

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE LUIZ DAL MOLIN MARANGON

**CONVERSOR CC-CC APLICADO À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2015

HENRIQUE LUIZ DAL MOLIN MARANGON

# **CONVERTOR CC-CC APLICADO À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - CO-ELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein

PATO BRANCO

2015

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **CONVERTOR CC-CC APLICADO À GERAÇÃO FOTOVOLTAICA** do acadêmico **Henrique Luiz Dal Molin Marangon** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 89 de 2015.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

**Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein**

**Prof. Dr. Emerson Giovani Carati**

**Prof. Dr. Marcelo Flavio Guepfrih**

Dedico este trabalho ao meu pai, mãe, irmã, namorada e amigos, os quais me apoiaram sempre e sei que sempre poderei contar com, por isto, sou grato!

Em memória de meu avô Armando Marangon, pessoa extraordinária, humilde, exemplo a ser seguido. Infelizmente não está mais entre nós mas continua vivo dentro de nossas lembranças e de nosso coração. Seus ensinamentos e exemplo de vida serão sempre levados comigo e ficarão para sempre gravados em minha memória.

*Dust in the wind. All we are is dust in the wind.*

Kansas

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à minha família e minha namorada pelo apoio e paciência, principalmente na reta final deste trabalho, por acreditar e me apoiar neste conquista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein por todo suporte dado, pela disponibilidade do seu tempo e pelo conhecimento transferido.

Aos professores Emerson Giovani Caratti e Marcelo Flavio Guepfruh pelas contribuições como membros da banca avaliadora para construção do trabalho.

Aos meus amigos pelo apoio dado, seja este de forma direta ou indireta, com brincadeiras em relação ao trabalho. Como prometido, vale um agradecimento especial ao colega e amigo Roner, pois só ele sabe a quantia que me ajudou, seja no desenvolvimento do trabalho ou em todo o percurso da faculdade.

## RESUMO

MARANGON, Henrique. Conversor CC-CC controlador de carga de baterias aplicado à geração fotovoltaica. 2015. 73 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Departamento Acadêmico de Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR, 2015.

A geração de energia fotovoltaica é uma matriz energética limpa e que se desenvolve a cada dia no mundo. No entanto, como qualquer 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 uma maneira de manter o fornecimento de energia menos variável. Este trabalho foca em apresentar um modelo de conversor CC-CC que atue como controlador de carga de um banco de baterias. 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 no barramento CC dentro dos limites estipulados. Nesse trabalho serão exibidos alguns modelos de conversores CC-CC isolados, modelos elétricos equivalentes e métodos de carga de uma bateria, desenvolvimento de um conversor CC-CC isolado e bidirecional e simulações do mesmo através do *software PSIM*<sup>®</sup>. Para controle deste sistema, serão utilizados controladores do tipo PI implementados digitalmente. O sistema simulado apresenta resultados satisfatórios, apesar de alguns detalhes que influenciaram nos gráficos finais. No entanto, analisando apenas o funcionamento do controlador, este apresenta um resultado plenamente satisfatório.

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

## ABSTRACT

MARANGON, Henrique. Battery Charger DC-DC Converter Applied to Photovoltaic Energy Generation. 2015. 73 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação) - Electrical Engineering Department, Federal University of Technology - Paraná, Pato Branco, PR, 2015.

Photovoltaic power generation is a clean energy matrix and that develops every day in the world. However, like any energy matrix in the world, generating energy from sunlight also presents problems. As the incidence of sunlight on the photovoltaic slab varies during the day, its needed a way to keep the power supply less variable. This paper focuses on present a *DC-DC* converter model that act as charge controller of a bank of batteries. The function of this converter is to store the surplus power on the batteries in high generation times and use this energy in low production times to maintain the *DC* bus voltage within the prescribed limits. This paper will show some models of isolated *DC-DC* converters, battery equivalent electric models and charging methods, development of a bidirectional isolated *DC-DC* converter and simulations of this converter through the *PSIM* software. To control this system will be used *PI* type controllers digitally implemented. The simulated system shows satisfactory results, despite some details that influenced the final graphics. However, only analyzing the operation of the converter, this provides a fully satisfactory result.

**Keywords:** Fotovoltaic generation, *DC-DC* converter, Charge controller, Bank of batteries.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Topologias básicas dos conversores CC-CC: (a) conversor <i>Buck</i> e (b) conversor <i>Boost</i> . Fonte: Autoria Própria. . . . .	20
Figura 2:	Diagrama de blocos da geração solar. Fonte: Autoria própria. . . . .	21
Figura 3:	Comparação entre o conversor <i>Buck-Boost</i> (a) e o conversor <i>Flyback</i> (b). Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 267). . . . .	23
Figura 4:	Comparação entre o conversor <i>Buck</i> (a) e o conversor <i>Forward</i> (b). Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 278). . . . .	28
Figura 5:	Conversor <i>Push-Pull</i> . Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 287). . . . .	30
Figura 6:	Conversor <i>Half-Bridge</i> ou meia ponte. Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 293). . . . .	31
Figura 7:	Conversor <i>Full-Bridge</i> ou ponte completa. Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 292). . . . .	32
Figura 8:	Conversor <i>Full-Bridge</i> bidirecional. Fonte: Adaptado de Moghaddam <i>et al.</i> (2012, p. 108). . . . .	34
Figura 9:	Curvas do modo <i>Boost</i> de operação do conversor <i>Full-Bridge</i> bidirecional. Fonte: Adaptado de Moghaddam <i>et al.</i> (2012, p. 108) . . . . .	35
Figura 10:	Curvas do modo <i>buck</i> de operação do conversor <i>Full-Bridge</i> bidirecional. Fonte: Adaptado de Moghaddam <i>et al.</i> (2012, p. 108) . . . . .	36
Figura 11:	Elementos básicos de uma bateria. Fonte: Lazzarin (2006) . . . . .	37
Figura 12:	Modelo elétrico simplificado. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31). . . . .	39
Figura 13:	Modelo elétrico de primeira ordem. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31). . . . .	40
Figura 14:	Modelo elétrico equivalente de Thévenin. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31). . . . .	40

Figura 15:	Modelo elétrico equivalente de Thévenin. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31). . . . .	41
Figura 16:	Curvas de corrente e tensão no processo de recarga da bateria com método de tensão constante e corrente limitada. Fonte: (SEGUEL, 2009) . . . . .	42
Figura 17:	Curvas de corrente e tensão no processo de recarga da bateria com método de tensão constante e corrente limitada considerando descarga profunda. Fonte: Adaptado de Lazzarin (2006, p. 17) . . . . .	43
Figura 18:	Características de auto descarga da bateria EVH 12240. Fonte: Adaptado de CSB Battery () . . . . .	48
Figura 19:	Circuito utilizado para obter o valor da capacitância para modelo das baterias. Fonte: Autoria própria. . . . .	50
Figura 20:	Modelo elétrico equivalente do banco de baterias. Fonte: Autoria própria. . . . .	51
Figura 21:	Fluxograma de controle para ações do conversor CC-CC bidirecional <i>full-bridge</i> . Fonte: Autoria própria . . . . .	55
Figura 22:	Sistema utilizado para simulação de carga e descarga do banco de baterias. Fonte: Autoria Própria. . . . .	56
Figura 23:	Circuito utilizado para simulação do sistema. Fonte: Autoria própria . . . . .	58
Figura 24:	Curvas obtidas da simulação no modo <i>buck</i> de operação do conversor <i>CC-CC Full-Bridge</i> bidirecional. Fonte: Autoria própria	59
Figura 25:	Curvas de corrente e tensão do banco de baterias e ação do controlador. Fonte: Autoria própria . . . . .	60
Figura 26:	Tensão da bateria e tempo de carga para uso cíclico . Fonte: CSB Battery () . . . . .	61
Figura 27:	Mudança do modo de operação do conversor de 4 para 3. Fonte: Autoria própria . . . . .	62
Figura 28:	Modo de operação 2 do conversor. Fonte: Autoria própria . . .	63

Figura 29:	Curvas obtidas na simulação do modo <i>boost</i> de operação do conversor <i>CC-CC Full-Bridge</i> bidirecional. Fonte: Autoria própria	64
Figura 30:	Descarga do banco de baterias durante 60 segundos. Fonte: Autoria própria . . . . .	66
Figura 31:	Picos existentes na simulação. Fonte: Autoria própria . . . . .	67
Figura 32:	Descarga profunda habilitada. Fonte: Autoria própria . . . . .	68
Figura 33:	Descarga profunda desabilitada. Fonte: Autoria própria . . . . .	69

## LISTA DE TABELAS

1	Características de descarga com corrente constante da bateria EVH 12240. Unidade: A. Fonte: Adaptado de CSB Battery () . . . . .	49
2	Relação entre tensão final da bateria por célula e corrente de descarga. Fonte: Adaptado de CSB Battery () . . . . .	49
3	Valores de capacitância obtidos para o modelo bateria. Fonte: Autoria Própria . . . . .	50
4	Valores dos ganhos dos controladores do modo <i>buck</i> . Fonte: Autoria Própria . . . . .	56
5	Valores dos ganhos dos controladores do modo <i>boost</i> . Fonte: Autoria Própria . . . . .	56
6	Valores obtidos para o banco de baterias, conversor <i>CC-CC</i> bidirecional <i>full-bridge</i> e barramento <i>CC</i> . Fonte: Autoria Própria . . . . .	57
7	Valores utilizados como referência para carga e descarga do banco de baterias. Fonte: Autoria Própria . . . . .	57
8	Modos de operação do conversor. Fonte: Autoria Própria . . . . .	61
9	Valores RMS das correntes para a primeira e para a segunda etapa de carga. Fonte: Autoria Própria . . . . .	64
10	Valores RMS para o modo de operação <i>boost</i> . Fonte: Autoria Própria . . . . .	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CA-CC Conversão de corrente alternada para corrente contínua.  
CC Corrente contínua.  
CC-CC Conversão de corrente contínua para corrente contínua.  
HV *High Voltage* - Alta tensão.  
LV *Low Voltage* - Baixa tensão.  
RMS *Root Mean Square* - Raíz do valor quadrático médio.  
SOC *State of charge* - Estado da carga.  
UPS *Uninterruptible power supply* - Fonte ininterrupta de energia.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$L$	Indutor
$C_o$	Capacitor com subíndice o
$R$	Resistência
$V_o$	Tensão com subíndice o
$i_L$	Corrente com subíndice L
$D$	Ciclo de trabalho (Duty cycle)
$T$	Período
$N_1$	Número de espiras do primário do transformador
$N_2$	Número de espiras do secundário do transformador
$P_s$	Potência com subíndice s
$f$	Frequência
$r_c$	Resistência série do capacitor
$D_1$	Diodo com subíndice 1
$C$	Capacidade da bateria
$PID$	Proporcional, integral e derivativo
$PI$	Proporcional e integral
$K_p$	Ganho proporcional
$K_i$	Ganho integral
$N_{bat}$	Número de baterias

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	HISTÓRICO	15
1.2	PROBLEMA	16
1.3	MOTIVAÇÃO DO ESTUDO	17
1.4	OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.1	CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CC	19
2.1.1	Conversores isolados	20
2.1.1.1	Conversor <i>Flyback</i>	22
2.1.1.2	Conversor <i>Forward</i>	27
2.1.1.3	Conversor <i>Push-Pull</i>	29
2.1.1.4	Conversor <i>Half-Bridge</i>	31
2.1.1.5	Conversor <i>Full-Bridge</i>	32
2.1.2	Conversores Bidirecionais	33
2.2	BATERIA	36
2.2.1	Introdução às baterias	36
2.2.2	Tipo da bateria	37
2.2.3	Circuito elétrico equivalente	39
2.2.4	Método de carga de baterias	41
2.3	CONTROLADORES	43
2.4	RESUMO DO CAPÍTULO	45
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>46</b>
3.1	PROJETO DO BANCO DE BATERIAS	46
3.2	PROJETO DO CONVERSOR CC-CC <i>FULL-BRIDGE</i> BIDIRECIONAL	51

3.2.1	Filtro $LC$ .....	51
3.2.2	Filtro $C_{HV}$ .....	52
3.2.3	Resistor $R_{HV}$ .....	52
3.2.4	Estratégia de controle para o conversor CC-CC bidirecional <i>full-bridge</i> ...	52
3.3	MODELO COMPLETO .....	56
3.4	RESUMO DO CAPÍTULO .....	57
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>58</b>
4.1	MODOS <i>BUCK</i> - CARGA.....	59
4.2	MODOS <i>BOOST</i> - DESCARGA .....	64
4.3	RESUMO DO CAPÍTULO .....	69
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 HISTÓRICO

A busca do homem por energia começou a muito tempo atrás, ainda na era primitiva com o homem tentando controlar o fogo para utilizá-lo da maneira que desejasse, afastando animais, aquecendo alimentos, entre outros. Desde então o homem vem descobrindo novas formas para obter energia e controlá-la. A partir das descobertas de vários meios para conseguir energia, esta tornou-se indispensável na vida dos homens, aumentando assim a quantia de pesquisas em cima deste assunto, objetivando aumentar a produção e diminuir os custos e os impactos ambientais.

Segundo Roseback (2004, p. 1), o Sol fornece  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia na forma de luz e calor para a Terra anualmente, correspondendo a 10.000 vezes o consumo do planeta considerando o mesmo período, 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 quantia imensa de energia. Vale lembrar ainda que Reis (2012, p. 4) afirma que a maioria das fontes de energia são, em última instância, derivadas do Sol, visto que o ciclo da água (hidroelétrica), radiação solar que gera ventos (eólicas) e petróleo, carvão e gás natural (combustíveis fósseis) são provenientes do mesmo.

Para captar a energia proveniente 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 Edmond Becquerel, em 1839, e pode ser explicado como o surgimento de uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor, chamada de Célula Fotovoltaica, produzida pela absorção dos raios solares, afirma Roseback (2004). Logo, um painel fotovoltaico nada mais é que o conjunto de várias Células Fotovoltaicas conectadas.

A primeira utilização de captação de energia fotovoltaica foi em lugares onde a energia da rede não estava disponível, como no espaço, comenta Silva (2004). O autor ainda cita que no primeiro teste este tipo de geração de energia decepcionou e muito, só vindo a 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 produção em massa, segundo Brito e Silva (2006). Após isso, essa tecnologia só sofreu avanços e tende a continuar neste percurso. Porém, Rosembach (2004, p. 2) aponta que o custo de produção de energia através 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 PROBLEMA

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 de ano, chuvas e mudança de dia para noite afetam diretamente o nível de insolação sobre os 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.

Nos sistemas fotovoltaicos a bateria serve, então, 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. (REIS, 2012, p. 5)

Porém Reis (2012, p. 5) afirma 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 será realizada através de um conversor CC-CC.

### 1.3 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO

A principal motivação deste trabalho é a pesquisa de um conversor CC-CC para aplicação entre o barramento CC gerado pelo painel fotovoltaico e o banco de baterias. Sua função será adaptar os níveis de tensão do barramento para níveis de tensão aceitáveis para as baterias trabalharem com segurança.

### 1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

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

1. Revisão literária sobre conversores CC-CC;
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 de 4600W;
3. Revisão literária sobre conversores CC-CC isolados e bidirecionais;
4. Escolha do(s) conversor(es) que melhor se adapta(m) às condições de trabalho desejadas;
5. Projeto do(s) conversor(es) escolhido(s) previamente;
6. Análise dos resultados obtidos;

### 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro uma breve introdução sobre o assunto e os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo envolve revisões bibliográficas sobre conversores CC-CC, baterias e controladores. Este capítulo tem como objetivo definir qual será o conversor CC-CC que será utilizado para desenvolvimento do projeto, qual será o método de carga e modelo elétrico equivalente das baterias e mostrar como foi realizada a implementação digital do controlador.

O capítulo três exibe o desenvolvimento do trabalho, com projetos do banco de baterias, dos componentes do conversor CC-CC escolhido no capítulo dois e uma prévia do sistema utilizado para simulação.

O quarto capítulo exibe resultados obtidos nas simulações através de gráficos e tabelas para os dois modos de operação do conversor: *buck* e *boost*.

No quinto e último capítulo são apresentadas conclusões sobre o trabalho e algumas sugestões para continuidade do trabalho no futuro.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão feitas revisões teóricas sobre conversores CC-CC, conversores isolados e conversores bidirecionais, baterias e suas peculiaridades de carga e descarga e técnicas de controle. Estes tópicos servirão como base para o desenvolvimento do trabalho.

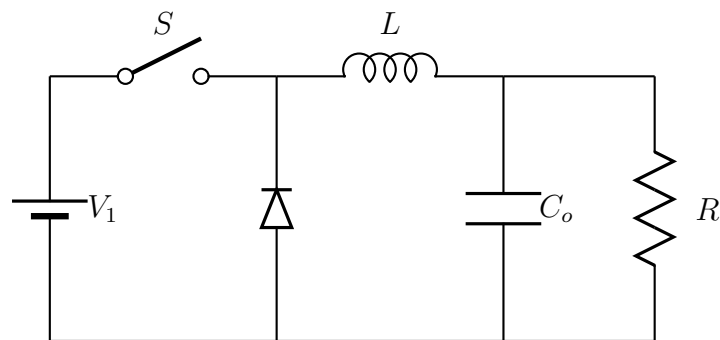
### 2.1 CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CC

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

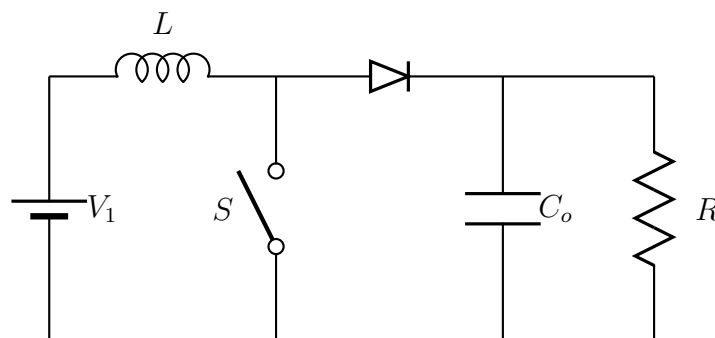
”Os conversores estáticos podem operar no modo tensão ou no modo corrente. No modo tensão a variável de controle é a tensão de saída e o conversor opera como uma fonte de tensão. No modo corrente a variável de controle é a corrente de saída e o conversor opera como uma fonte de corrente equivalente.”(ROSEMBACK, 2004, p. 17).

Segundo Mohan *et al.* (2003, p. 161), existem duas topologias básicas para os conversores: conversor abaixador de tensão, *Buck* ou *Step-down* e conversor elevador de tensão, *Boost* ou *Step-up*, sendo os outros conversores apenas combinações destes básicos. A Figura 1 exibe 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  $L$ , afirma Roseback (2004, p. 17), sendo que no primeiro modo a corrente  $i_L(t)$  é sempre maior que zero durante um período de chaveamento e no segundo modo a corrente  $i_L(t)$  é igual a zero por alguns instantes.



(a)



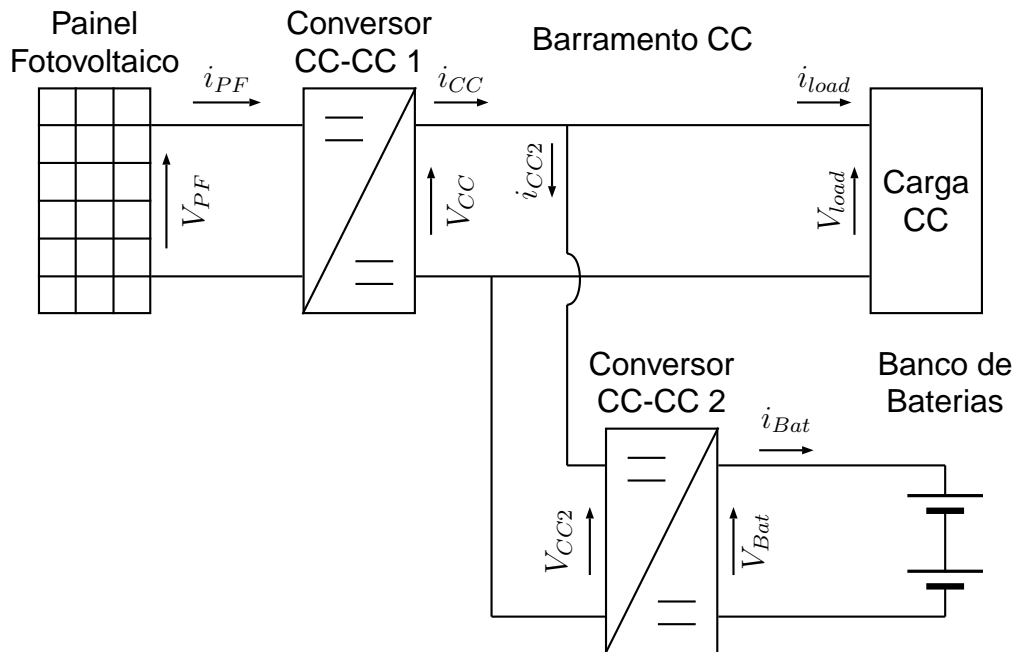
(b)

**Figura 1: Topologias básicas dos conversores CC-CC: (a) conversor *Buck* e (b) conversor *Boost*. Fonte: Autoria Própria.**

A função do conversor neste projeto será de adaptação de níveis de tensão em relação ao barramento CC da geração fotovoltaica e o banco de baterias a ela associado. Um conversor CC-CC pode ter outras aplicações dentro da geração autônoma de energia fotovoltaica, como, por exemplo, servir como controlador de carga operando no ponto de máxima potência dos painéis. Neste caso o conversor teria como função extrair a 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, p. 54). 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 as aplicações são demonstradas na Figura 2.

### 2.1.1 Conversores isolados

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 en-



**Figura 2: Diagrama de blocos da geração solar. Fonte: Autoria própria.**

trada e a saída dos não isolados, enquanto isso não ocorre nos isolados. Segundo Hart (2010, p. 265), o fato de existir esta conexão elétrica nos não isolados é uma desvantagem, visto que se a entrada estiver aterrada, a saída também estará. Uma forma de contornar 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 apropriadamente. No entanto, caso a frequência de operação 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 (2010, p. 265), 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 do número de espiras nos seus dois enrolamentos. Outra situação interessante é que com o uso de vários enrolamentos, conversores com este modo de ação podem ter várias tensões de saída.

Neste trabalho a utilização de um conversor CC-CC isolado fez-se ne-

cessária visto que não é desejável que alguma perturbação que ocorra no barramento CC seja transmitida para as baterias.

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

#### 2.1.1.1 Conversor *Flyback*

"O conversor *Flyback* é um conversor idêntico ao conversor *Buck-Boost*, mas que apresenta isolamento galvânica entre a tensão de entrada e de saída."(PETRY; BARBI, 2001, p.11). Segundo Rech (2009, p. 5), o transformador deste conversor apresenta a função de indutor de acúmulo de energia através da sua indutância magnetizante, além das funções clássicas de isolamento e adaptação dos níveis de tensão e também de nunca ter corrente fluindo pelo primário e secundário ao mesmo tempo. A Figura 3 mostra o desenvolvimento do conversor *Buck-Boost* para chegar ao conversor *Flyback*.

Este conversor atua em duas etapas. A primeira diz respeito ao momento em que a chave  $S$  está conduzindo e a segunda etapa refere-se a quando a chave está aberta. No primeiro momento "a fonte  $V_1$  fornece energia para a magnetização do enrolamento primário do transformador."(PETRY; BARBI, 2001, p. 11) Como a tensão induzida no secundário do transformador é negativa, o diodo ficará reversamente polarizado, isto é, bloqueado. Na segunda etapa a tensão no secundário é positiva e o diodo é polarizado de modo a permitir circulação de corrente, logo a energia armazenada no enrolamento primário do transformador é levada até a carga.

Para analisar matematicamente o comportamento deste conversor, primeiramente será feita análise com a chave fechada e posteriormente com a mesma aberta. Além disto, necessita-se considerar que o capacitor de saída é grande o suficiente a ponto de considerar-se a tensão de saída  $V_o$  constante, ou seja,  $V_{ripple}$  nulo, que as chaves e os diodos são ideais, que o período de trabalho da chave é  $D$ , ficando fechada por um tempo  $DT$  e aberta por um tempo  $(1-D)T$ , onde  $T$  é o período de chaveamento, e que o circuito funciona no estado estável, ou seja, todas as correntes e tensões são periódicas, iniciando e terminando sempre no instante de chaveamento.



## 2.1.1.1.1 Análise com a chave S fechada

Quando a chave está fechada, a tensão presente no enrolamento primário do transformador é a mesma da fonte, logo

$$V_1 = V_s = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{V_s}{L_m} = \frac{di_{Lm}}{dt} = \frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} \quad (2)$$

Isolando a variação da corrente na indutância de magnetização do transformador na Equação 2 resulta em

$$\Delta i_{LmFechada} = \frac{V_s DT}{L_m} \quad (3)$$

Nas igualdades 2, o valor de  $\Delta t$  é substituído por  $DT$  pois esse é o tempo em que a chave permanece fechada.

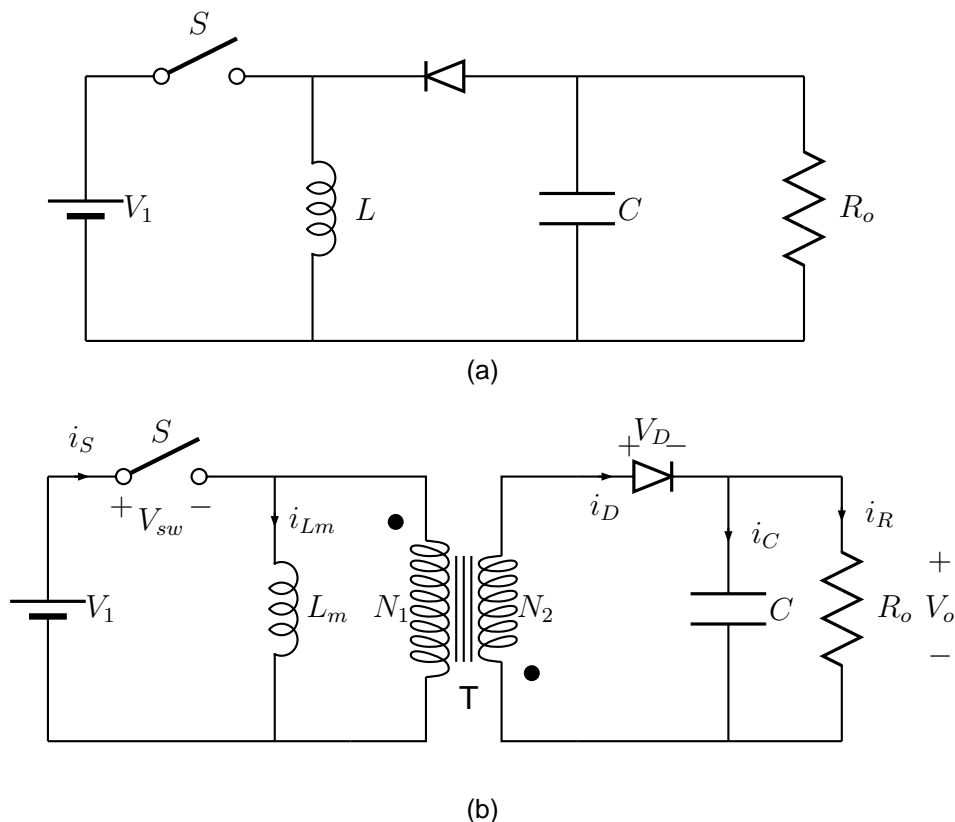


Figura 3: Comparação entre o conversor *Buck-Boost* (a) e o conversor *Flyback* (b).  
Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 267).

## 2.1.1.1.2 Análise com a chave S aberta

No momento em que a chave é aberta, é impossível variar a corrente instantaneamente na indutância  $L_m$ , logo esta corrente circula pelas espiras do primário do transformador ideal. A corrente  $i_{L_m}$  entra pelo terminal do primário sem o ponto, visto que a bobina de magnetização estava carregada, e, da mesma forma como entrou, sai no lado sem ponto do secundário pois o diodo está permitindo fluxo de corrente. Supondo que a tensão na saída é constante igual a  $V_o$ , conseqüentemente a tensão no secundário do transformador torna-se  $-V_o$ . Esta tensão no secundário do transformador retorna para o primário, fazendo com que a tensão em  $L_m$  torne-se

$$v_1 = -V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

onde  $v_1$  é a tensão no enrolamento primário do transformador.

Como dito anteriormente, a tensão no secundário do transformador é equivalente a  $-V_o$ , logo

$$v_1 = v_2 \frac{N_1}{N_2} = -V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

$$L_m \frac{di_{L_m}}{dt} = v_1 = -V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

$$\frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{\Delta i_{L_m}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{L_m}}{(1-D)T} = \frac{-V_o N_1}{L_m N_2} \quad (7)$$

Isolando o termo da variação na indutância de magnetização do transformador da Equação 7 obtêm-se

$$\Delta i_{L_m \text{ Aberta}} = \frac{-V_o (1-D) T N_1}{L_m N_2} \quad (8)$$

Nas igualdades 7, o valor de  $\Delta t$  é substituído por  $(1-D)T$  pois este é o tempo em que a chave permanece aberta.

Para um indutor funcionar em estado estável, a variação da corrente que circula sobre ele num período deve ser nula, logo

$$\Delta i_{L_m \text{ Fechada}} + \Delta i_{L_m \text{ Aberta}} = 0 \quad (9)$$

Das equações 3 e 8 têm-se

$$\frac{V_s DT}{L_m} + \frac{V_o(D-1)TN_1}{L_m N_2} = 0 \quad (10)$$

Resolvendo para  $V_o$  resulta na relação entre entrada e saída do conversor *Flyback*, que é

$$\frac{V_o}{V_s} = \left(\frac{D}{1-D}\right)\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \quad (11)$$

Com a chave ainda aberta pode-se estabelecer algumas outras correntes e tensões que serão úteis.

$$i_D = -i_1 \frac{N_1}{N_2} = i_{Lm} \frac{N_1}{N_2} \quad (12)$$

$$V_{sw} = V_s - V_1 = V_s + V_o \frac{N_1}{N_2} \quad (13)$$

$$i_R = \frac{V_o}{R} \quad (14)$$

$$i_C = i_D - i_R = i_{Lm} \frac{N_1}{N_2} - \frac{V_o}{R} \quad (15)$$

onde  $i_1$  é a corrente no enrolamento primário do transformador.

Observando a Equação 13 percebe-se que a tensão sobre a chave quando aberta é maior que a tensão da fonte, então, para casos de grande tensão de entrada o estresse sobre a chave será grande, podendo impossibilitar o funcionamento do conversor.

Como a potência fornecida pela fonte e a potência absorvida pela carga devem ser iguais, idealmente falando, tem-se que

$$P_s = P_o \quad (16)$$

o que gera

$$V_s I_s = \frac{V_o^2}{R} \quad (17)$$

A corrente média da fonte,  $I_s$  ou  $I_1$ , e a corrente média da indutância de magnetização,  $I_{Lm}$ , são relacionadas da seguinte maneira

$$I_s = \frac{I_{Lm} DT}{T} = I_{Lm} D \quad (18)$$

Substituindo  $I_s$  da Equação 18 na Equação 17 e isolando  $I_{Lm}$  têm-se

$$V_s I_s = V_s I_{Lm} D = \frac{V_o^2}{R} \quad (19)$$

$$I_{Lm} = \frac{V_o^2}{V_s D R} \quad (20)$$

Outro modo de calcular a corrente média no indutor, utilizando a Equação 11, é dado por

$$I_{Lm} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{V_o N_2}{(1-D) R N_1} \quad (21)$$

Para encontrar o valor mínimo que o indutor  $L_m$  deve respeitar para o conversor funcionar em modo de condução contínua, primeiramente são descobertos os valores máximo e mínimo da corrente no indutor, os quais são obtidos pelas equações 3 e 21

$$I_{LmMax} = I_{Lm} + \frac{\Delta i_{Lm}}{2} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + \frac{V_s D T}{2 L_m} \quad (22)$$

$$I_{LmMin} = I_{Lm} - \frac{\Delta i_{Lm}}{2} = \frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 - \frac{V_s D T}{2 L_m} \quad (23)$$

Como o funcionamento em modo de condução contínua necessita que  $I_{LmMin}$  seja maior que zero, utilizando o limite entre modo de condução contínua e descontínua, ou seja,  $I_{Lm}$  sendo igual a zero e também a Equação 23, obtêm-se

$$I_{Lm} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{V_s D}{(1-D)^2 R} \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 = \frac{V_s D T}{2 L_m} = \frac{V_s D}{2 L_m f} \quad (25)$$

onde  $f$  é a frequência de chaveamento da chave. Fazendo uso da Equação 25 e resolvendo-a para o valor mínimo de  $L_m$ , o qual irá garantir o modo de condução contínua do conversor, têm-se

$$L_{mMin} = \frac{(1-D)^2 R}{2f} \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (26)$$

Quando é executado o projeto de um conversor *Flyback*, o indutor  $L_m$  tem sempre um valor maior do que  $L_{mMin}$  para garantir a operação em modo contínuo. Utilizando a Equação 3 pode-se encontrar uma relação entre a indutância de magnetização e a variação da corrente

$$L_m = \frac{V_s D T}{\Delta i_{Lm}} = \frac{V_s D}{\Delta i_{Lm} f} \quad (27)$$

Como o conversor *Flyback* tem a mesma saída que o conversor *Buck-Boost*, o *ripple* na saída de ambos é o mesmo, logo

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (28)$$

Outro detalhe importante a ser destacado é a resistência série do capacitor. Esta resistência pode contribuir de maneira significativa para o *ripple* de saída. A variação pico a pico na corrente do indutor é igual à corrente máxima do diodo e à corrente no secundário do transformador. Logo, utilizando a Equação 15, o *ripple* devido à resistência do capacitor é

$$\Delta V_{oRES} = \Delta i_c r_c = I_{LmMax} r_c \frac{N_1}{N_2} \quad (29)$$

onde o valor utilizado de  $I_{Lm}$  é o valor máximo pois assim resultará na maior variação de tensão devido à resistência intrínseca do capacitor e  $r_c$  é a resistência série do capacitor. O valor de  $\frac{V_o}{R}$  da Equação 15 foi suprimido quando utilizada para obtenção da Equação 29 pelo mesmo motivo de utilizar-se o valor máximo da corrente.

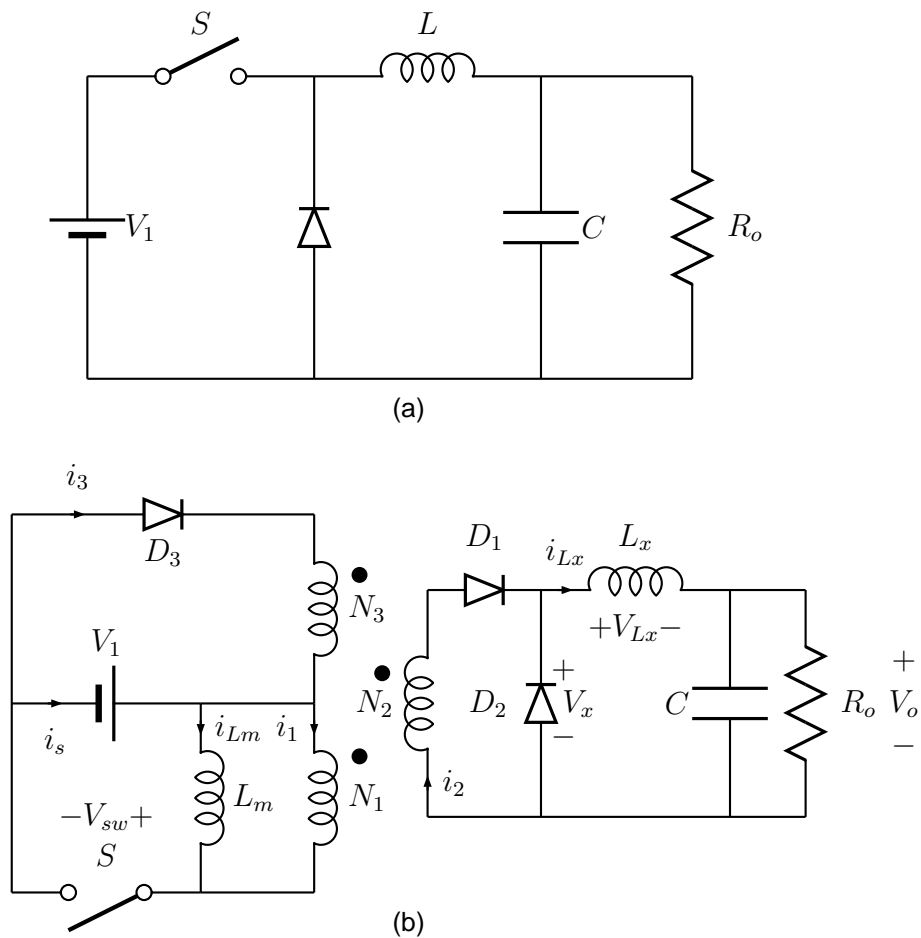
Segundo Barbi (2001, p. 67), o conversor *Flyback* tem várias vantagens, como baixo custo, aceita grande variação de carga, tem isolamento, dispensa indutor de filtragem, entre outros. Porém, segundo o autor, este modelo é amplamente utilizado em aplicações de baixa potência (abaixo de 100W).

#### 2.1.1.2 Conversor *Forward*

Como o conversor *Flyback*, o *Forward* também apresenta isolamento galvânica entre a entrada e a saída e também é derivado de um dos modelos básicos de conversores, neste caso o conversor *Buck*, segundo Petry e Barbi (2001, p.14). A sequência para obter-se o *Forward* a partir do *Buck* está disposta na Figura 4.

A adição de um enrolamento a mais no transformador é necessária para eliminar a energia armazenada devido à corrente magnetizante, afirma Petry e Barbi (2001, p. 14).

Este conversor atua em dois momentos distintos. O primeiro diz respeito ao momento em que a chave S está fechada e o segundo quando a mesma está bloqueada. Na primeira etapa a fonte de entrada fornece energia para a carga através do transformador, visto que os diodos  $D_1$  e  $D_3$  estarão bloqueados. Na segunda parte



**Figura 4: Comparação entre o conversor *Buck* (a) e o conversor *Forward* (b). Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 278).**

do processo, o transformador é desmagnetizado através do diodo  $D_3$  e o diodo  $D_1$  permite a circulação da corrente armazenada em  $L_x$  para a carga.

Do mesmo modo que o conversor anterior, o modelo matemático do *Forward* foi obtido em duas etapas, as quais estão relacionadas com a posição da chave. As equações necessárias para projeto serão descritas a seguir, sendo relevado o processo de obtenção das mesmas.

A relação entre tensão de saída e tensão de entrada pode ser dada por

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{DN_2}{N_1} \quad (30)$$

O valor do indutor  $L_x$  é calculado através de

$$L_x = \frac{V_o(1-D)}{0,4I_{Lx}f} \quad (31)$$

Para calcular o valor do capacitor, primeiramente é necessário calcular sua

resistência equivalente série, a qual pode ser obtida por

$$r_c = \frac{\Delta V_o}{\Delta i_C} \quad (32)$$

Obtendo-se o valor da resistência equivalente série, pode-se enfim calcular o valor do capacitor utilizando a relação a seguir,

$$C = \frac{K}{r_c} \quad (33)$$

onde  $K$ , segundo Pressman (1999, p. 22), varia entre 50 e  $80 \cdot 10^{-6}$ .

De acordo com Varga (2001, p. 10), este conversor utiliza muito melhor o transformador do que o *Flyback*, visto que este, na teoria, não estoca energia no transformador. O autor afirma que as aplicações para o conversor *Forward* com uma chave variam em torno de 150W de potência.

#### 2.1.1.3 Conversor *Push-Pull*

"O conversor conhecido por *Push-Pull* é, na verdade, um arranjo de dois conversores *Forward* trabalhando em contra-fase", segundo Pomilio (2004, p. 2-6). O circuito do conversor *Push-Pull* está disposto na Figura 5. Semelhante aos outros conversores já apresentados, neste também existe isolação 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 *Push-Pull* é necessário considerar três momentos distintos, sendo um considerando as duas chaves abertas, e dois momentos considerando uma aberta e a outra fechada.

Alguns dos problemas deste conversor, segundo Pomilio (2004, p. 2-6), são o fato de que o ciclo de trabalho, ou *duty cycle*, ser limitado em 0,5, visando não permitir a condução simultânea das chaves semicondutoras, além de que as chaves devem suportar o dobro da tensão de entrada. Pomilio (2004, p.2-6) ainda alerta sobre 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 (2010, p. 289).

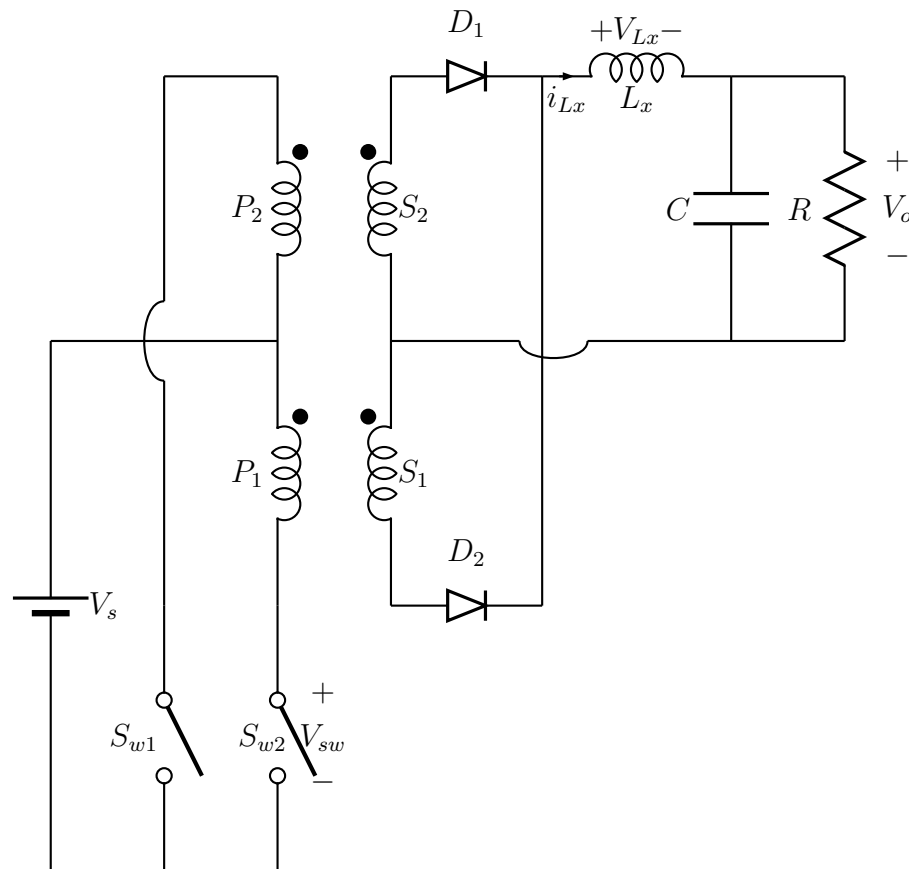


Figura 5: Conversor *Push-Pull*. Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 287).

A função de transferência pode ser definida como

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \frac{N_s}{N_p} \quad (34)$$

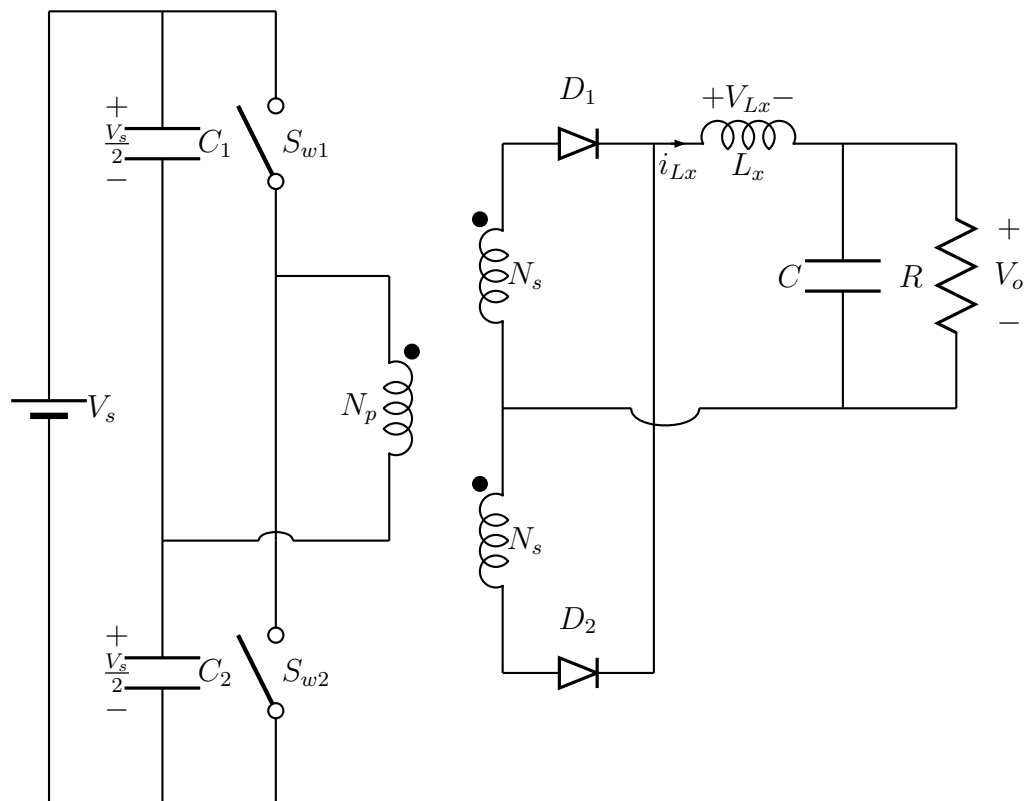
Os valores do indutor  $L_x$  e do capacitor  $C$  são dados respectivamente por

$$L_x = \frac{V_o \left(\frac{1}{2} - D\right)}{\Delta I_{Lx} f_s} \quad (35)$$

$$C = \frac{(1 - 2D)V_o}{32\Delta V_o L_x f_s^2} \quad (36)$$

As aplicações para o conversor *Push-Pull* são as de pequena potência, visto que propicia um mau aproveitamento do transformador e dificulta o emprego de técnicas para evitar a saturação do núcleo devido à desigualdade entre os tempos de comutação dos interruptores, afirma Barbi (2001, p. 125).





**Figura 6: Conversor *Half-Bridge* ou meia ponte. Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 293).**

#### 2.1.1.4 Conversor *Half-Bridge*

O conversor *Half-Bridge* ou conversor em 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.

Segundo Pomilio (2004, p. 2-6), o problema de tensão sobre as chaves é resolvido, pois a tensão máxima aplicada sobre as chaves quando abertas é  $V_s$  e não  $2V_s$ , como no conversor *Push-Pull*, embora a corrente que circulará pela chave fechada será o dobro. Os capacitores tem função de garantir uma tensão média nula no primário do transformador, porém devem ter valor escolhido para evitar ressonância com o indutor da saída. Hart (2010, p. 293) afirma que estes capacitores tem valores iguais e elevados.

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

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \frac{N_s}{N_p} \quad (37)$$

O indutor e o capacitor podem ser definidos a partir das equações 35 e 36 do conversor *Push-Pull*, visto que o filtro de saída é igual.

Barbi (2001, p. 125) 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 este não exhibe alguns dos problemas que o *Half-Bridge* demonstra.

#### 2.1.1.5 Conversor *Full-Bridge*

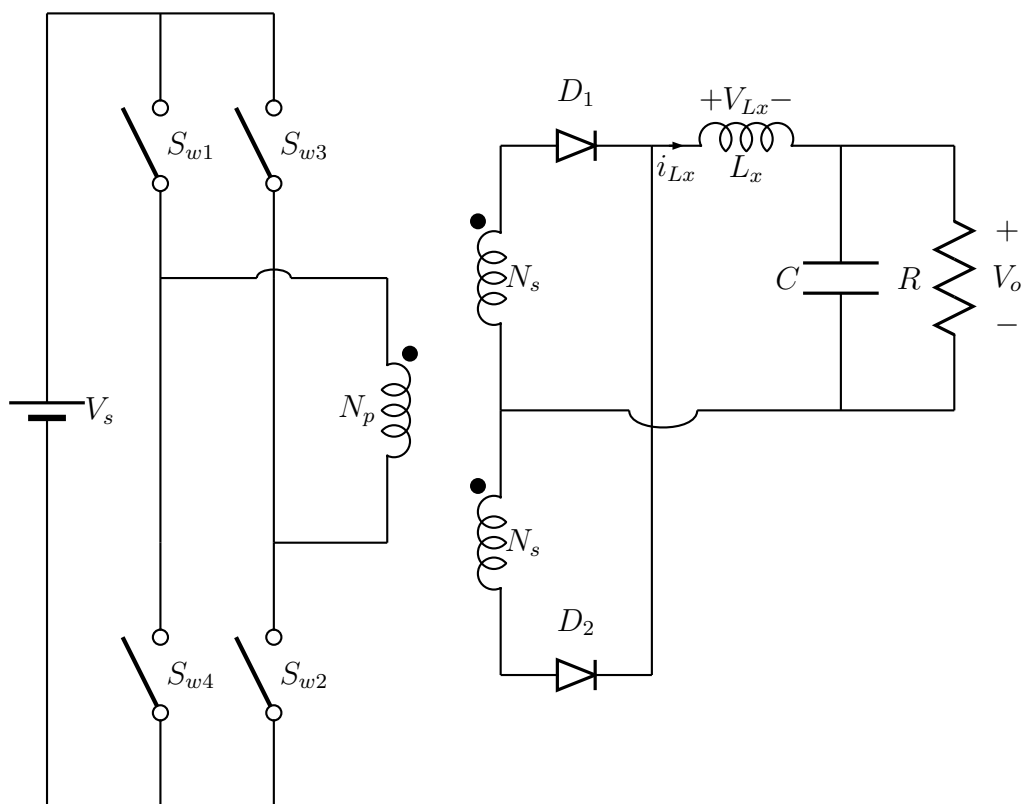


Figura 7: Conversor *Full-Bridge* ou ponte completa. Fonte: Adaptado de Hart (2010, p. 292).

Para evitar os problemas de tensão do *Push-Pull* e de corrente do *Half-*

*Bridge*, segundo Pomilio (2004, p. 2-7), usa-se o conversor *Full-Bridge* ou conversor em ponte completa. Este é quase igual o 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  $S_{w2}$  funcionam em oposição de fase em relação às chaves  $S_{w3}$  e  $S_{w4}$ , visto que as chaves que formam os pares sempre funcionam de forma idêntica. O circuito referente a este conversor é exibido na Figura 7.

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

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \frac{N_s}{N_p} \quad (38)$$

Para especificação dos componentes da saída, pode-se utilizar as mesmas equações que o conversor *Push-Pull* fornece (equações 35 e 36), visto que o filtro de saída de ambos é igual.

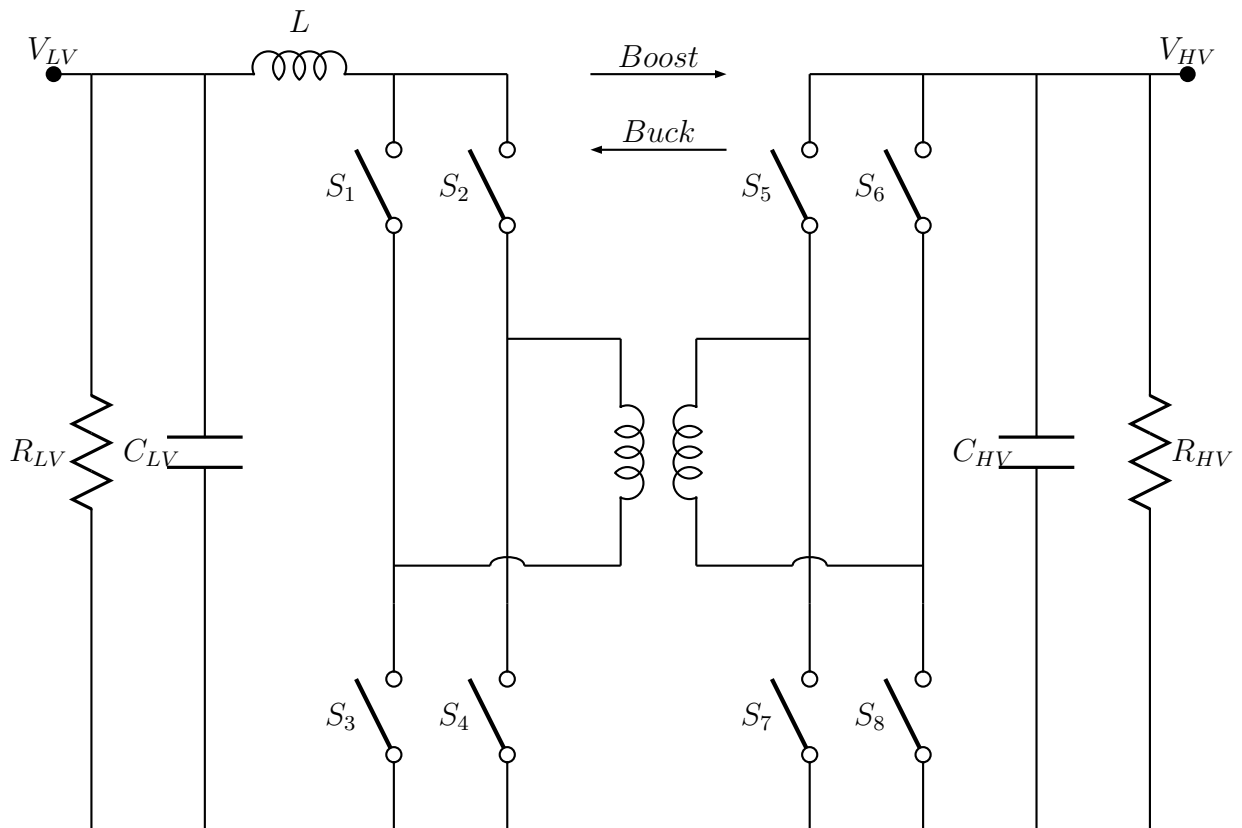
### 2.1.2 Conversores Bidirecionais

Partindo dos valores informados nas seções 2.1.1.1 - 2.1.1.5, percebe-se que o modelo mais propício a ser empregado no projeto é o *Full-Bridge*, visto que a potência a ser utilizada no trabalho será na ordem de poucos milhares de *Watts*. Por este motivo, foram pesquisadas diversas topologias de conversores *CC-CC Full-Bridge* bidirecional e a que melhor se adaptou ao trabalho foi a topologia exposta em Moghaddam *et al.* (2012, p. 107), Figura 8, visto que este modelo contém menos dispositivos, facilitando o projeto e também há explicações detalhadas do funcionamento deste modelo.

O funcionamento deste circuito, explica Moghaddam *et al.* (2012, p. 108), é dividido em dois modos: modo *Boost* e modo *Buck*.

1. Modo *Boost*: este modo pode ser dividido em dois intervalos principais, sendo um deles com as quatro chaves ligadas e o outro com apenas duas ligadas. No momento em que as quatro chaves estão conduzindo, a tensão do indutor  $L$  será igual à tensão  $V_{LV}$  e a corrente do indutor irá aumentar proporcionalmente à tensão aplicada. Neste momento, o indutor estoca energia para ser utilizada no próximo intervalo. Enquanto isso ocorre no lado de baixa tensão (LV), no lado de alta tensão (HV) a carga é alimentada pela energia que foi transferida ao

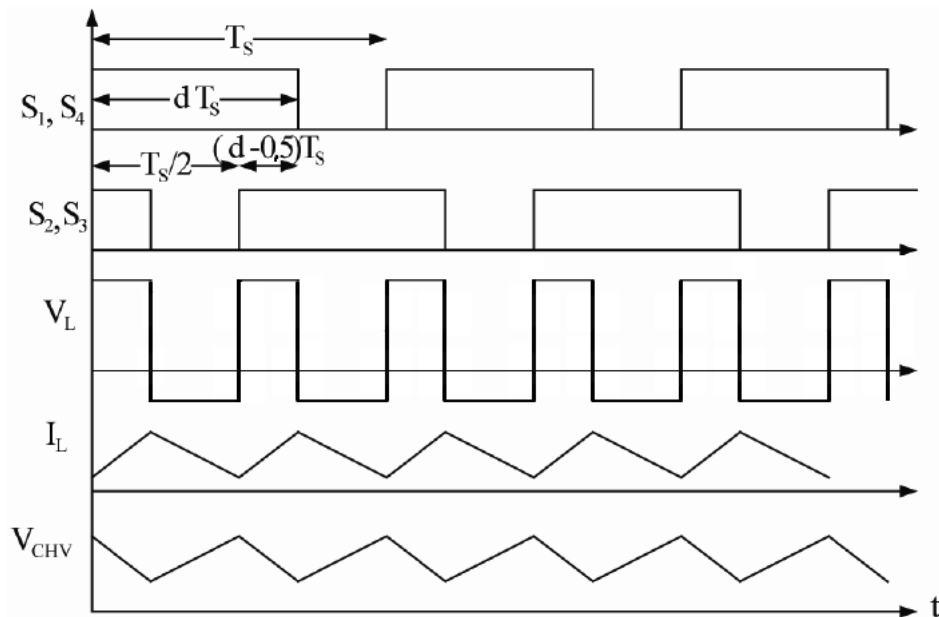
capacitor  $C_{HV}$  durante o intervalo anterior.



**Figura 8: Conversor Full-Bridge bidirecional. Fonte: Adaptado de Moghaddam et al. (2012, p. 108).**

O próximo intervalo é o momento em que a energia é transferida para o lado de alta tensão. Neste instante apenas duas chaves estarão ligadas, sendo elas  $S_1$  e  $S_4$  ou  $S_2$  e  $S_3$ , ou seja, sempre relacionadas em diagonal. Supondo que  $S_1$  e  $S_4$  estejam fechadas e  $S_2$  e  $S_3$  abertas, a tensão  $V_{LV}$  será aplicada ao transformador, sendo aumentada pela relação de espiras do mesmo e retificada após o transformador, visto que existirão diodos em paralelo com as chaves, formando uma ponte retificadora. Na próxima metade do ciclo de serviço, quando a diagonal será invertida, a tensão aplicada no transformador será negativa, porém será retificada, tornando-se positiva novamente. O ciclo de trabalho das chaves e formas de onda de  $V_{LV}$  e da corrente e tensão do indutor são exibidas na Figura 9

2. Modo *Buck*: igualmente ao modo anterior, este pode ser dividido em duas etapas principais. A primeira refere-se ao momento em que apenas as chaves das diagonais estão ligadas, sejam elas  $S_5$  e  $S_8$  ou  $S_6$  e  $S_7$ , e a segunda etapa ao momento em que todas as chaves ficam desligadas.

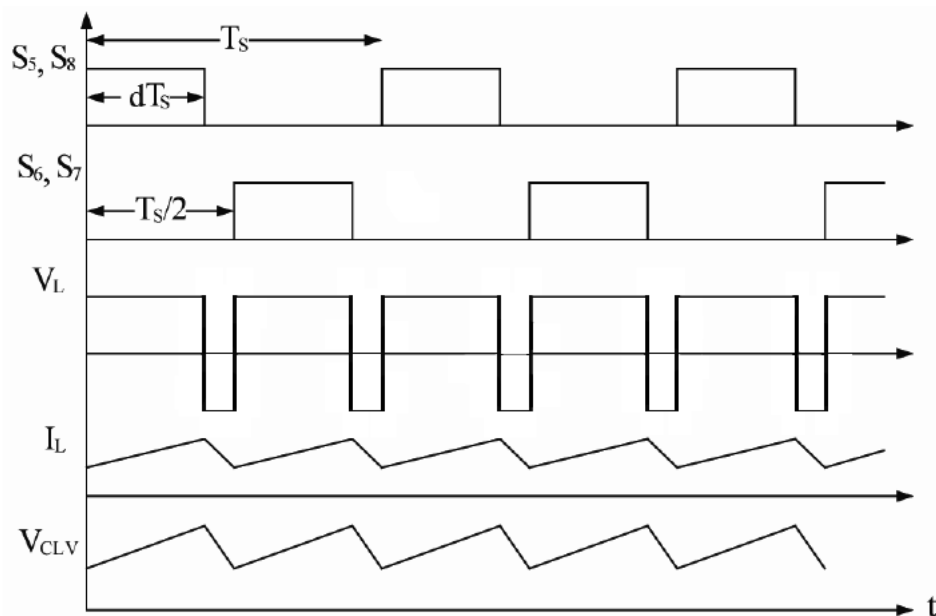


**Figura 9: Curvas do modo *Boost* de operação do conversor *Full-Bridge* bidirecional. Fonte: Adaptado de Moghaddam *et al.* (2012, p. 108)**

Na primeira fase, a energia é transferida do lado de alta tensão para o lado de baixa, aumentando a corrente no indutor proporcionalmente à tensão do lado de alta menos a tensão do lado de baixa. Desligando todas as chaves, inicia-se o próximo estágio. Neste, o lado de baixa tensão é alimentado pela energia contida no indutor, logo, a corrente no indutor diminui proporcionalmente à tensão neste lado. Na próxima metade do ciclo de serviço, como dito no modo anterior, a única diferença será que a tensão aplicada no lado *HV* é negativa, sendo retificada no lado *LV*. O ciclo de trabalho das chaves, formas de onda da corrente e tensão no indutor e tensão  $V_{LV}$  são mostradas na Figura 10

Para fins de projeto deste modelo de conversor, serão utilizadas as equações do conversor *Full-Bridge* convencional (35,36 e 38) para calcular os valores do filtro *LC*, visto que este conversor bidirecional comporta-se da mesma maneira que o convencional, quando se tratando do modo *buck* de operação. Já o cálculo do filtro capacitivo  $C_{HV}$  será baseado na variação máxima de tensão (*ripple*) aceita no barramento *CC* quando o conversor está operando no modo *boost*, ou seja, na variação de tensão que será aceita na saída. Para tal, utilizaremos a Equação 39.

$$C = \frac{I_{CC}}{fV_{ripple}} \quad (39)$$



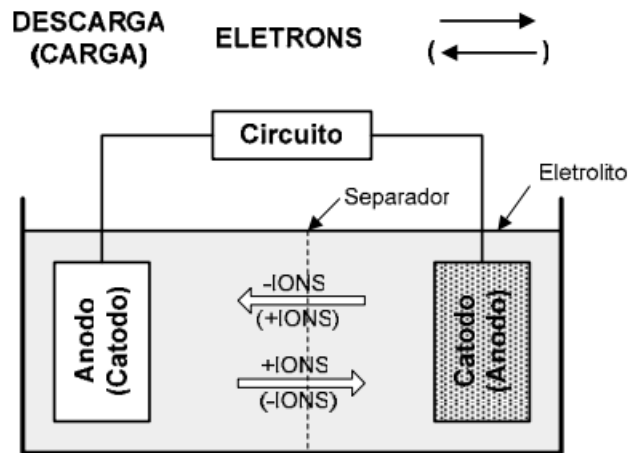
**Figura 10: Curvas do modo *buck* de operação do conversor *Full-Bridge* bidirecional. Fonte: Adaptado de Moghaddam *et al.* (2012, p. 108)**

## 2.2 BATERIA

### 2.2.1 Introdução às baterias

Segundo Lazzarin (2006, p. 5), 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 oxidorredução, ou seja, a junção do fenômeno da oxidação (processo de liberar elétrons) com o fenômeno da redução (processo de consumir elétrons). Lazzarin (2006, p. 5) 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 de baterias é mostrado na Figura 11.

Lazzarin (2006, p. 5) 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 a oxidação, gerando íons positivos. Do mesmo modo, íons negativos serão gerados no cátodo quando este receber os elétrons. Estes íons podem fluir livremente graças ao separador que existe entre o cátodo e o ânodo, enquanto o fluxo de elétrons é forçado pelo circuito externo, completando o sistema.



**Figura 11: Elementos básicos de uma bateria. Fonte: Lazzarin (2006)**

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 *et al.* (2000, p. 4), 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 níquel, chumbo/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.

### 2.2.2 Tipo da bateria

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 apresentam uma característica diferente que é o fato de ter chumbo em ambos os eletrodos (ânodo e cátodo), segundo Bocchi *et al.* (2000, p. 7). 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, p. 8), são as seguintes:

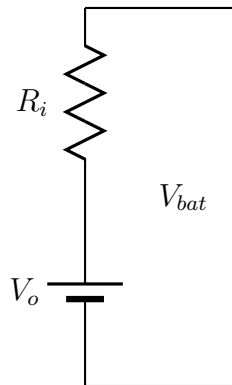
1. Automotiva: principal função deste tipo de bateria é dar a partida ou ignição de veículos. Para isto, uma elevada corrente tem um curto período de tempo é necessária. As placas destas são muito finas (1mm) e tem uma área grande, além de serem projetadas para não descarregar mais que 5% de sua capacidade 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 das 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 em *UPS's* e como são projetadas para não serem movidas, leva-se em conta no projeto a minimização da sulfatação ("recristalização dos finos cristais de  $P_bSO_4$  em grânulos de  $P_bSO_4$ . Ocorre durante longos períodos de baixo estado de carga. Reduz os volumes de chumbo e de eletrólito. Consequentemente, as capacidades de carga e de fornecimento de energia se reduzem."(LAZZARIN, 2006, p. 8)).



### 2.2.3 Circuito elétrico equivalente

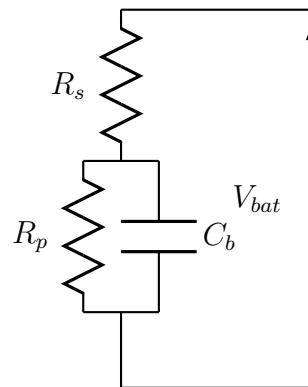
Segundo Seguel (2009, p. 29), encontrar um modelo elétrico ou matemático que descreva a resposta dinâmica de uma bateria não é simples, visto que suas reações químicas não são lineares e sofrem variações de acordo com vários fatores inter-relacionados, como a temperatura, estado de carga, aspectos construtivos, entre outros. Dentre os modelos baseados em componentes elétricos existem modelos mais simples, os quais desprezam vários fatores da bateria, porém são 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 12, 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.



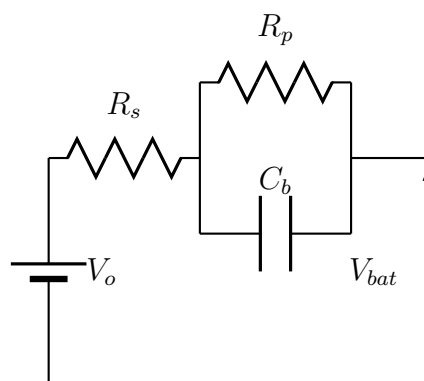
**Figura 12: Modelo elétrico simplificado. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31).**

A Figura 13 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 da mesma. 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 das baterias geralmente é pequeno. Neste modelo, a inclusão da malha RC permite simular fenômenos transitórios tanto na carga quanto na descarga da bateria, mesmo sendo um modelo simples.



**Figura 13: Modelo elétrico de primeira ordem. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31).**

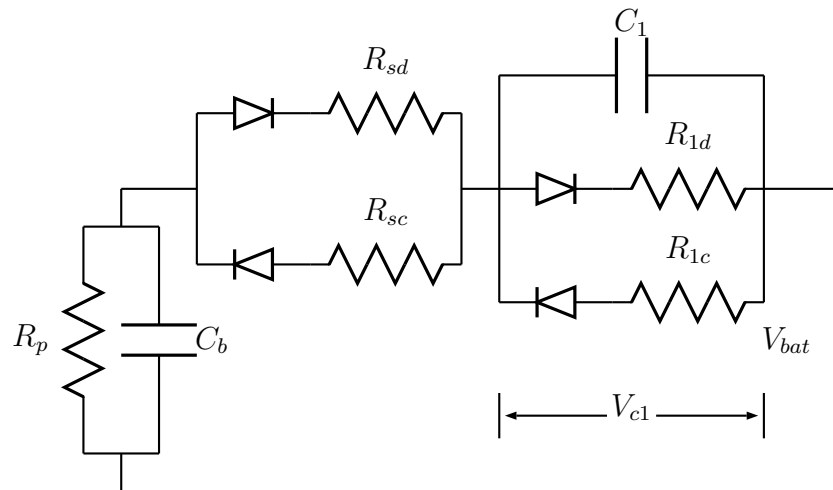
O próximo modelo, apresentado na Figura 14, apresenta o circuito equivalente de Thévenin de uma bateria. Este modelo conta com uma tensão de circuito aberto  $V_o$ , a resistência interna  $R_s$  e uma tensão em sobretensão, a qual surge com a combinação da resistência  $R_p$  com o condensador  $C_b$ . Este circuito permite verificar quais os principais elementos que condicionam o funcionamento das baterias. Entretanto, utilizar o modelo equivalente de Thévenin em simulações produz resultados pouco 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 14: Modelo elétrico equivalente de Thévenin. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31).**

O último e mais sofisticado modelo é chamado de modelo de carga e descarga, exibido na Figura 15. Neste circuito os componentes presentes em  $V_{c1}$  que representam sobretensão, as resistências  $R_{sc}$  e  $R_{sd}$  a resistência interna,  $R_p$  a 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, im-

possibilita a sua utilização.



**Figura 15: Modelo elétrico equivalente de Thévenin. Fonte: Adaptado de Seguel (2009, p. 31).**

#### 2.2.4 Método de carga de baterias

De acordo com Seguel (2009, p. 28), 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 carga de flutuação (*float charge*). A Figura 16 mostra a corrente e a tensão durante o processo de carga da bateria para cada região.

1. Região 1: Segundo Seguel (2009, p. 29), quando a bateria encontra-se descarregada, esta chega a um mínimo de tensão  $V_{CHGENB}$  (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  $I_{TC}$  (geralmente 1% de C), este estágio da carga estará concluído.
3. Região 3: Com a corrente num valor muito baixo, a tensão aplicada será reduzida de  $V_{OCH}$  para  $V_{FLOT}$  (normalmente 13,5V para baterias de chumbo-ácido de 12V). A corrente remanescente  $I_{FLOT}$  é responsável apenas por compensar a auto descarga da bateria. Nesta condição pode-se dizer que a bateria está carregada.

Mota *et al.* (2012) explica que o método de carga apresentado até aqui pode ser melhorado adicionando mais uma região de carga. Esta nova região será

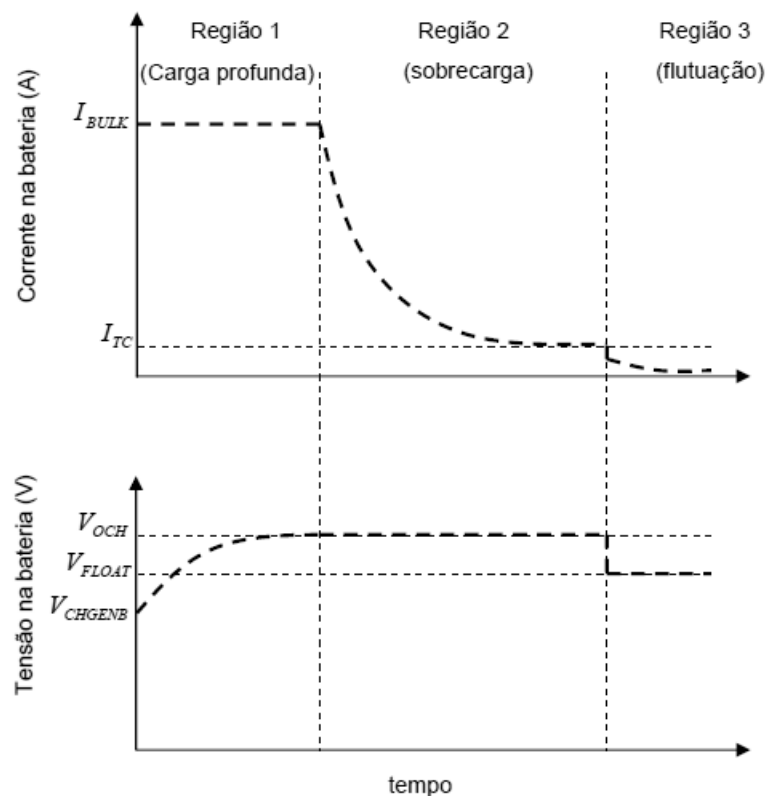
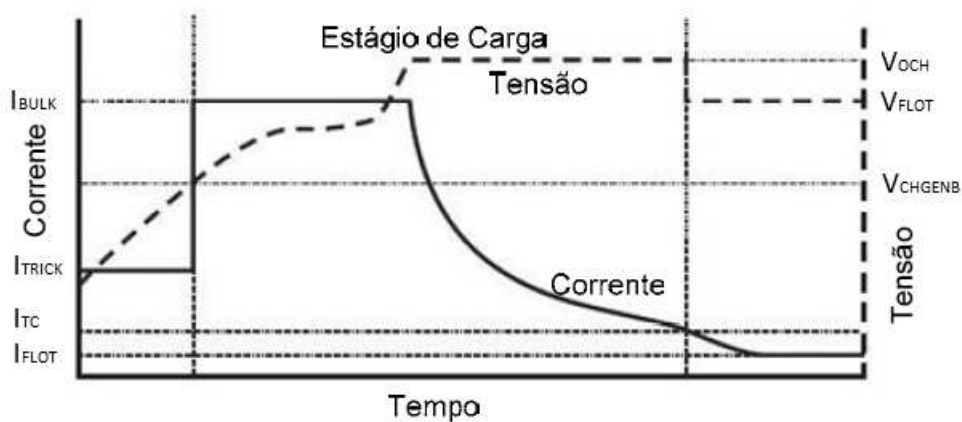


Figura 16: Curvas de corrente e tensão no processo de recarga da bateria com método de tensão constante e corrente limitada. Fonte: (SEGUEL, 2009)

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). Neste caso, uma região com corrente constante  $I_{TRICK}$  (normalmente 1% da capacidade da bateria) será adicionada anteriormente à região com corrente constante de valor  $I_{BULK}$ . Esta etapa permanece até que a tensão da bateria atinja o valor mínimo  $V_{CHGENB}$ . As novas curvas de corrente e tensão durante a carga são exibidas na Figura 17



**Figura 17: Curvas de corrente e tensão no processo de recarga da bateria com método de tensão constante e corrente limitada considerando descarga profunda. Fonte: Adaptado de Lazzarin (2006, p. 17)**

## 2.3 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 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 ( $I$ ), proporcional, integral e derivativo ( $PID$ ), dentre outros. Foi optado por um controlador proporcional e integral ( $PI$ ), pois este é de fácil implementação e gera um erro nulo em regime.

As ações de controle do  $PI$  funcionam da seguinte maneira:

1. Proporcional: de acordo com Bazanella e 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 e Jr. (2000) afirma que a ação integral permite obter um erro nulo em regime permanente. No entanto, a introdução deste controlador tende a piorar a estabilidade relativa do sistema em malha fechada ou até torná-lo instável. Por este motivo, o controle integral geralmente não é utilizado de maneira isolada.

Para implementar o  $PI$  de forma não analógica, será necessário discretizá-lo. Para tal, primeiramente necessita-se da função de transferência do mesmo no domínio da frequência. De acordo com Júnior e Carati (2015, p. 94), a função de transferência de um controlador  $PI$  no domínio da frequência é dada por:

$$PI(s) = \frac{K_p(K_i + s)}{s} \quad (40)$$

O próximo passo será discretizar a equação acima. Para isso será utilizado o método trapezoidal de discretização, que diz que, segundo Júnior e Carati (2015, p. 59)

$$s = \frac{2}{T} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (41)$$

Utilizando a Equação 41 na Equação 40, obtêm-se

$$PI(z) = \frac{K_p}{2} \frac{(K_i T + 2)z + K_i T - 2}{z - 1} \quad (42)$$

Júnior e Carati (2015, p. 95) afirmam que com algumas manipulações algébricas é possível obter a equação diferença para a Equação 42

$$\omega(n) = \omega(n - 1) + \frac{K_p}{2} [(K_i T + 2)\epsilon(n) + (K_i T - 2)\epsilon(n - 1)] \quad (43)$$

onde  $\epsilon$  é o erro a ser corrigido do sistema e  $\omega$  é a saída do controlador.

Pode-se simplificar a equação anterior utilizando

$$K_1 = \frac{K_p}{2} K_i T + 2 \quad (44)$$

$$K_2 = \frac{K_p}{2} K_i T - 2 \quad (45)$$

obtendo assim

$$\omega(n) = \omega(n - 1) + K_1\epsilon(n) + K_2\epsilon(n - 1) \quad (46)$$

Com isso pode-se aplicar o controle *PI* em controladores digitais, facilitando a implementação dos mesmos.

## 2.4 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 o 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 *PI* 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 no conversor.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão demonstrados os cálculos e processos para desenvolver o trabalho. O projeto será dividido em duas etapas: projeto do banco de baterias e projeto dos filtros. Posteriormente será exibido o conjunto completo e os resultados obtidos serão expostos no próximo capítulo.

Os valores estipulados para os projetos a seguir são:

1.  $V_{Bat} = V_{LV} = 192V$ ;
2.  $V_{Barr} = V_{HV} = 384V$ ;
3.  $I_{Barr} = 12A$ ;
4.  $f_{Chaveamento} = 30kHz$ ;
5. Relação de espiras  $\frac{N_p}{N_s} = 1$ .

#### 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 UTFPR - Câmpus Pato Branco e facilitaria a utilização da mesma caso se desenvolvesse o trabalho na prática.

O modelo elétrico equivalente que será utilizado é o exposto na Figura 13, visto que este modelo é simples e permite 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 deste processo é definir o número de baterias ( $N_{bat}$ ) que serão necessárias no banco para obter a tensão necessária. Para isto, divide-se a tensão do lado de baixa tensão do conversor, onde as baterias estarão localizadas, pela tensão de cada bateria.



$$N_{Bat} = \frac{V_{LV}}{V_{Bat}} \quad (1)$$

$$N_{Bat} = \frac{192}{12} \quad (2)$$

$$N_{Bat} = 16 \quad (3)$$

É preciso averiguar se haverá necessidade de mais de 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. Como a relação das espiras do transformador foi definida em 1:1, a potência de entrada deve ser igual à potência de saída. Partindo disso e da tensão  $V_{bat}$  do banco de baterias de 192V, a corrente que será necessária no conjunto de baterias é:

$$I_{Bat} = \frac{P}{V_{Bat}} = \frac{4608}{192} = 24A \quad (4)$$

Com isso verifica-se que apenas um conjunto de 16 baterias em série é capaz de alimentar o barramento por um período de tempo. Como o tempo de fornecimento de energia a partir das baterias para o barramento 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.

Após calcular o número total de baterias que serão necessárias para suprir a demanda de energia, necessita-se dos valores para o modelo elétrico equivalente (Figura 13). 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 de aproximadamente  $9m\Omega$ . 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

$$R_s = N_{Bat} * 9 * 10^{-3} = 16 * 9 * 10^{-3} = 144m\Omega \quad (5)$$

Para calcular o valor da resistência de auto-descarga, representada por  $R_p$ , utilizou-se a Figura 18. Este gráfico mostra a capacidade de retenção da bateria pelo tempo em que ela está sem uso, ou seja, a taxa de auto-descarga da mesma. Para

achar um valor de resistência que seja equivalente à curva (utilizou-se a curva de 25°C como base), tomou-se como base um tempo de estoque de 6 meses, pois neste ponto a capacidade da bateria está em aproximadamente 80% do valor total. Partindo deste ponto, tem-se que

$$C = 24Ah \Rightarrow 80\%C = 19,2Ah \quad (6)$$

logo

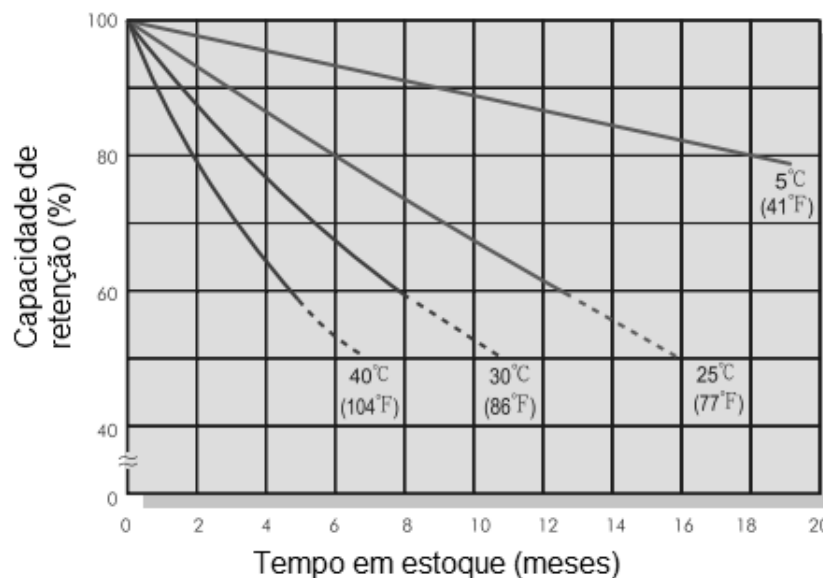
$$C_{perdida} = C_{Total} - 80\%C = 24 - 19,2 = 4,8Ah \quad (7)$$

então

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

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

$$V = RI \Rightarrow R = \frac{192}{1,111mA} \Rightarrow R_p = 172,8k\Omega \quad (9)$$



**Figura 18: Características de auto descarga da bateria EVH 12240. Fonte: Adaptado de CSB Battery ()**

Por fim, para obter-se o valor da capacitância, foram utilizadas as Tabelas 1 e 2, exibidas a seguir. Na primeira tabela vê-se a relação entre tensão final da bateria por célula e tempo de utilização dada através da corrente de descarga, ou seja, para um corrente de descarga de 29,9A durante 30 minutos, por exemplo, obteve-se uma tensão final por célula da bateria de 1,6V. Na segunda, vê-se a relação entre a tensão

final da bateria por célula e a corrente de descarga utilizada.

**Tabela 1: Características de descarga com corrente constante da bateria EVH 12240. Unidade: A. Fonte: Adaptado de CSB Battery ()**

F.V/Time	30MIN	60MIN	90MIN	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1,60V	29,9	17,7	13,0	10,3	7,50	5,84	4,84	3,16	2,57	1,31
1,67V	29,6	17,5	12,9	10,2	7,44	5,83	4,78	3,15	2,56	1,30
1,70V	29,4	17,4	12,8	10,1	7,41	5,82	4,77	3,14	2,55	1,29
1,75V	29,0	17,2	12,7	10,0	7,32	5,74	4,73	3,09	2,52	1,28
1,80V	28,4	17,0	12,5	9,98	7,16	5,65	4,64	3,06	2,49	1,27
1,85V	27,0	16,2	11,9	9,56	6,85	5,44	4,47	2,91	2,34	1,17

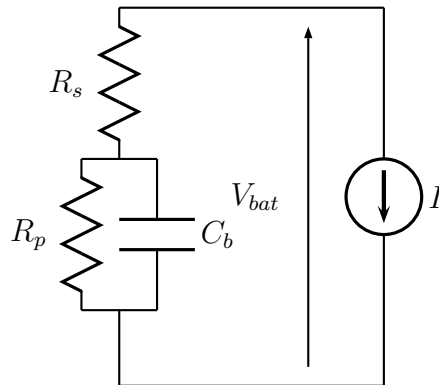
**Tabela 2: Relação entre tensão final da bateria por célula e corrente de descarga. Fonte: Adaptado de CSB Battery ()**

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

Para obter o valor do capacitor, primeiramente utilizou-se a Tabela 2 para verificar qual será a tensão final do banco de baterias em relação à corrente de descarga utilizada. Como mostrado na Equação 4, a corrente de descarga necessária será de 24A. Observando novamente para 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 o valor da capacidade  $C$  da bateria é 24Ah. Optou-se pelo terceiro pois o valor final de tensão de 1,60V para cada célula também está disponível na Tabela 1. Este valor de 1,60V para cada célula resulta num valor total de 153,6V ( $V_{CHGENB}$ ) para as 16 baterias, visto que em cada bateria existem 6 células.

Após determinar o valor final de tensão para cada célula da bateria, precisou-se replicar os valores de corrente exibidos na primeira linha da primeira tabela. Para isto foi simulado o circuito mostrado na Figura 19. Com este circuito pôde-se aplicar uma corrente de descarga constante na bateria e verificar qual será a variação da tensão na mesma após o fim do tempo estipulado na tabela.

Utilizando o software *PSIM*<sup>®</sup> para simular o circuito e utilizando uma tensão  $V_{bat}$  de 218,4V, visto que esta é a tensão de flutuação média, segundo CSB Battery (), aplicou-se uma corrente  $I$  de descarga de 29,9A e mediu-se a tensão  $V_{bat}$ . Após alguns testes, percebeu-se que um capacitor com capacitância de 850F teve uma variação de tensão próxima à esperada para 30 minutos. O mesmo foi executado para



**Figura 19: Circuito utilizado para obter o valor da capacitância para modelo das baterias. Fonte: Autoria própria.**

os demais pontos da Tabela 1 e obteve-se a Tabela 3, exibida a seguir.

**Tabela 3: Valores de capacitância obtidos para o modelo bateria. Fonte: Autoria Própria**

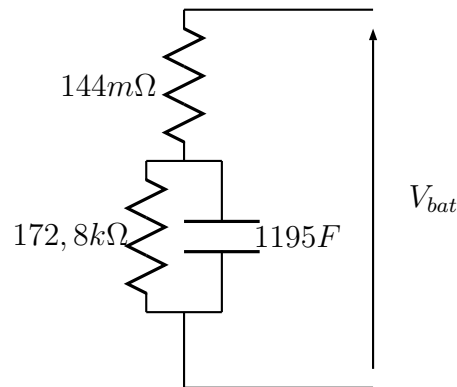
Corrente de Descarga (A)	Capacitância (F)
29,9	850
17,7	1000
13,0	1100
10,3	1100
7,50	1200
5,84	1200
4,84	1300
3,16	1300
2,57	1400
1,31	1500

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

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

$$C = 1195F \quad (11)$$

A partir dos resultados demonstrados, chegou-se ao modelo elétrico equivalente do banco de baterias apresentado na Figura 20.



**Figura 20: Modelo elétrico equivalente do banco de baterias. Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 PROJETO DO CONVERSOR CC-CC FULL-BRIDGE BIDIRECIONAL

Esta etapa do trabalho envolve o projeto de um filtro  $LC$ , de um filtro  $C$  e do sistema de controle de carga e descarga do banco de baterias. O funcionamento deste conversor e as equações necessárias para o projeto do mesmo estão expostas na Seção 2.1.2.

#### 3.2.1 Filtro $LC$

Para calcular os valores do filtro  $LC$ , composto por  $L$  e  $C_{LV}$  da Figura 8, primeiramente necessitou-se do valor do ciclo de trabalho ( $D$ ) que será utilizado.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2D \frac{N_s}{N_p} \Rightarrow D = \frac{V_o N_p}{2V_{in} N_s} \quad (12)$$

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

$$D = \frac{192 * 1}{2 * 384 * 1} \Rightarrow D = 0,25 \quad (13)$$

Com o valor de  $D$  definido, foram utilizadas as Equações 35 e 36 para obter o valor de  $L$  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 20% para esta corrente, tem-se que, a partir da Equação 35,

$$L = \frac{V_o(\frac{1}{2} - D)}{\Delta I_L f} = \frac{192 * (0,5 - 0,25)}{0,2 * 7,2 * 30 * 10^3} \quad (14)$$

$$L = 1,11mH \quad (15)$$

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

$$C = \frac{(1 - 2D)V_o}{32\Delta V_o L_x f^2} = \frac{(1 - 2 * 0,25)192}{32 * 10\% * 192 * 1,111 * 10^{-3} * (30 * 10^3)^2} \quad (16)$$

$$C = 0,156\mu F \quad (17)$$

Logo, o filtro LC do lado LV do conversor terá valores de indutância de 1,11mH e capacitância de 0,15 $\mu$ F.

### 3.2.2 Filtro $C_{HV}$

Para projetar o filtro puramente capacitivo utilizado no lado HV do conversor, foi utilizada a Equação 39, como explicado em 2.1.2. Estipulando uma variação de tensão de 1%, tem-se que

$$C_{HV} = \frac{I_{CC}}{fV_{ripple}} = \frac{12}{60 * 10^3 * 0,01 * 384} \quad (18)$$

$$C = 52\mu F \quad (19)$$

### 3.2.3 Resistor $R_{HV}$

A resistência  $R_{HV}$  deve comportar-se como o barramento CC, ou seja, fazendo com que exista uma corrente de 12A, que é a corrente do barramento, para uma tensão de 384V. Logo, utilizando novamente a Lei de Ohm, obtêm-se

$$V = RI \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{384}{12} \quad (20)$$

$$R = 32\Omega \quad (21)$$

### 3.2.4 Estratégia de controle para o conversor CC-CC bidirecional *full-bridge*

Como visto anteriormente, este conversor possui duas etapas distintas de operação - modo *boost* e modo *buck*. Durante a etapa *boost* o carregador irá permitir a descarga do banco de baterias e durante a etapa *buck* o banco de baterias é carregado.

O 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 Roseback (2004, p. 45), a potência  $P_{Barr}$  do barramento CC é variável, visto que a insolação sob os painéis solares varia durante o dia. 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, Roseback (2004, p. 45) 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 no barramento CC dentro dos limites aceitáveis. Para verificar isso, é preciso verificar 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  $V_{BarrMin}$  para a tensão do barramento CC e um limite mínimo  $V_{CHGENB}$  e um máximo  $V_{FLOT}$ , chamado de tensão de flutuação, para a tensão do banco de baterias, pode-se ter as seguintes combinações para definir a direção do fluxo de energia:

1.  $V_{Barr} \geq V_{BarrMin}$  e  $V_{Bat} \geq V_{CHGENB}$ : caso a tensão das baterias esteja abaixo do valor  $V_{FLOT}$ , as baterias serão carregadas. Caso  $V_{Bat}$  seja maior que  $V_{FLOT}$ , o banco de baterias está carregado ou está em processo de carga com  $V_{Bat}$  igual a  $V_{OCH}$ . Em ambos os casos, o fluxo de energia será do barramento para o banco;
2.  $V_{Barr} \geq V_{BarrMin}$  e  $V_{Bat} < V_{CHGENB}$ : neste caso diz-se que as baterias sofreram uma descarga profunda. As baterias serão carregadas seguindo as curvas da Figura 17, pois este modelo de recarga considera a descarga profunda;
3.  $V_{Barr} < V_{BarrMin}$  e  $V_{Bat} \geq V_{CHGENB}$ : com estes valores de tensão, o conversor deve descarregar as baterias de modo a manter a tensão do barramento CC dentro dos limites;

4.  $V_{Barr} < V_{BarrMin}$  e  $V_{Bat} < V_{CHGENB}$ : 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 reestabelecida e as baterias sejam carregadas.

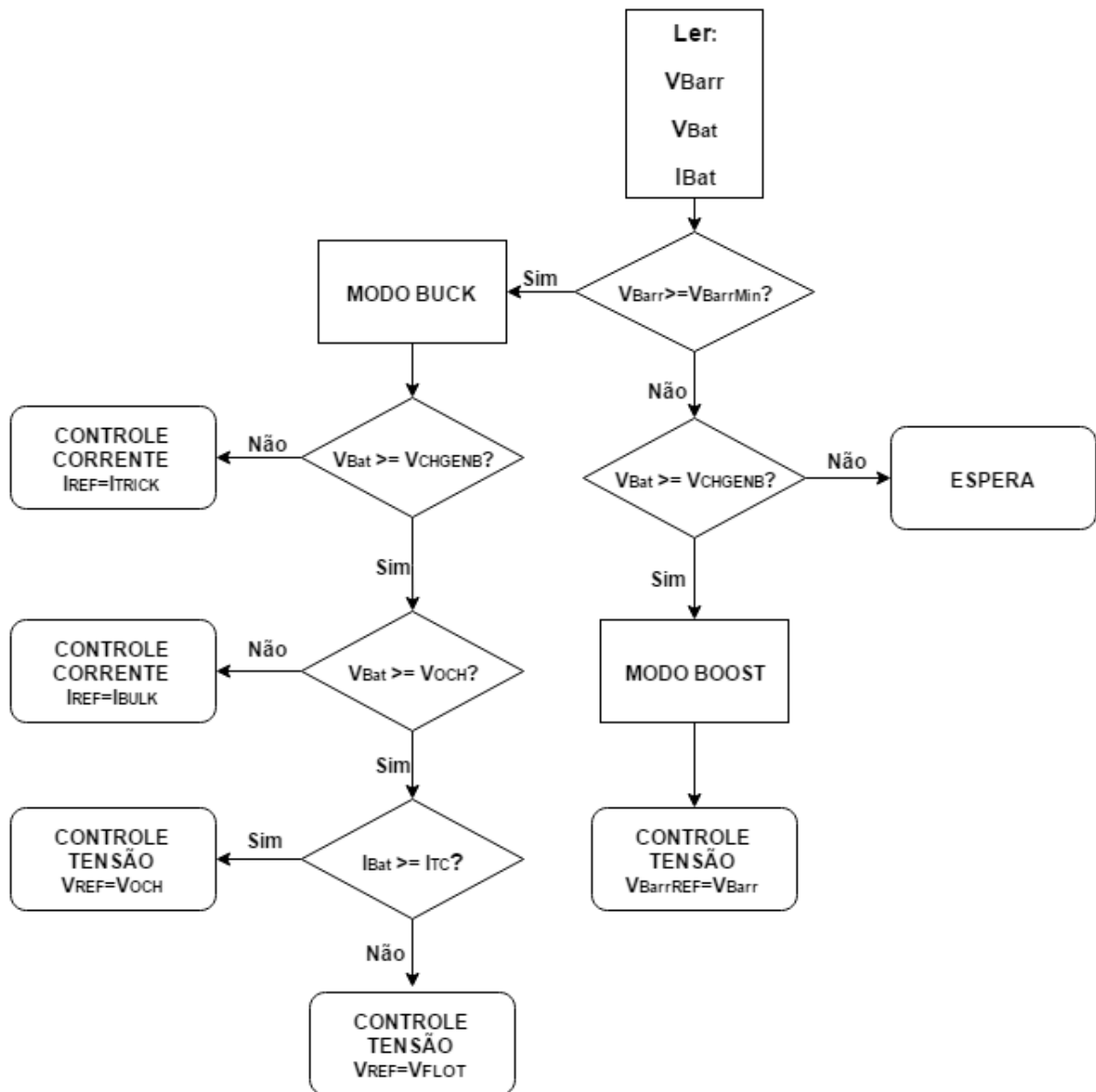
Utilizando o segundo método de carga explicado em 2.2.4, representado pela Figura 17, pode-se perceber que as variáveis a serem monitoradas pelo algoritmo de controle serão a corrente  $I_{Bat}$  do bando de baterias, sendo esta considerada positiva ao entrar no banco e negativa ao sair, a tensão  $V_{Bat}$  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 21, para mostrar quais serão as ações tomadas pelo controlador de modo a carregar ou descarregar o banco de baterias ou ficar num modo de 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 a 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 num momento em que ela é barata e vender essa mesma energia por um valor mais alto num outro momento do dia, entre outros. Para isso, foi incluso um sinal  $C_{Car}$  chamado de Comando de Carga, o qual permite ou não a carga, dependendo do seu nível lógico. Também foi adicionado outro sinal chamado de Comando de Descarga Profunda ( $C_{CarProf}$ ), 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 controladores *PI*. Cada etapa da carga das baterias e da descarga tem um controlador respectivo. Os controladores foram implementados utili-





**Figura 21: Fluxograma de controle para ações do conversor CC-CC bidirecional *full-bridge*. Fonte: Autoria própria**

zando as Equações 44, 45 e 46 e um bloco de controle chamado Bloco C, o qual recebe os valores de tensão e corrente das baterias, tensão do barramento, Comando de Carga e Comando de Descarga Profunda e retorna o valor do *duty cycle* para chaveamento dos semicondutores e o sinal referente à descarga profunda das baterias.

Os ganhos utilizados nos controladores são exibidos nas tabelas 4 e 5. Estes ganhos foram obtidos através de testes e aproximações, de modo a obter um valor satisfatório de resposta.

Tabela 4: Valores dos ganhos dos controladores do modo *buck*. Fonte: Autoria Própria

Etapa de controle	$K_i$	$K_p$
Corrente constante $I_{TRICK}$	25000	0,00025
Corrente constante $I_{BULK}$	50000	0,00025
Tensão constante $V_{OCH}$	25000	0,025
Tensão constante $V_{FLOT}$	25000	0,0025

Tabela 5: Valores dos ganhos dos controladores do modo *boost*. Fonte: Autoria Própria

Etapa de controle	$K_i$	$K_p$
Tensão $V_{Barr}$ constante	20000	0,5

### 3.3 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, excluindo a parte de controle, como mostra a Figura 22.

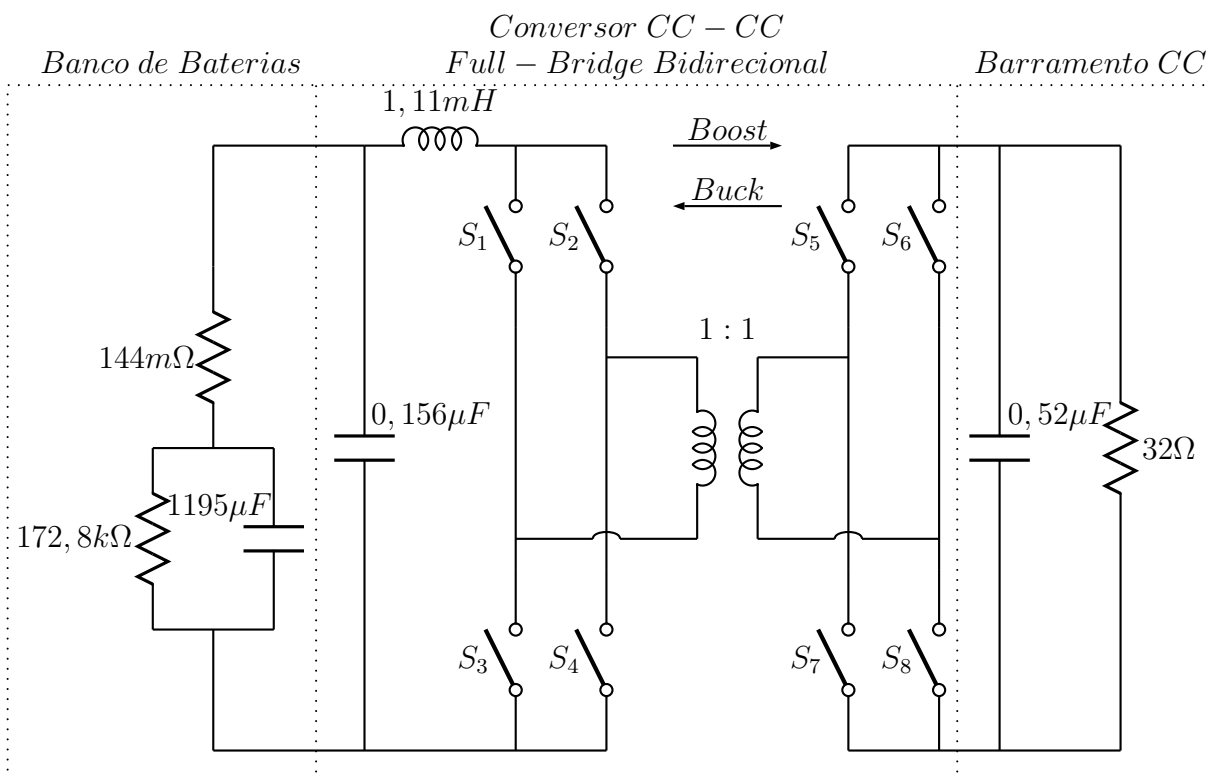


Figura 22: Sistema utilizado para simulação de carga e descarga do banco de baterias. Fonte: Autoria Própria.

Para melhor organizar os valores obtidos e os valores utilizados como re-

ferência, foram criadas as Tabela 6 e Tabela 7.

**Tabela 6: Valores obtidos para o banco de baterias, conversor CC-CC bidirecional *full-bridge* e barramento CC. Fonte: Autoria Própria**

Variável	$C_{Bat}$	$R_p$	$R_s$	$C_{LV}$	L	$C_{HV}$	$R_{HV}$
Valor	1195 $\mu$ F	172,8k $\Omega$	144m $\Omega$	0,156 $\mu$ F	1,11mH	0,52 $\mu$ F	32 $\Omega$

**Tabela 7: Valores utilizados como referência para carga e descarga do banco de baterias. Fonte: Autoria Própria**

Variável	$V_{Barr}$	$I_{Barr}$	$V_{Bat}$	$I_{TRICK}$	$I_{BULK}$	$V_{OCH}$	$V_{FLOT}$	$V_{CHGENB}$	$I_{Bat}$
Valor	384V	12A	192V	0,24A	7,2A	230,4V	218,4V	153,6V	24A

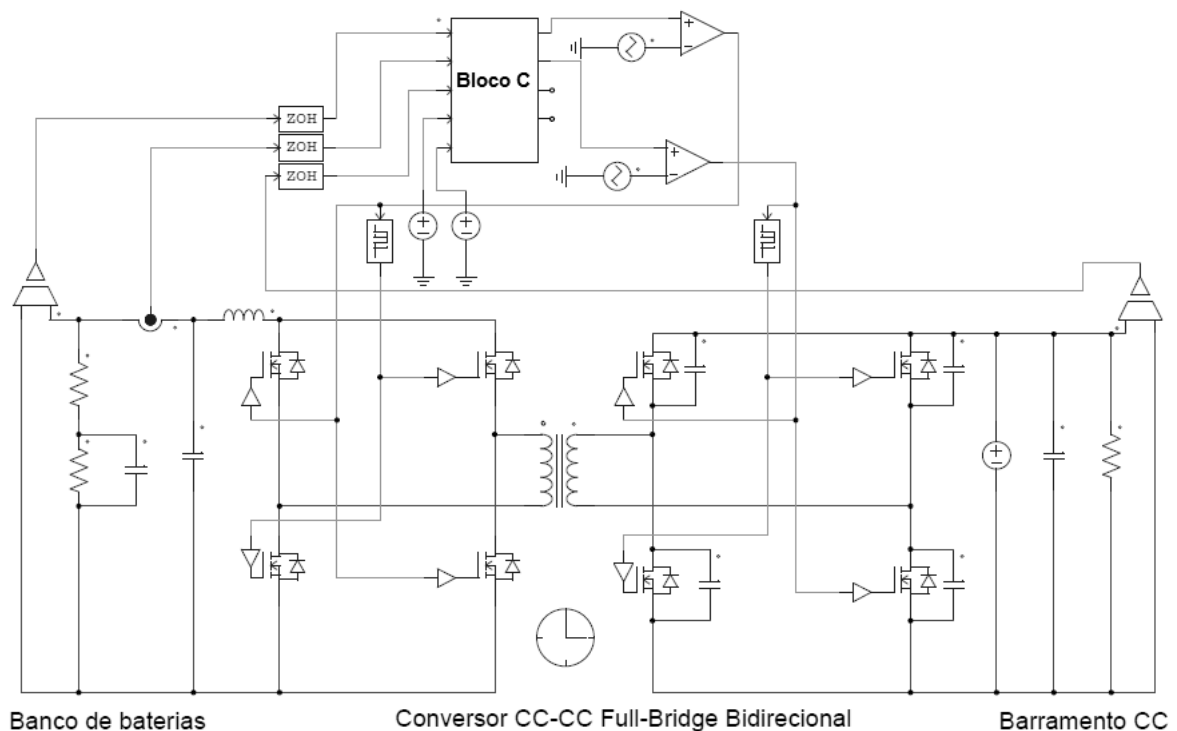
### 3.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi exibido primeiramente o projeto dos componentes do modelo elétrico equivalente do banco de baterias, dos componentes do conversor CC-CC bidirecional *full-bridge* e a estratégia de controle utilizada para determinar a direção do fluxo de energia sob o mesmo, ou seja, se será um processo de carga ou de descarga das baterias. Além disto, também temos uma prévia do circuito que será utilizado para simulação.

No capítulo a seguir, serão exibidos os resultados obtidos nas simulações para os dois modos de operação do sistema: *buck* e *boost*.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para simular o sistema exibido na Figura 23, como dito anteriormente, foi utilizado o *software* PSIM<sup>®</sup>. As duas fontes de tensão na quarta e quinta entrada do Bloco C representam o Comando de Carga e o Comando de Carga Profunda, respectivamente. As saídas livres do bloco de controle são utilizadas para verificar o modo de operação do conversor e o sinal de descarga profunda das baterias. Para simular o modo *Boost*, a fonte de tensão que representa o barramento CC é removida.



**Figura 23: 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* (descarga) serão expostos.

## 4.1 MODO BUCK - CARGA

Antes de tudo, serão verificadas as formas de onda obtidas e comparadas com as formas de onda exibidas na Figura 10. As formas de onda obtidas na simulação estão dispostas na Figura 24. Estas ondas foram retiradas do sistema na etapa de carga em que aplica-se  $I_{BULK}$  às baterias.

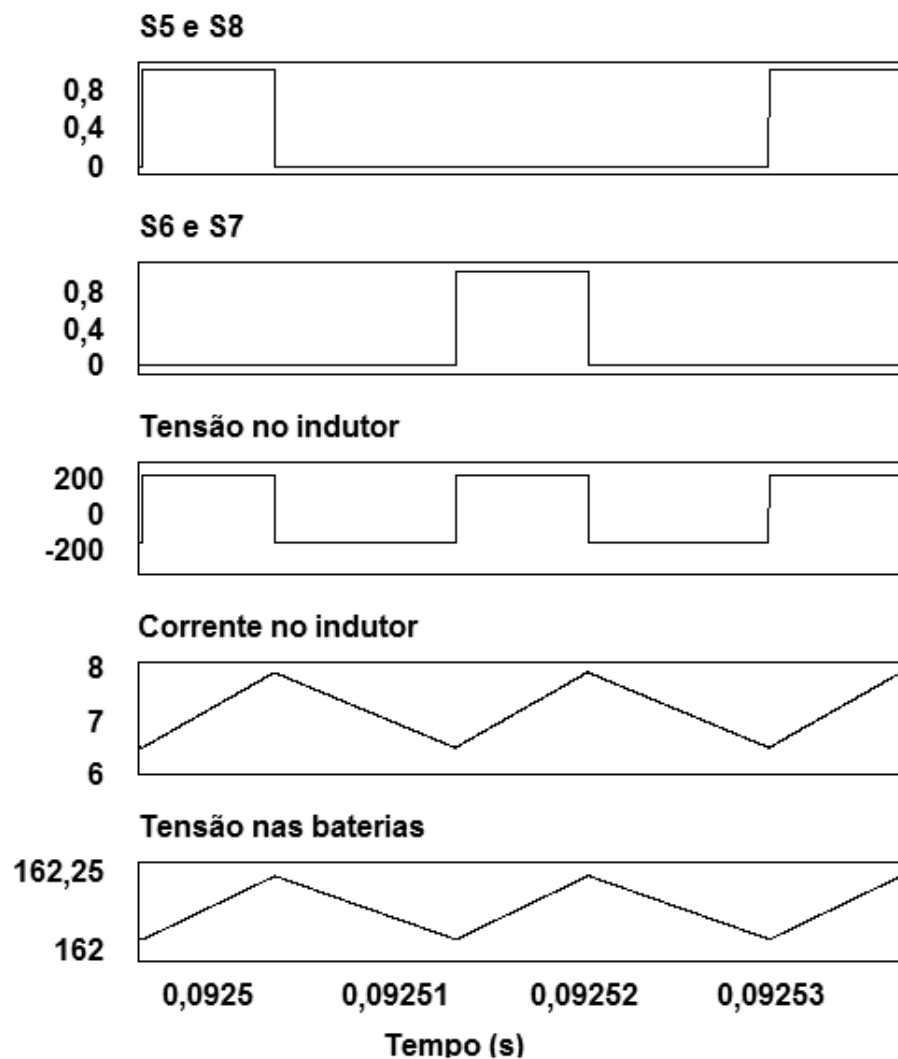
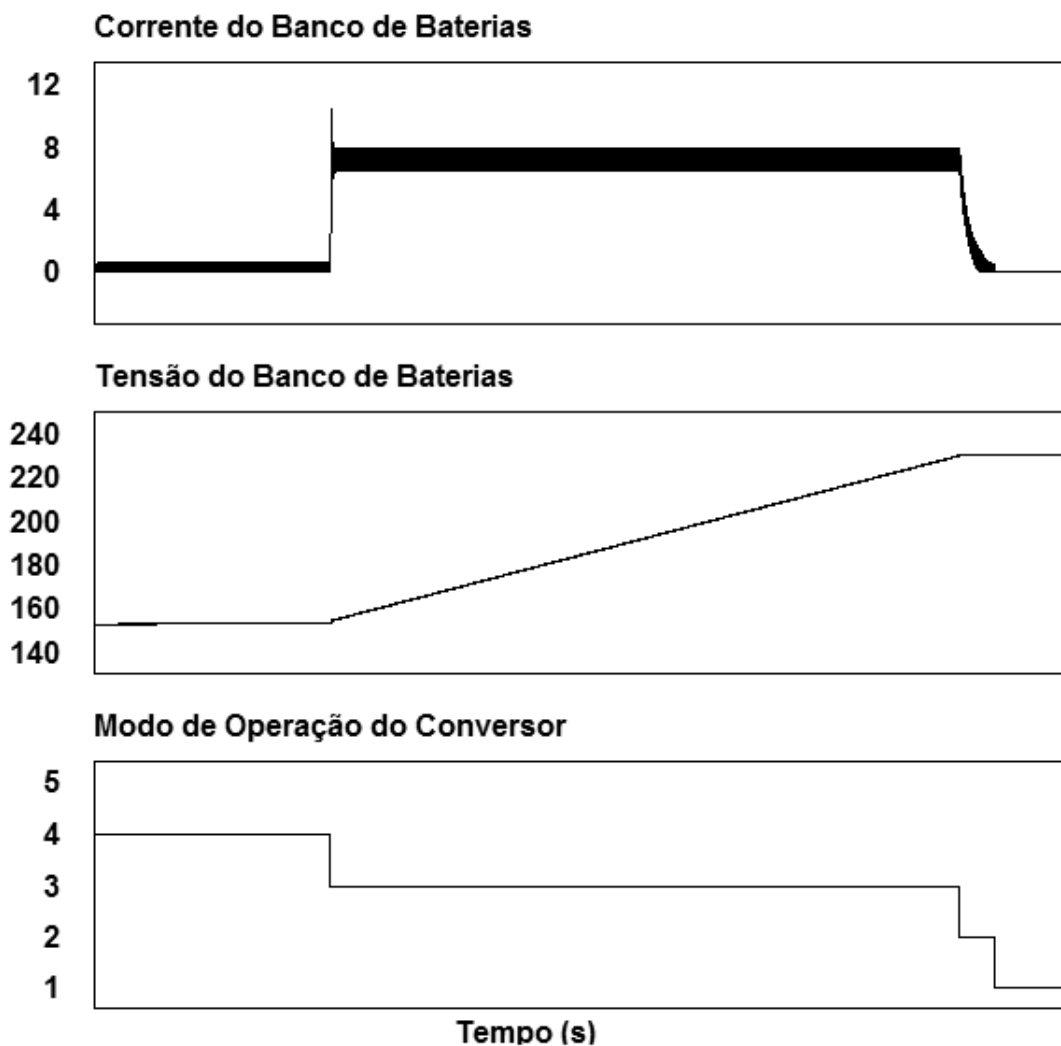


Figura 24: Curvas obtidas da simulação no modo *buck* de operação do conversor CC-CC Full-Bridge bidirecional. Fonte: Autoria própria

Por início, pode-se afirmar que o chaveamento dos semicondutores jamais se sobreporão, visto que o *duty cycle* limite do modo de carga do conversor é 0,5. Sobre a tensão no indutor, percebe-se que comporta-se da maneira esperada, ou seja, no momento em que algum dos dois conjuntos de chave está conduzindo, a tensão é positiva, visto que o indutor está sendo carregado. Quando nenhum dos conjuntos de chave conduz corrente, a tensão será negativa, visto que o indutor alimenta o

banco de baterias. Mudando de tensão para corrente no indutor, percebe-se que esta também comporta-se como deveria, aumentando quando algum dos conjuntos de chaves conduz e diminuindo quando os mesmos estão abertos. Por fim, a tensão no banco de baterias (equivalente à  $V_{CLV}$  na Figura 10) tem a mesma forma de onda da corrente no indutor, aumentando quando a corrente aumenta e decrescendo quando a corrente decresce, confirmando seu funcionamento.



**Figura 25: Curvas de corrente e tensão do banco de baterias e ação do controlador.**  
Fonte: Autoria própria

Após observar as formas de onda geradas em alta frequência, iremos observar as curvas de carga ignorando esta frequência, ou seja, em baixa frequência. Analisando a Figura 25 e comparando-a com a Figura 17, percebe-se que a carga da bateria foi executada respeitando o método escolhido. Para gerar a curva da figura abaixo, a bateria foi iniciada com uma tensão abaixo de  $V_{CHGENB}$ , ou seja, abaixo de

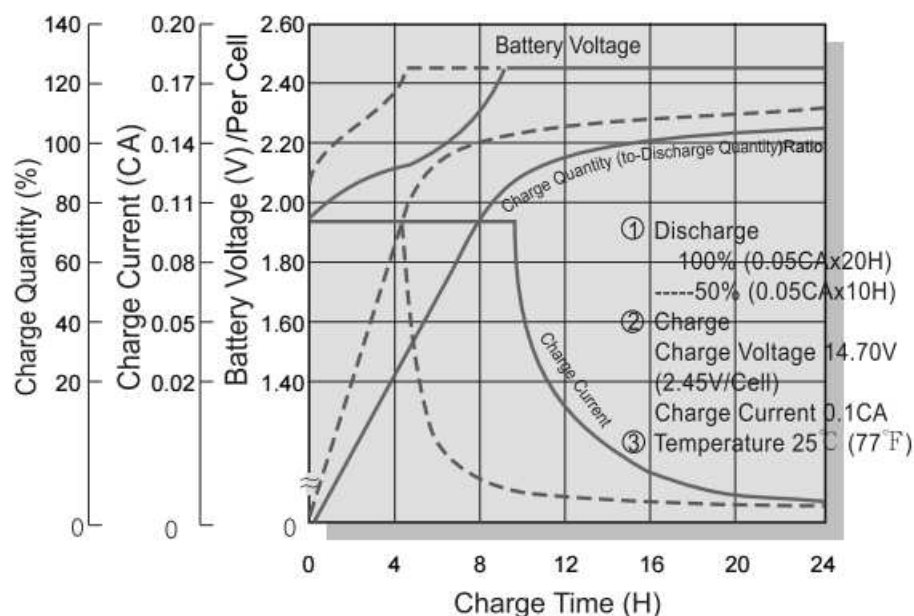
153,6V.

Na Figura 25, 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 momento. Os modos de operação e as ações de controle respectivas estão listados na Tabela 8.

**Tabela 8: Modos de operação do conversor. Fonte: Autoria Própria**

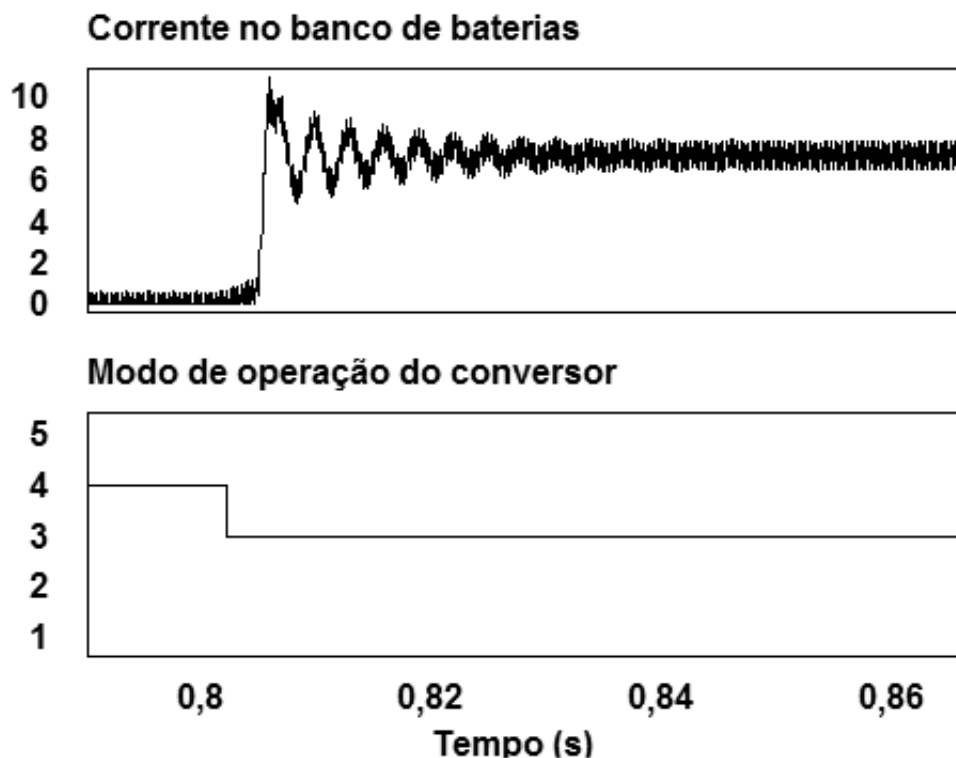
Modo de operação do conversor	Função do conversor
0	Modo de descarga
1	Modo de carga com tensão constante no valor de $V_{FLOT}$
2	Modo de carga com tensão constante no valor de $V_{OCH}$
3	Modo de carga com corrente constante no valor de $I_{BULK}$
4	Modo de carga com corrente constante no valor de $I_{TRICK}$

Para gerar a Figura 25, o tempo de carga da bateria real não foi respeitado, visto que para rodar uma simulação de aproximadamente 16 horas (tempo necessário para obter 100% de carga nas baterias, de acordo com a Figura 26), seria necessário um tempo de simulação muito grande. Como a ação do controle é igual independente do tempo de carga, foi utilizado um capacitor de 0,4F no modelo equivalente do banco de baterias. Como o capacitor que representa as baterias tem um valor menor, a carga será mais rápida.



**Figura 26: Tensão da bateria e tempo de carga para uso cíclico . Fonte: CSB Battery ()**

A partir da Figura 25, foram retiradas as figuras 27 e 28. Na primeira, o



**Figura 27: Mudança do modo de operação do conversor de 4 para 3. Fonte: Autoria própria**

pico de corrente existente quando há a mudança do modo de operação do conversor de 4 para 3 está sendo evidenciado, enquanto na segunda é evidenciado o modo de operação 2, que está relacionado à etapa de carga com tensão constante no valor de  $V_{OCH}$ .

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

1. Corrente constante em  $I_{TRICK}$ : representada pelo intervalo de tempo em que o conversor está trabalhando no modo de operação 4 na Figura 25. 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 24Ah, tem-se uma corrente com valor de 0,24A.
2. Corrente constante em  $I_{BULK}$ : representada pelo intervalo em que o conversor está trabalhando no modo de operação 3. A corrente é mantida constante em 7,2A, pois esta é a corrente máxima de carga.



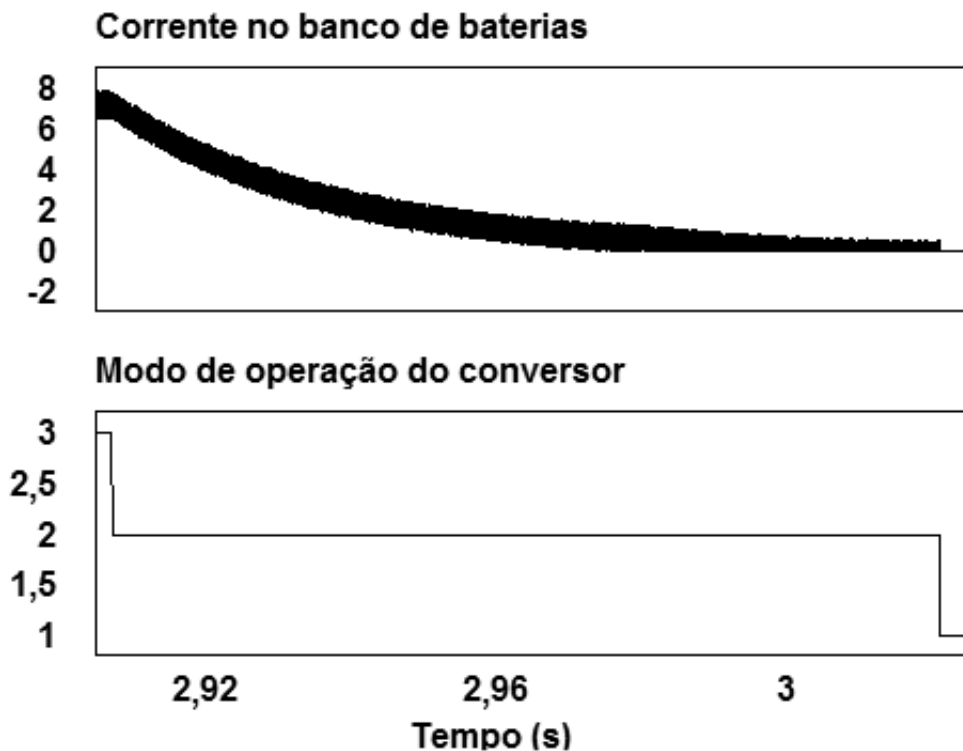


Figura 28: Modo de operação 2 do conversor. Fonte: Autoria própria

3. Tensão constante em  $V_{OCH}$ : momento em que o conversor atua no modo de operação 2. Neste momento a tensão é controlada no valor de equalização (14,4V/bateria, ou seja, 230,4V no total) até que a corrente atinja um valor menor que 1% da capacidade das baterias, ou seja, menor que 0,24A.
4. Tensão constante em  $V_{FLOT}$ : etapa em que o conversor atua no modo de operação 1. A tensão do banco de baterias é mantida no valor de flutuação (13,65V/bateria resultando em 218,4V no total pois, de acordo com CSB Battery (), este é o valor médio para as baterias utilizadas). Neste ponto nota-se que a tensão do banco de baterias continua a mesma da etapa anterior. Isto ocorre pois o modelo de bateria utilizado é baseado num capacitor e este não permite uma variação brusca de tensão. No entanto, observando o modo de operação do conversor, percebe-se que a ação do controlador está correta e que, caso fosse utilizada uma bateria real ou um modelo equivalente que represente esta característica das baterias, o gráfico de tensão exibiria a queda de tensão de  $V_{OCH}$  para  $V_{FLOT}$ .

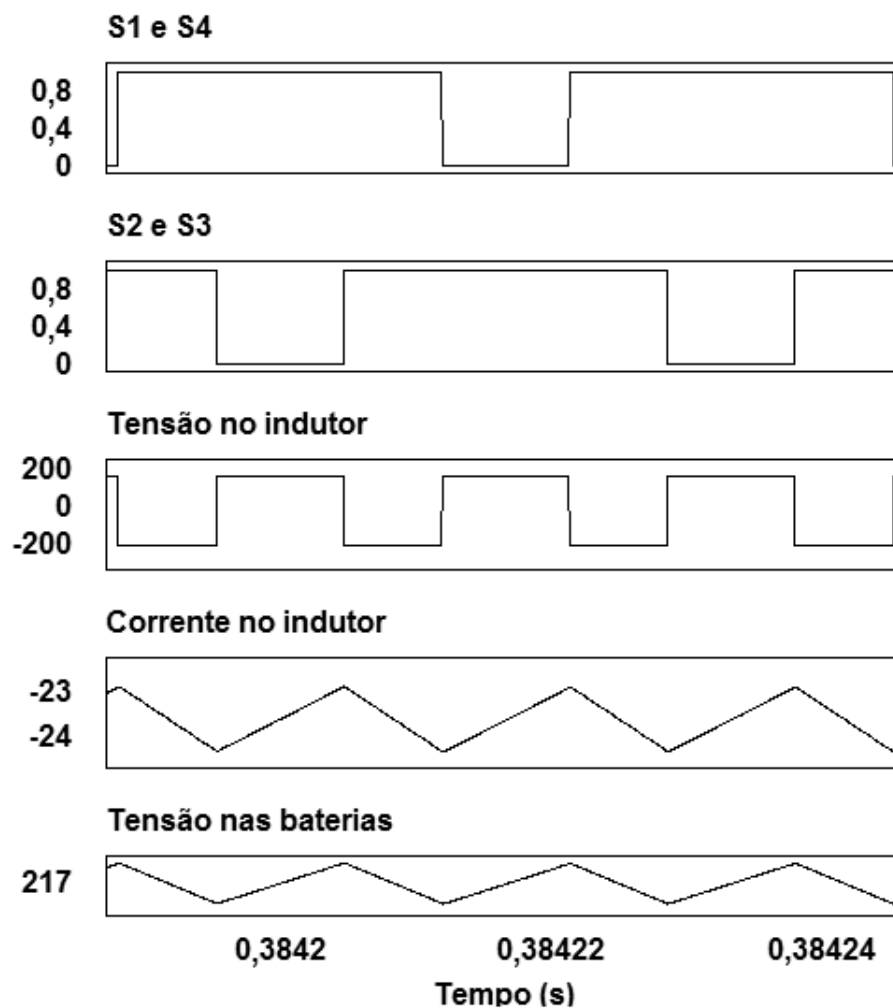
Para verificar se as variáveis estão adequadas aos níveis citados acima, foi utilizada a medição do *PSIM*<sup>®</sup>. Os valores RMS obtidos através desta estão expostos na Tabela 9.

**Tabela 9: Valores RMS das correntes para a primeira e para a segunda etapa de carga.**  
 Fonte: Autoria Própria

Corrente	Medição
$I_{TRICK}$	0,2438A(rms)
$I_{BULK}$	7,2151A(rms)
$V_{OCH}$	230,35V(rms)

#### 4.2 MODO BOOST - DESCARGA

Da mesma maneira como foi feito para o modo *Buck* de operação, primeiramente serão verificadas as formas de onda do conversor e analisado se o mesmo comporta-se da maneira esperada. As formas de onda do geradas na simulação são mostradas na Figura 29.



**Figura 29: Curvas obtidas na simulação do modo *boost* de operação do conversor CC-CC Full-Bridge bidirecional.** Fonte: Autoria própria

As formas de onda obtidas na simulação serão comparadas com as mos-

tradas na Figura 9. Inicialmente, pode-se dizer que as chaves sempre serão chaveadas com um intervalo onde ambas as diagonais conduzem, visto que o *duty cycle* mínimo estipulado para a descarga é 0,5. Em relação à corrente e à tensão do indutor, percebe-se que estão invertidas quando comparadas com a Figura 29. Isso acontece porque foi definido que a corrente é positiva quando entra no indutor e vai em direção ao banco de baterias, enquanto na figura de referência, esta definição não foi feita. Já a tensão das baterias (relacionada a  $V_{LV}$ ) comporta-se da maneira esperada, ou seja, quando há um curto circuito no transformador (quatro chaves conduzindo corrente), as baterias carregam o indutor e quando há apenas uma diagonal conduzindo, a tensão aumenta, agindo contrariamente à corrente no indutor.

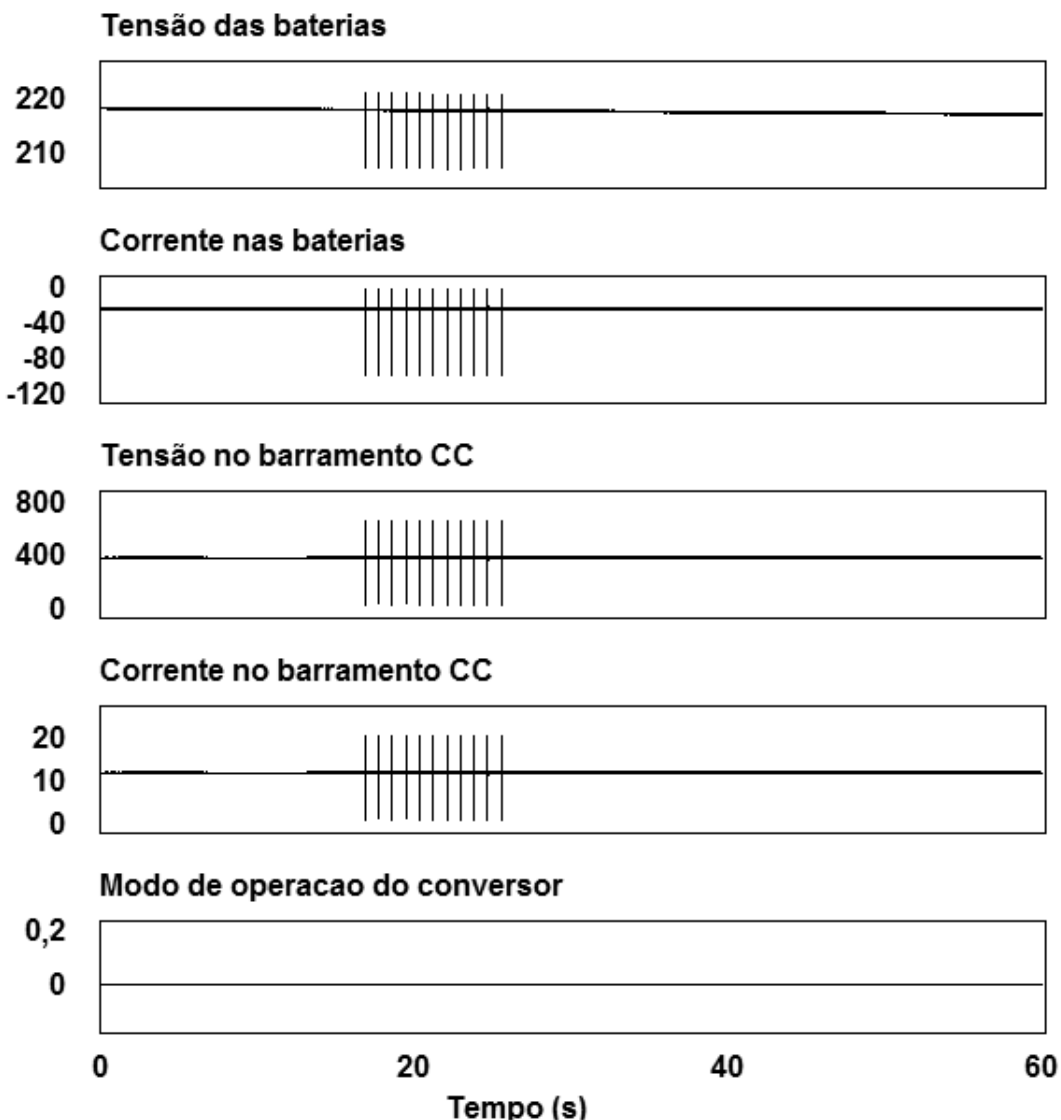
Com as curvas em alta frequência analisadas, os níveis de tensão e corrente serão analisados para verificar se estes estão adequados ao projeto. Para isso, ajustou-se a tensão do banco de baterias para 218,4V e simulou-se o sistema durante 60 segundos (o sistema não foi simulado até as baterias ficarem descarregadas pois iria demorar um tempo demasiadamente grande). O resultado é mostrado na Figura 30.

Primeiro, deve-se explicar que os picos que existem nos gráficos da Figura 30 provavelmente são decorrentes de algum detalhe no *software* de simulação, visto que o circuito foi minuciosamente analisado e qualquer alteração no circuito não gera variação nos picos. O primeiro pico existente está sendo evidenciado na Figura 31.

Para verificar se os valores estão dentro do esperado, a medição do *PSIM*<sup>®</sup> foi utilizada novamente. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 10. O valor da tensão das baterias não foi exibido visto que ele diminui com o tempo.

Analisando a Tabela 10, percebe-se que os valores obtidos na simulação encontram-se dentro dos valores esperados.

Com o valor da tensão das baterias pode-se estimar quanto tempo elas conseguiriam alimentar o barramento. Analisando a Tabela 1, 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 entre 30 e 60 minutos. Para estimar este tempo, basta utilizar uma simples "Regra de três". Para isso necessita-se do valor final da tensão  $V_{Bat}$  após os 60 segundos, que é de 217,00V. Como a tensão



**Figura 30: Descarga do banco de baterias durante 60 segundos. Fonte: Autoria própria** reduziu de 218,4V para 217,00V, tem-se uma diferença de 1,4V em 60 segundos. Então, se em 60 segundos a tensão diminuiu 1,4V, para diminuir 64,8V ( $V_{bat} - V_{CHGENB} = 218,4V - 153,6V = 64,8V$ ) obtêm-se

$$X = \frac{60s * 64,8V}{1,4V} \quad (1)$$

$$X = 2777,14s = 46,28min \quad (2)$$

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 se o comportamento do conversor em relação à des-

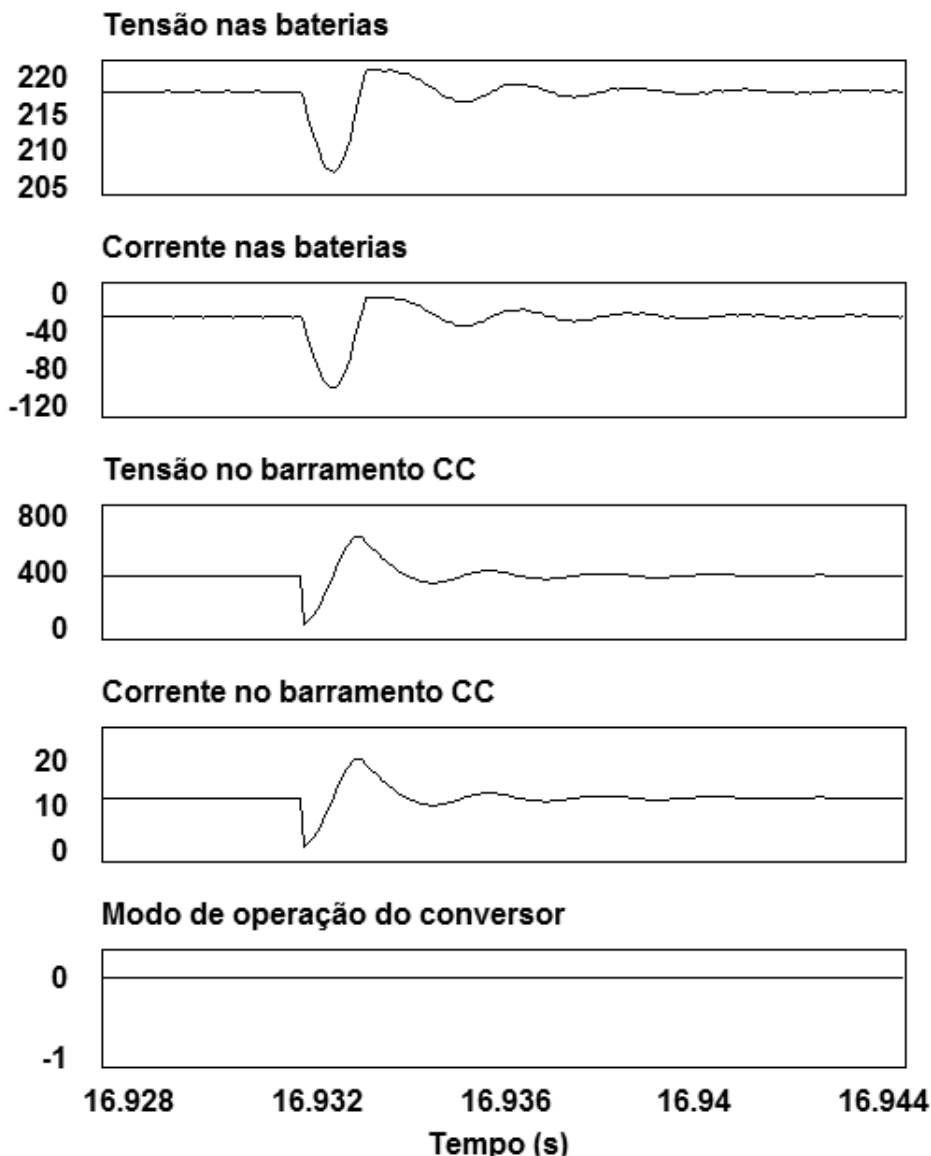


Figura 31: Picos existentes na simulação. Fonte: Autoria própria

Tabela 10: Valores RMS para o modo de operação *boost*. Fonte: Autoria Própria

Variável	Medição
$V_{Barr}$	384,09V(rms)
$I_{Barr}$	12,00V(rms)
$I_{Bat}$	23,48A(rms)

carga profunda está coerente. Para isto, ajustou-se o valor da tensão das baterias para 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 Figuras 32 e 33. Para gerar ambas as 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 da tensão (153,6V).

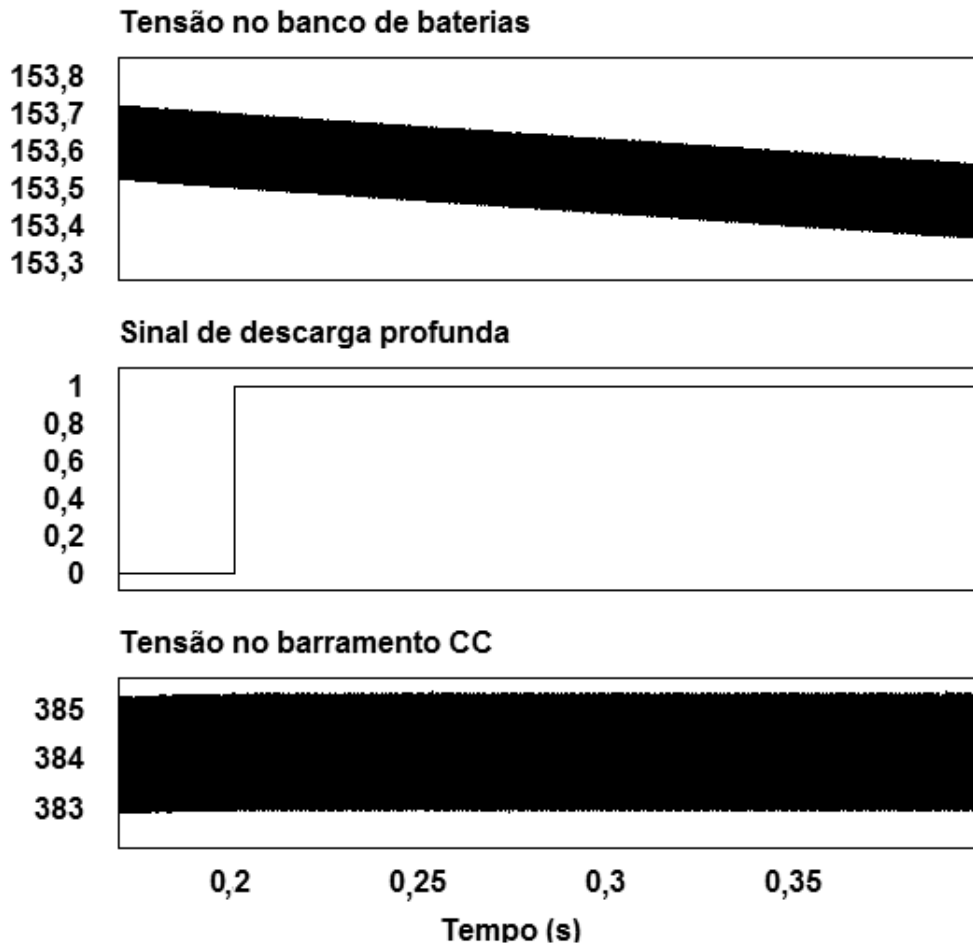


Figura 32: Descarga profunda habilitada. Fonte: Autoria própria

Analisando os dois casos (descarga profunda habilitada e desabilitada), pode-se afirmar que o controlador está agindo da maneira como era esperado. Para a Figura 32, no instante em que a tensão *RMS* das baterias fica menor que a tensão mínima ( $V_{CHGENB}$  ou 153,6V), o sinal de aviso de que as baterias estão sofrendo uma descarga profunda vai para nível lógico alto e as baterias continuam fornecendo energia para o barramento CC. Já para o segundo caso, assim que a tensão *RMS* das baterias entram no valor de descarga profunda, o fornecimento de energia é cortado, diminuindo a tensão no 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.

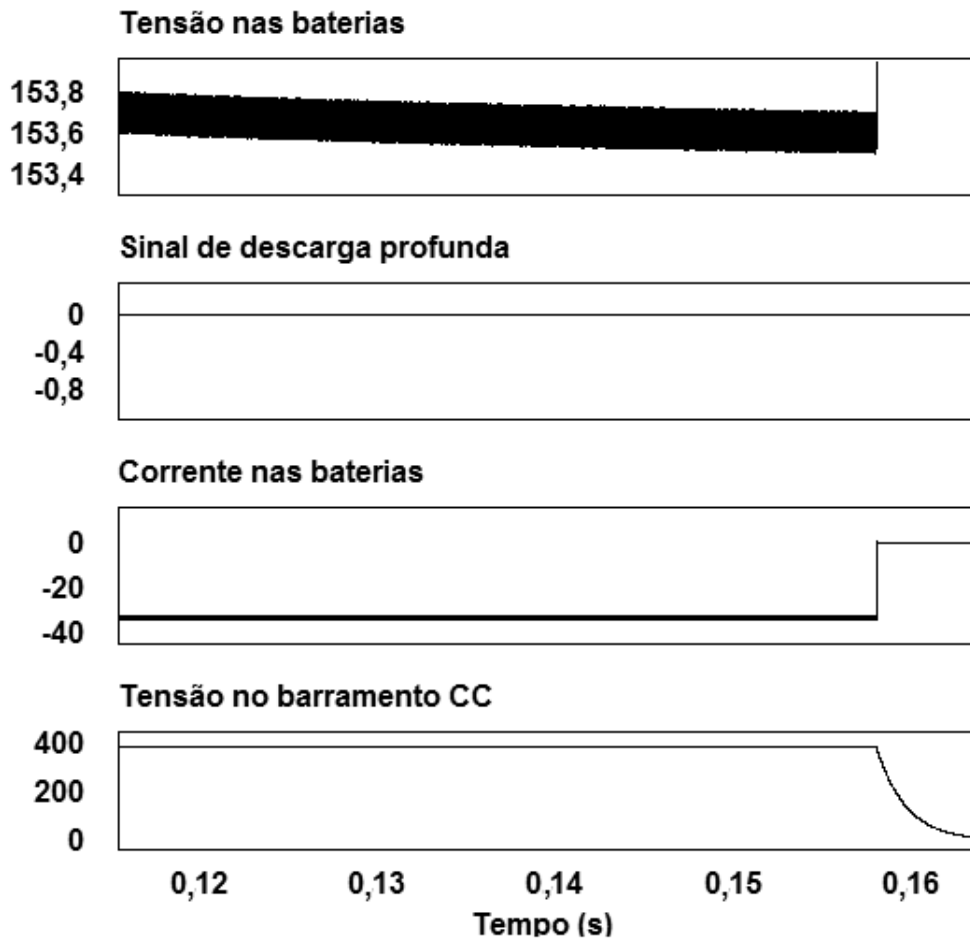


Figura 33: Descarga profunda desabilitada. Fonte: Autoria própria

#### 4.3 RESUMO DO CAPÍTULO

No presente capítulo foram exibidos os resultados obtidos através da simulação do sistema proposto. Percebeu-se que os resultados do conversor mantiveram-se dentro do esperado. O banco de baterias também manteve-se dentro do esperado, apesar do detalhe de não permitir uma variação instantânea de tensão. Além deste detalhe do banco de baterias, também verificou-se a existência de picos nos gráficos do modo de descarga. Para este problema não foi encontrada solução. No entanto, imagina-se que a causa destes picos não seja proveniente do circuito mas sim do *software* de simulação, visto que estes não ocorrem periodicamente, mas sim espontaneamente. Relevando estes detalhes, pode-se dizer que o sistema obteve um resultado dentro do esperado, mantendo as variáveis dentro dos valores esperados no projeto.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho.

## 5 CONCLUSÃO

Com o aumento da poluição e do dano causado ao meio ambiente por causa de vários métodos de obtenção de energia elétrica, a pesquisa por meios de produção de energia chamada limpa, ou seja, que não gera problemas à natureza ou poluição cresce cada dia mais. A geração fotovoltaica é um exemplo de geração de energia limpa, visto que só depende do Sol e de placas de conversão de energia.

Este trabalho apresentou um projeto de um controlador *CC-CC* bidirecional *full-bridge* com o objetivo de controlar a carga e descarga de um banco de baterias a partir de um barramento *CC* que está conectado à um sistema de geração fotovoltaica.

Inicialmente foram realizados estudos sobre conversores *CC-CC* e detectou-se a possibilidade de isolamento e bidirecionalidade. Por este motivo, alguns conversores *CC-CC* isolados foram analisados e após as análises, optou-se por utilizar um conversor *CC-CC full-bridge*, visto que este se adapta melhor aos níveis de potência envolvidos. Com esta decisão, foi apresentado um modelo de conversor *CC-CC full-bridge* bidirecional, o qual foi utilizado no projeto.

Com o modelo de conversor a ser utilizado definido, partiu-se para o estudo das baterias. Após uma introdução teórica sobre as mesmas, foram estudados modelos elétricos equivalentes que simulam o comportamento das baterias em processos de carga e descarga. 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 para implementar digitalmente, o qual irá controlar o chaveamento dos semicondutores do conversor. Para isso, foi exibido um modelo do controlador *PI* para ser utilizado de forma digital.

Com os estudos prontos, mostrou-se o desenvolvimento do projeto do conversor *CC-CC full-bridge* bidirecional para controle de carga do banco de baterias. 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, vale citar o detalhe existente no modelo de bateria, o qual não permite uma variação instantânea de tensão, influenciando assim na curva de carga obtida, visto que no momento em que a tensão das baterias devia diminuir de  $V_{OCH}$  para  $V_{FLOT}$ , o capacitor existente no modelo de bateria não aceita esta variação brusca de tensão. Pode-se também citar os picos que apareceram no modo de descarga da bateria, para os quais não foi encontrada uma explicação lógica. No entanto, o controlador atuou da maneira correta em todos os instantes, mantendo os níveis de tensão e corrente dentro do esperado para ambos os modos de operação: *buck* e *boost* (carga e descarga, respectivamente). Por fim, pode-se dizer que os resultados do trabalho foram satisfatórios, por mais que alguns problemas surgiram e não puderam ser corrigidos, mas percebeu-se que o conversor, que era o foco do trabalho, resultou em valores corretos e satisfatórios.

Uma possível sugestão 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, o qual não apresente o mesmo problema detectado no modelo de bateria utilizado neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- BARBI, Ivo. **Projetos de fontes chaveadas**. 2001.
- BAZANELLA, Alexandre Sanfelice; JR., João Manoel Gome da Silva. **Ajuste de Controladores PID**. Abr 2000.
- BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. n. 11, 2000.
- BRITO, Miguel C.; SILVA, José A. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade**. 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/i1.pdf>>. Acesso em: 23 de Mar. de 2015.
- CSB BATTERY. **EVH 12240**. [S.l.]. Disponível em: <[http://www.csb-battery.com/english/01\\_product/02\\_detail.php?fid=13pid=84](http://www.csb-battery.com/english/01_product/02_detail.php?fid=13pid=84)>.
- HART, Daniel W. **Power Electronics**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010.
- JÚNIOR, Roner André Liston; CARATI, Emerson Giovani. **SISTEMA DE CONTROLE PARA CONVERSORES ESTÁTICOS DE ENERGIA APLICADOS EM GERAÇÃO HÍBRIDA DISTRIBUÍDA**. 2015.
- LAZZARIN, Telles Brunelli. **Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Março 2006.
- MOGHADDAM, Shahab H. A.; AYATOLLAHI, Ahmad; RAHMATI, Abdolreza. Modeling and current programmed control of a bidirectional full bridge dc dc converter. **Energy and Power Engineering**, Mai 2012.
- MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS., William P. **Power Electronics: converters, applications and design**. [S.l.]: Wiley, 2003.
- MOTA, Juliana de Oliveira; LOPES, Ciro Dal Bianco; SILVA, Washington Luís Santos; ALMEIDA, Tiago Milloli Pereira. **Sistema de armazenamento de energia solar com controle microprocessado para dispositivos eletrônicos**. 2012.
- PETRY, Clóvis Antônio; BARBI, Ivo. **Introdução aos Conversores CC-CC**. Agosto 2001.
- POMILIO, José Antenor. **Fontes Chaveadas**. [S.l.: s.n.], 2004.
- PRESSMAN, Abraham I. **Switching Power Supply Desing**. 2nd. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 1999.

RECH, Cassiano. **Conversor Flyback**. Abril 2009. Disponível em: <[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/cassiano/materiais/EPOII\\_Capitulo\\_3\\_Flyback](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/cassiano/materiais/EPOII_Capitulo_3_Flyback)>. Acesso em: 27 de Fev. de 2015.

REIS, Francisco Everton Uchôa. **Conversor CC/CC com dois estágios para aplicação em sistemas fotovoltaicos autônomos de energia**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fev 2012.

ROSEMBACK, Ricardo Henrique. **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.

SEGUEL, Julio Igor López. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Ago 2009.

SILVA, Palmira F. **Breve história da energia solar**. 2004. Disponível em: <<http://web.ist.utl.pt/palmira/solar2.html>>. Acesso em: 6 de Jan. de 2015.

VARGA, Craig. **Power Converter Topology and MOSFET Selection for 48-V Telecom Applications**. June 2001.