61,4V ($215V - V_{Bat,MIN}$) obtém-se

$$T = \frac{25s * 61,4V}{0,55} \quad (4.1)$$

$$T = 2790,90s + 5s = 46,59min \quad (4.2)$$

Conclue-se então que os valores obtidos nas medições e o tempo que as baterias aguentarão fornecer energia para o barramento (sem sofrer uma descarga profunda) estão dentro do esperado.

Resta ainda averiguar o comportamento do conversor em relação à descarga profunda está coerente. Para isto, ajustou-se o valor de tensão das baterias próximo do valor de descarga e foi monitorado o valor do sinal de descarga profunda enviado pelo conversor para o sistema de supervisão. Os resultados para os casos em que a descarga profunda está habilitada e quando não está habilitada são exibidos nas Figura 30 e 31. Para gerar ambas figuras, o valor do capacitor do banco de baterias foi diminuído para 50F visando deixar a descarga mais rápida e assim mais fácil de visualizar o momento em que o banco de baterias chega no valor final de descarga de tensão (153,6V). Analisando os dois casos (descarga profunda habilitada e desabilitada), tem se que:

1. **Descarga profunda habilitada:** Neste modo de operação, no instante em que a tensão RMS das baterias fica menor que a tensão mínima ($V_{Bat,MIN}$ ou 153,6V), o

sinal de aviso de que as baterias estão sofrendo uma descarga vai para nível lógico 1 e as baterias continuam fornecendo energia para o barramento CC.

2. **Descarga profunda desabilitada:** Neste caso, assim que a tensão RMS das baterias entram no valor de descarga profunda, o fornecimento de energia é cortado, diminuindo a tensão do barramento CC e zerando a corrente das baterias, visto que elas não devem mais enviar energia para o barramento, além de não haver envio de sinal de aviso de descarga profunda, pois esta está desabilitada.

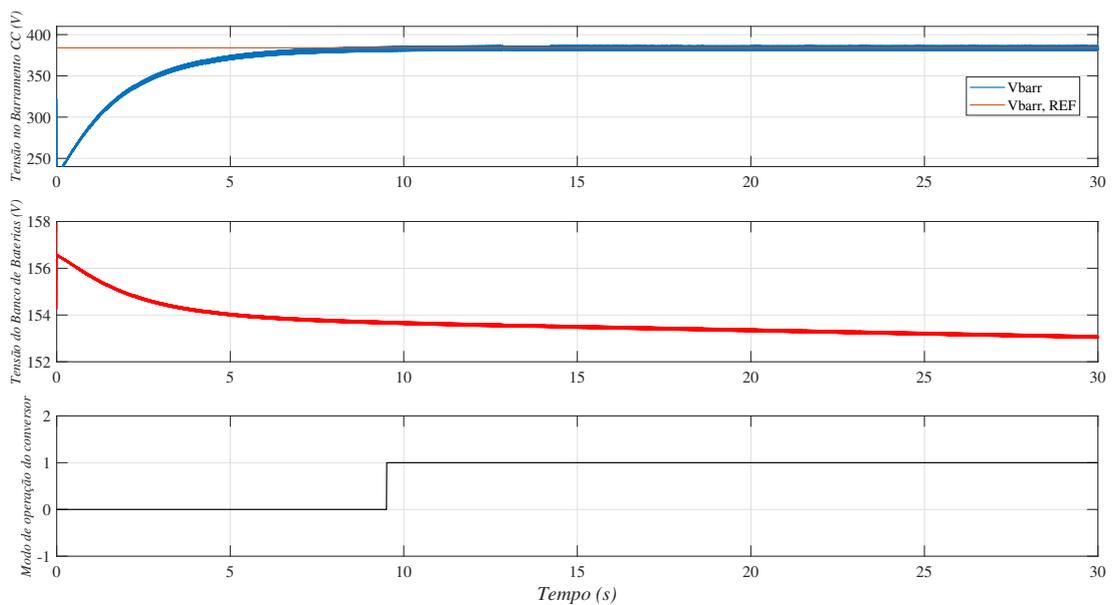
Tabela 14 – Modos de operação do conversor - Modo *Boost*

Modos de operação do conversor	Função do conversor
1	Modo de descarga profunda habilitada
0	Modo de descarga profunda desabilitada

Fonte: Autoria própria.

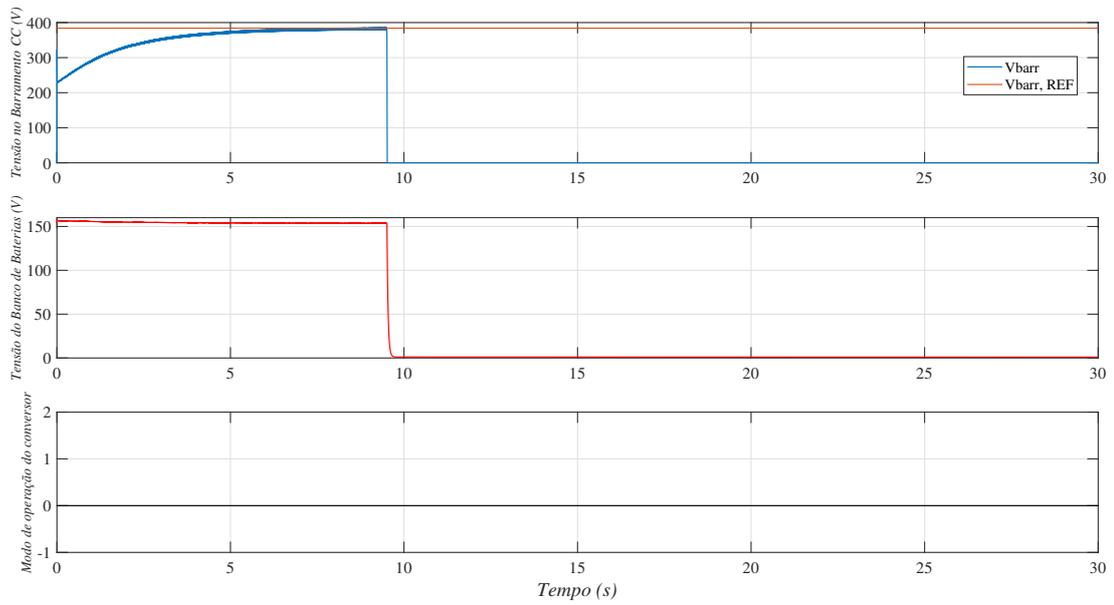
Para gerar ambas figuras, o valor do capacitor do banco de baterias foi diminuído para 50F visando deixar a descarga mais rápida e visualizar de maneira mais fácil o momento em que o banco de baterias chega no valor final de descarga.

Figura 30 – Curvas de tensão do barramento CC e banco de baterias com descarga habilitada.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Curvas de tensão do barramento CC e banco de baterias com descarga dehabilitada.



Fonte: Autoria própria.

5 Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma modelagem de um conversor bidirecional CC-CC do tipo *Full-Bridge*, bem como o projeto de seu respectivo controlador, com o objetivo de controlar a carga e descarga de um banco de baterias a partir de um barramento CC que está conectado a uma microrrede CC.

Primeiramente foram realizados estudos sobre conversores CC-CC e considerou-se a possibilidade de não isolamento e bidirecionalidade. Por este motivo, alguns conversores CC-CC isolados e não isolados foram analisados e após análises, optou-se por utilizar um conversor CC-CC *Full-Bridge* não-isolado, visto que este se adapta melhor aos níveis de potência envolvidos e não há necessidade de isolamento elétrica, o que diminuiria a quantidade de componentes envolvidos em projeto. Com esta decisão, foi apresentado um modelo de conversor CC-CC *Full-Bridge* bidirecional.

Com o modelo do conversor definido, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre baterias. Neste estudo, diversos modelos elétricos equivalentes que simulam o comportamento das baterias em processos de carga e descarga foram analisados. Definido o modelo elétrico a ser utilizado, estudou-se um método de carga para baterias e como aperfeiçoá-lo, considerando uma etapa para carga de baterias que sofreram descarga profunda.

Após estudar o conversor e as baterias, foi necessário apresentar um modelo de controlador a ser implementado digitalmente, o que irá definir os estados de chaveamento dos semicondutores do conversor. Para tal, foi exibido um modelo de controlador *PI* para ser utilizado de forma digital.

Com os estudos base realizados, mostrou-se o desenvolvimento do projeto do conversor CC-CC *Full-bridge* bidirecional escolhido para controle de carga do banco de baterias e tensão de barramento CC. Este desenvolvimento conta com o projeto do banco de baterias, de um filtro LC e um filtro C, um resistor que representa o barramento CC e a estratégia de controle utilizada para definir qual será a direção do fluxo de energia através do conversor. Posteriormente, é exibido o modelo completo do sistema utilizado para simulação do controlador de carga das baterias.

Tendo os projetos devidamente calculados, os resultados das simulações foram apresentados. Dentro dos resultados, o controlador atuou da maneira correta em todos os instantes, mantendo os níveis de tensão e corrente dentro do esperado para ambos modos de operação: *Buck* e *Boost* (carga e descarga, respectivamente). Por fim, pode-se dizer que os resultados do trabalho foram satisfatórios.

Duas sugestões para continuidade deste trabalho é a implementação de um protótipo

para este conversor ou, caso não seja feita a implementação, utilizar um modelo de bateria mais complexo e completo.

Referências

- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. Distributed generation: a definition. *Elsevier*, 2000. Citado na página 27.
- BARBI, I. *Projeto de Fontes Chaveadas*. 2001. Citado na página 38.
- BATTERY, C. *EVH 12240*. [S.l.]. Disponível em: <<http://www.csb-battery.com/english/01product/02detail.php?fid=13pid=84>>. Nenhuma citação no texto.
- BAZANELLA, A. S.; JR., J. M. G. da S. *Ajuste de Controladores PID*. [S.l.], 2000. Citado na página 48.
- BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. *Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental*. 11. ed. [S.l.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- BRAUN-GRABOLLE, P. *A Integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no Sistema elétrico de distribuição urbana*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- BRITO, M. C.; SILVA, J. A. *Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade*. 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/i1.pdf>>. Citado na página 24.
- CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, P. *Microgrids and Active Distribution Networks*. [S.l.]: The Institution of Engineering and Technology, 2009. Citado na página 29.
- CIGRE. 2008. Disponível em: <www.cigre.org>. Citado na página 28.
- COSTA, L. F. *Conversor CC-CC Buck+Boost Multinível Bidirecional*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, mar 2013. Citado na página 65.
- DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E.; BALL, G. J. Distribution planning for distributed generation. In: *2000 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 44th Annual Conference (Cat. No.00CH37071)*. [S.l.: s.n.], 2000. p. C4/1–C4/7. Citado na página 27.
- DUGAN, R. C.; PRICE, S. K. Including distributed resources in distribution planning. In: *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 1694–1698 vol.3. Citado na página 27.
- ERICKSON, R. W. *Fundamentals of Power Electronics*. [S.l.]: Chapman and Hall, 1997. Citado na página 41.
- HART, D. W. *Power Eletronics*. [S.l.]: Connect Learn Suced, 2011. Citado 6 vezes nas páginas 35, 36, 37, 39, 40 e 60.
- IEEE. *Institut of Eletrical and Eletronics Engineers. Inc*. [S.l.], 2008. Citado na página 28.

KAKIGANO, H. et al. Distribution voltage control for dc microgrid by converters of energy storages considering the stored energy. In: *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 2851–2856. ISSN 2329-3721. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 32.

KAZI, M. S. *Understanding sustainable development*. 2016. Disponível em: <<http://www.teriin.org/opinion/understanding-sustainable-development>>. Citado na página 23.

Lasseter, R. H.; Paigi, P. Microgrid: a conceptual solution. In: *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*. [S.l.: s.n.], 2004. v. 6, p. 4285–4290 Vol.6. ISSN 0275-9306. Citado na página 31.

LAZZARIN, T. B. *Estudo e implementação de um carregador de baterias ~ com uma técnica de avaliação de sua vida útil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, march 2006. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. *Power Eletronics - Converters, Applications and Design*. [S.l.]: Jonh Wiley and Sons, Inc, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 33, 40 e 41.

MOTA, J. de O. et al. Sistema de armazenamento de energia solar com controle microprocessado para dispositivos eletrônicos. In: . [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 48.

OLADE. *ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGIA. Curso de la Generación Distribuida*. 2011. Disponível em: <<http://www.olade.org/elearning>>. Citado na página 28.

POMILIO, J. A. *Fontes Chaveadas*. 2010. Citado 5 vezes nas páginas 36, 38, 39, 41 e 42.

PRESIDÊNCIA, D. R. *DECRETO Nº 5.163 DE 30 DE JULHO DE 2004*. 2004. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/>>. Citado na página 28.

REIS, F. E. U. *Conversor CC/CC com dois estágios para aplicação em sistemas fotovoltaicos autônomos de energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 35.

ROSEMBACK, R. H. *Conversor CC-CC bidirecional Buck-Boost atuando como controlador de carga de baterias em um sistema fotovoltaico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 33 e 62.

SEGUEL, J. I. L. *Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 44, 45, 46, 47 e 49.

SHIPLEY, A. et al. *Combined Heat and Power*. 2008. Citado na página 31.

SILVA, P. F. *Breve historia da energia solar*. 2004. Disponível em: <<http://web.ist.utl.pt/palmira/solar2.html>>. Citado na página 23.

TAHIM, A. P. N. *Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Nenhuma citação no texto.

VILLALVA, M. G. Energia solar fotovoltaica: Conceito e aplicações. In: _____. [S.l.]: Érica, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.