

Matheus Lemos Bahia

Desenvolvimento de um Conversor CA- CC para Carga de Bateria Chumbo- Ácido

ORIENTADOR: Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Júnior

São Carlos
2015

Matheus Lemos Bahia

Desenvolvimento de um Conversor CA-CC para Carga de Bateria Chumbo-Ácido

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Júnior

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Bahia, Matheus Lemos
B151d Desenvolvimento de um conversor ca-cc para carga de
bateria chumbo-acido / Matheus Lemos Bahia; orientador
Assauri Albano de Oliveira Junior. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Conversor CA-CC. 2. Bateria. 3. Chumbo-Ácido. 4.
Eletrônica de Potência. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Matheus Lemos Bahia

Título: "Desenvolvimento de um conversor CA-CC controlado para carga de bateria chumbo-ácido"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 29/04/2016,

com NOTA 5,5 (cinco, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Júnior - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Dr. Manoel Luis de Aguiar - (SEL/EESC/USP)

Mestre Thales Eugenio Portes de Almeida - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedico esse trabalho aos meus pais,
Jorge Henrique Bahia de Souza e Dilma Suely Lemos Bahia (*in memoriam*)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a toda a minha família, em especial meus pais e meus irmãos, por toda a ajuda que me deram mesmo eu estando longe de casa por todo esse tempo de graduação, mas que mesmo assim sempre me ajudaram no que foi possível e sempre deram forças para poder completar mais essa etapa da minha vida

Também gostaria de agradecer aos meus amigos que me acompanharam nesses últimos 6 anos e que estiveram juntos comigo passando esses momentos e fazendo companhia em todos os momentos, desde nos momentos mais difíceis de véspera de provas como nos momentos de festas e de confraternização

Em especial gostaria de agradecer aos meus colegas Acássio Matheus Roque, e Leonardo Mariano Gomes pela ajuda que me deram para poder fazer o meu protótipo, bem como ao Mestre Thales Eugenio Portes de Almeida pela ajuda no laboratório e ao Heinz Suadicani pela revisão do texto.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar, analisar e desenvolver um conversor CA-CC não isolado, para realizar a carga de uma bateria do tipo chumbo-ácido. O resultado desse projeto é um conversor capaz de fornecer a corrente e a tensão sobre a bateria, de forma a viabilizar a maximização da vida útil da mesma e manter a integridade do sistema

Palavras Chaves: Conversor CA-CC, Bateria, Carregador, Eletrônica de Potência

Abstract

This work aims to analyze and develop a non-isolated AC-DC converter, to charge a lead-acid battery. The result of this project is a converter capable to supply both current and voltage across the battery, always seeking to maximize the life and shall also maintain the system integrity.

Key words: AC-DC converter, Battery, Charger, Power Electronics

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 - Motivação.....	1
1.2 - Objetivo.....	1
1.3 - Estrutura do texto.....	2
2 - Bateria.....	3
2.1 - Características das Baterias.....	4
2.2 - Bateria de chumbo ácido.....	5
2.2.1 - Reação química.....	7
2.2.3 - Influência da temperatura na capacidade da bateria	8
2.2.4 - Propriedades Elétricas e Estado de Carga (SOC).....	9
2.2.5 - Técnicas de Carga.....	11
2.2.5.1 - Método a um nível de corrente e um nível de tensão.	11
2.2.5.2 - Método duplo nível de tensão.....	12
2.2.5.3 - Método duplo nível de corrente.....	13
2.2.6 - <i>Ripple</i> de Carga	14
3 - Conversores Estáticos de Potência.	15
3.1 - Retificadores.....	15
3.1.1 - Retificador monofásico de meia onda	15
3.1.2 - Retificador monofásico de onda completa	16
3.2 - Conversores CC-CC.....	19
3.2.1 - Conversor <i>Buck</i>	20
3.2.2 - Conversor <i>Boost</i>	21
3.2.3 - Conversor <i>Buck-Boost</i>	22
3.3 - Circuito do conversor CA-CC para a carga da bateria	24
3.3.1 - Acionamento PWM	25
3.3.2 - Determinação do filtro indutivo	26
3.3.3 - Determinação dos semicondutores	28
4 - Simulações do Conversor	31
4.1 - Levantamento de Grandezas do Sistema.....	31
4.1.2 - Determinação do Filtro Indutivo	31
4.2 - Formas de onda do conversor.....	34
5 - Simulações do controle do conversor.....	37
5.1 - Levantamento dos parâmetros do controlador.....	37
5.2 - Resposta do sistema controlado.....	42
5.2.1 - Resposta do sistema controlado por tensão	42
5.2.2 - Resposta do sistema controlado por corrente.	43
6 - Resultados Experimentais.....	47
6.1 - Controlador.....	47
6.2 - Circuito do conversor.....	48
6.2.1 – Análise do <i>ripple</i> de corrente	50
6.2.2 - Análise das formas de onda do sistema	51

7 - Conclusão	59
7.1 - Proposta de continuidade	59
Referências	61

Índice de figuras

Figura 1 - Número de veículos elétricos e híbridos nos EUA [1].....	1
Figura 2 - Elementos de uma Bateria [3].....	3
Figura 3 - Ciclos de Carga em função da percentagem de descarga [4].....	6
Figura 4 - Vida útil em função da temperatura [8]	7
Figura 5 - Capacidade máxima por temperatura.....	9
Figura 6 - SOC por tensão em circuito aberto por célula [13].....	10
Figura 7 - Tensão em função do tempo [13].....	11
Figura 8 - Características dos métodos de carga [2]	12
Figura 9 - Tensão e corrente durante a carga a um nível de corrente e um nível de tensão [3]...	12
Figura 10 - Tensão e corrente durante a carga com duplo nível de tensão [3]	13
Figura 11- Tensão e corrente durante a carga com duplo nível de corrente [3]	13
Figura 12 - Circuito do retificador de meia onda.....	15
Figura 13 - Formas de onda do retificador de meia onda	16
Figura 14 - Circuito do retificador de onda completa com derivação central	17
Figura 15 - Circuito do retificador de onda completa em ponte	17
Figura 16 - sentido da corrente retificador de onda completa com derivação central	18
Figura 17 - Sentido da corrente no circuito do retificador de onda completa em ponte.....	18
Figura 18 - Formas de ondas dos circuitos retificadores de onda completa	19
Figura 19 - Circuito do conversor abaixador	20
Figura 20 - Formas de ondas para o conversor abaixador [16].....	21
Figura 21 - Circuito do conversor boost	22
Figura 22 - Formas de onda para o conversor elevador [16]	23
Figura 23 - Circuito do conversor buck-boost	23
Figura 24 - Formas de onda do conversor buck-boost [16].....	24
Figura 25 - Circuito do conversor CA-CC para a carga da bateria.....	25
Figura 26 - Formas de Onda do retificador chaveado com modulação PWM [18].....	26
Figura 27 - Gráfico para determinar o ângulo da impedância do conversor [17].....	28
Figura 28 - Circuito simulado	32
Figura 29 - Corrente simulada para diferentes valores de indutância (a) 21,7mH (b) 25mH (c)90mH	33
Figura 30 - Corrente simulada para diferentes valores de indutância (a) 1,8mH (b) 2mH.....	34
Figura 31 - Corrente simulada com frequência de chaveamento em 5kHz	34
Figura 32 - Tensão sobre o indutor	35
Figura 33 - Tensão sobre o transistor.....	35
Figura 34 - Tensão sobre o transistor em um menor espaço de tempo.....	36
Figura 35 - Tensão reversa sobre o diodo de retificação	36
Figura 36 - Toolbox de identificação de sistemas	38
Figura 37 - Sinais utilizados para se determinar a resposta em tensão do sistema	39
Figura 38 - Sinais utilizados para se determinar a resposta em corrente do sistema	39
Figura 39 - Parâmetros da bateria de simulação	40
Figura 40 - Parâmetros de simulação.....	40
Figura 41 - Diagrama do sistema controlado por corrente	43
Figura 42 - Diagrama de simulação do circuito controlado por tensão	44
Figura 43 - Tensão de Carga da bateria de 100A-h	44

Figura 44 - Tensão de carga da bateria de 7A-h	45
Figura 45 - Corrente de carga da bateria de 100A-h.....	45
Figura 46 - Corrente de carga da bateria de 7A-h.....	46
Figura 47- Controlador Arduino Mega	48
Figura 48 - Circuito da placa do conversor.....	49
Figura 49 - Sistema montado para teste	50
Figura 50 - Corrente de carga da bateria com frequência de chaveamento de 1,2kHz.....	51
Figura 51 - Corrente de carga da bateria com frequência de chaveamento de 5kHz.....	52
Figura 52 - Ripple da corrente de carga da bateria com frequência de chaveamento de 5kHz ...	52
Figura 53 - Tensão sobre o transistor.....	53
Figura 54 - Tensão sobre o transistor em um menor intervalo de tempo.....	54
Figura 55 - Tensão sobre o filtro indutivo	54
Figura 56 - Tensão sobre um dos diodos de retificação.....	55
Figura 57 - Tensão sobre a bateria	55
Figura 58 - Resultado do processo de carga	57

Índice de Siglas

A – Ampere

A-h – Ampere Hora

BEV – Carros elétricos (*Battery Electric Vehicle*)

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

EUA - Estados Unidos da América

HEV – Carros Híbridos (*Hybrid Electric Vehicle*)

LACEP – Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência

PHEV – Carros híbridos com bateria interna (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*)

SLI – Partida, iluminação e ignição (*Start, Lightining and Ignition*)

SOC – Estado de carga (*State of Charge*)

V –Volts

W – Watt

Índice de Símbolos

α_m - m-ésimo instante de tempo que o transistor para de conduzir

c - Capacidade da bateria

D - ciclo de trabalho

δ - período que o transistor conduz

e^- - Elétron

G - Ganho estático

H_2O - Água

H_2SO_4 - Ácido Sulfúrico

I_{min} - Corrente mínima de carga

Pb - Chumbo

PbO₂ - Óxido de Chumbo

PbSO₄ - Sulfato de Chumbo

r_c - Ripple de corrente

τ - período de chaveamento

V_{bat} - Tensão da bateria em circuito aberto

V_{blk} - Tensão de equalização

V_{cc} - Tensão média na saída do conversor.

V_{ds} - Tensão dreno-fonte

V_{flt} - Tensão de flutuação

V_o - Tensão de saída

$V_{out\ k}$ - Tensão instantânea do conversor no momento k

V_s - Tensão de alimentação

1 – Introdução

1.1 - Motivação

Nos últimos anos, tem ocorrido um grande crescimento no desenvolvimento de veículos com propulsão totalmente elétrica. Esta tecnologia vem recebendo bastante destaque internacionalmente e apoio de investimentos tecnológicos e acadêmicos, por ser a alternativa que alia a maior eficiência na redução de problemas de poluição, tanto de emissão de gases tóxicos, quanto de poluição sonora, bem como a redução da dependência de petróleo.

A figura 1 mostra o grande crescimento no número de veículos elétricos e de carros híbridos, nos Estados Unidos da América, maior mercado desse tipo de veículos do mundo. A figura mostra um crescimento principalmente nos carros com bateria interna para a propulsão do veículo, que são os casos dos carros elétricos propriamente ditos (BEV – *Battery Electrical Vehicles*) e dos carros híbridos com bateria (PHEV – *Plug-in Hybrid Electrical Vehicles*)

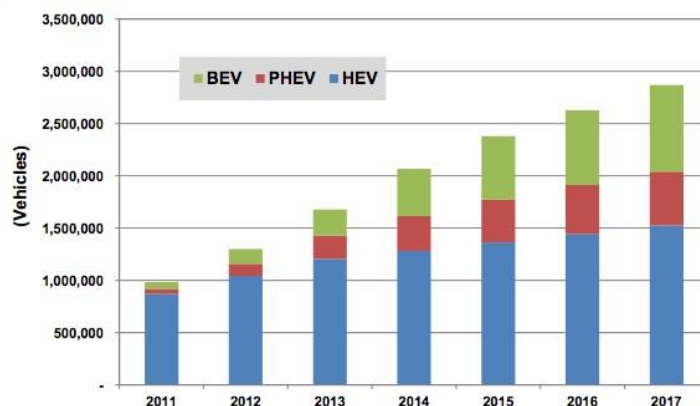


Figura 1 - Número de veículos elétricos e híbridos nos EUA [1]

Com esse crescimento torna-se necessário a criação de formas e meios para realizar o carregamento das baterias dos carros elétricos, sendo requisitado que este carregamento seja eficiente, rápido, econômico e ocorrendo de forma a não danificar as baterias.

1.2 - Objetivo

Esse projeto visa estudar e desenvolver um conversor CA/CC para ser utilizado como carregador de baterias do tipo chumbo-ácido. Será feito o estudo para realizar a carga de uma bateria que é utilizada para a alimentação da propulsão de um carro elétrico do Laboratório de

Controle e Eletrônica de Potência (LACEP) do departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, que é alimentado por um banco de baterias cada uma com capacidade de 100A-h. Este estudo abrange ainda detalhes das baterias de chumbo-ácido, determinação suas características físicas, formas de carregamento desempenho e métodos de otimizar o processo de carga

Será desenvolvido um protótipo de conversor para realizar a carga de uma bateria de 7A-h que é utilizada para a alimentação da instrumentação eletrônica do veículo, com capacidade de até no máximo 40W, não isolado da rede elétrica, fazendo a carga de maneira eficiente e maximizando a vida útil da bateria bem como tentar maximizar a carga armazenada na bateria.

Também será realizado a simulação do controle do sistema, porém este não será implementado na prática.

1.3 - Estrutura do texto

No capítulo 2, é feito um estudo sobre a bateria de chumbo ácido. Neste é mostrado as características físicas da bateria bem como os métodos de carga da bateria e as formas de se maximizar sua vida útil.

No capítulo 3 é feita uma introdução sobre conversores de potência, bem como discutido o circuito a ser utilizado nesse trabalho para fazer a carga da bateria, descrevendo sua forma de funcionamento e suas características.

No capítulo 4 são mostrados os resultados da simulação do conversor.

No capítulo 5 é realizado a simulação do controle do sistema.

No capítulo 6 são mostrados os resultados práticos obtidos no processo de carga na bateria de 7A-h

O capítulo 7 é a conclusão do projeto.

2 - Bateria

De forma genérica, pode-se definir uma bateria como um dispositivo que armazena energia nas ligações químicas de seus componentes, dessa forma, elementos de circuito elétrico como capacitores ou indutores, não podem ser encaixados na categoria pois não realizam esse tipo de reação, mas sim, armazenam energia no campo elétrico ou magnético. Além disso deve-se destacar que baterias não produzem energia, pois a energia fornecida por ela, foi previamente armazenada nas ligações moleculares de seus elementos químicos. [2]

De forma geral as baterias operam utilizando o processo químico de oxidação e redução, sendo que a oxidação consiste na liberação de um elétron, enquanto a dinâmica da redução consiste na absorção de um elétron. A bateria é constituída por quatro elementos básicos: ânodo, cátodo, eletrólito e o separador, onde o ânodo é o responsável por fornecer os elétrons, o cátodo por receber e o eletrólito e o separador permitem a troca de íons, como mostra a figura 2.

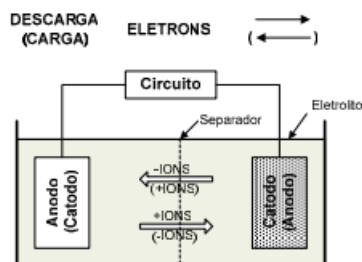


Figura 2 - Elementos de uma Bateria [3]

Durante o processo de descarregamento da bateria o ânodo oxida gerando um elétron e um íon positivo enquanto o cátodo é o oposto, ele reduz gerando um íon negativo e aceitando um elétron. O separador da bateria tem como função permitir a livre circulação dos íons forçando com que os elétrons passem necessariamente pelo circuito externo para completar o ciclo. Dessa forma o cátodo é o terminal positivo da bateria enquanto o ânodo é o terminal negativo. Já durante o processo de carregamento da bateria as reações químicas se invertem, pois o ânodo recebe um elétron, reduz e gera um íon negativo, enquanto o cátodo oxida, liberando um elétron e um íon positivo. Porém deve-se observar que isso só ocorre de forma forçada, ou seja, é necessária uma força eletromotriz (FEM) externa para que esse processo ocorra.

2.1 - Características das Baterias

A seguir são apresentados alguns parâmetros e noções básicas sobre o princípio de funcionamento, construção e dimensionamento de baterias, que são de fundamental importância para uma análise pormenorizada das baterias, bem como para poder descrever melhor seu funcionamento.

- Auto-Descarga: é um fenômeno que ocorre na bateria que mesmo sem nenhum circuito conectado a mesma, ainda assim ela perde energia armazenada. Isso ocorre devido a correntes internas na bateria, que geram perdas de carga. [4]
- Capacidade (c): É a quantidade de energia que a bateria consegue armazenar, geralmente é especificada em ampere-hora, ou seja, a quantidade de amperes que se consegue extrair de uma bateria em um certo período de tempo para se esgotar a energia armazenada pela mesma. Deve-se notar que na maioria das baterias, a quantidade de energia que a mesma consegue entregar a carga varia com a corrente fornecida, de tal modo que quanto maior a corrente que é extraída da bateria, menor é a quantidade total de energia que a bateria consegue prover, e que a capacidade em ampere-hora nominal é para um tempo de descarregamento que se obtenha a maior eficiência. [4]
- Célula: também denominada de elemento, é o menor dispositivo eletroquímico capaz de suprir energia a partir de reações químicas internas, uma bateria é constituída de uma célula ou uma associação de várias células.[4]
- Carga: Operação em que é fornecido energia elétrica a uma bateria, para que a mesma possa ser armazenada dentro do acumulador [4]
- Vida Útil: também denominada de ciclos, é a quantidade de vezes que uma bateria consegue ser carregada e descarregada até o momento que sua capacidade máxima atinge o valor de 80% da sua capacidade nominal. [4]

Devido as grandes diferenças entre os diversos tipos de baterias, este trabalho tem interesse apenas no tipo Chumbo Ácido, que é o tipo bateria utilizado para a propulsão do carro elétrico do LACEP.

2.2 - Bateria de chumbo ácido

A bateria de chumbo ácido foi inventada pelo físico francês Gaston Planté no ano de 1859 e foi a primeira bateria vendida em larga escala com a capacidade de ser recarregada, ou seja, é possível injetar energia nesta sem causar sua autodestruição. Esta tecnologia é, portanto, bastante antiga e possui diversas desvantagens em relação a outras baterias, tais como: baixa densidade de energia, baixa densidade de energia volumétrica, elevado peso, rápida autodescarga e baixa vida útil. Porém o custo por watt apresentado nesta tecnologia é bem menor que das outras baterias mais modernas, tornando-a atrativa e fazendo com que se tenha uma vasta gama de aplicações para ela, além de sua popularidade devido ao fato de que é a bateria utilizada na grande maioria dos veículos [5].

Como visto a bateria de chumbo ácido possui uma pequena vida útil e por isso é fundamental que se maximize a vida útil dessas baterias tanto no processo de carga, quanto durante seu descarregamento. Os principais problemas que afetam o número de ciclos da bateria são:

- Corrosão: Ocorre quando o cátodo se transforma em óxido de chumbo, PbO_x . Essa corrosão aumenta a resistência interna da bateria, bem como, perda de material útil do eletrodo [6];
- Degradação: Isso é devido a grande fadiga do cátodo, já que o mesmo está em constante reação química, devido aos processos de carga e descarga. A degradação pode levar a uma ruptura do eletrodo [6];
- Sulfatação: Recristalização dos finos cristais de chumbo em grânulos, esse fenômeno ocorre durante longos períodos em que a bateria fica com pouca energia armazenada. A sulfatação diminui os volumes de chumbo e de eletrólito, reduzindo assim as capacidades de carga e o fornecimento de energia [6].

Os fatores acima citados fazem com que a bateria de chumbo ácido tenha uma vida útil limitada mesmo que sejam respeitados todos os critérios de utilização e manutenção do fabricante. Por isso deve-se evitar ao máximo alguns fatores como:

- Descarga completa da bateria. Ao realizar a descarga completa a bateria sofre o processo de sulfatação, reduzindo assim a capacidade da mesma e também de sua vida útil.
- Operação acima da temperatura nominal. Ao operar a bateria em altas temperaturas, ou exigir grandes correntes da mesma, que leva a um aumento da temperatura interna devido à correntes que geram perdas ôhmicas, os fatores de degradação e corrosão aumentam.

É considerado um ciclo de carga completo, quando após uma, ou mais, cargas a soma da porcentagem de carga se torna 100%, ou seja, se uma bateria está completamente carregada e é descarregada com uma profundidade de 50% e então carregada até sua capacidade completa significa que a bateria sofreu meio ciclo de carga. Para completar o ciclo de carga a bateria deve novamente ser descarregada até 50% da sua capacidade e então carregada novamente.

Observa-se pela figura 3 que se tem uma relação exponencial entre a profundidade de descarga com a vida útil da bateria, e que, por exemplo, um aumento da descarga da bateria de 25% para 50% ocasionará em uma redução pela metade do número de ciclos.

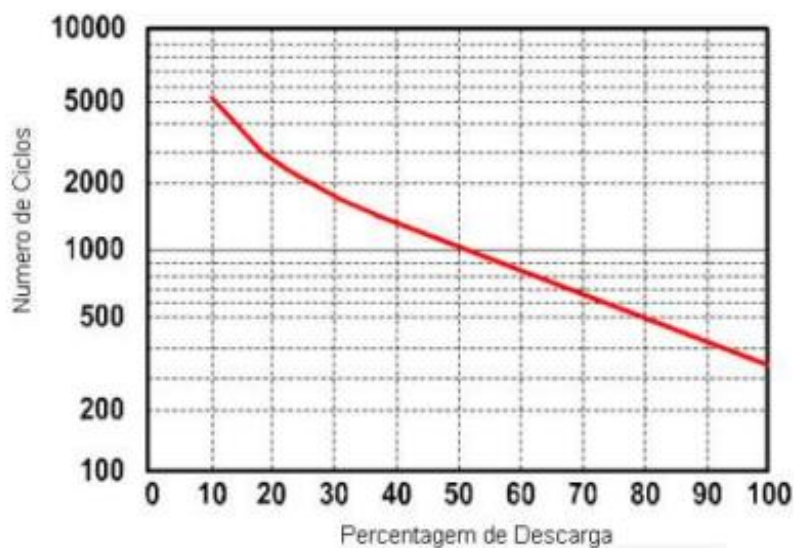


Figura 3 - Ciclos de Carga em função da percentagem de descarga [4]

A figura 4 mostra a relação entre a vida útil da bateria a temperatura. Observa-se quanto maior a temperatura da bateria menor é sua vida útil, segundo [7], para cada aumento de 8°C a vida útil da bateria pode ter uma redução de até 50%.

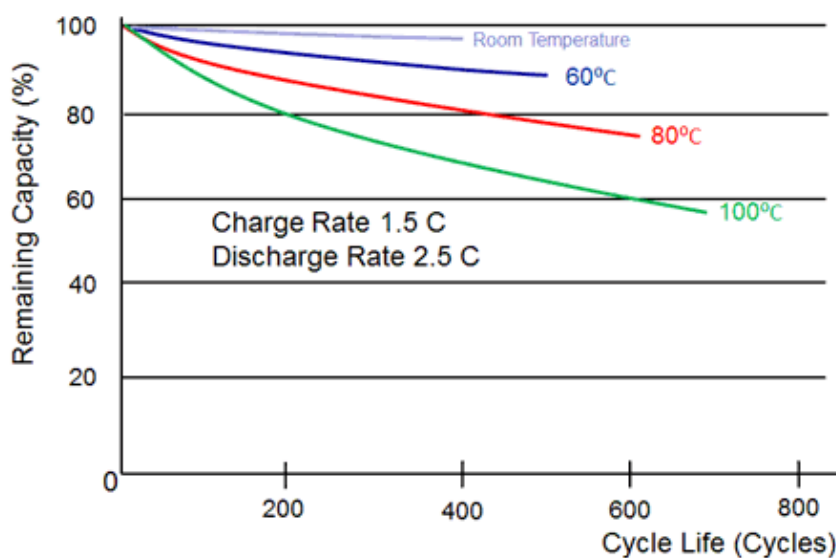
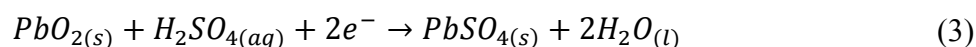
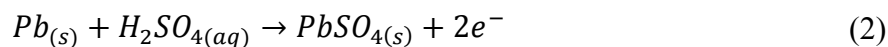
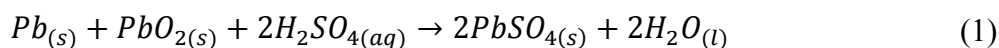


Figura 4 - Vida útil em função da temperatura [8]

2.2.1 - Reação química

O funcionamento da bateria de chumbo ácido se baseia nas reações químicas mostradas pelas equações 1,2 e 3. [9].



Sendo que a reação representada pela equação 3 acontece no ânodo e a reação representada pela equação 4 ocorre no cátodo.

Pela equação 2 percebe-se que há formação de água no sistema, portanto caso o processo de carga não seja feito de maneira correta, poderá ocorrer uma eletrólise da molécula de $H_2O_{(l)}$. O processo de eletrólise gera gases internamente na bateria e, se o processo acontecer de maneira exagerada, poderá danificar a bateria de forma severa.

2.2.2 – Tipos de bateria chumbo-ácido

Pode-se categorizar as baterias do tipo chumbo-ácido de diferentes maneiras, uma delas é a categorização entre as baterias seladas e as não seladas. As baterias não seladas são baterias que requerem manutenção periódica. Tipicamente a cada ano deve-se verificar a água da bateria. Isso se dá pelo fato que no processo de carga dessa bateria pode haver o consumo de água da mesma.

Já as baterias seladas não requerem manutenção, pois os fabricantes garantem que a quantidade de água interna à bateria é o suficiente por toda sua vida útil. Porém, caso ocorra algum problema no processo de carga da bateria que faça o consumo completo da água, a bateria ficará inutilizada, já que não há forma de repor a água.

Outra maneira de categorizar as baterias de chumbo-ácido é com relação a sua finalidade, já que existem alguns tipos de baterias específicas para algumas situações.

As baterias mais comuns no mercado são as do tipo SLI (*Start, Lightining and Ignition*), que são as baterias encontradas nos carros a combustão interna, essas baterias são feitas para serem o mais barato possível sendo que podem chegar a ter uma vida útil de apenas 50 ciclos. [10]

Outro tipo de bateria são as baterias de ciclo profundo, que são utilizadas de forma que possam sofrer grandes descargas sem ser danificada. São tipicamente usadas na operação de veículos, como por exemplo carros de golfe.

O último tipo de bateria são as estacionárias, que são baterias mais compactas e utilizadas em aplicações que as baterias fiquem de *standby* ou em caso de emergência. São o caso por exemplo de aplicações em *no-breaks*.

2.2.3 - Influência da temperatura na capacidade da bateria

Como já mostrado anteriormente a temperatura da bateria influencia na quantidade de ciclos da mesma devido ao fato da degradação e de corrosão dentro do acumulador. Porém deve-se ressaltar que a densidade do eletrólito também influi na tensão fornecida.

Operar a bateria em temperatura baixas, para diminuir os efeitos da degradação e corrosão, implica em uma tensão fornecida, pela bateria, menor que a tensão nominal, reduzindo assim a capacidade do armazenador. Dessa forma ocorre uma perda de rendimento do acumulador. [11]

A figura 5 mostra a relação entre a temperatura e a capacidade da bateria.

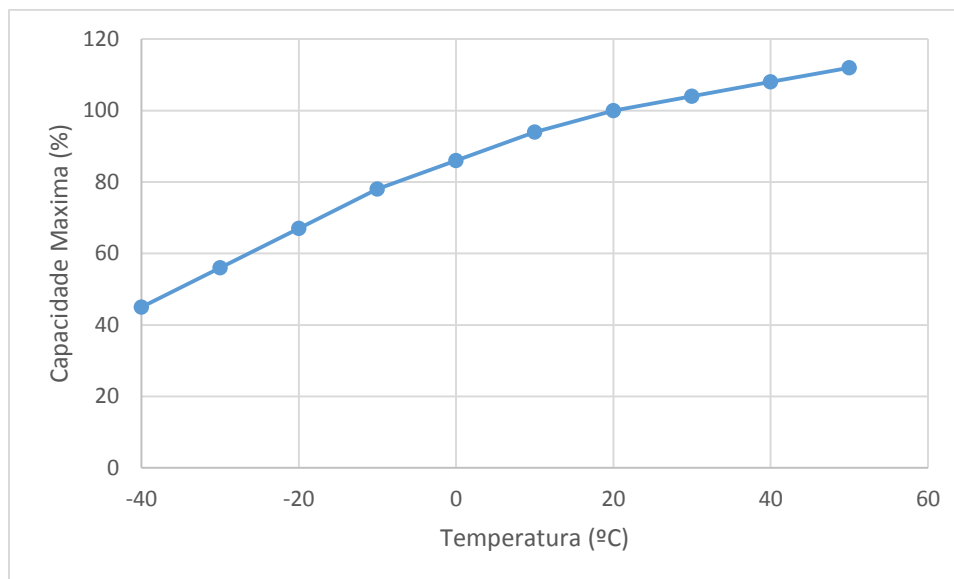


Figura 5- Capacidade máxima por temperatura

Observa-se que a partir dos 20°C, que é a temperatura de operação nominal da bateria, a capacidade máxima aumenta 4% para o aumento de 10°C e que para temperaturas mais baixas a queda na capacidade máxima é mais acentuada, sendo que por volta da temperatura de -35°C a capacidade se torna a metade da capacidade nominal.

2.2.4 - Propriedades Elétricas e Estado de Carga (SOC)

Tipicamente uma bateria de chumbo ácido de 12V é composta pela associação em série de 6 células sendo que, cada uma, quando em estado de carga completa, possuem tensão nominal de 2,14V. Dessa forma, uma bateria possui tensão nominal em seus terminais de 12,84V. Deve-se salientar também que, devido a auto descarga, a tensão aplicada aos terminais para manter a carga na bateria é de 2,2V por célula, ou de 13,2V. [12]

Outro parâmetro para se avaliar em uma bateria é o seu estado de carga (*State of Charge – SOC*), sendo este um dos mais importantes itens a se avaliar, já que o SOC informa o quanto de carga ainda existe na bateria. Dessa forma, pode-se evitar efeitos indesejáveis como o sobrecarregamento, ou descargas excessivas. Por meio desse parâmetro é possível controlar de forma mais precisa todo o processo de carga e descarga da bateria, prolongando assim a sua vida útil.

Existem alguns métodos para fazer a determinação do SOC, tais como o método interativo ou pela acidez do eletrólito, porém devido maiores complexidades de tais métodos, que não estão presentes no escopo deste trabalho, o método a ser utilizado é a conversão tensão-carga. Nesse método a estimativa do

valor do SOC é realizado por meio do valor de tensão da bateria quando esta se encontra em circuito aberto. [13]

A figura 6 mostra o SOC estimado para a bateria em função da tensão de célula da bateria em circuito aberto.

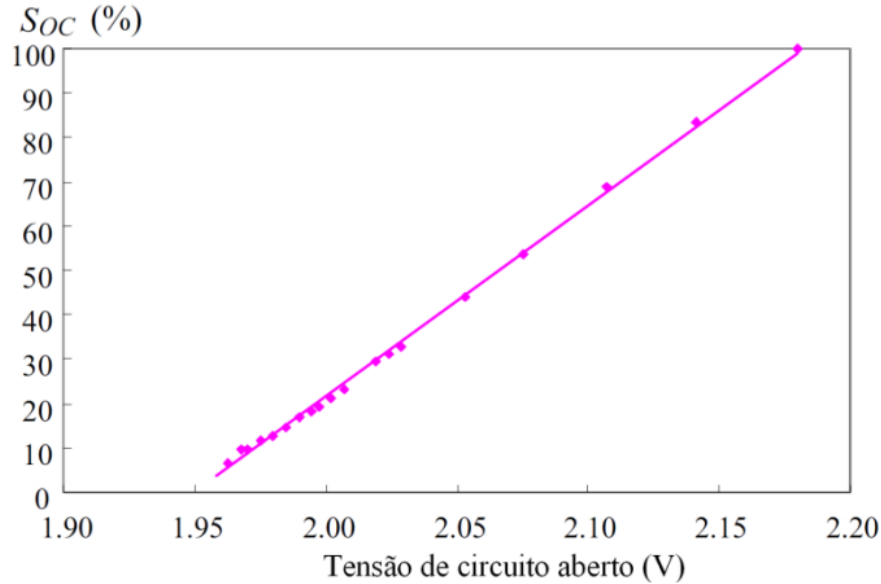


Figura 6 - SOC por tensão em circuito aberto por célula [13]

Por meio da figura 6 é possível determinar uma equação para estimar o valor do SOC para uma determinada tensão de circuito da bateria, dessa forma se obteve a equação 5.

$$SOC = -885.3 + 454 * V_{bat} , \quad 1,95 < V_{bat} < 2,17 \quad (5)$$

Onde o valor de V_{bat} é a tensão das células da bateria. Além disso o valor de SOC já é informado em forma porcentual.

Além do valor de tensão, outro fator variante na determinação do SOC da bateria é o tempo de descanso ao qual a bateria esteve submetida antes da medição do valor de tensão, pois após ser desconectada do circuito a tensão da bateria tende a se estabilizar no valor correspondente ao seu SOC, entretanto essa estabilização depende da reação química interna da bateria, que não ocorre de maneira instantânea. A figura 7 mostra a dependência do valor de tensão em função do tempo. É considerado que após um período de 2h a redução do valor de tensão é mínima e pode ser atribuído ao auto descarregamento. Dessa forma, durante o processo de carga ou descarga da bateria, não é possível utilizar esse método, porém é possível utiliza-lo depois da ocorrência desses processos [13]

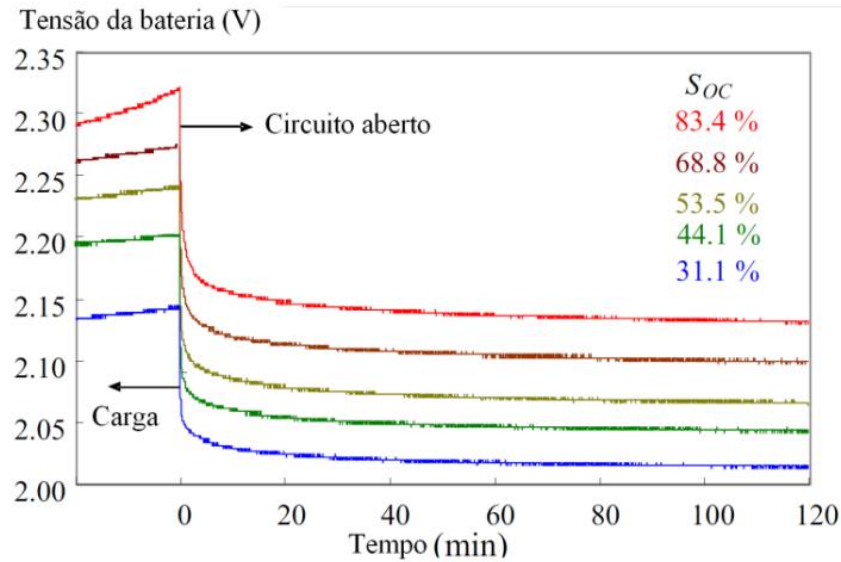


Figura 7 - Tensão em função do tempo [13]

2.2.5 - Técnicas de Carga

Para se fazer a carga de uma bateria de chumbo ácido são utilizados três métodos diferentes: corrente constante, tensão constante e potência constante. A figura 8 mostra a características de tensão e corrente desses três métodos.

Tipicamente para se realizar a carga da bateria são mesclados os três métodos listados anteriormente com o propósito de se aumentar a vida útil da bateria. Dessa forma, o ciclo de carga é dividido em etapas onde em cada uma delas é aplicado um método diferente.

Além disso, quando a bateria possui um profundo nível de descarga é recomendado fazer uma pré-carga para não danificar a bateria. Essa pré-carga é feita aplicando uma corrente de condicionamento constante na bateria até que a mesma atinja um valor de tensão mínimo que condiciona a bateria a receber uma carga de maior intensidade.

2.2.5.1 - Método a um nível de corrente e um nível de tensão.

Este método é constituído por duas etapas, o primeiro com uma corrente constante e o segundo com a tensão constante. A primeira etapa dura até o momento em que a bateria atinja o valor da tensão de flutuação, onde essa tensão de flutuação é a tensão em que a corrente fornecida à bateria é apenas para suprir as perdas internas, após isso é mantido uma tensão constante para garantir que a bateria mantenha sua carga. Esse método é utilizado por ser bastante simples, porém não garante que a bateria esteja 100%

carregada. [2]

A figura 9 mostra o comportamento da corrente e da tensão durante a aplicação desse método.

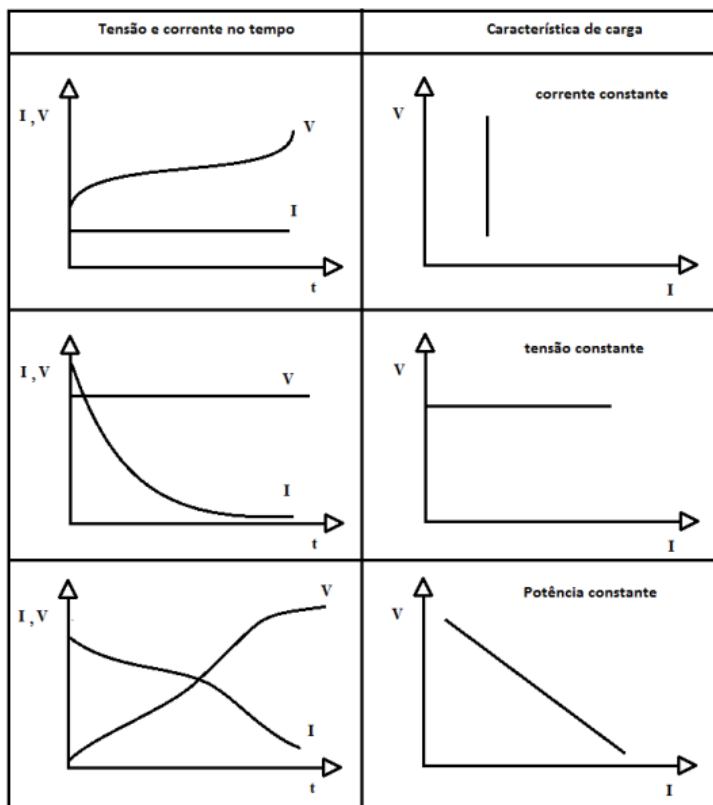


Figura 8 - Características dos métodos de carga [2]

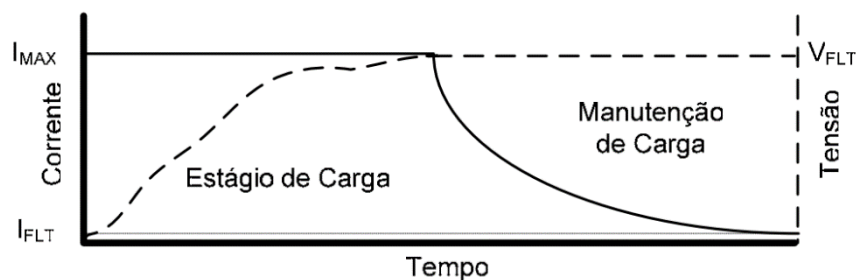


Figura 9 - Tensão e corrente durante a carga a um nível de corrente e um nível de tensão [3]

2.2.5.2 - Método duplo nível de tensão

Esse método consiste em 3 etapas. O primeiro consiste em uma aplicação de uma corrente constante até o momento em que a bateria atinge o valor da tensão de equalização (V_{BLK}), que consiste em

uma tensão um pouco maior que a tensão de flutuação e serve para equalizar as diferenças de tensões entre as células internas da bateria. Após isso, é mantido esse valor de tensão constante. Quando a corrente atinge um valor mínimo (I_{MIN}) é o momento em que a bateria atingiu o estado de carga completa. Após isso é necessário apenas manter uma tensão constante de flutuação (V_{FLT}), para evitar que a bateria se descarregue. [14]

A figura 9 mostra o comportamento da corrente e da tensão durante a aplicação desse método.

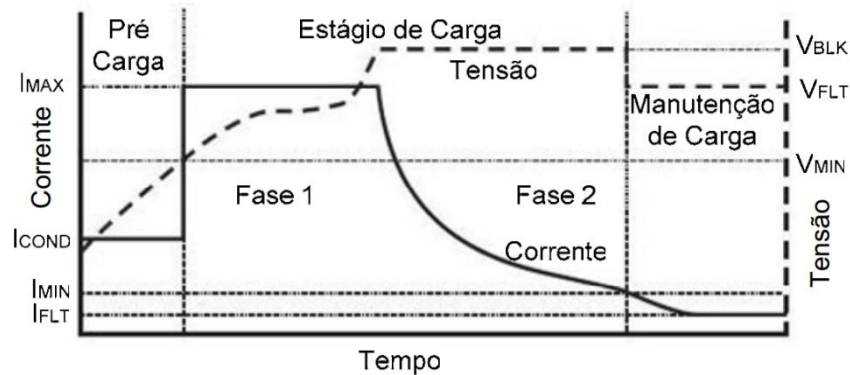


Figura 10 - Tensão e corrente durante a carga com duplo nível de tensão [3]

2.2.5.3 - Método duplo nível de corrente

Esse método é constituído por duas etapas. O primeiro consiste em uma aplicação de uma corrente constante até o momento em que a bateria atinge o valor da tensão de equalização. Após isso, é aplicado uma corrente pulsante de frequência e amplitude ajustadas de forma a fazer a manutenção da carga na bateria. [2] A figura 11 mostra o comportamento da corrente e da tensão durante a aplicação desse método.

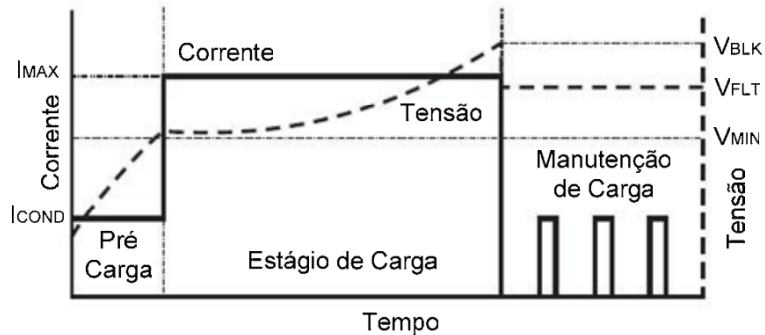


Figura 11- Tensão e corrente durante a carga com duplo nível de corrente [3]

2.2.6 - *Ripple* de Carga

Durante o processo de carregamento da bateria é recomendado que a tensão aplicada seja de no máximo 0.5% do valor CC aplicado nos terminais da bateria. Isso assegurará que a tensão aplicada não ultrapassará o valor da tensão máxima suportada, como também evitará o aquecimento da bateria devido as perdas ôhmicas envolvidas no processo, uma vez que a bateria apresenta uma resistência interna [15].

Em relação ao *ripple* de corrente, é tipicamente recomendado pelos fabricantes de bateria que ele seja limitado em uma razão de 20 da capacidade da bateria, como mostra a equação 6, onde r_c é o *ripple* de corrente em amperes e c é a capacidade da bateria em ampere-hora .

$$r_c = \frac{c}{20} \quad (6)$$

Porém mesmo que se aplique uma corrente com um *ripple* 3 vezes maior que a recomendada, os efeitos de aquecimento serão desprezíveis, tipicamente menor que 1,8 °C e a redução da vida útil da bateria será de menos de 3%. [15]

3 - Conversores Estáticos de Potência.

A necessidade de controlar as grandezas elétricas de corrente e tensão para o acionamento de máquinas elétricas, carga de baterias ou algum outro sistema de potência, requer a utilização de circuitos que façam a adequação dos níveis de tensão disponível na rede elétrica ou de um outro tipo de fonte para os patamares adequados ao sistema.

Os conversores são divididos primariamente em quatro categorias: os conversores CC-CA e CA-CA ou inversores, que não iremos abordar nesse trabalho, os conversores CA-CC ou retificadores e os conversores CC-CC.

Neste capítulo iremos abordar as topologias mais básicas dos retificadores monofásicos e dos conversores CC-CC e por fim iremos detalhar melhor o circuito do conversor utilizado para realizar a carga da bateria bem como alguns aspectos do seu projeto.

3.1 Retificadores

3.1.1 Retificador monofásico de meia onda

A topologia mais simples dos conversores CA-CC é o retificador de meia onda mostrado pela figura 12. Este conversor utiliza apenas um diodo entre a fase e a carga do sistema.

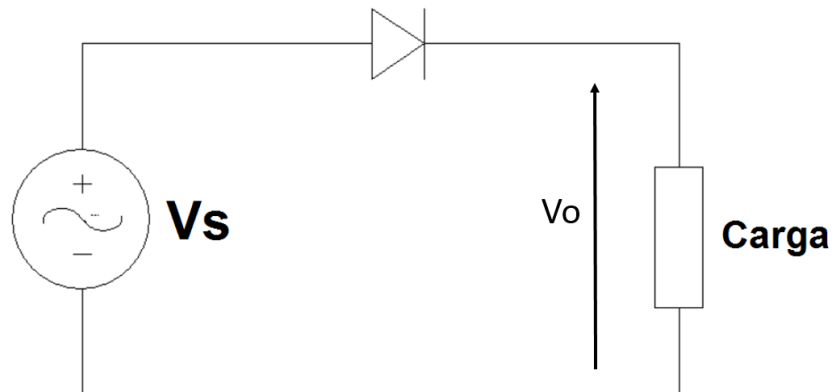


Figura 12 - Circuito do retificador de meia onda

O diodo é um componente eletrônico que permite a passagem da corrente em apenas um sentido. Dessa forma, o circuito desse conversor bloqueia a passagem de corrente quando se tenta inverter a polaridade da corrente na carga.

Para cargas resistivas, o retificador apresenta uma tensão de meia onda com apenas o semi-ciclo positivo atuando sobre a carga como mostra a figura 13.

Pela figura 13 observa-se que mesmo a tensão de saída V_o possuindo um nível contínuo diferente de 0V, este sinal ainda apresenta uma grande variação do sinal de tensão (*Ripple*). Para poder reduzir esse efeito, que pode ser prejudicial a alguns equipamentos, são utilizados filtros. Tipicamente esses filtros são capacitores que se carregam durante o semi-ciclo que o diodo conduz e se descarregam no momento de corte do semicondutor e dessa forma mantém a tensão de forma mais contínua e com um menor *ripple*. Porém como o tempo que o diodo conduz é relativamente pequeno comparado com o tempo que ele está em estado de corte, os capacitores são geralmente de alto valor o que é um problema desse circuito.

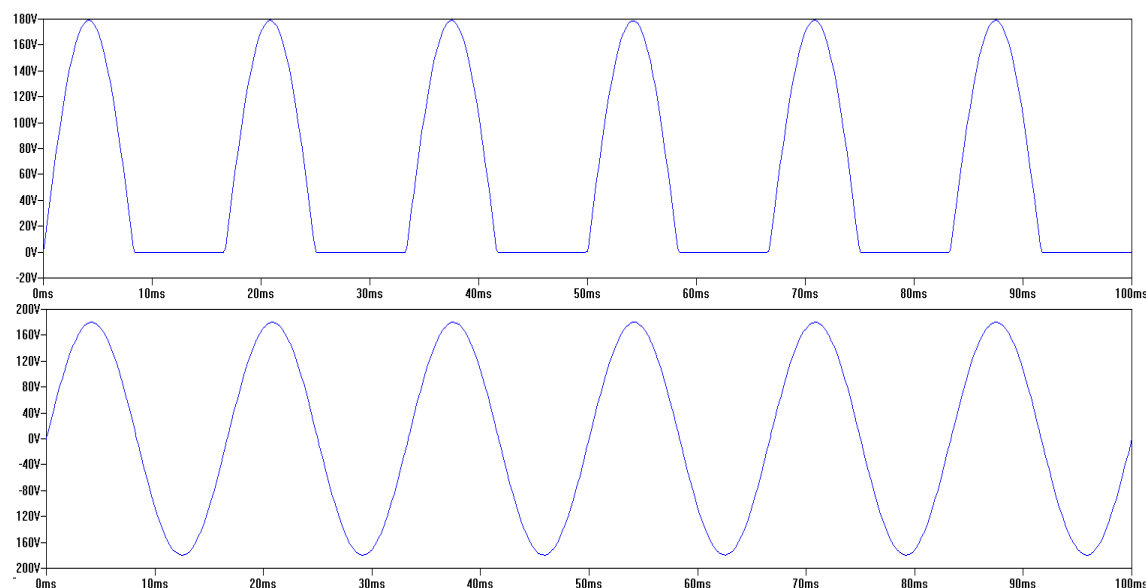


Figura 13 - Formas de onda do retificador de meia onda

Para reduzir o problema da filtragem do sinal muitas vezes é utilizado as topologias de conversores de onda completa que será visto a seguir.

3.1.2 Retificador monofásico de onda completa

O retificador monofásico de onda completa opera de forma bastante parecida ao conversor de meia onda, porém este permite a condução da corrente durante os dois semi-ciclos da senóide.

As duas topologias mais comuns para os retificadores de onda completa são a de ponte completa e a de transformador com derivação central. Apesar de apresentarem aspectos construtivos distintos, as duas topologias, que podem ser observadas respectivamente nas figuras 14 e 15, produzem a mesma forma de onda na carga.

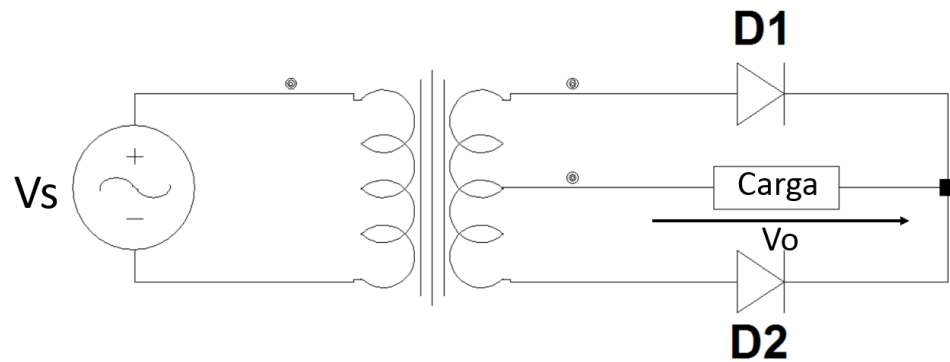


Figura 14 - Circuito do retificador de onda completa com derivação central

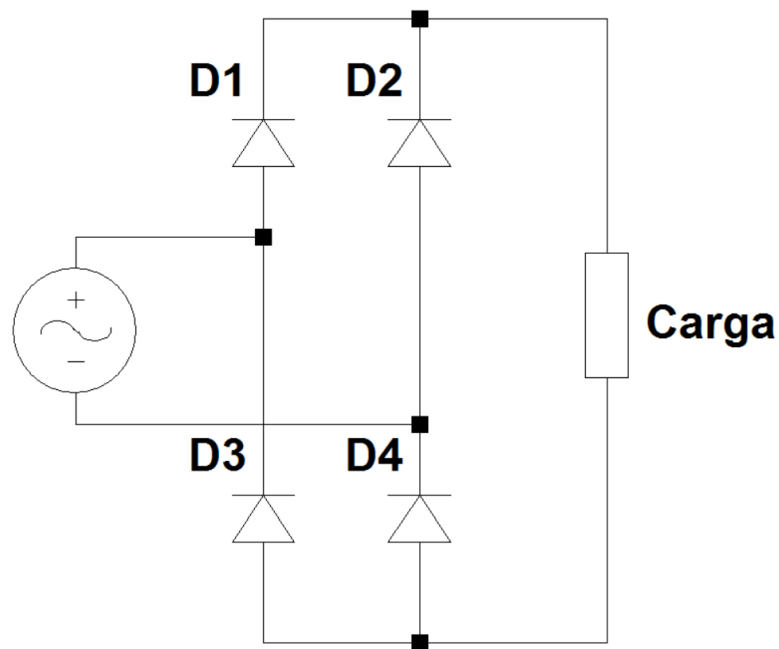


Figura 15- Circuito do retificador de onda completa em ponte

A topologia com o *center-tap* funciona da seguinte maneira: durante um semi-ciclo um diodo se comporta como um curto, enquanto o outro abre, e no semi-ciclo seguinte os diodos mudam sua forma de operação, assim sempre há passagem de corrente por um diodo e consequentemente pela carga.

A figura 16 mostra o diagrama de funcionamento do circuito onde I_p é a corrente que passa na carga durante o semi-ciclo positivo da senóide da rede e a corrente I_n é a corrente durante o semi-ciclo negativo, percebe-se assim que a corrente na carga sempre flui no mesmo sentido.

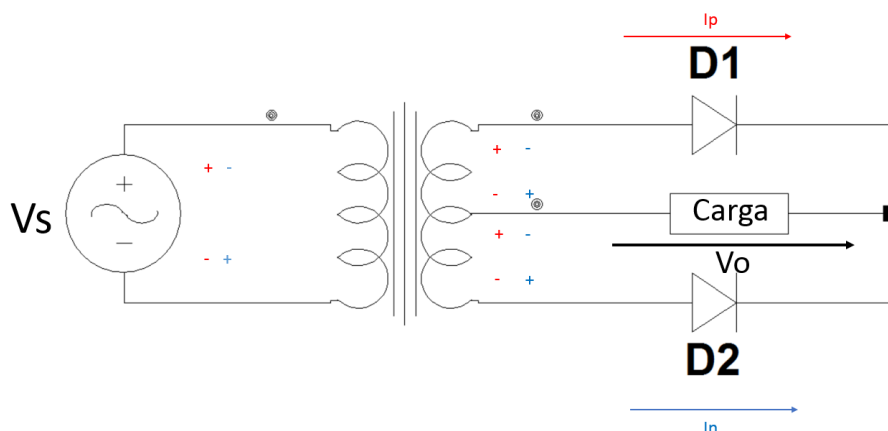


Figura 16 - sentido da corrente retificador de onda completa com derivação central

A topologia em ponte utiliza dois pares de diodos para realizar a conversão. O princípio de funcionamento do retificador de onda completa com uma ponte é mostrado pela figura 17 e pode ser descrita da seguinte maneira: durante o semi-ciclo positivo os diodos D1 e D4 conduzem enquanto os diodos D2 e D3 permanecem em corte, já durante o semi-ciclo negativo essa situação se inverte e os diodos D2 e D3 entram em condução enquanto os diodos D1 e D4 ficam em corte. Verifica-se assim que a corrente sempre flui em um sentido na carga gerando uma corrente contínua.

A figura 18 mostra as formas de onda na carga para os conversores CA-CC monofásico de onda completa e percebe-se que, diferentemente do circuito de meia onda, sempre há passagem de corrente pela carga, com exceção do momento de cruzamento de zero da senóide.

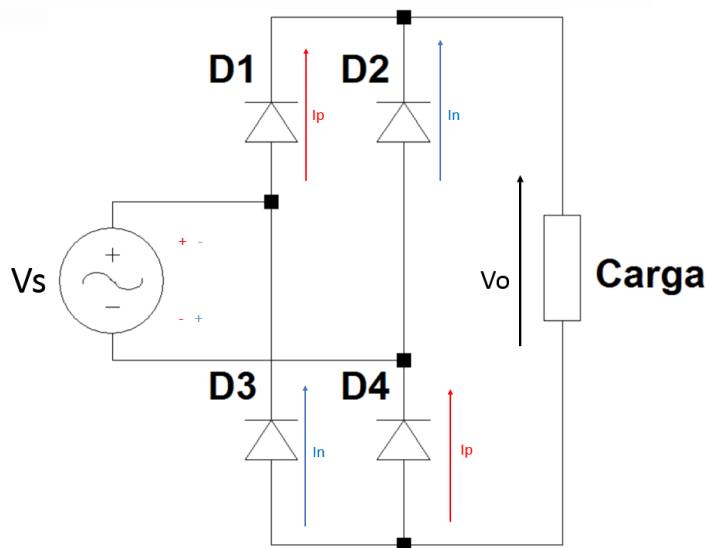


Figura 17 - Sentido da corrente no circuito do retificador de onda completa em ponte

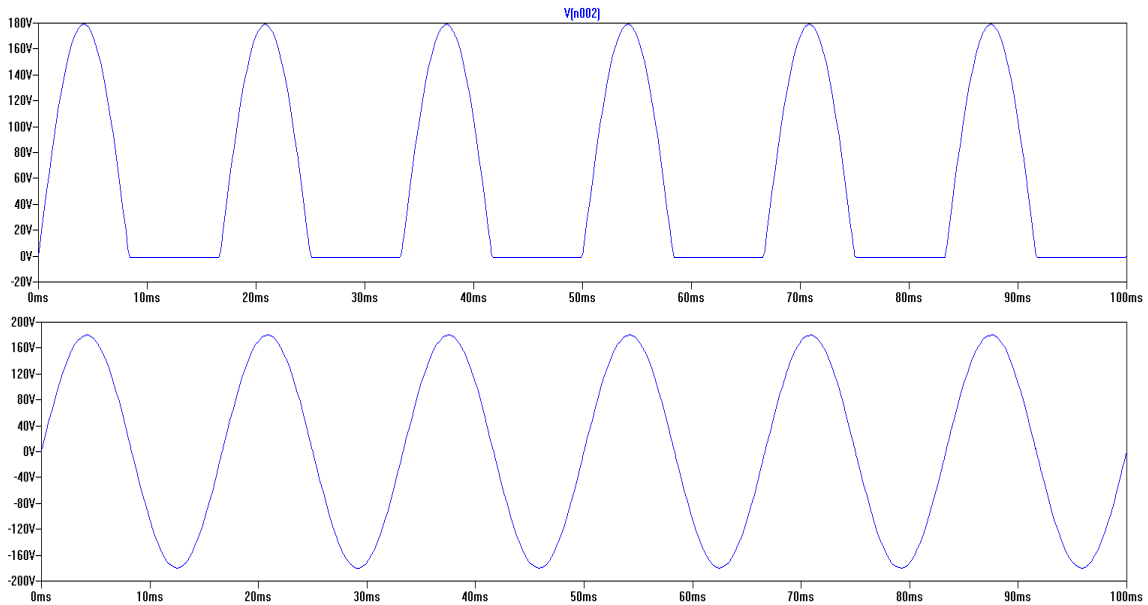


Figura 18 - Formas de ondas dos circuitos retificadores de onda completa

Percebe-se também que existe uma grande oscilação no sinal de saída e que para obter um sinal com menor *ripple* também é necessário a utilização de um filtro na saída do sistema. Porém neste retificador o fator de *ripple* é menor que no conversor de meia onda. Dessa forma o valor do filtro capacitivo para um retificador de onda completa é menor que o utilizado por um retificador de meia onda.

3.2 Conversores CC-CC

Os conversores CC-CC ou *Choppers* são circuitos que realizam a conversão de uma tensão CC fixa para uma outra tensão CC, podendo essa outra tensão ser maior, menor ou igual a tensão de entrada.

Existem diversas topologias diferentes para os conversores CC-CC sendo que essas topologias podem ser divididas em três categorias diferentes: os conversores abaixadores ou *Buck* que tem a finalidade de transformar a tensão de entrada em uma tensão de saída menor que a de entrada; os conversores elevadores ou *Boost*, realizam a conversão da tensão de entrada para uma tensão de magnitude superior na saída; conversores abaixadores-elevadores ou *Buck-Boost*, transformam a tensão de entrada em uma tensão maior ou menor da saída.

Neste capítulo serão abordadas as topologias mais simples de cada uma das categorias dos conversores CC-CC, sendo que só será abordado os modelos ideais dos conversores, ou seja, deve-se assumir que não há perdas internas no conversor e que a potência de entrada é igual a potência de saída.

3.2.1 Conversor *Buck*

O conversor *Buck* ou abaixador de tensão tem como objetivo entregar na saída do conversor uma tensão menor que a tensão de entrada. O conversor atua recortando a tensão de entrada e dessa forma obtém na saída um valor de tensão equivalente ao valor médio da alimentação recortada. A figura 19 mostra a topologia básica do conversor *Buck*.

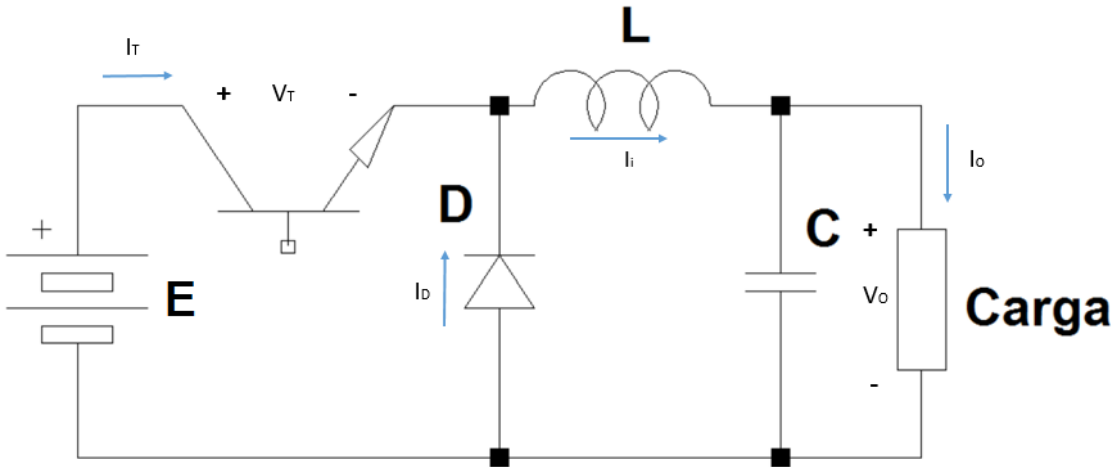


Figura 19 - Circuito do conversor abaixador

Pode-se dividir o funcionamento do conversor em duas etapas, quando o transistor conduzindo, o diodo entra em corte e o indutor carrega. Com o transistor em corte, o diodo passa a conduzir, atendendo a continuidade de corrente no indutor e nesse momento o indutor começa a descarregar.

Pode-se classificar também o modo de operação do conversor. Operação em condução descontínua, quando a corrente no indutor chega a zero durante a descarga, e operação em condução contínua, quando o indutor não descarrega por completo.

A figura 20 mostra as formas de ondas típicas do conversor *Buck*, em estado estacionário, para os modos contínuo e descontínuo.

O ganho estático do conversor (G), que é definido pela razão entre a tensão de saída pela tensão de entrada pode ser expresso em razão do tempo de condução (t_T) e o período do chaveamento (τ). Pode-se assim definir o ciclo de trabalho (D) pela equação 7

$$D = \frac{t_T}{\tau} \quad (7)$$

Dessa forma o ganho estático do conversor *Buck* é definido pela equação 8.

$$G = D \quad (8)$$

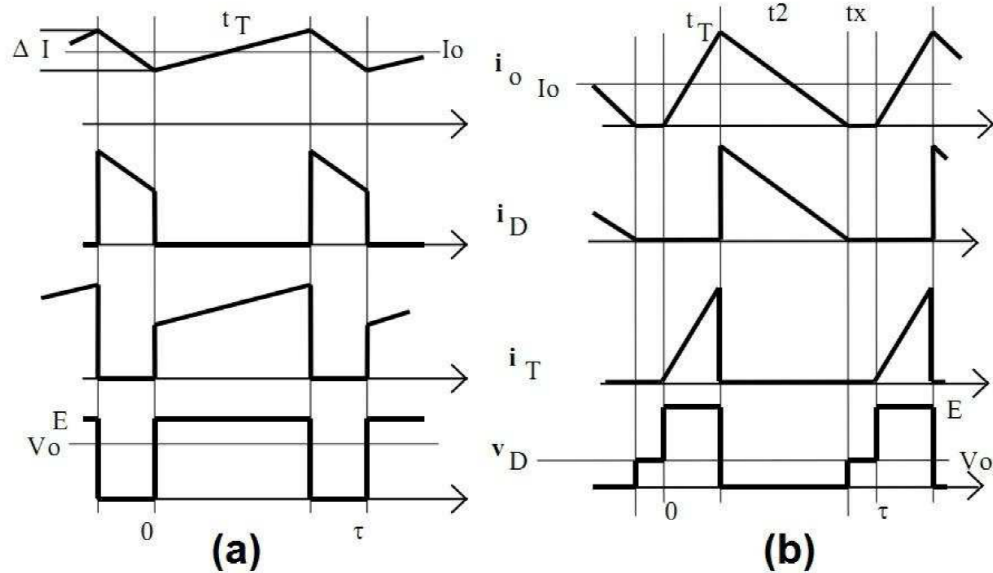


Figura 20 - Formas de ondas para o conversor abaixador [16]

3.2.2 Conversor Boost

O conversor *Boost*, ou elevador de tensão tem como objetivo entregar na saída do conversor uma tensão maior que a tensão de entrada. O conversor atua carregando um indutor que ao descarregar eleva a tensão de saída do sistema. A figura 21 mostra a topologia básica para o conversor *Boost*.

Pode-se dividir o funcionamento do conversor em duas etapas: quando o transistor conduz e quando ele abre. Durante a primeira etapa, a tensão de entrada é aplicada ao indutor que se carrega. Nesse momento o diodo está cortado, uma vez que a tensão de saída é maior que a de entrada. No momento em que o transistor abre, o diodo passa a conduzir e nesse momento a tensão de saída do sistema é a soma da tensão de entrada com a tensão do indutor, ou seja, a saída tem uma tensão maior que a tensão de entrada, desde que a tensão do indutor não seja nula.

Pode-se também separar os modos de operações em condução contínuo e descontínuo para esse conversor. A figura 22 mostra as formas de onda para o *Boost* para ambos os modos de operação.

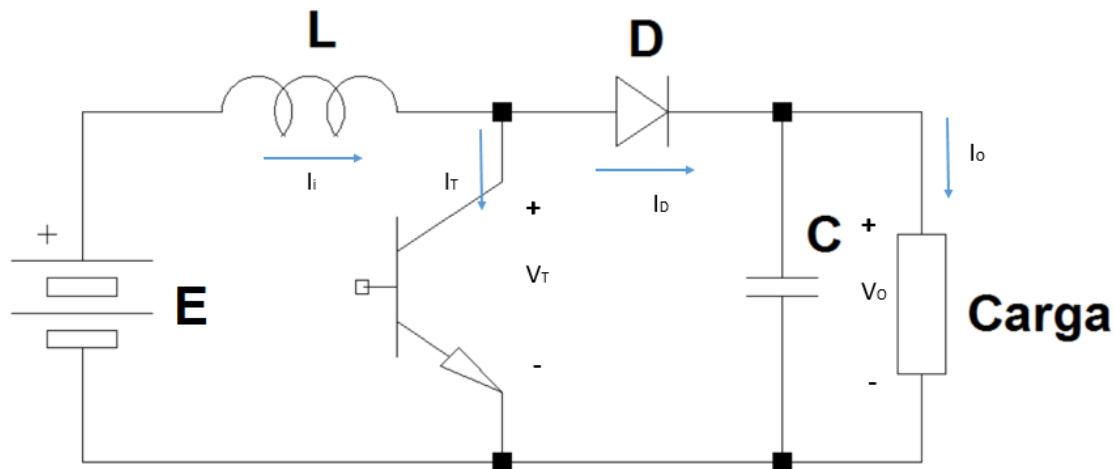


Figura 21 - Circuito do conversor boost

Já o ganho estático do conversor pode ser definido pela equação 9, onde percebe-se que a tensão de saída será maior ou igual a tensão de alimentação. Esta equação é válida para um conversor ideal e por isso permite que o ganho possa aumentado indefinidamente, porém isto não é possível em conversores reais.

$$G = \frac{1}{1 - D} \quad (9)$$

3.2.3 Conversor *Buck-Boost*.

O conversor *Buck-Boost* ou abaixador-elevador tem como objetivo entregar na saída uma tensão que pode ser tanto menor como maior do que a tensão de entrada. Para realizar esta tarefa, o conversor carrega um indutor que ao descarregar pode entregar uma tensão ou menor ou maior que a tensão de alimentação. A figura 22 mostra o circuito básico do conversor *Buck-Boost*.

Assim como os outros conversores CC-CC estudados aqui pode-se dividir a operação deste conversor em duas etapas: a quando o transistor conduz e a segunda quando o transistor abre. Na primeira etapa, o transistor conduz e o diodo entra em corte: nesse momento o indutor se carrega e o capacitor alimenta a carga. Quando o transistor abre, se inicia a segunda etapa de operação do conversor: neste momento o diodo conduz e o indutor se descarrega na carga.

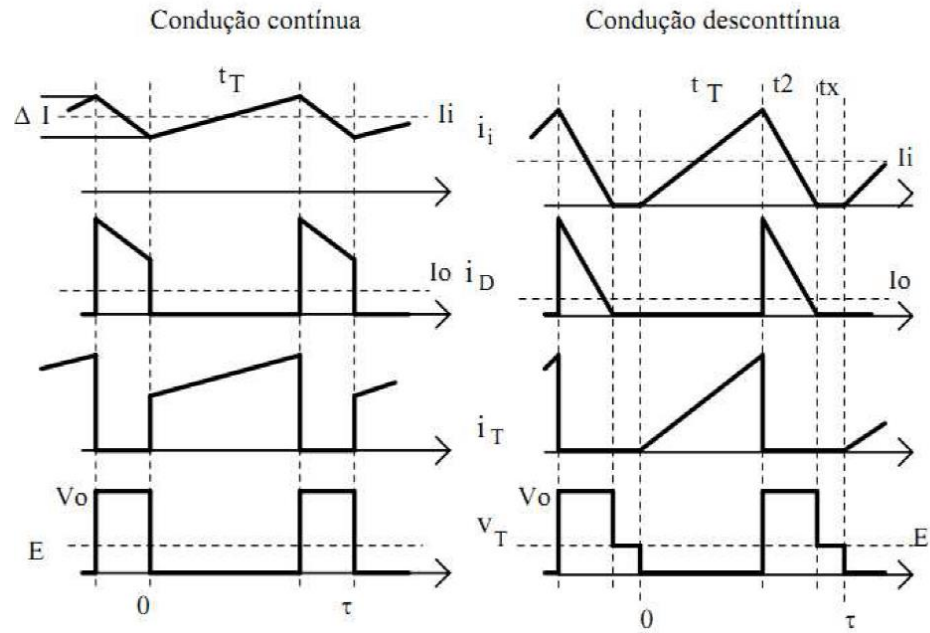


Figura 22 – Formas de onda para o conversor elevador [16]

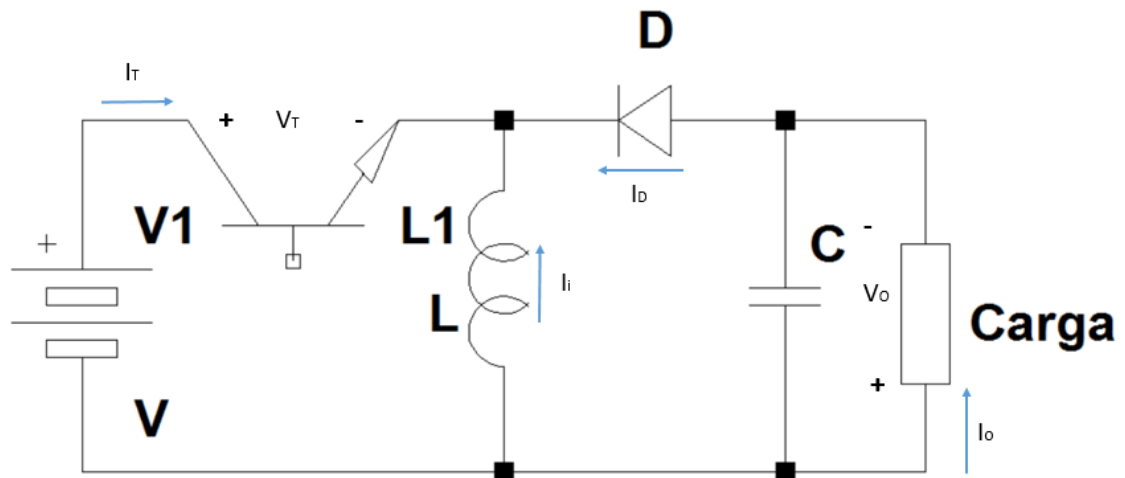


Figura 23- Circuito do conversor buck-boost

Observa-se pelo circuito que a tensão de saída do circuito tem polaridade oposta à da tensão de alimentação do conversor.

Pode-se separar os modos de operações em condução contínua e descontinua para esse conversor. A figura 24 mostra as formas de onda para o conversor *Buck-Boost* em ambos os modos de condução

Já o ganho estático do conversor pode ser definido pela equação 10. Pode-se perceber por esta equação que para valores de D menor que 0,5 o ganho é menor que um, para valores de D maior que 0,5 o ganho do conversor é maior que 1 e D igual a 0,5 implica em ganho unitário

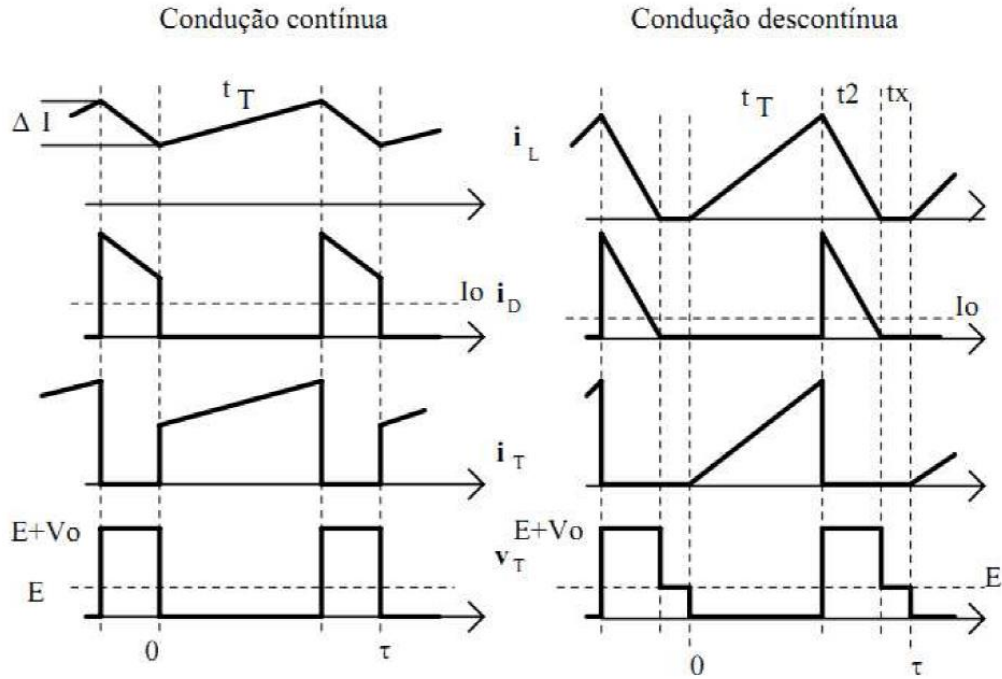


Figura 24 – Formas de onda do conversor buck-boost [16]

Pela equação 10 percebe-se também que pode-se aumentar indefinidamente o ganho do conversor como no caso do conversor *Boost* ideal, porém deve-se lembrar que essa equação é para um conversor ideal, que não é realizável na prática e que conversores reais possuem um valor máximo para o ganho.

$$G = \frac{D}{1 - D} \quad (10)$$

3.3 – Circuito do conversor CA-CC para a carga da bateria

O circuito para o retificador monofásico chaveado proposto é exibido pela figura 25.

Deve-se destacar que esse circuito é de apenas um quadrante, ou seja, a tensão será sempre positiva na saída e a corrente também só flui em um sentido, independentemente do controle aplicado ao mesmo.

A operação do circuito ocorre da seguinte maneira: durante o semi-ciclo positivo, M1 é chaveado e a corrente passa por M1, D1 e D3; já durante o semi-ciclo negativo, M2 passa a ser chaveado e a corrente passa por M2, D2 e D4. Durante a operação quando M1 e M2 estão em aberto a corrente passa pelo diodo

de roda livre D5. A figura 12 mostra a operação do sistema.

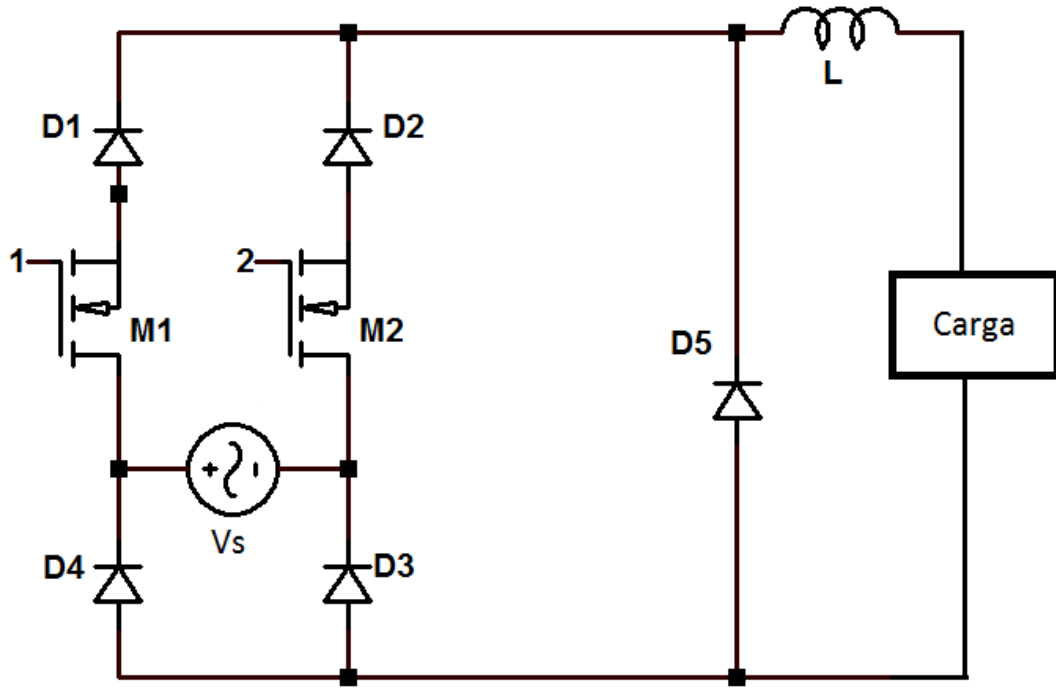


Figura 25 - Circuito do conversor CA-CC para a carga da bateria

3.3.1 - Acionamento PWM

Para fazer o controle do conversor é utilizado um acionamento modulação de largura de pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*) fazendo com que os transistores atuem como chaves liga-desliga e recorte a tensão, limitando assim a potência de entrada e consequentemente a potência entregue a carga.

A figura 26 mostra as formas de onda do conversor utilizando um acionamento PWM.

Analisando o circuito pode-se obter as equações 11 e 12 para tensão de saída, e a equação 13 para a corrente de saída. [17] onde:

$$v_{out\ k} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \text{ para } \alpha_m - \delta_m < \omega t < \alpha_m \quad (11)$$

$$v_{out\ k} = 0 \text{ para } \alpha_m < \omega t < \alpha_{m+1} - \delta_m \quad (12)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (13)$$

Para o valor da tensão média tem-se a equação 14.

$$V_{CC} = \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^p \int_{a_k - \delta_k}^{a_k} \sqrt{2} V \sin(\omega t) d\omega t \quad (14)$$

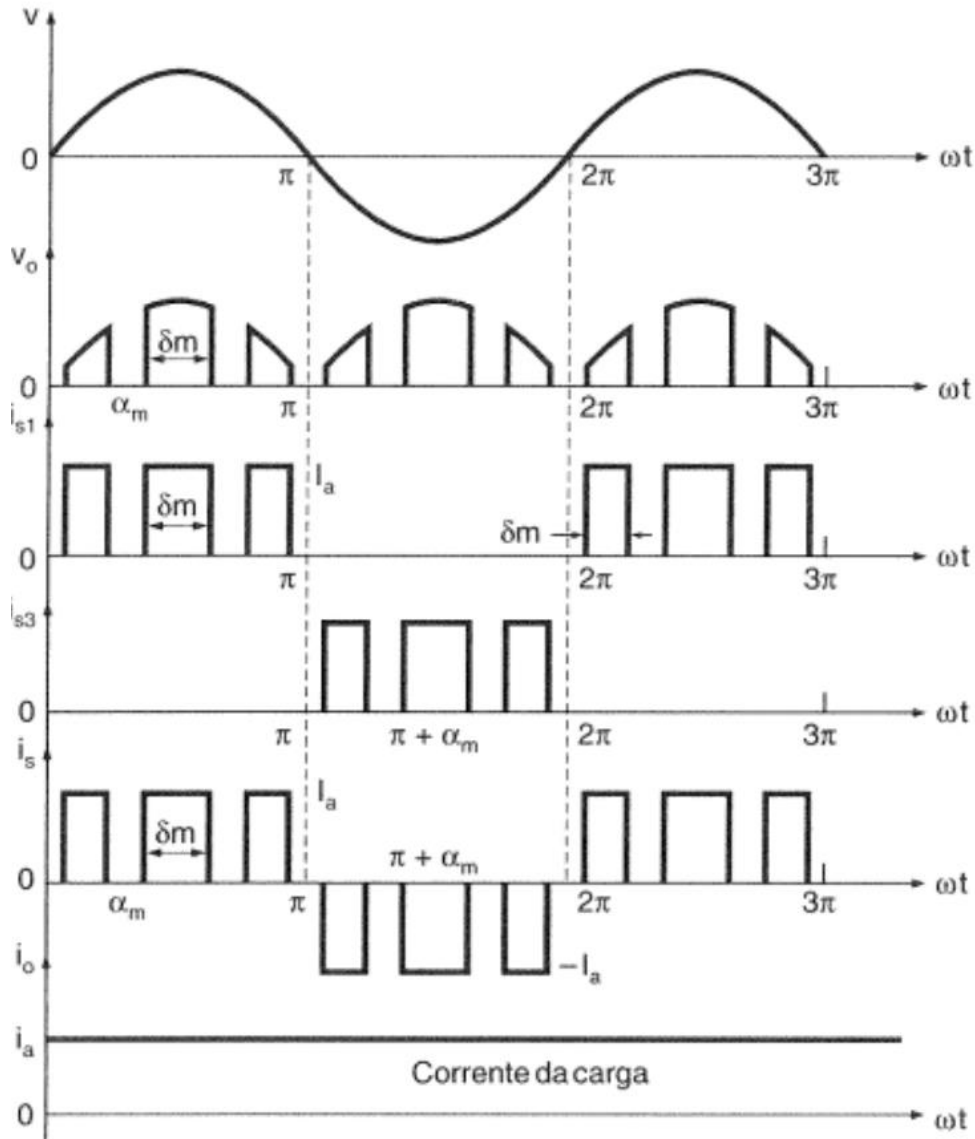


Figura 26 - Formas de Onda do retificador chaveado com modulação PWM [18]

3.3.2 - Determinação do filtro indutivo

Nesta topologia do conversor escolhida para realizar a carga da bateria, recomenda-se utilizar uma frequência de chaveamento dez vezes superior a frequência do semi-ciclo da senóide. Valores acima desta frequência tem pouco efeito na redução do *ripple* de corrente. Dessa forma, a utilização de frequências de

chaveamento muito altas não traz vantagens na determinação do valor do filtro indutivo [17].

Para realizar o cálculo do valor do indutor a ser utilizado, será feita uma estimativa inicial para o valor do filtro considerando apenas uma carga resistiva que irá fornecer a corrente de carga máxima durante o processo de carga da bateria.

O método utilizado é descrito por Bianco, H. S. D., Otani, H., & Quini, R. A [17] sendo que para se determinar o valor do indutor são realizadas as seguintes operações

1. Determinar valor de carga resistiva no qual o conversor entregue uma corrente similar que será entregue durante o processo de carga da bateria.
2. Estabelecer por meio da equação 6 o valor do *ripple* e a sua porcentagem em relação a corrente média.
3. Estabelecer a largura do pulso para que o conversor entregue a tensão média desejada por meio da equação 15.
4. Utilizar a figura 27 [17], que relaciona o *ripple* do sistema com o ângulo da impedância, e assim é possível obter o valor da indutância pela equação 16.

Primeiramente tem-se que a tensão média da bateria durante o processo de carga é de aproximadamente 12,8 V. Normalizando esse valor em função da tensão de entrada que nosso caso é 127V tem-se um valor de aproximadamente 0.1

Como esse trabalho visa dois tipos de baterias diferentes, uma com capacidade de 100A-h, que é utilizada na alimentação do *powertrain* de um veículo elétrico e outra de menor capacidade (7A-h) que é utilizada para alimentação da eletrônica do mesmo, serão calculados os valores dos filtros para as duas baterias.

Para a bateria de 100A-h a corrente de carga é de aproximadamente 20A e para a bateria que iremos realizar os testes, a corrente de carga é de 2A. Assim o resistor que para uma tensão de 12,8V tem essas correntes são respectivamente 0,64 Ω e 6,4 Ω .

Pela equação 5 tem-se que os valores de *ripple* para cada uma das baterias são de 5A para a bateria do veículo e 350mA para a bateria de Esses valores em relação ao valor da corrente de carga são, em porcentagem, respectivamente 25% e 17,5%.

Para se determinar a largura de pulso δ [°] temos a equação 15, onde V_n é a tensão normalizada do sistema. Como no caso estudado a tensão normalizada para as duas baterias é a mesma, tem-se a largura de pulso sendo de 2.81°

$$V_n = 0.0355 * \delta \quad (15)$$

Utilizando a figura 27 para se determinar o ângulo da impedância do sistema tem-se que para o conversor da bateria do veículo o ângulo φ de aproximadamente 47° e para a bateria de teste o ângulo é de aproximadamente 52° .

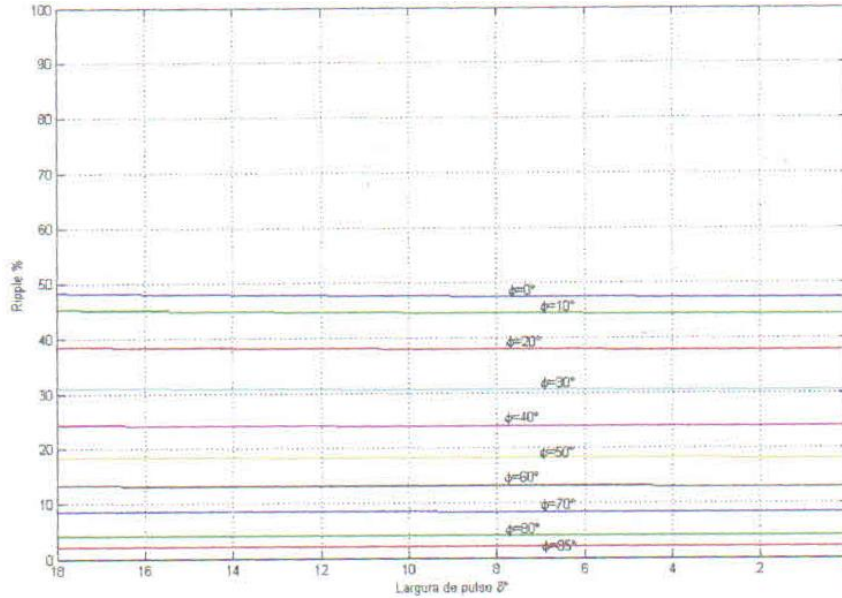


Figura 27 – Gráfico para determinar o ângulo da impedância do conversor [17]

$$L = \frac{\tan(\varphi) R}{\omega} \quad (16)$$

Com esses valores tem-se que os valores dos filtros indutivos para cada um dos conversores da bateria do veículo e da bateria de teste são respectivamente 1.8mH e 21.7mH. Como a carga de uma bateria não é resistiva os valores dos filtros serão utilizados apenas como uma referência, usando os valores iniciais de indutância, determinados pelo processo gráfico descrito, os valores finais das indutâncias serão ajustados através de simulações do circuito.

3.3.3 – Determinação dos semicondutores

Para se determinar os semicondutores utilizados é necessário levar em conta principalmente a corrente e as tensões que os mesmos vão ser submetidos para que não haja problemas na operação do conversor, ou que o funcionamento não fique de acordo com o esperado.

Primeiramente deve-se determinar as chaves a serem utilizadas. As melhores chaves para realizar esse tipo de tarefa são os Mosfets ou IGBT's, A vantagem do primeiro é o fato de conseguir operar em frequências mais altas e segundo por suportar uma maior corrente. A escolha depende da aplicação, mas é

recomendável que a frequência de chaveamento seja superior em 20 vezes a frequência da rede, no caso do Brasil 1200Hz.

A tensão que cada chave terá de suportar é igual à tensão da rede, por isso deve-se escolher uma chave que suporte o pico de tensão da alimentação do circuito. Em relação à corrente média que passa em cada uma das chaves, esta é metade da corrente média de saída multiplicada pelo ciclo de trabalho, uma vez que em cada semi-ciclo uma chave conduz a corrente e somente no período de tempo em que se está acionada, que é correspondente ao ciclo de trabalho.

Outro fator importante é a corrente de pico de cada chave. Apesar da corrente média que passa por cada chave ser a metade da corrente média da carga, a corrente de pico é igual a corrente de carga somada ao *ripple* de corrente.

Os diodos de retificação possuem as mesmas características que os transistores e devem suportar os mesmos valores de tensão e de corrente que os anteriores.

O diodo de roda livre difere um pouco dos diodos de retificação, uma vez que sua corrente média conduzida pelo diodo é de aproximadamente igual à corrente média na carga, devido aos ciclos de trabalho dos transistores serem bastante reduzidos fazendo com que a corrente circule a maior parte do tempo pelo diodo de roda livre.

4 - Simulações do Conversor

4.1- Levantamento de Grandezas do Sistema

Para realizar as simulações é necessário antes determinar os parâmetros da bateria, tais como a corrente máxima e a tensão de equalização, bem como determinar o filtro indutivo do conversor CA-CC, necessário para atender as demandas do processo de carga da bateria.

A bateria do veículo possui uma capacidade de 100 ampere-hora. O método utilizado de carga é o duplo nível de tensão, sendo sua escolha justificada devido ao fato que este método realiza uma carga mais efetiva da bateria, como explicada na seção 2.2.5.2. O método de duplo nível de corrente também possui esta propriedade, mas é bastante complexo por utilizar correntes pulsantes e não uma referência constante como no método utilizado.

Para que tal ensaio seja realizado, é necessário que os valores máximos de corrente fiquem entre 14 A e 20 A, com uma tensão de equalização de 2,4V por célula [11].

Devido à capacidade da bateria ser de 100A-h, o *ripple* de corrente recomendado é de no máximo 5A (calculado pela equação 7) e o *ripple* de tensão é de 0.5% da tensão da bateria, o que corresponde ao valor de 0,06V.

Já para as baterias de teste a corrente máxima de carga recomendada pelo fabricante é de 2,1 A, e como a capacidade dela é de 7A-h, pode-se calcular o *ripple* máximo de 350mA. A tensão de equalização recomendada é de 13,8V.

A figura 28 mostra o circuito a ser utilizado para as simulações onde a bateria é modelada como uma fonte de tensão em série com sua resistência interna R.

4.1.2 - Determinação do Filtro Indutivo

Na seção 3.3.2, realizou-se o cálculo do valor do filtro indutivo considerando-se uma carga puramente resistiva. Porém, como a carga do sistema não é apenas resistiva, o valor obtido será utilizado como referência. Nesta seção, será ajustada por meio de simulação, a obtenção de um valor adequado para o filtro indutivo para aplicação prática, tendo como ponto de partida os valores determinados pelo método apresentado no item 3.3.2, do capítulo anterior

Para se determinar o valor do indutor a ser utilizado como filtro do sistema foi realizada uma simulação, no *software* LTspice, com um conjunto de valores de indutâncias para o filtro sendo utilizado como valor inicial do indutor, o valor calculado na seção 3.3.2. A análise do *ripple* de corrente permitiu a escolha do menor valor da indutância que satisfaz os requerimentos do sistema.

Como os cálculos foram feitos para um sistema de 10 pulsos por semi-ciclo, as simulações para se determinar o valor do indutor usarão essa frequência de chaveamento.

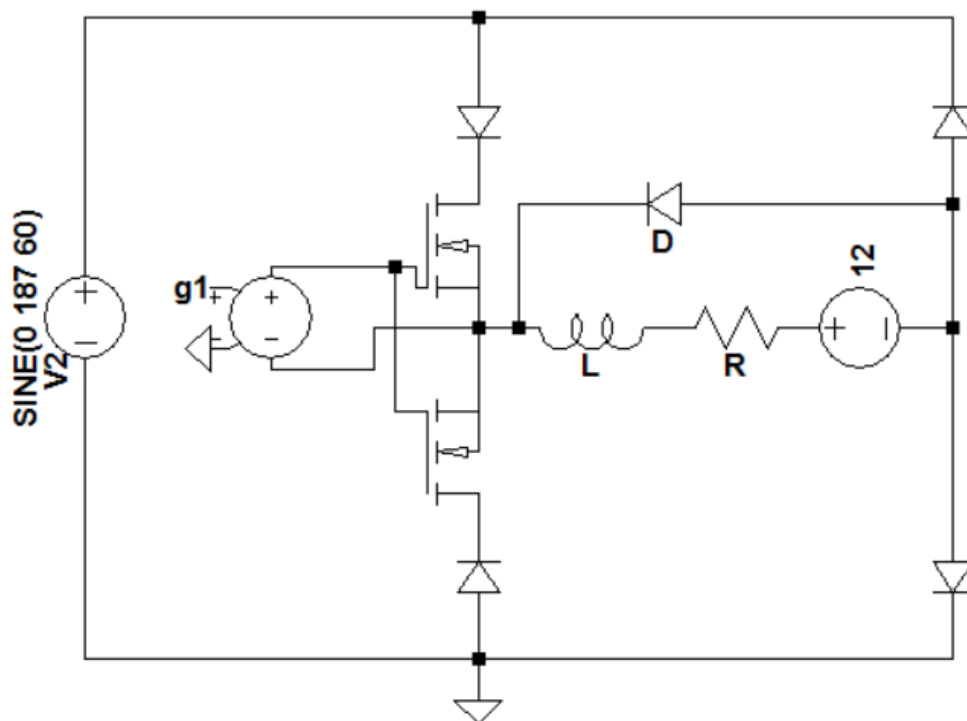


Figura 28 - Circuito simulado

A figura 29 mostra o resultado da simulação, utilizando os dados da bateria de teste, com os valores de indutância de 21,7mH, 25mH e 90mH. A escolha desse último valor ocorre pelo fato de ser o valor da indutância de um transformador disponível no laboratório.

O valor do *ripple* para o indutor calculado é de 400mA, o que é um pouco acima do desejado. Para o indutor de 25mH o *ripple* é de 350mA, ou seja, possui uma resposta adequada para a aplicação. Já o indutor de 90mA apresenta um *ripple* de 97mA, o que é uma resposta ainda mais satisfatória.

Como o indutor de 90mH satisfaz os critérios desejados, este valor será utilizado ele nos testes de bancada e nas futuras simulações.

A Figura 30 mostra os resultados para a mesma simulação, mas com a bateria de 100A-h, sendo utilizados os indutores de 1,8mH e um de 2mH. Para o filtro de 1,8mH, o *ripple* foi de 5,4 A, o que é um pouco superior ao estipulado. No caso do indutor de 2mH a ondulação na corrente foi de 4,8 A que está dentro do desejável.

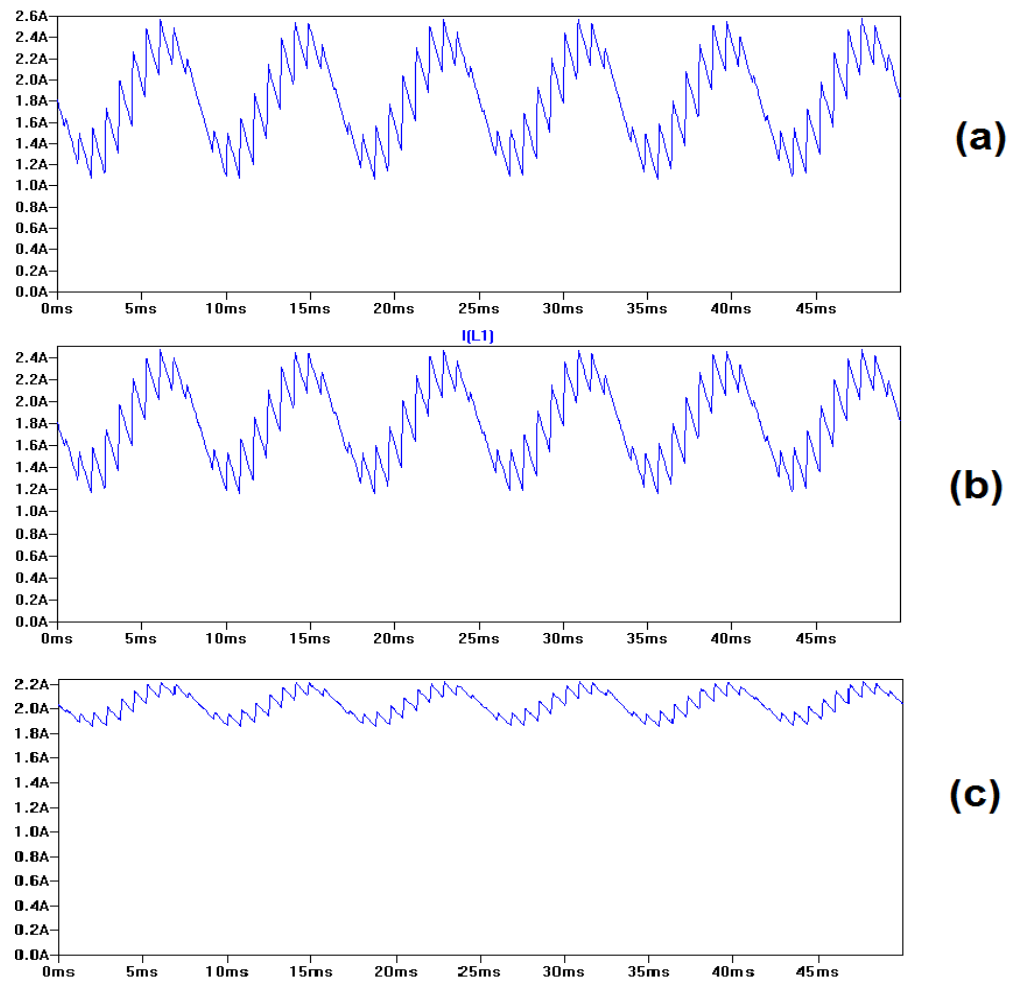


Figura 29 - Corrente simulada para diferentes valores de indutância (a) $21,7\text{mH}$ (b) 25mH (c) 90mH

Como pode ser visto pelas figuras 29 e 30, a forma de onda da corrente apresenta um grande *ripple* de alta frequência. Para tentar melhorar esse aspecto foi realizado o aumento da frequência de chaveamento e observado a influência no *ripple* de corrente. A figura 31 mostra a corrente para o indutor de 90mH , com uma corrente média de 2A e frequência de chaveamento de 5kHz .

Pela figura observa-se uma melhora no aspecto da corrente, porém o valor RMS do *ripple* diminuiu apenas 5mA , mesmo com o aumento em mais de quatro vezes do valor da frequência.

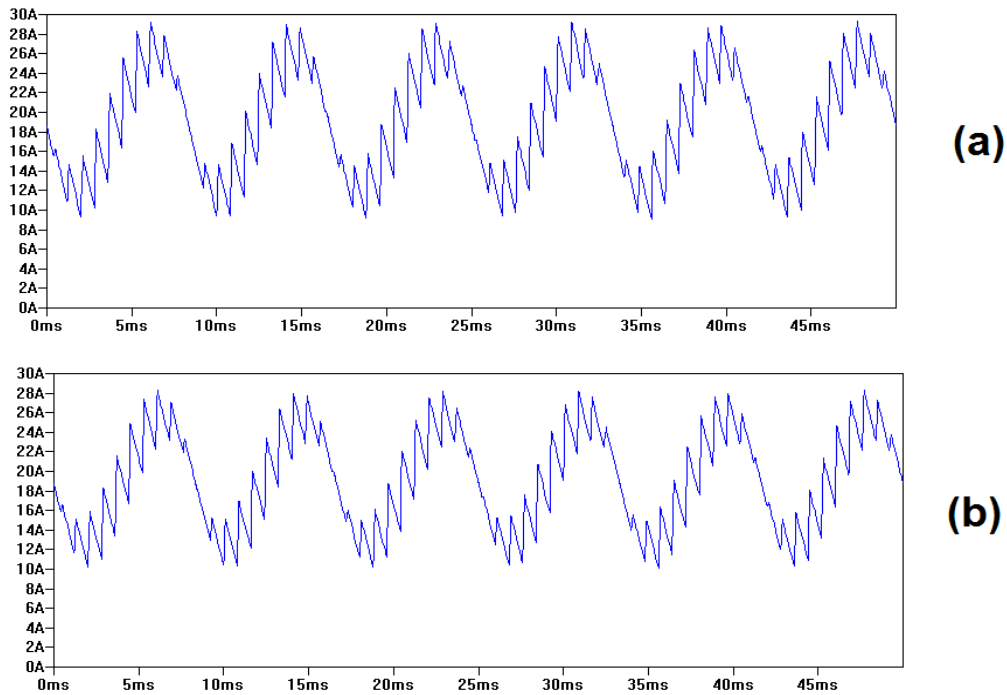


Figura 30 - Corrente simulada para diferentes valores de indutância (a) 1,8mH (b) 2mH

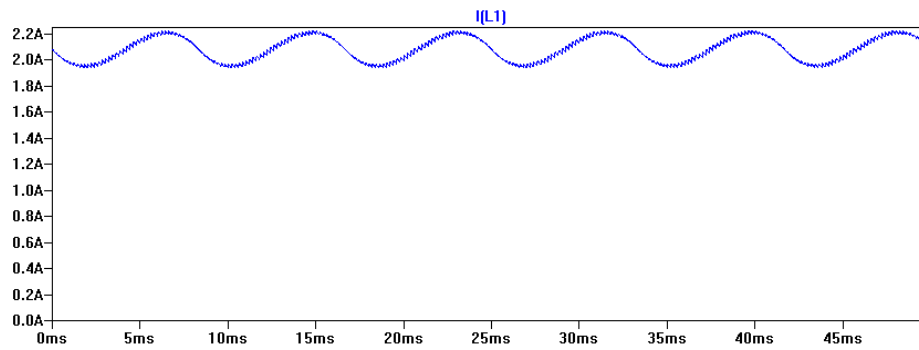


Figura 31 - Corrente simulada com frequência de chaveamento em 5kHz

4.2 Formas de onda do conversor

Nesta seção são exibidas as formas de ondas do conversor utilizando a bateria como a carga do sistema. Nas simulações foram utilizados o indutor de 90mH e uma corrente média de 2 A, que será o valor de referência para realizar a comparação com os resultados de bancada.

A figura 32 mostra a tensão sobre o indutor.

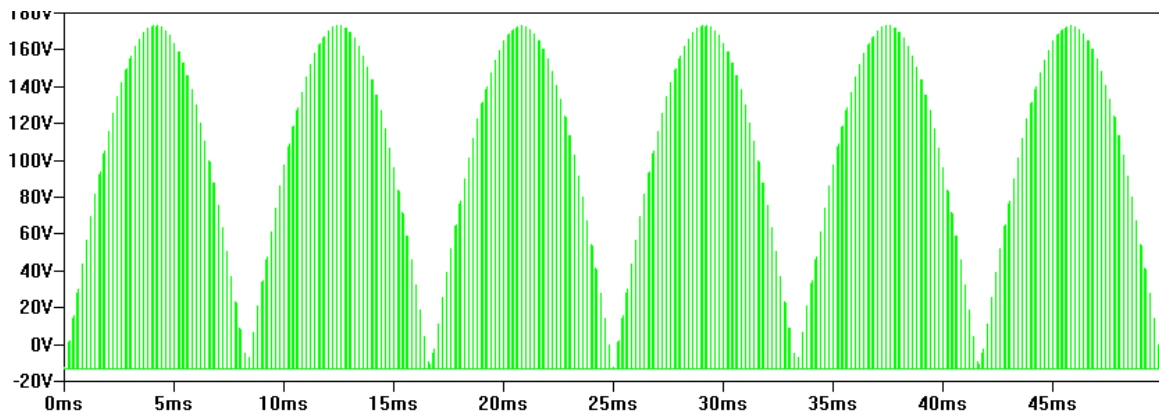


Figura 32 - Tensão sobre o indutor

A figura 33 mostra a tensão sobre o transistor, que opera em um apenas semi-ciclo como é esperado. Observa-se também que quando o transistor conduz a sua tensão é nula e que quando o transistor abre, a tensão sobre ele é a tensão da rede. A figura 34 exibe detalhes do chaveamento e como o ciclo de trabalho, definido pela razão entre o tempo de condução e o período do chaveamento, é baixo para fornecer os 12V e os 2 A.

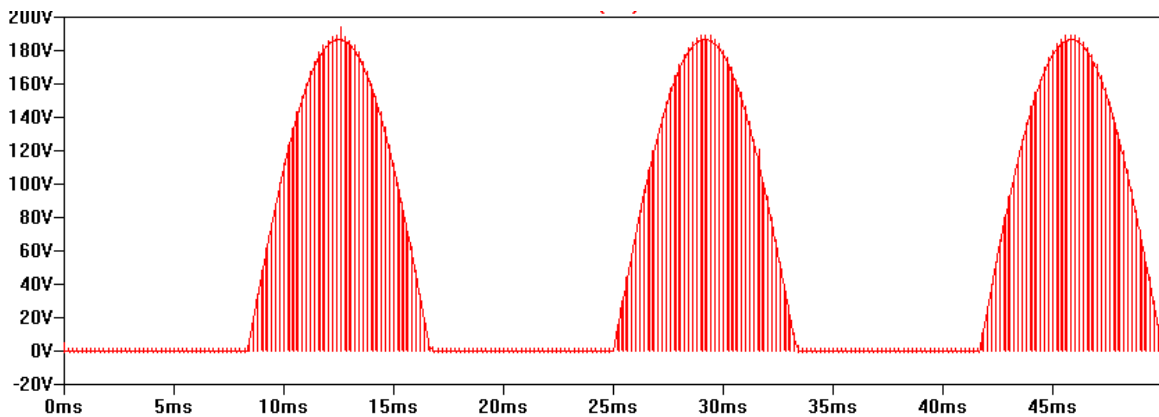


Figura 33 - Tensão sobre o transistor

A figura 35 mostra a tensão sobre os diodos de retificação. Pode-se verificar que a tensão sobre estes dispositivos é igual a tensão da rede durante um semi-ciclo e que não há efeitos do chaveamento na tensão sobre eles como ocorrem com o transistor e o indutor.

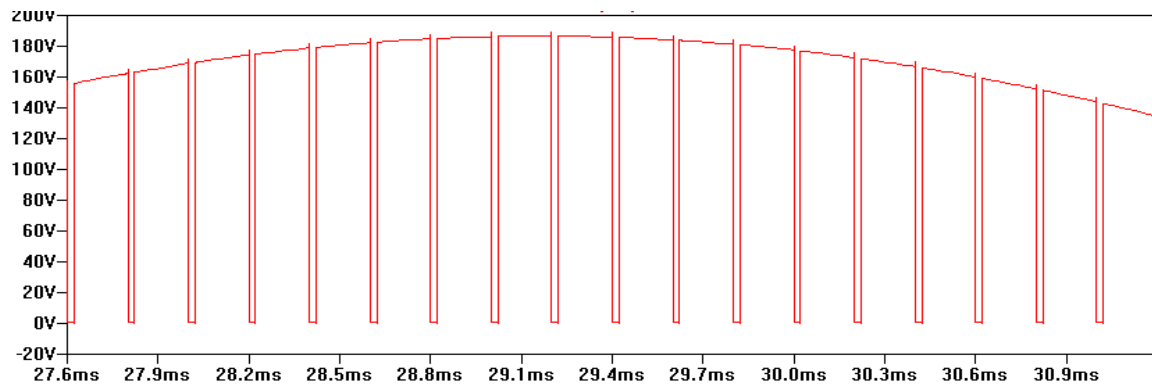


Figura 34 - Tensão sobre o transistor em um menor espaço de tempo

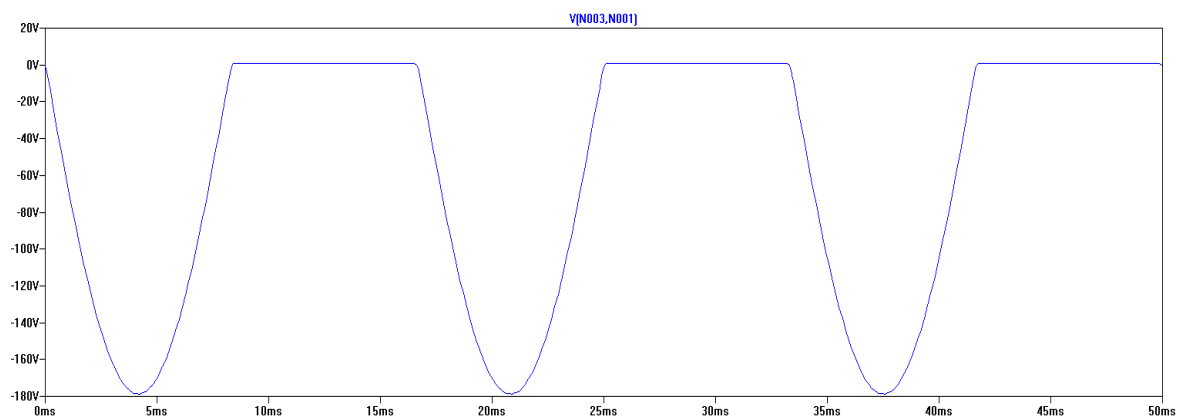


Figura 35 - Tensão reversa sobre o diodo de retificação

5 – Simulações do controle do conversor

Neste capítulo será apresentado um método de controle do conversor utilizando um controlador digital do tipo PI.

Para realizar esta tarefa é necessário que o conversor já esteja com os seus parâmetros definidos. Como exemplo será realizado a simulação para o conversor para carga de uma bateria de 100A-h, com um filtro indutivo de 5mH e de uma bateria de 7A-h com um filtro indutivo de 90mH.

5.1- Levantamento dos parâmetros do controlador

Após a determinação dos parâmetros físicos do sistema, é necessário projetar o controlador responsável por regular corrente e tensão entregue a carga, de modo a não danificar as baterias. Para realizar esta tarefa foi utilizado o *software* Matlab, que permite por meio de suas ferramentas determinar uma função de transferência aproximada para planta e também observar a resposta desta para diferentes tipos de controle.

Para se determinar a função de transferência aproximada do sistema, utilizou-se o aplicativo de identificação de sistemas (System Identification Toolbox, veja figura 36) em conjunto com a simulação do Simulink. Na determinação do sistema, foram utilizados um filtro indutivo de 5mH, uma bateria de 100A-h e uma entrada com um ciclo de trabalho fixo em 0,14, que é o valor aproximado para a faixa de operação do sistema.

As respostas e as entradas do sistema para a utilização no aplicativo de identificação dos sistemas são mostrados pelas figuras 37 e 38. Deve-se salientar que o sinal de resposta da corrente foi filtrado por um filtro contínuo de primeira ordem com frequência de corte em 100 rad/s, que na prática pode ser implementado por um sistema RC. Esta filtragem é interessante para o controle pois reduz a ação do *ripple* no controle.

O modelo utilizado para a bateria foi o modelo do *Simulink* bateria, que é um bloco que implementa um modelo dinâmico da bateria e que pode-se escolher parâmetros para diferentes tipos de bateria. O bloco utilizado já possui diversos parâmetros típicos para as seguintes baterias:

- Chumbo-Ácido
- Lítio-Íon
- Níquel-Cádmio
- Níquel-Hidreto metálico

Na simulação realizada foram utilizados os parâmetros típicos já estabelecidos pelo *simulink* para

a bateria de chumbo ácido, sendo modificado apenas a tensão nominal, que foi estipulada em 13,2V, o SOC em 50% e a capacidade da bateria de 100A-H. A figura 39 mostra as configurações do bloco da bateria.

Com o auxílio do aplicativo foi determinado funções de transferência estimadas do sistema tanto para tensão como referência (G_v), como para corrente (G_c), que são determinados pelas equações 17 e 18.

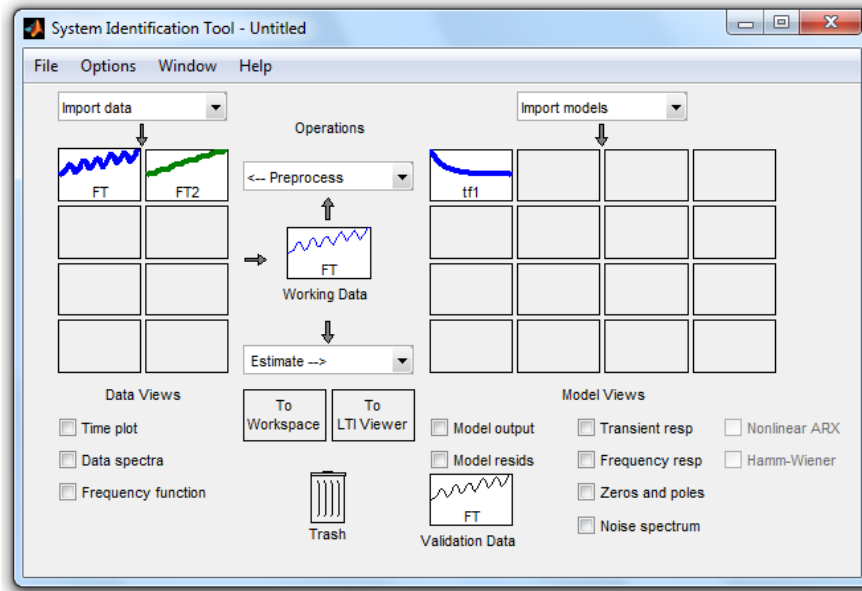


Figura 36 - Toolbox de identificação de sistemas

$$G_v = \frac{106.5s + 14.96}{s + 0.139} \quad (17)$$

$$G_c = \frac{2207s + 2.173 \cdot 10^4}{s^2 + 143.9s + 109.7} \quad (18)$$

Após a determinação da planta do sistema, utilizou-se o aplicativo de configuração de PID do Matlab (*PID Tunning*) para se determinar os ganhos do controlador. Para o caso estudado, um controlador PI consegue satisfazer os requerimentos do sistema, já que o mesmo consegue eliminar o erro com uma velocidade satisfatória.

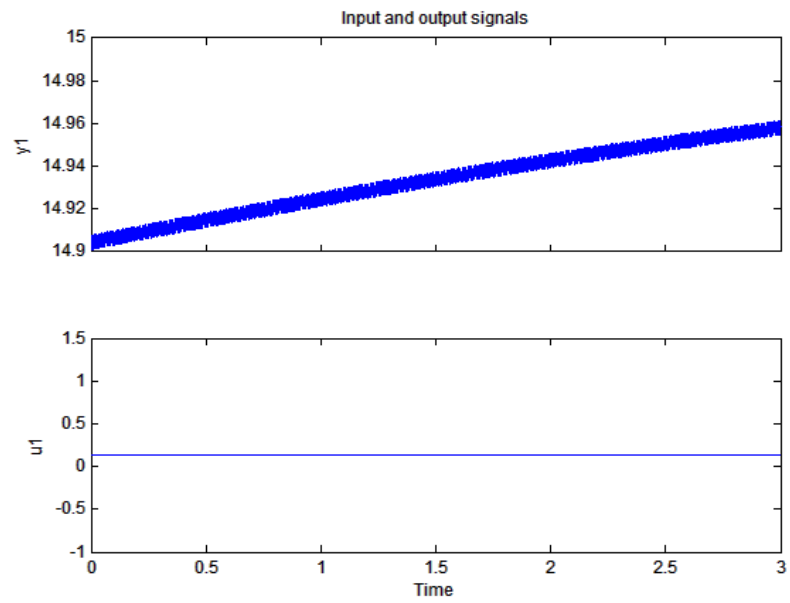


Figura 37 - Sinais utilizados para se determinar a resposta em tensão do sistema

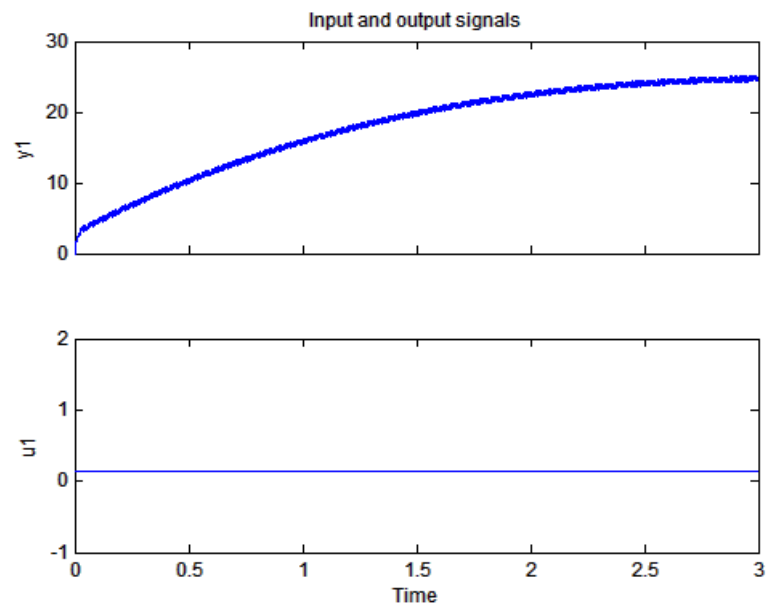


Figura 38 - Sinais utilizados para se determinar a resposta em corrente do sistema

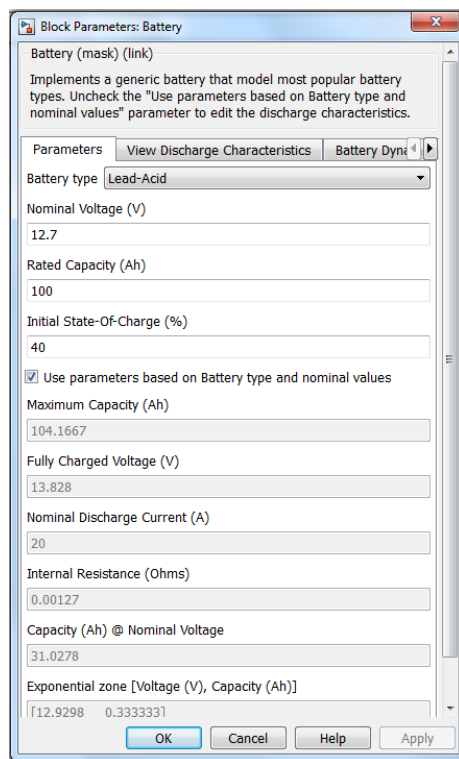


Figura 39 - Parâmetros da bateria de simulação

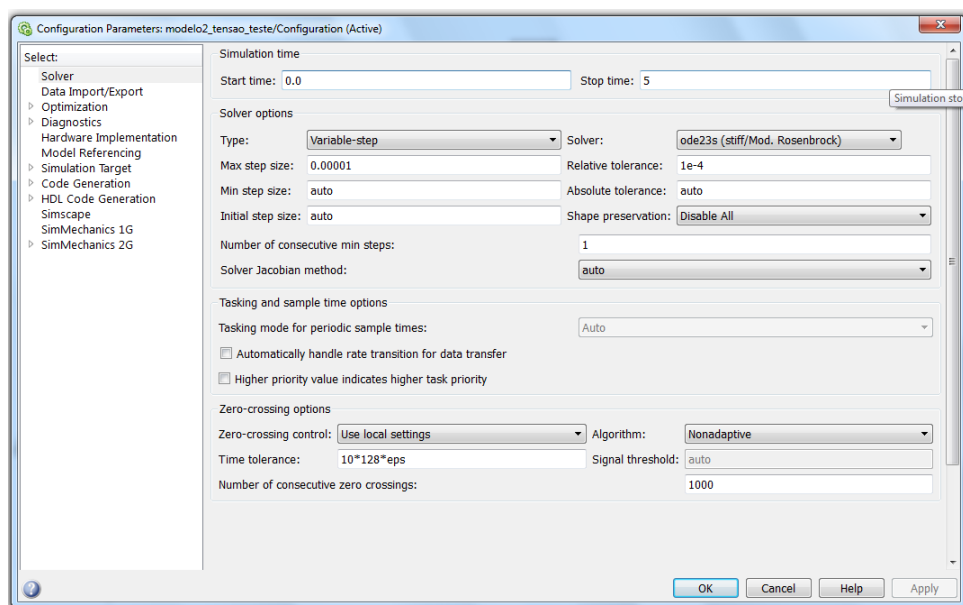


Figura 40 - Parâmetros de simulação

Determinou-se também que o controlador seria do tipo digital e com uma taxa de amostragem de 0,01s. Como o sistema é lento, com o período de carga na escala de horas, essa taxa de amostragem

representa um bom valor. Com essa taxa amostragem, foi realizado em Matlab a discretização das plantas do sistema com *Zero Order Holder*. As equações 19 e 20 representam as plantas de tensão e corrente discretizadas.

$$G_v = \frac{106.5z - 106.3}{z - 0.9986} \quad (19)$$

$$G_c = \frac{12.39z - 11.24}{z^2 - 1.1231z + 0.2372} \quad (20)$$

Outro fato importante é que a resposta do sistema não ocorre de maneira idêntica ao determinado pelas funções de transferência com os ganhos estipulados pelo PID *tunning*. Dessa forma foi necessário fazer uma adaptação empírica, baseada nos ganhos dos controladores estabelecidos pelo aplicativo de PID *tunning*, para que os mesmos apresentassem uma resposta satisfatória.

Esse fato ocorre, pois, o sistema não é linear, uma vez que só ocorre passagem de corrente e aumento de tensão na saída do sistema, quando a tensão média de saída fornecida pelo conversor for superior a tensão da bateria.

Para o sistema com um indutor de 5mH, os parâmetros do controlador foram definidos por:

- Quando controlando a tensão

$$K_p = 0.8$$

$$K_i = 0.4$$

- Quando controlando a corrente:

$$K_p = 0.001$$

$$K_i = 0.01$$

Para sistema com o indutor de 90mH e uma bateria de 7A-h os ganhos foram definidos em:

- Quando controlando a tensão:

$$K_p = 1$$

$$K_i = 0.2$$

- Quando controlando a corrente:

$$K_p = 0.035$$

$$K_i = 0.45$$

5.2- Resposta do sistema controlado

Determinado o ganho dos controladores, é possível ter a resposta do sistema em malha fechada. Foram feitas simulações em Simulink para ambos os tipos de controle (corrente e tensão) e para os dois tipos de bateria, mudando apenas os ganhos dos controladores e o valor do indutor. A referência deve ser modificada quando utilizado o controle em corrente, uma vez que a corrente de carga de uma bateria de 100A-h é de 20A e a corrente de carga de uma bateria de 7A-h é de 2A.

Deve-se destacar que quando controlado em tensão, o valor utilizado para o SOC para a configuração do bloco da bateria foi de 95%. Para o caso do controle em corrente, o valor utilizado foi de 40%. O valor mais alto de SOC para o controle por tensão ocorre pois se desejava que a bateria já apresentasse um valor de tensão mais alto em seus terminais, uma vez que durante o processo de carga, no momento que é utilizado o controle de tensão a bateria já foi carregada em um certo nível e sua tensão já atingiu a tensão de equalização.

As figuras 41 e 42 representam os circuitos simulados.

Foi adicionado após os controladores um valor fixo de 0.11, que é o valor de *duty cycle* que o sistema começa a responder, ou seja, faz com que o sistema comece a fornecer uma tensão superior a tensão da bateria, já que em valores menores de ciclo de trabalho isso não ocorre, fazendo com que não haja fornecimento de energia nem pelo conversor nem pela bateria. Além disso, caso não utilizasse esse constante para deixar o sistema na iminência da resposta, o integrador do controlador apresentaria problemas de *wind-up*, uma vez que até a resposta do sistema chegar ao valor de 0.11 muito erro teria sido acumulado.

Também deve-se destacar que o filtro para o sinal de corrente continuou a ser utilizado e é representado na figura 41 pelo bloco “TransferFcn2”.

5.2.1- Resposta do sistema controlado por tensão

As figuras 43 e 44 mostram respectivamente os perfis de tensão das baterias de 100A-h e 7A-h. Observa-se que em ambos os casos a tensão de saída acompanha bem a variável de controle, e a mesma possui um leve sobre-sinal, porém o valor de pico não ultrapassa o valor de regime em 0,2V, resultado aceitável para o sistema.

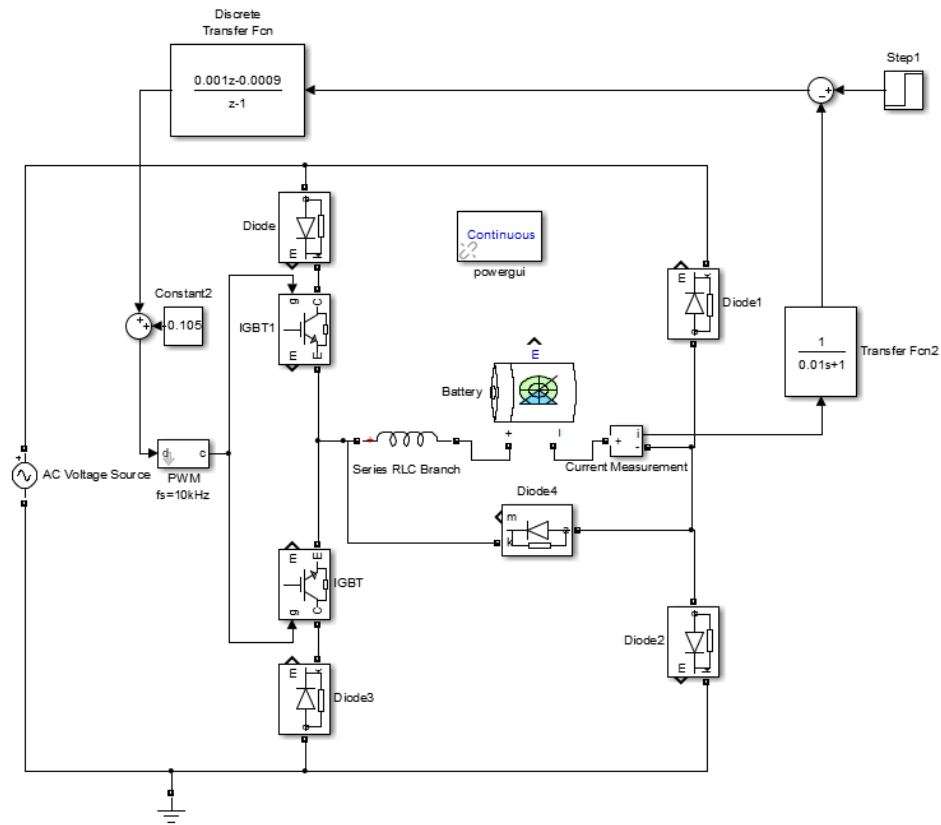


Figura 41 - Diagrama do sistema controlado por corrente

5.2.2- Resposta do sistema controlado por corrente.

As figuras 45 e 46 mostram respectivamente os perfis de corrente de carga das baterias de 100A-h e 7 A-h, juntamente com a variável de controle. Observa-se que em ambos os casos o valor médio da corrente tende ao valor da referência e que não há sobressinal durante esse processo

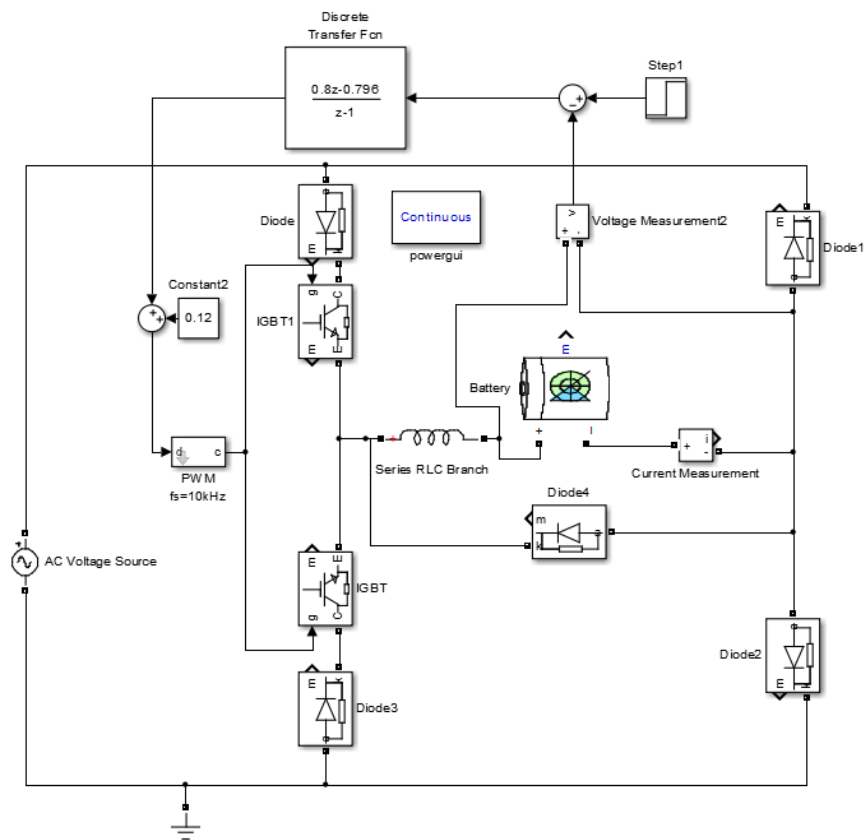


Figura 42- Diagrama de simulação do circuito controlado por tensão

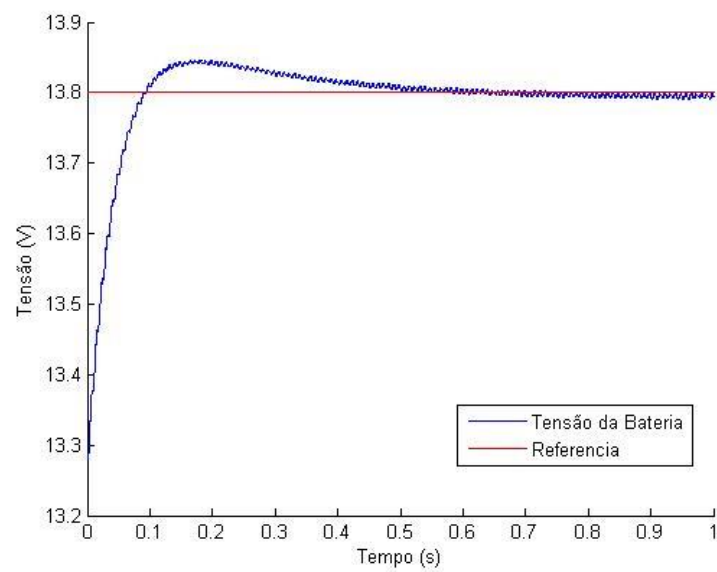


Figura 43 – Tensão de Carga da bateria de 100A-h

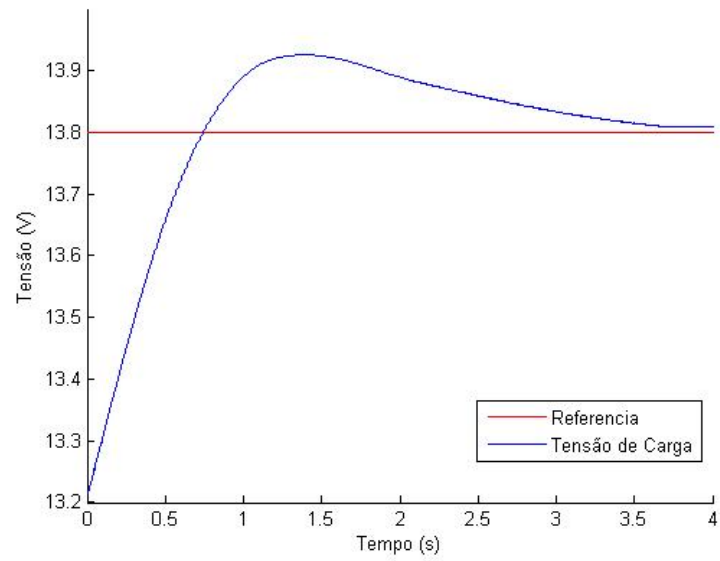


Figura 44 – Tensão de carga da bateria de 7A-h

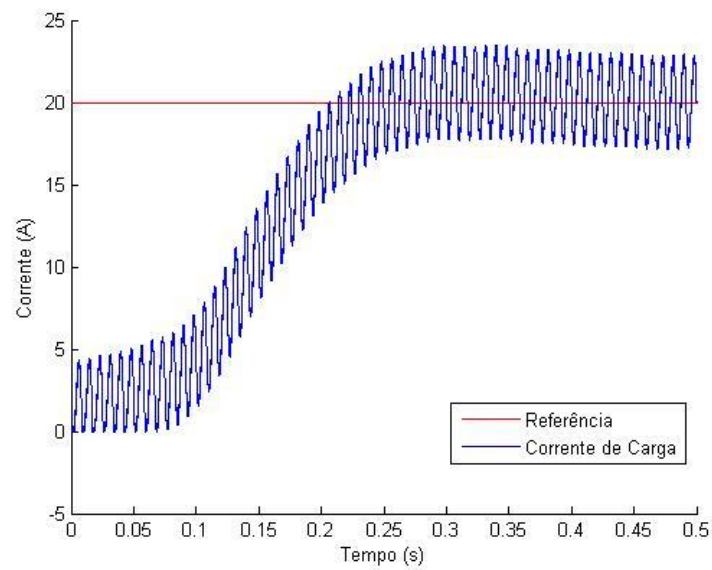


Figura 45- Corrente de carga da bateria de 100A-h

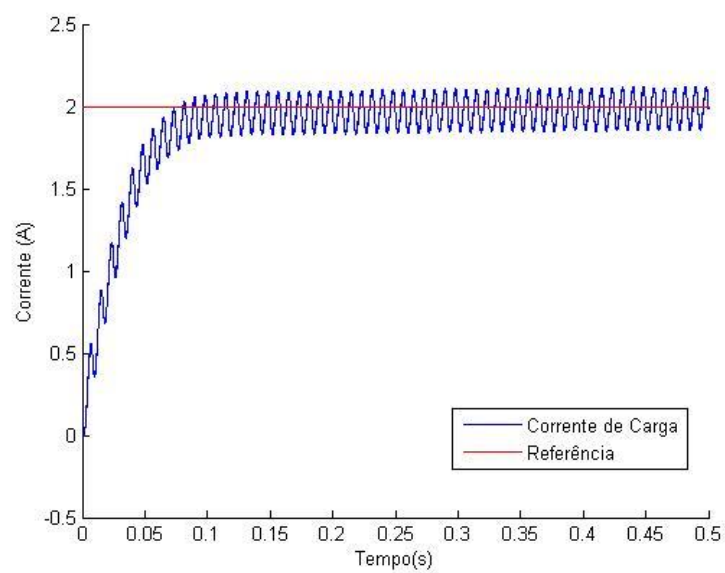


Figura 46- Corrente de carga da bateria de 7A-h

6 - Resultados Experimentais

Este capítulo abordará o processo de implementação do sistema e análise dos resultados obtidos. O conversor CA-CC foi desenvolvido para realizar a carga de uma bateria de teste, que tem uma capacidade de 7A-h, uma vez que a utilização da bateria de tração do veículo iria requisitar altas corrente, tendo um alto custo para desenvolvimento do protótipo. Pelas próprias especificações do fabricante, a corrente de carga da bateria deve ser de 2,1 A e a tensão de equalização de 13,8 V.

Deve-se mencionar que, por limitações de recursos, será utilizado como filtro um indutor de 90mH, valor muito superior ao necessário, pois este estava disponível no laboratório. Como pontos negativos da utilização deste indutor, destacam-se o seu núcleo de ferro que não responde em altas frequências (assim a frequência de chaveamento do sistema não poderá ser muito alta) e seu peso (10 kg).

6.1 - Controlador

Nos ensaios foi utilizado um Arduino Mega (figura 47) que possui um microcontrolador ATmega 2560. A escolha desse controlador ocorreu pela facilidade de programação do mesmo, e por esse possuir uma saída PWM com 16bits e uma entrada analógica com 10 bits. Além disso o controlador possui as especificações descritas pela tabela 1:

Tabela 1 - Especificações do Arduino Mega

Tensão de operação	5V
Tensão de alimentação recomendada	7-12V
Limites da tensão de alimentação	6-20V
Entradas e saídas digitais	54 (das quais 15 são saídas PWM)
Entradas analógicas	16
Corrente máxima da saída digital	40 mA
Corrente para o pino de 3,3V	50 mA
Memoria flash	128 KB
Memoria estática de acesso aleatório	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade do clock	16 MHz

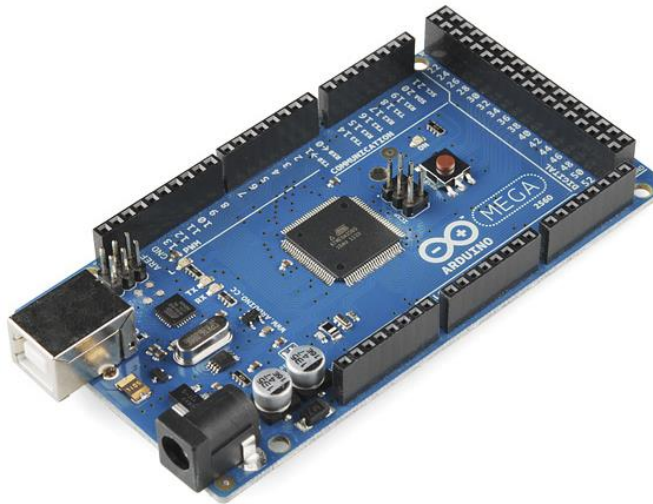


Figura 47- Controlador Arduino Mega

Pelas especificações do controlador percebe-se uma que possui um *clock* de alta velocidade permitindo assim que o mesmo opere realizando uma grande quantidade de cálculos por segundo o que é necessário para uma aplicação desse tipo. Além disso percebe-se que há uma grande quantidade de portas de entradas e saídas disponíveis para serem utilizadas na aquisição dos dados do conversor e da bateria e também para o acionamento do conversor

6.2 - Circuito do conversor

Para montar o circuito do conversor foram utilizados transistores IRF640, que possuem uma capacidade de corrente média de 10 A e uma corrente de pico de 18A. Esses valores são bem superiores aos valores de corrente que serão conduzidos por eles. A tensão V_{ds} máxima dos transistores é de 200V que é superior aos 180V de pico da rede. Os diodos utilizados na ponte retificadora foram diodos 6A6 que suportam até 6 A e um diodo rápido MUR2020 foi utilizado como diodo de roda livre. Para realizar o chaveamento do *Mosfet* foi escolhido um *driver* isolado opticamente do tipo TLP351, de forma a isolar eletricamente o controlador da placa do conversor. O diagrama da placa pode ser visto na figura 37.

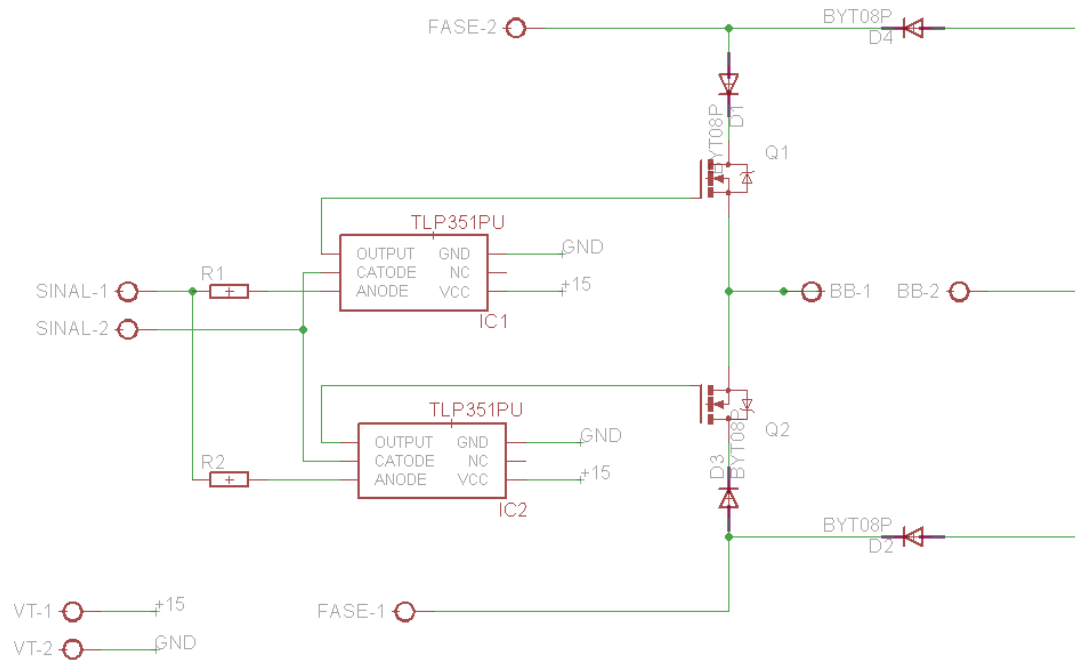


Figura 48 - Circuito da placa do conversor

Entre os terminais BB-1 e BB-2 deve ser colocado o filtro indutivo em série com a bateria e também o diodo de roda livre, como pode ser verificado na figura 48.

6.3 - Teste do conversor

O circuito foi testado em malha aberta para observar o seu bom funcionamento. Neste teste foi utilizado um valor fixo de *duty cycle* no acionamento dos transistores e verificado a resposta do sistema.

A figura 49 mostra a bancada montada para os testes.

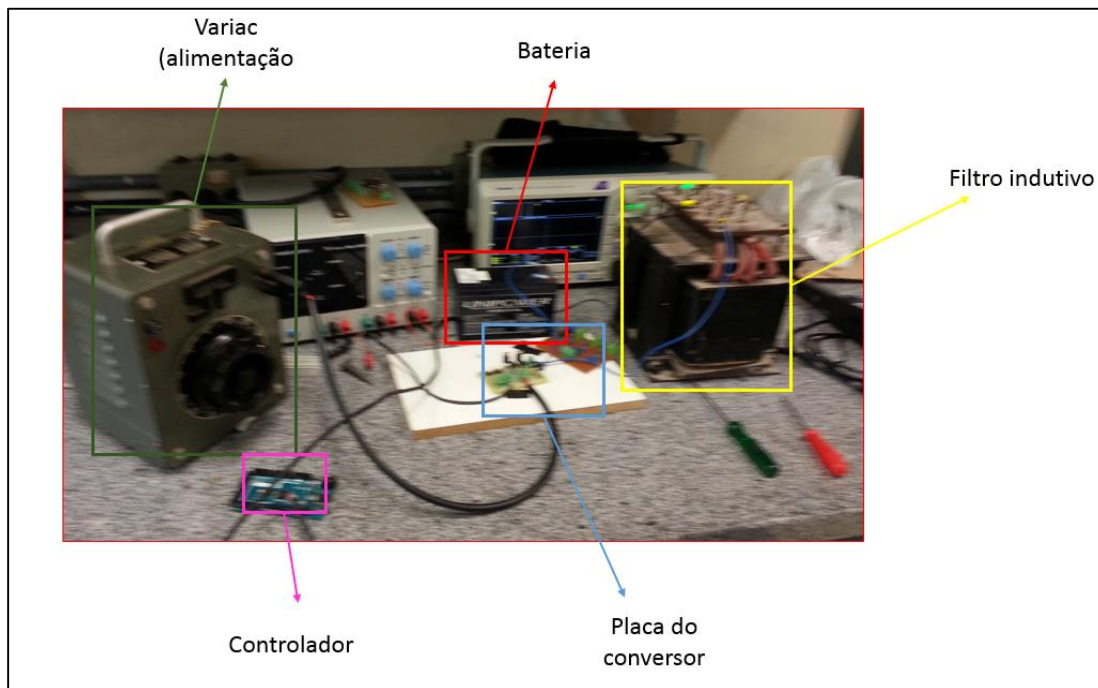


Figura 49- Sistema montado para teste

6.2.1 – Análise do *ripple* de corrente

A primeira verificação a ser realizada é relativa ao *ripple* de corrente. Esta análise foi realizada com uma frequência de chaveamento 20 vezes superior à frequência da rede. A figura 50 mostra a corrente para uma frequência de chaveamento de 1,2kHz.

Observa-se que o valor do *ripple*, 156mA, está bem superior ao valor da simulação. Isso ocorre devido ao núcleo de ferro do indutor não responder bem a chaveamentos de alta frequência. Mesmo a ondulação estando acima do valor simulado, o seu valor é próximo à metade do valor máximo recomendado para a carga da bateria, ou seja, o conversor está apto a realizar a carga da bateria.

Após a verificação do *ripple* em 1,2 kHz, elevou-se a frequência para 5kHz e o comportamento da corrente foi observado. A figura 51 mostra a corrente na nova frequência e a figura 52 mostra apenas o *ripple* da corrente.

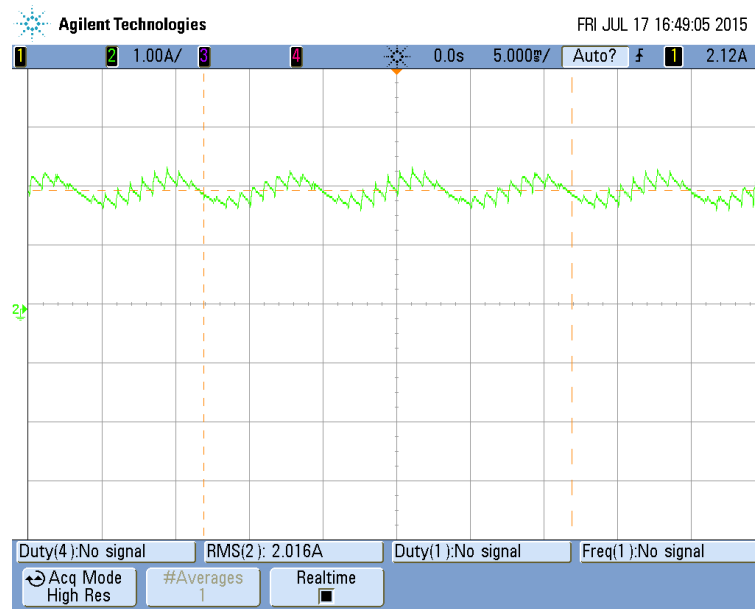


Figura 50 - Corrente de carga da bateria com frequência de chaveamento de 1,2kHz

Observa-se na figura 52 que o *ripple* (133mA) é um pouco menor em relação ao obtido para frequência de chaveamento de 1,2 kHz (156mA). Ainda que relativamente distante do valor simulado (92mA), este valor é adequado para a carga da bateria.

Como o sistema apresentou uma melhor resposta para essa frequência de chaveamento, esta será utilizada nos outros testes, uma vez que esta frequência soma os benefícios de não ter grandes perdas de chaveamento (frequências muito altas) e reduzir o *ripple* de alta frequência na forma de onda da corrente (frequências baixas).

6.2.2 - Análise das formas de onda do sistema

A figura 42 mostra a tensão sobre o transistor durante alguns semi-ciclos da senóide, e percebe-se que o mesmo está chaveando, limitando a passagem de corrente como esperado. Deve-se ressaltar que durante os semi-ciclos complementares, o chaveamento ocorre no outro transistor do circuito. Percebe-se uma grande similaridade entre a figura 53 e a figura 33 na simulação. A figura 55 mostra um *zoom* do mesmo chaveamento para se verificar o funcionamento do sistema.

Percebe-se pela figura 55 que o tempo de condução do diodo é bem reduzido comparado ao período do chaveamento, isso se dá pelo fato da tensão de entrada ser bem maior que a tensão da bateria.

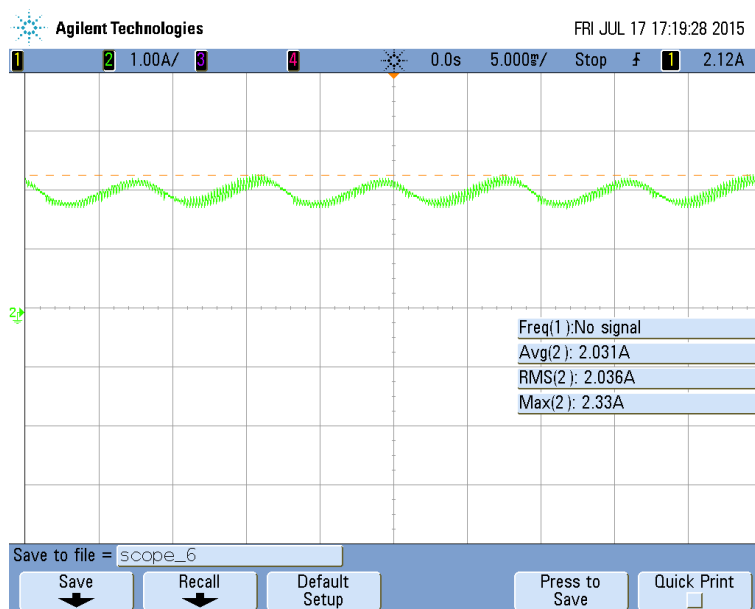


Figura 51 - Corrente de carga da bateria com frequência de chaveamento de 5kHz

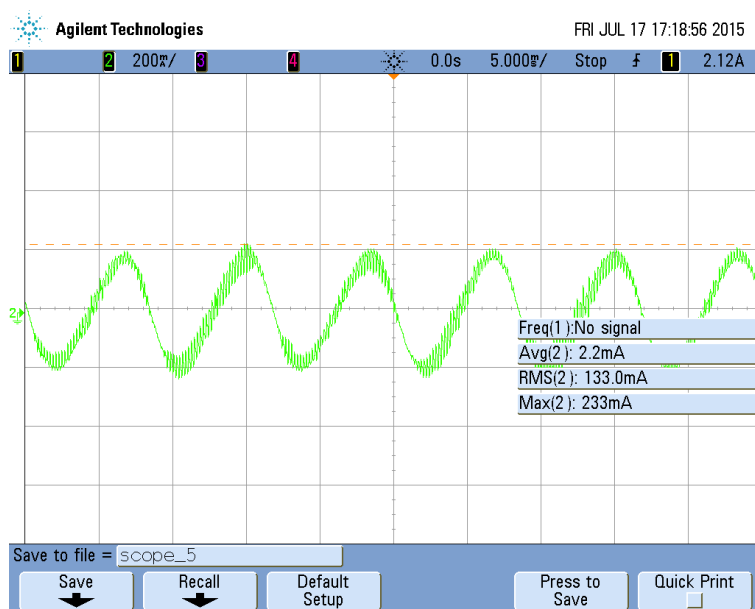


Figura 52 - Ripple da corrente de carga da bateria com frequência de chaveamento de 5kHz

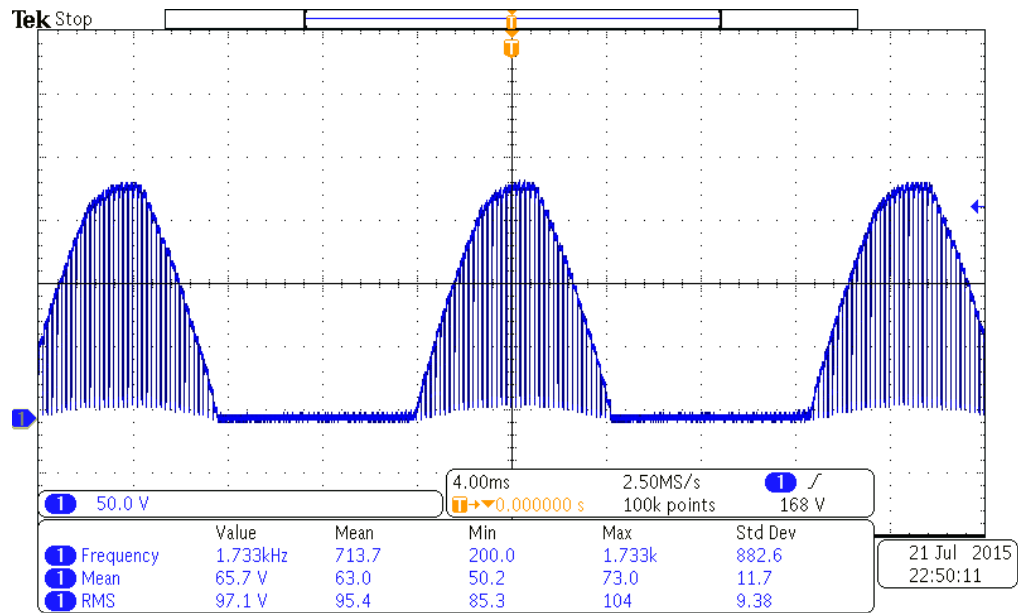


Figura 53 - Tensão sobre o transistor

A figura 55 exibe a tensão sobre o indutor, onde é possível perceber o funcionamento do filtro,. Percebe-se que o indutor apresenta uma tensão negativa, esse fato ocorre no momento que o transistor abre e faz com que a corrente continue circulando pela bateria mesmo não havendo corrente sendo drenada da rede elétrica.

A figura 56 mostra a tensão sobre um dos diodos retificadores e sua atuação sobre um semi-ciclo da senóide.

A figura 57 exibe a tensão sobre a bateria e evidencia o baixo *ripple* sobre a mesma, fato que já era esperado, devido ao baixo valor de ondulação de corrente e baixa resistência interna da bateria. Existe um ruído perceptível na leitura do sistema, como pode ser observado.

Como se pode ver pelas figuras 52 a 57, o circuito do conversor funcionou de forma adequada podendo dessa forma realizar a carga da bateria.

6.3 Teste de carga da bateria

Uma vez verificado o adequado funcionamento do conversor, testou-se a carga da bateria de 7A-h disponível. Para realizar a carga foi utilizado o método de um nível de corrente e um nível de tensão.

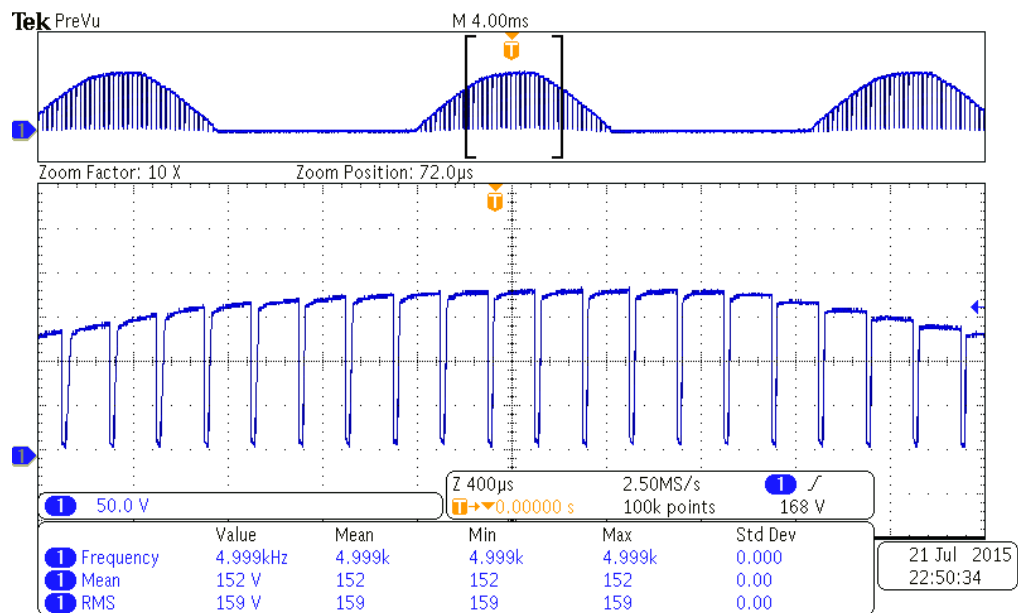


Figura 54 - Tensão sobre o transistor em um menor intervalo de tempo

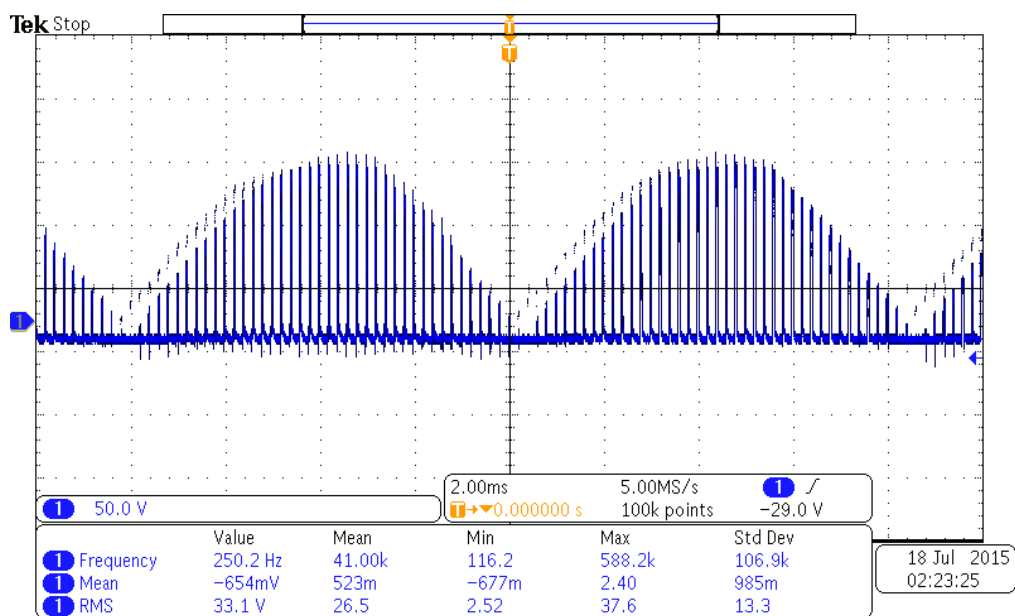


Figura 55- Tensão sobre o filtro indutivo

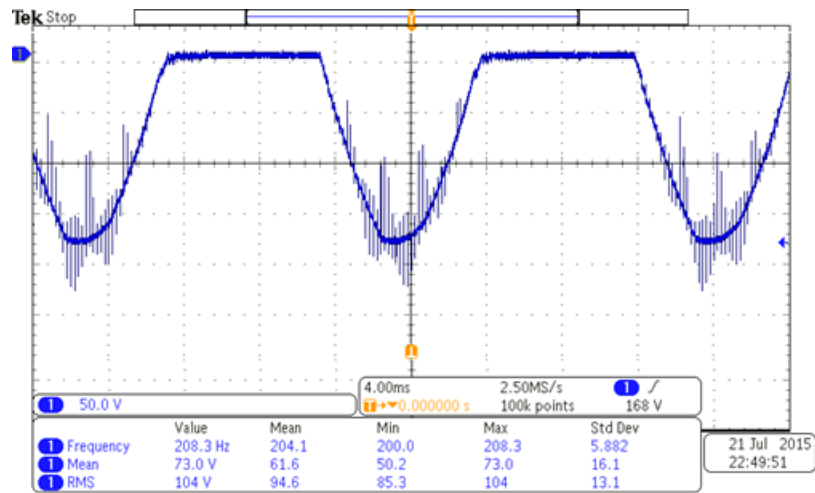


Figura 56 - Tensão sobre um dos diodos de retificação

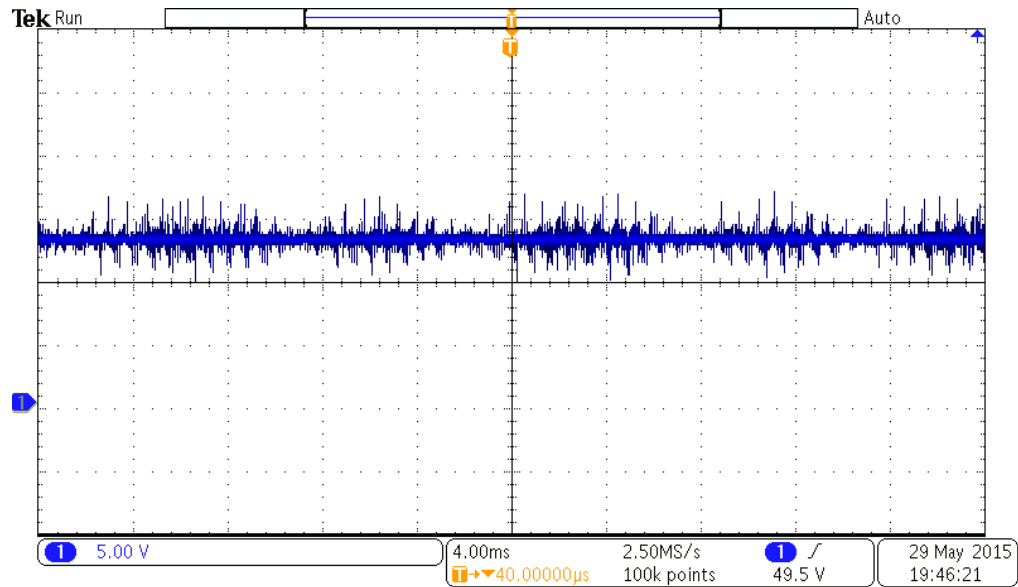


Figura 57 - Tensão sobre a bateria

Segundo os dados fornecidos pelo fabricante da bateria, o valor máximo de corrente de carga contínua é de 2,1 A e a tensão de carga é de 13,8 V. Dessa forma foram esses os valores utilizados de tensão e corrente para se realizar a carga da bateria, sendo adotado 300mA como o valor de corrente mínima, valores menores que estes exercem influência muito pequena para a carga final da bateria.

Outro fato importante é o estado inicial da bateria que foi submetida a um processo de descarga sobre uma resistência de 8Ω até atingir o nível de tensão de 11V.

Após o fim do processo de descarga, a bateria atingiu um valor final de tensão de 12,2V, o que indica que a mesma não está completamente descarregada, porém com um bom nível de descarga.

Utilizando a equação 5 podemos estimar seu SOC em 23.4%

Para realizar o processo de carga foi feito um ensaio em que o valor do *duty cycle* de acionamento dos transistores foi ajustado manualmente a fim de se obter uma resposta de corrente e de tensão adequada.

Para se realizar a medida da tensão na bateria foi utilizado um voltímetro, medindo a tensão sobre seus terminais. A corrente foi medida utilizando um alicate amperímetro na entrada da bateria. Os valores de corrente e tensão durante o processo de carga foram anotados e mostrados na tabela 2

A figura 58 mostra de forma gráfica os valores da tabela 2.

Tabela 2- Resultados do processo de carga da bateria

Corrente (A)	Tensão (V)	Tempo (min)
0	12,2	0
1,9	13,64	1
2	13,68	4
2	13,81	6
1,62	13,81	10
1,5	13,82	11
1,4	13,82	12
1,3	13,82	13
1,2	13,82	14
1,1	13,82	15
1	13,83	16
0,9	13,83	18
0,8	13,83	21
0,7	13,83	30
0,74	13,83	47
0,7	13,83	67
0,6	13,84	87
0,5	13,84	104
0,4	13,84	122
0,3	13,84	162

Analisando a tabela 2, percebe-se que a carga começou com o modo de corrente constante e permaneceu nela por cerca de 6 min. Logo após, o valor da tensão de equalização foi atingido e se passou ao modo de tensão constante, onde a tensão permaneceu constante e a corrente sofreu queda, permanecendo assim até o fim do processo de carga.

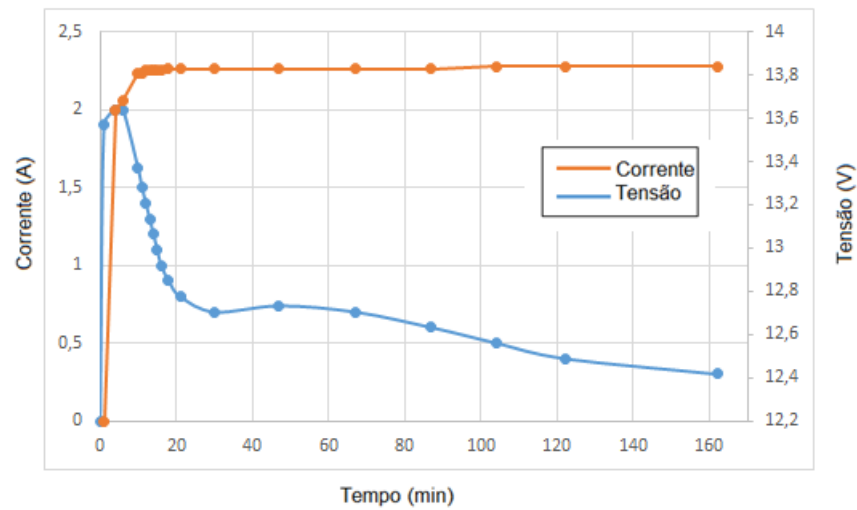


Figura 58 - Resultado do processo de carga

Observa-se o processo de carga ocorreu de maneira bem-sucedida e que a figura 47 está de acordo com as curvas que podem ser encontradas na literatura.

O processo de carga durou quase 3h, e após um tempo de repouso sem carga, a bateria apresentou uma tensão de 13,1V, o que indica que a mesma estava com a carga completa e com um SOC calculado pela equação 5 acima de 100%.

7 - Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um conversor CA-CC para realizar a carga de uma bateria chumbo ácido a partir da alimentação da rede elétrica com tensão de 127V e frequência de 60Hz. Foi utilizado um método de chaveamento da tensão e corrente da alimentação para adequar estes valores na bateria de forma a não a danificar e aumentar a sua vida útil.

Inicialmente foi realizado um estudo sobre o comportamento e funcionamento das baterias do tipo chumbo-ácido que são fatores fundamentais para se conseguir uma carga eficiente da mesma. Também foram estudadas as técnicas de carga mais comuns da bibliografia e determinado os parâmetros para se fazer a carga das baterias disponíveis.

Um estudo sobre os tipos de conversores CA-CC e CC-CC não isolados foi apresentado e um modelo de conversor CA-CC para se realizar a carga da bateria diretamente da alimentação da rede elétrica sem utilizar conversores anteriores foi definido, a fim de aumentar a eficiência do sistema e simplificar o conversor implementado.

Os resultados da simulação de controle mostraram que é possível realizar o controle desse sistema utilizando um controlador PI, porém não foi possível realizar a implementação prática do mesmo para poder fazer a validação prática das simulações.

Foi desenvolvido um protótipo para realizar a carga da bateria de chumbo ácido de 7A-h. O protótipo do conversor funcionou de acordo com o esperado e apresentou em sua saída valores de tensão e de corrente adequados para se realizar a carga da bateria, dentro dos parâmetros estabelecidos. Dados gráficos com a carga da bateria foram exibidos e estavam em concordância com a literatura.

Os resultados práticos se mostraram próximos aos resultados da simulação, com exceção do *ripple* de corrente que no caso prático foi levemente superior aos valores simulados, mas ainda assim dentro de valores seguros para se realizar a carga da bateria. Essa diferença se deu devido ao fato do núcleo de ferro do indutor utilizado não responder bem na frequência de chaveamento necessária para o conversor. Um dos modos de tentar obter uma resposta mais próxima nesse fator seria utilizar um indutor de núcleo de ferrite.

7.1 Proposta de continuidade

Como sugestão para melhorias deste trabalho e trabalhos futuros relacionados, tem-se os seguintes tópicos:

- Utilizar um filtro indutivo de núcleo de ferrite e observar uma maior similaridade entre a corrente simulada e os valores obtidos na prática
- Desenvolver um protótipo que consiga realizar a carga da bateria de tração do veículo disponível

no departamento.

-Fazer a implementação pratica do controle do conversor para que o mesmo realize a carga da bateria de forma autônoma.

- Realizar uma análise da eficiência do conversor e de seu fator de potência.

Referências

- [1] PIKE RESEARCH; **“Electric Market Vehicle Forecast”**, disponível em : < <http://www.navigantresearch.com/research/electric-vehicle-market-forecasts>>
- [2] COELHO, K. D.; **“Estudo de uma Fonte Ininterrupta de Corrente Contínua de Baixa Potência Gerenciada por um microcontrolador”** Dissertação de Mestrado, PPGEE- UFSC, 2001.
- [3] LAZZARIN, T. B.; **“Estudo e Implementação de um Carregador de Baterias com uma Técnica de Avaliação de sua Vida Útil”**. Dissertação de Mestrado, PPGEE- UFSC, 2006
- [4] JUNIOR, E. M. S.; **“Sistema Fotovoltaico para Iluminação Pública em Horário de Ponte”**. Dissertação de Mestrado, UFC, 2004
- [5]. LINDEN, D.; REDDY, T. B.; **Handbook of Batteries**. 3 ed. New York, McGraw-Hill, 2002
- [6]. DAMLUDE, I.; ROSKILD. **“Analysis and Interpretation of AC-Measurements on Batteries used to assess State-of-Health and Capacity Condition”**. In: Telecommunication Energy Conference – INTELEC 17th International, 1995. Proceedings of INTELEC 95 pp.828-833
- [7]. IEEE STD 1188-1996; **“IEEE Recommended Practice for Maintenance, Testing and Replacement of Valve Regulated Lead-Acid (VRLA) Batteries for Stationary Applications”**. IEEE Std 1188-1996 16p.
- [8]. WOODBANK COMMUNICATIONS, disponível em < <http://www.mpoweruk.com/life.htm>>
- [9]. DENKER, J, **“Lead-Acid Battery : Principles of Operation”**, disponível em < <http://www.av8n.com/physics/lead-acid.htm> />
- [10] MACAN, D. A.; **“Desenvolvimento de um carregador de baterias embarcado em Veículo Elétrico”**. Trabalho de Conclusão de Curso, USP, 2013.
- [11] KIEHNE, H.A.; **“Batteries Fundamentals and Theory, Running Techniques Outlook”** Expert Verlag, Ehningen bei boblingen, Germany, Ch 3, pp 67-82 and 301-302, 1989.
- [12]. AYLOR, J. H.; THIEME, A.; JOHNSO, B. W. ; **“A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs. Industrial Electronics”**, IEEE Transactions on, v. 39, n. 5, p. 398-409, 1992.
- [13] NG, K.-S. et al.; **“State-of-Charge Estimation for Lead-Acid Batteries Based on Dynamic Open-Circuit Voltage”** Power and Energy Conference, IEEE 2nd International, p. 972-976, 2008. NORTHCO
- [14] UNITRODE INC., **“U-510 Using the bq2031 to Charge Lead-Acid Batteries”**, Application Note. www.ti.com, 2005.

[15] Emerson, N. P.; “**Effects of AC Ripple Current on VRLA Battery Life**”, disponível em: <<http://www.emersonnetworkpower.com/documentation/enus/brands/liebert/documents/white%20papers/effects%20of%20ac%20ripple%20current%20on%20vrla%20battery%20life.pdf>>

[16] POMILIO, J. A. **Eletrônica de Potência**. Ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.

[17] BIANCO, H. S. D., Otani, H., & Quini, R. A. (2005). “**Determinação de filtro indutivo de corrente contínua para retificadores controlados.**” FIEL - Faculdades Integradas Einstein de Limeira, Limeira, SP

[18] RASHID, M. H. (1999). **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books.