

MILIANO FERNANDES DE OLIVEIRA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE
OS CONVERSORES BOOST E BUCK-BOOST**

JOINVILLE, 2014

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA,
CAMPUS JOINVILLE
CURSO MECATRÔNICA INDUSTRIAL**

MILIANO FERNANDES DE OLIVEIRA JUNIOR

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE
OS CONVERSORES BOOST E BUCK-BOOST**

**Submetido ao Instituto Federal
de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina
como parte dos requisitos de
obtenção do título de Tecnólogo
em Mecatrônica Industrial.**

**Orientador: Luis Sérgio Barros
Marques, Dr.**

JOINVILLE, 2014

Junior, Miliano Fernandes de Oliveira.

Análise Comparativa entre os conversores Boost e Buck-Boost. Junior, Miliano Fernandes de Oliveira. – Joinville: Instituto Federal de Santa Catarina, 2013. 71f.

Trabalho de Conclusão de Curso-Instituto Federal de Santa Catarina, 2013. Graduação. Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial. Modalidade: Presencial.

Orientador: Luis Sérgio Barros Marques, Dr.

1. Análise 2.Comparativa 3.Conversores

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CONVERSORES BOOST E BUCK-BOOST

MILIANO FERNANDES DE OLIVEIRA JUNIOR

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Tecnólogo em Mecatrônica Industrial e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Mecatrônica Industrial do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Joinville, 8 de Julho de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Luis Sérgio Barros Marques, Dr.
Orientador

Prof. Jorge Guedes, M. Sc.
Avaliador

Prof. Luis Mariano Nodari, M. Sc.
Avaliador

RESUMO

Este trabalho tem como tema os conversores de potência cc-cc Boost e Buck-Boost. Uma análise comparativa dos conversores é realizada em relação ao aumento da tensão, os esforços sobre os interruptores e respectivas eficiências. O trabalho apresenta o funcionamento dos conversores Boost e Buck-Boost, as equações que descrevem os circuitos os conversores operando em modo contínuo, dimensionamento dos elementos que compõe os circuitos e projeto físico dos indutores. Através de simulação em software é verificado as formas de ondas e comparado com testes práticos os esforços sobre os interruptores e a eficiência dos dois conversores.

Palavras-chave: Eletrônica de Potência; Conversor Boost; Conversor Buck-Boost.

ABSTRACT

This work has as its theme the power converters dc-dc Boost and Buck-Boost. A comparative analysis the converters is performed to ratio the rise of the voltage, efforts on the switches and his efficiencies. The work presents the functioning of converters Boost and Buck-Boost, the equations that describe the circuits of converters operating in continuous mode, scaling of elements that comprises circuits and physical design of the inductors. Through software simulation is verified the waveforms and compared with practical testing, efforts the switches and the efficiency of the two converters.

Keywords: Power Electronics, Converter Boost, Buck-Boost Converter.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Característica tensão e corrente de um diodo | 16 |
| Figura 2 - Símbolo do Transistor NPN..... | 17 |
| Figura 3 - Símbolo de um MOSFET de potência canal N. | 18 |
| Figura 4 - Modos de operação de um capacitor..... | 19 |
| Figura 5 - Símbolo do indutor. | 20 |
| Figura 6 - a) PWM com ciclo de trabalho de 50%; b) PWM com ciclo de trabalho de 75%. | 22 |
| Figura 7 - Topologia do conversor Boost..... | 24 |
| Figura 8 - Circuito equivalente do conversor CC-CC Boost quando T opera como chave fechada..... | 25 |
| Figura 9 - Circuito equivalente do conversor CC-CC Boost quando T opera como chave aberta. | 25 |
| Figura 10 -Principais formas de ondas em MCC..... | 27 |
| Figura 11- Ganho de tensão. | 28 |
| Figura 12 - Ganho de corrente..... | 29 |
| Figura 13 - Ondulação da corrente no indutor..... | 30 |
| Figura 14 - Circuito equivalente do conversor Buck-Boost quando o transistor está conduzindo. | 33 |
| Figura 15 - Circuito equivalente do conversor Buck-Boost quando o transistor não está conduzindo. | 34 |
| Figura 16 - Principais formas de ondas em MCC..... | 36 |
| Figura 17 - Ganho de tensão. | 37 |
| Figura 18 - Ganho de corrente..... | 38 |
| Figura 19 - Ondulação da corrente no indutor Buck-Boost | 39 |
| Figura 20 - Simulação do Conversor Boost..... | 47 |
| Figura 21 - Tensões no conversor Boost..... | 48 |
| Figura 22 - Corrente no conversor Boost. | 50 |
| Figura 23 - Simulação do conversor Buck-Boost. | 56 |
| Figura 24 - Simulações das tensões no conversor Buck-Boost. | 57 |
| Figura 25 - Simulações das correntes no conversor Buck-Boost. | 58 |
| Figura 26 - Diagrama funcional..... | 61 |
| Figura 27 - Aplicação para o comando de um MOSFET..... | 62 |
| Figura 28 - Componentes no conversor Boost..... | 62 |
| Figura 29 - Componentes no conversor Buck-Boost..... | 63 |
| Figura 30 - Conversores Boost e Buck-Boost. | 64 |
| Figura 31 - Forma de onda do PWM (5 V/div ; $10\mu\text{s/div}$). | 65 |
| Figura 32 - Tensão no indutor (50 V/div ; $5\mu\text{s/div}$). | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 - Tensão no transistor (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$)..... | 66 |
| Figura 34 - Tensão no diodo (50 V/div ; $5\mu\text{s/div}$)..... | 66 |
| Figura 35 - Tensão de saída (50 V/div ; $50\mu\text{s/div}$)..... | 67 |
| Figura 36 - Forma de onda do PWM (5 V/div ; $10\mu\text{s/div}$). | 68 |
| Figura 37 - Tensão no transistor 50 V/div ; $5\mu\text{s/div}$)..... | 68 |
| Figura 38 - Tensão no Indutor (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$). | 69 |
| Figura 39 - Tensão no Diodo (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$)..... | 69 |
| Figura 40 - Tensão de saída (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$)..... | 70 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Especificações para o conversor Boost. | 42 |
| Tabela 2– Tensões e correntes retiradas do PSIMDEMO. ... | 50 |
| Tabela 3- Tensões e correntes medias na simulação. | 59 |
| Tabela 4 – Tensões no diodo e transistor na simulação. | 60 |
| Tabela 5 – Tensões no diodo e transistor na simulação. | 60 |
| Tabela 6 - Principais dados dos Interruptores..... | 63 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA-CA – Corrente alternada/ Corrente alternada
CC-CC – Corrente Contínua/ Corrente Contínua
CC-CA – Corrente continua/ Corrente alternada
CI – Circuito Integrado
MCC – Modo de Condução Contínua
MCD– Modo de Condução Descontínua
MCL– Modo de Condução Limite
NPN – Negativo/Positivo/Negativo
PNP – Positivo/Negativo/Positivo
 V_C -Tensão no Capacitor
 i_C -Corrente no Capacitor
C-Capacitor
D-Razão ciclica
 t_{on} -Tempo
 T_s - Período
 V_L -Tensão no Indutor
 i_L -Corrente no Indutor
T-Transistor
d-Diodo
 i_d -Corrente no diodo
L-Indutor
R-Resistência
 i_T -Corrente no transistor
 V_{in} -Tensão de entrada
 i_{in} -Corrente de entrada
 i_c -Corrente no Capacitor
 i_o -Corrente na saída
 G_i -Ganho de corrente
 G_v -Ganho de tensão
 W_{on} -Energia quando transistor está aberto
 W_{off} -Energia quando o transistor está fechado
 Δi_L -Variação da corrente
t- Tempo
 I_m -Corrente mínima no indutor
 I_M -Corrente máxima no indutor
 ΔV -Variação da tensão
 P_o -Potência de saída

P_{in} -Potência de entrada
 f -Frequência
 Δi -Variação da corrente
 k_w -Fator de enrolamento
 B_{max} -Densidade do fluxo máximo
 J_{max} -Densidade da corrente
 V_o -Tensão de saída
 μ_0 -Permeabilidade no vácuo

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Objetivo Geral | 14 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 14 |
| 1.3 Justificativa | 14 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 15 |
| 2.1 Eletrônica de Potência | 15 |
| 2.2 Diodos de Potência | 16 |
| 2.3 Transistores de Potência | 17 |
| 2.4 Capacitores e indutores | 18 |
| 2.4.1 O Capacitor de Potência | 18 |
| 2.4.2 Indutor ideal | 20 |
| 2.5 Modulação por Largura de Pulso | 21 |
| 3 ANÁLISE DOS CONVERSORES BOOST E BUCK BOOST. 23 | |
| 3.1 Conversor Elevador de Tensão | 23 |
| 3.1.1 Topologia e Estágios de funcionamento | 23 |
| 3.1.2 Modo de Condução Contínua | 24 |
| 3.1.2.1 Estágios de operação | 24 |
| 3.1.2.2 Formas de onda básicas | 26 |
| 3.1.2.3 Ganho Estático Ideal | 27 |
| 3.1.2.4 Ondulação de Corrente no Indutor | 30 |
| 3.2 Conversor CC-CC Elevador e Abaixador de Tensão | 32 |
| 3.2.1 Modo de Condução Contínua (MCC) | 33 |
| 3.2.1.1 Estágios de operação | 33 |
| 3.2.1.2 Formas de onda básicas | 35 |
| 3.2.1.3 Ganho Estático Ideal | 36 |
| 3.2.1.4 Ondulação de Corrente dos Indutores | 38 |
| 4 PROJETO DOS CONVERSORES BOOST E BUCK-BOOST 42 | |
| 4.1 Conversor Boost | 42 |
| 4.2.1 Projeto Físico para o Indutor | 44 |
| 4.2.2 Simulação do conversor Boost | 47 |
| 4.3.3 Conversor Buck-Boost | 50 |
| 4.3.4 Projeto Físico para o Indutor do conversor Buck-Boost | 53 |
| 4.3.5 Simulação do conversor Buck-Boost | 55 |
| 4.4 Comparações entre os Conversores Simulados | 59 |
| 4.5 Circuito de comando SG3524 | 60 |
| 4.6 Escolha dos componentes | 62 |
| 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS PRÁTICOS | 64 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1 Resultados Práticos para o Conversor Boost | 64 |
| 5.1.4 Eficiência do conversor Boost | 67 |
| 5.2 Resultados Práticos para o Conversor Buck-Boost..... | 67 |
| 5.2.4 Eficiência do Conversor Buck-Boost | 70 |
| 5.3 Comparações entre os conversores Boost e Buck-Boost | 70 |
| 5.4 Dificuldades encontradas no projeto..... | 70 |
| 6 CONCLUSÕES | 73 |
| 7 REFERÊNCIAS..... | 74 |
| 8 BLIBLIOGRÁFIA COMPLEMENTAR | 75 |

1 INTRODUÇÃO

A eletrônica de potência é uma área da engenharia elétrica que está em expansão, principalmente pelo aumento na demanda por aparelhos eletrônicos e o desenvolvimento de novas tecnologias. Do ponto de vista histórico, um dos setores que impulsionaram a eletrônica de potência foram os programas espaciais. Devido à necessidade de equipamentos mais compactos, foram criadas diversas topologias de conversores estáticos, simultaneamente foram desenvolvidos dispositivos eletrônicos mais eficientes no chaveamento de elevadas correntes e suas tensões, uma gama maior de equipamentos de potência pôde ser produzida com um menor tamanho, maior qualidade e confiabilidade. As aplicações estão presentes em diversas áreas, seja no acionamento de motores de corrente contínua (cc-cc) na indústria ou em fontes de alimentação para aparelhos domésticos ou comerciais como computadores e celulares.

Os circuitos na eletrônica de potência também chamados de conversores estáticos são classificados de acordo com seu modo de operação, os principais são: ca-ca, cc-cc, cc-ca e ca-ca. Os conversores cc-cc apresentam diferentes topologias. Serão abordados neste material os conversores Boost e Buck-Boost.

O conversor Boost eleva a tensão em relação à fonte de entrada. O conversor Buck-Boost eleva ou abaixa a tensão em relação à fonte de entrada. O objetivo geral é avaliar o comportamento comum desses conversores, ou seja, quando estão elevando a tensão.

A escolha dos conversores Boost e Buck-Boost se faz por sua simplicidade de projeto, ótimo rendimento e baixo custo. De acordo com estudos realizados (J. A. Pomilio, 2007, p.3-1) o conversor Boost também pode ser aplicado com Pré-regulador de Fator de Potência.

Os capítulos serão estruturados para que possam proporcionar melhor entendimento, (Capítulo 1) introdução, (Capítulo 2) revisão bibliográfica, (Capítulo 3) Análise dos conversores, (Capítulo 4) Dimensionamento dos conversores e simulação, (Capítulo 5) Análise dos resultados práticos e (Capítulo 6) conclusão.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo de analisar os conversores Boost e Buck-Boost com relação ao valor médio de corrente e tensão, formas de onda, comportamento dos elementos reativos, comparando os resultados como esforços nos interruptores e eficiência dos conversores, estabelecendo uma referência didática para trabalhos futuros.

1.2 Objetivos Específicos

- Conhecer o funcionamento dos conversores Boost e Buck-Boost;
- Determinar as equações que descrevem os circuitos;
- Fazer uma análise das formas de ondas através de equações e simulação;
- Verificar através de testes práticos os resultados teóricos obtidos para os conversores.

1.4 Justificativa

Os dispositivos semicondutores para o controle dos conversores são constituídos de silício que é abundante na natureza, tendo baixo custo, pequeno porte e considerável eficiência. Se dimensionarmos da maneira correta os componentes do circuito é possível obter rendimentos elevados, também é possível empregar novas tecnologias.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será realizado o levantamento bibliográfico dos assuntos mais relevantes de eletrônica de potência servindo de base para o entendimento do trabalho.

2.1 Eletrônica de Potência

O conhecimento teórico acerca do campo elétrico e magnético tem sua aplicação nos dispositivos semicondutores usados em conversores estáticos. Elementos passivos como indutores e capacitores comportam-se de maneira variável conforme a tensão aplicada em seus terminais. Um indutor poder ser uma fonte de corrente se existir densidade magnética armazenada, já um capacitor pode comportar-se como uma fonte de tensão se existir cargas armazenadas em seu campo elétrico. Elementos ativos como transistores podem controlar a energia elétrica disponibilizada na saída, funcionando como uma chave. O diodo é integrado ao circuito possibilitando o fluxo de corrente em um único sentido. Esses dispositivos eletrônicos em um circuito possibilitam o controle de potência.

Conforme Ashfaq Ahmed (2000) eletrônica de potência é:

A eletrônica de potência trata da aplicação de dispositivos semicondutores de potência, como transistores, na conversão e no controle de energia elétrica em níveis altos de potência. (AHMED, 2000, p.14)

Conforme Ivo Barbi, autor de vários livros sobre eletrônica de potência, “A eletrônica de potência pode ser definida como uma ciência aplicada dedicada ao estudo dos conversores estáticos de energia elétrica”. (BARBI, 2000, p. 14)

Os principais conversores de tensão cc-cc são:

- Conversor Buck: abaixa a tensão da fonte;
- Conversor Boost: eleva a tensão da fonte;
- Conversor Buck-Boost: abaixa ou eleva a tensão;
- Conversor Cuk: abaixa ou eleva a tensão da fonte, com inversão de polaridade;

- Conversor Sepic: abaixa ou eleva a tensão da fonte;
- Conversor Zeta; abaixa ou eleva a tensão da fonte.

2.2 Diodos de Potência

Normalmente o material que compõe os diodos de potência é o silício. O diodo é considerado um dipolo sendo um polo ânodo (A) e outro polo cátodo (K). Esses polos possuem uma relação quando polarizados. Se ânodo estiver polarizado em relação ao cátodo o diodo conduz corrente com uma pequena queda de tensão; se o cátodo estiver polarizado em relação ao ânodo o diodo não conduz corrente, funcionando como uma chave aberta.

Diferente dos diodos ideais, os diodos reais apresentam uma resistência interna, conforme a Figura 1. Quando o ânodo está polarizado á uma pequena queda de tensão e quando o diodo está inversamente polarizado ele apresenta uma alta resistência elétrica, apresentando uma pequena corrente de fuga que pode ser desprezada.

Um diodo de potência tem características que o diferem do diodo de junção P e N, pois possuem uma camada extra N, de baixa dopagem que aumenta sua resistência em elevadas tensões. Dependendo da aplicação é necessário escolher um diodo que tenha uma recuperação rápida ou ultrarápida para suportar frequências elevadas.

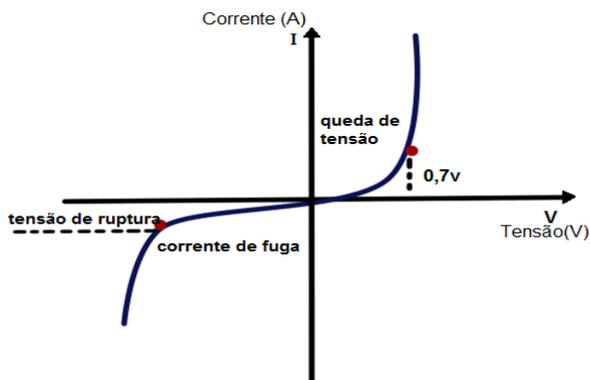


Figura 1- Característica tensão e corrente de um diodo

2.3 Transistores de Potência

Um dispositivo usado para o controle do fluxo de potência de maneira eficiente em altas tensões são os transistores de potência, que normalmente são constituídos com silício, elemento abundante na natureza. O transistor é representado por três terminais: base (B), o coletor (C) e o emissor (E), conforme e apresentado na Figura 2, podendo ser do tipo NPN ou PNP. Essa dopagem invertida possibilita a alteração no sentido da corrente em seus terminais, sendo compatíveis com várias aplicações. As principais aplicações para os transistores são:

- Osciladores;
- Amplificadores;
- Chaveamento de tensões.

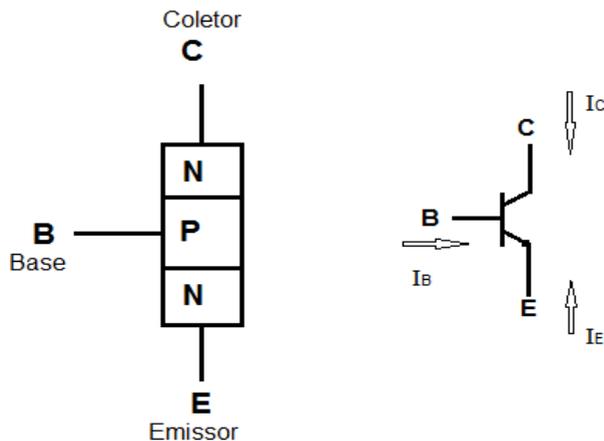


Figura 2- Símbolo do Transistor NPN.

Em eletrônica de potência os transistores comumente são aplicados como chaves, os tipos mais usuais são:

- Bipolar junction transistor- BJT;
- Metal-oxide-semiconductor- MOSEFT;
- Static induction transistor - SIT;
- Insulated-gate bipolar transistor – IGBT.

Conforme Ashfaq Ahmed (2000), as características do MOSEFT são:

É um transistor de chaveamento rápido, caracterizado por uma alta impedância de entrada, apropriado para potências baixas (até alguns quilowatts) e para aplicações de alta frequência (até 100 KHz).(AHMED, 2000, p.71)

O símbolo para um MOSFET de canal N é apresentado na Figura 3 sendo formado por três terminais: a fonte S, o dreno D e a porta G. O controle do fluxo de energia entre o dreno e a fonte é feito por uma tensão aplicada na porta.

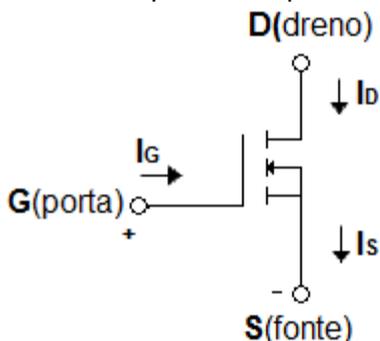


Figura 3-Símbolo de um MOSFET de potência canal N.

2.4 Capacitores e indutores

Os capacitores e os indutores são componentes passivos essenciais para o funcionamento dos conversores de potência.

2.4.1 O Capacitor de Potência

Os capacitores de potência são constituídos por placas equidistantes e separados por um dielétrico, os quais diferem dos capacitores de baixa potência por serem fabricados com dielétrico que suporta um maior estresse em frequências e tensões elevadas.

Os tipos de capacitores existentes caracterizam-se pela

sua constituição dielétrica e seu modo de operar, podendo ser fixa ou variável. Os disponíveis comerciais são capacitores eletrolíticos, cerâmicos, de vidro, de mica, filme plástico e outros.

Quando uma tensão é aplicada nos terminais de um capacitor ideal seu comportamento é descrito da seguinte forma:

- Quando a tensão for constante, o capacitor não armazena energia em seus terminais.
- Quando a tensão for crescente no tempo, a corrente tem o mesmo sentido da tensão e o capacitor armazena energia em suas placas condutoras, seguindo a lei de Coulomb.
- Quando a tensão for decrescente no tempo, a corrente elétrica tem sentido contrário da tensão; a intensidade do campo elétrico diminui e funciona como uma fonte de tensão.

A Figura 4 mostra a relação da corrente com a tensão, sendo possível verificar que a polaridade da tensão não muda apenas a corrente muda a polaridade.

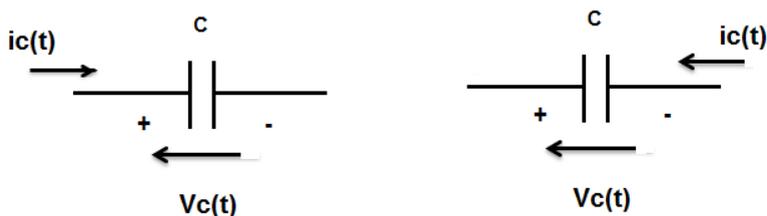


Figura 4-Modos de operação de um capacitor.

As equações para a tensão no capacitor $V_C(t)$ e a corrente no capacitor $i_C(t)$ são apresentadas a seguir:

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) \cdot dt + V_C(0) \quad (1)$$

$$i_C(t) = C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (2)$$

Quando o valor para tensão $V_C(t)$ for constante, o valor para sua derivada é zero e a corrente $i_C(t)$ é nula. A capacitância C é uma característica dos capacitores que armazenam energia nos seus terminais através de um campo elétrico.

2.4.2 Indutor ideal

O indutor é obtido quando um conjunto de espiras forma uma bobina. Geralmente é enrolado em um núcleo de ferrite ou ferrossilício que são materiais ferromagnéticos com propriedades magnéticas adequadas. Dependendo das especificações do projeto é possível construir um indutor com valor fixo ou variável de indutância. A variabilidade é uma característica do indutor que tem o núcleo ajustável sendo possível aumentar ou diminuir o número de espiras, bem como variar a relutância magnética.

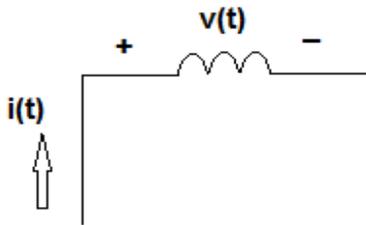


Figura 5-Símbolo do indutor.

Quando uma corrente elétrica percorre o indutor ideal surge um campo magnético e um fluxo magnético que de acordo com a lei da indução eletromagnética de Faraday, a indutância é a constante de proporcionalidade entre a força eletromotriz induzida e a taxa de variação para a corrente. A corrente no indutor possui uma defasagem em relação tensão no mesmo instante de tempo. O indutor possui a característica de se opor a variações bruscas de corrente.

É possível descrever o comportamento do indutor de

acordo com a variação de tensão aplicada em seus terminais:

- Quando a tensão é crescente, o indutor armazena energia através do aumento do fluxo magnético em seu campo magnético;
- Quando a tensão é decrescente o indutor devolve ao circuito a energia armazenada através da corrente elétrica, funcionando como um gerador de corrente;
- Quando não existe variação na corrente o indutor funciona como um curto-circuito.

As equações que descrevem a tensão $V_L(t)$ e a corrente $i_L(t)$ no indutor são:

$$V_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (3)$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t V_L(t) \cdot dt + i_L(0) \quad (4)$$

Quando a fonte de tensão fornece corrente constante, o valor da derivada para a corrente no indutor é nula e, portanto, a tensão sobre o indutor também. O sentido da corrente no indutor que compõem um conversor cc-cc nunca muda, o que muda de sentido é a tensão aplicada em seus terminais..

2.5 Modulação por Largura de Pulso

A técnica de modulação por largura de pulso ou modulação PWM (Pulse Width Modulation) está presente em várias aplicações onde há processamento de energia e controle de potência.

A maneira mais comum para se obter um sinal PWM é através da comparação entre dois sinais. O sinal de referência é uma tensão contínua e constante, e o sinal de portadora de alta frequência forma um sinal dente de serra que tem origem em um oscilador. Os dois sinais são aplicados à entrada de um comparador resultando em uma forma de onda quadrada com

período T_s , frequência e amplitude constante. O controle é realizado sobre a largura de pulso positivo t_{on} , como mostra a Figura 6:

Referência = V_c

Portadora = V_D

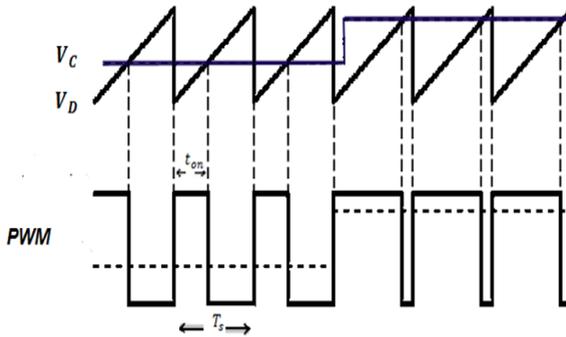


Figura 6- Modulação por largura de pulso.

A razão cíclica D corresponde o tempo t_{on} que o pulso da onda está em alta em relação ao período T_s do sinal.

A equação que define a razão cíclica D é:

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (5)$$

3 ANÁLISE DOS CONVERSORES BOOST E BUCK BOOST

Os conversores cc-cc Boost e Buck-Boost possuem topologias diferentes, mas fazem parte da família dos conversores cc-cc não isolados. O conversor Boost eleva a tensão da saída em relação à entrada e o conversor Buck-Boost eleva ou abaixa a tensão na saída. De acordo com a aplicação é possível trabalhar com três modos de operação: o modo de condução contínuo, modo de condução descontínuo e o modo de condução crítica.

Para efeito de análise do comportamento dos circuitos. Far-se-á as seguintes considerações:

- Os elementos semicondutores são ideais;
- Os conversores operam em modo contínuo;
- A tensão de saída é constante;

3.1 Conversor Elevador de Tensão

O conversor Boost tem como característica topológica um indutor em série com a fonte de alimentação. Esse conversor não possui isolamento elétrico entre a entrada e a saída.

“O conversor Boost é empregado nas alimentações de cargas com características de fonte de tensão contínua a partir de uma fonte de corrente contínua”. (BARBI, 2000, p 111).

3.1.1 Topologia e Estágios de funcionamento

A topologia do conversor Boost é apresentada na Figura 7 sendo composta por elementos funções. O diodo (d) e o transistor (T) formam o circuito de controle de potência, o diodo permite a passagem de corrente $i_d(t)$ em um único sentido que está relacionado com a abertura e fechamento do transistor. O indutor (L) e o capacitor (C) armazenam energia e transferem, sendo que o indutor confere a característica de fonte de corrente à entrada do conversor e o capacitor fonte de tensão à saída do conversor.

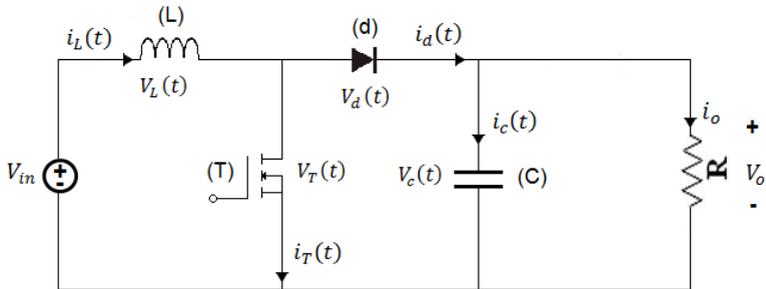


Figura 7- Topologia do conversor Boost.

O funcionamento do conversor Boost possui dois estágios:

Primeiro estágio de funcionamento: A chave está fechada, o indutor armazena energia em seu campo magnético, o diodo não está conduzindo. Com isso o capacitor fornece tensão à resistência (R), a corrente do indutor $i_L(t)$ é igual à corrente no transistor $i_T(t)$ e a corrente no diodo é nula $i_d(t) = 0$.

Segundo estágio de funcionamento: A chave está aberta, o diodo (d) está conduzindo, o indutor (L) funciona como uma fonte de corrente que transfere energia à resistência (R), o capacitor (C) armazena energia em seu campo elétrico, e $i_L(t)$ é igual a $i_d(t)$, $i_T(t)$ é nula.

3.1.2 Modo de Condução Contínua

O modo de condução contínua (MCC) está relacionado com a capacidade de o indutor armazenar energia quando a chave (T) está fechada e fornece continuamente energia quando a chave está aberta, mantendo uma corrente não nula.

3.1.2.1 Estágios de operação

O conversor cc-cc Boost operando em MCC possui dois estágios. No primeiro estágio conforme a Figura 8, o circuito está operando com o transistor (T) em condução, o diodo é inversamente polarizado e opera como um circuito aberto.

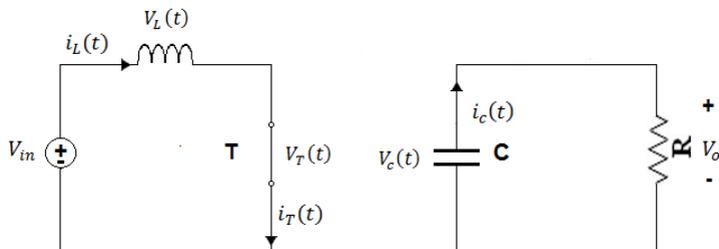


Figura 8 - Circuito equivalente do conversor CC-CC Boost quando T opera como chave fechada.

Analisando o comportamento dos elementos que constituem o circuito do conversor Boost e convertendo através das Leis de Kirchoff no momento em que o transistor conduz, é possível escrever as seguintes equações:

$$V_L(t) = V_{in} \quad (6)$$

$$V_d(t) = -V_o \quad (7)$$

$$V_c(t) = V_o \quad (8)$$

$$i_d(t) = i_c(t) + i_o = 0 \quad (9)$$

$$i_{in}(t) = i_T(t) = i_L(t) \quad (10)$$

No segundo estágio o transistor opera como uma chave aberta e não conduz diretamente, o diodo entra em condução por estar polarizado e o capacitor é carregado. A Figura 9 representa o circuito.

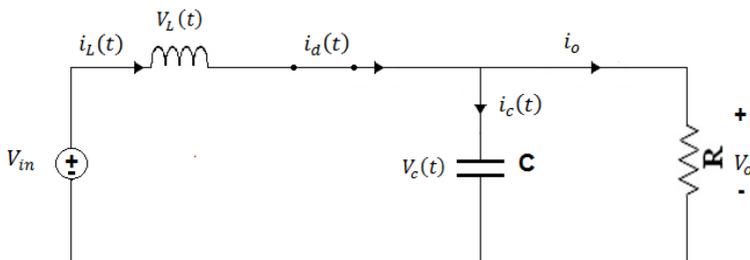


Figura 9 - Circuito equivalente do conversor CC-CC Boost quando T opera como chave aberta.

Analisando o comportamento dos elementos que constituem o circuito e aplicando as Leis de Kirchhoff quando a chave está aberta, é possível escrever as seguintes equações:

$$V_T(t) = V_C(t) = V_o \quad (11)$$

$$V_d(t) = 0 \quad (12)$$

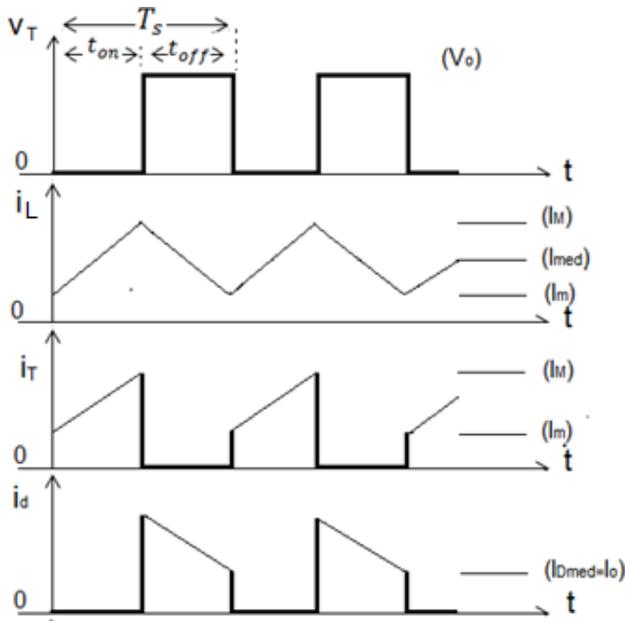
$$V_L(t) = V_{in} - V_o$$

$$i_T(t) = 0 \quad (13)$$

$$i_{in}(t) = i_L(t) = i_d(t) = i_c(t) + I_o \quad (14)$$

3.1.2.2 Formas de onda básicas

As principais formas de ondas em MCC estão representadas na Figura 10:



(continua)

(continuação)

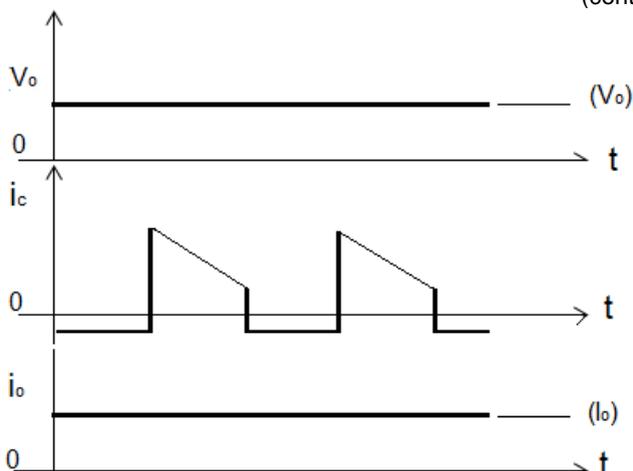


Figura 10 - Principais formas de ondas em MCC.

3.1.2.3 Ganho Estático Ideal

O ganho estático para o conversor cc-cc Boost é em relação a corrente G_i e a tensão G_V sendo que a razão cíclica D permite variar os ganhos. A análise é representada pelas equações abaixo:

Considerando que energia da fonte transferida para a carga quando o transistor está conduzindo é W_{on} e bloqueado é W_{off} :

$$W_{on} = V_{in} \cdot i_L \cdot T_s \quad (15)$$

$$W_{off} = V_o \cdot i_L \cdot t_{off} \quad (16)$$

Uma vez que os componentes do circuito são ideais e não possuem perdas, pode-se escrever que:

$$W_{on} = W_{off} \quad (17)$$

$$V_{in} \cdot i_L \cdot T_s = V_o \cdot i_L \cdot t_{off} \quad (18)$$

Considerando que o período $T_s = t_{on} + t_{off}$ e substituindo na equação anterior:

$$V_{in} \cdot i_L \cdot T_s = V_o \cdot i_L \cdot (T_s - t_{on}) \quad (19)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_s - t_{off}} \quad (20)$$

Sendo que G_V é a relação entre V_o e V_{in} , dividindo por T_s e simplificando com a Equação (5):

$$G_V = \frac{1}{1 - D} \quad (21)$$

Ganho de tensão conforme a Figura 11:

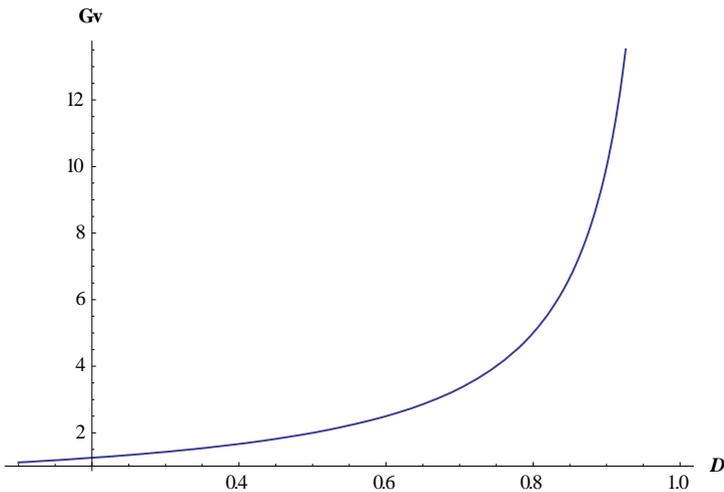


Figura 11- Ganho de tensão.

Considerando de que os componentes são todos ideais permite escrever a equação abaixo:

$$P_{in} = P_o \quad (22)$$

$$V_{in} \cdot i_{in} = V_o \cdot i_o \quad (23)$$

$$\frac{i_{in}}{i_o} = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (24)$$

$$\frac{i_o}{i_{in}} = \frac{V_{in}}{V_o} \quad (25)$$

$$G_i = \frac{i_o}{i_{in}} = 1 - D \quad (26)$$

Ganho de corrente G_i conforme a Figura 12:

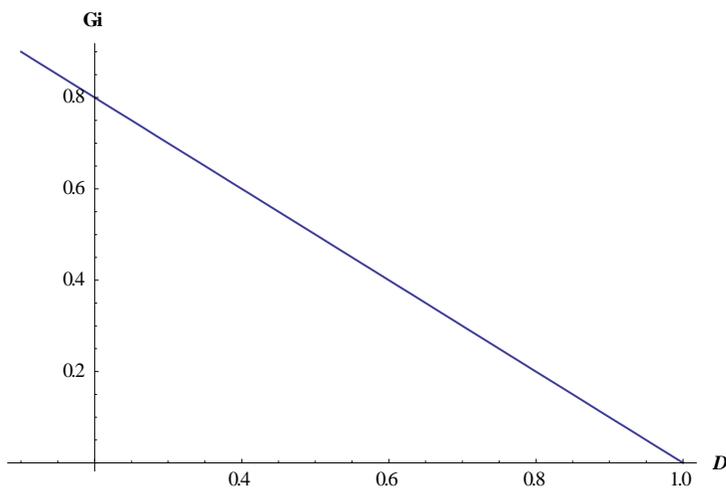


Figura 12 - Ganho de corrente

3.1.2.4 Ondulação de Corrente no Indutor

A Figura 13 mostra a evolução para a corrente no indutor em MCC. Quando a chave está conduzindo a corrente no indutor i_L cresce linearmente (o indutor está armazenando energia através de seu campo magnético), quando a chave bloqueia a corrente decresce linearmente no tempo (o indutor transfere energia para a carga).

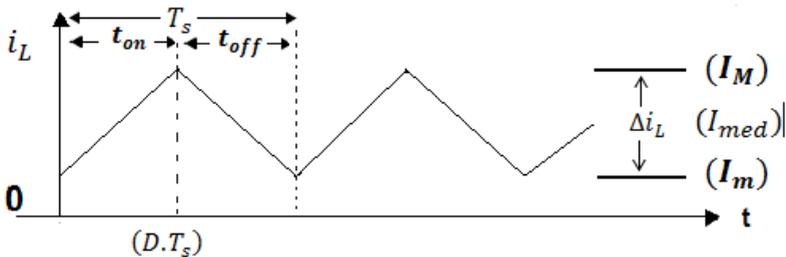


Figura 13 - Ondulação da corrente no indutor.

O equacionamento para variação de corrente Δi_L no indutor, também conhecida por ondulação ou ripple de corrente é iniciado com a equação que representa a corrente no indutor.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t V_{in} \cdot dt + i_L(0) \quad (27)$$

$$i_L(t) = \frac{V_{in}}{L} \cdot t + i_L(0) \quad (28)$$

Considerando que no instante de tempo $t = 0$ a corrente no indutor é mínima $i_L(0) = I_m$, e no instante de tempo $t = D \cdot T_s$ a corrente no indutor é máxima $i_L(D \cdot T_s) = I_M$, se tem:

$$I_M = \frac{V_{in}}{L} \cdot D \cdot T_s + I_m \quad (29)$$

$$I_M - I_m = \frac{V_{in} \cdot D}{L} \cdot T_s \quad (30)$$

Sendo que a frequência é $f = \frac{1}{T_s}$:

$$\Delta i_L = I_M - I_m = \frac{V_{in} \cdot D}{L \cdot f} \quad (31)$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} \quad (32)$$

Para isolarmos os valores I_M , I_m podemos simplificar a partir do valor médio de corrente no indutor, considerando que $i_l = i_{in} = \frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R}$:

$$i_l = \frac{I_M + I_m}{2} \quad (33)$$

$$I_M + I_m = 2 \cdot i_{in} \quad (34)$$

$$I_m = 2 \cdot \frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R} - I_M \quad (35)$$

Substituindo I_m na equação anterior:

$$I_M - \left(2 \cdot \frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R} - I_M \right) = \frac{V_{in} \cdot D}{L \cdot f} \quad (36)$$

$$I_M = V_{in} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot L \cdot f} + \frac{1}{(1-D)^2 \cdot R} \right] \quad (37)$$

Analogamente substituindo I_m :

$$I_m = 2 \cdot \frac{V_{in}}{(1-D)^2 \cdot R} - V_{in} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot L \cdot f} + \frac{1}{(1-D)^2 \cdot R} \right] \quad (38)$$

$$I_m = V_{in} \cdot \left[-\frac{D}{2 \cdot L \cdot f} + \frac{1}{(1-D)^2 \cdot R} \right] \quad (39)$$

O equacionamento do capacitor é a partir da derivada da corrente:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (40)$$

A variação da tensão no capacitor ocorre no primeiro estágio, é possível escrever que $i_c(t_{on}) = i_o$, portanto:

$$i_o = C \cdot \frac{\Delta V}{t_{on}} \quad (41)$$

Substituindo $t_{on} = \frac{D}{f}$ na equação e isolando C :

$$C = \frac{i_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_c} \quad (42)$$

3.2 Conversor CC-CC Elevador e Abaixador de Tensão

Os conversores cc-cc Buck-Boost possui como característica a inversão para a polaridade da tensão de saída e a possibilidade de abaixar ou elevar a tensão em seus terminais de saída. Barbi ressalta:

Assim, caso se deseje controlar o fluxo de energia entre uma fonte de tensão contínua e uma carga com característica de fonte de tensão contínua, deve-se empregar um conversor à acumulação indutiva, também conhecido na literatura como conversor Buck-Boost. (BARBI, 2000, p. 111)

Os modos de operação do conversor Buck-Boost estão relacionados com a capacidade do indutor em fornecer corrente

elétrica para a carga e podem ser construídos de forma a operarem em MCC, MCD e MCL.

A análise dos estágios de funcionamento é descrita para componentes ideais.

3.2.1 Modo de Condução Contínua (MCC)

Quando a corrente elétrica no indutor não se anula em um período T_s , pode dizer-se que o conversor opera em modo de condução contínua (MCC).

3.2.1.1 Estágios de operação

O conversor cc-cc Buck-Boost operando em MCC possui dois estágios. No primeiro estágio, conforme a Figura 14 representa que o circuito está operando com o transistor T conduzindo, o diodo está inversamente polarizado e opera como uma chave aberta, o capacitor fornece energia à carga e o indutor armazena energia.

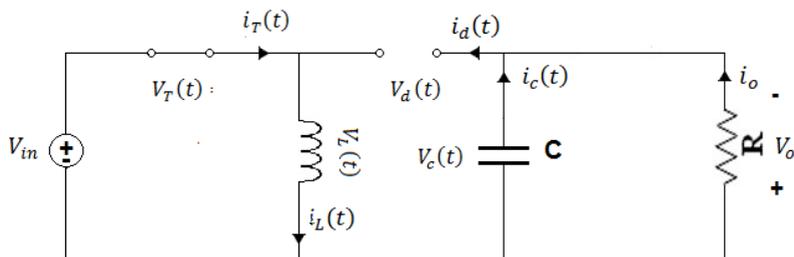


Figura 14 - Circuito equivalente do conversor Buck-Boost quando o transistor está conduzindo.

Analisando o comportamento dos elementos que constituem o circuito do conversor cc-cc Buck-Boost, através das Leis de Kirchhoff, é possível escrever as seguintes relações entre tensões e correntes:

$$i_d(t) = i_c(t) + i_o(t) = 0 \quad (43)$$

$$i_{in}(t) = i_T(t) = i_L(t) \quad (44)$$

$$V_L(t) = V_{in}(t) \quad (45)$$

$$V_d(t) = -V_o - V_{in}(t) \quad (46)$$

$$V_C(t) = V_o(t) \quad (47)$$

No segundo estágio o transistor opera como uma chave aberta e não conduz, o diodo entra em condução por estar diretamente polarizado. O indutor transfere energia e muda sua polaridade. A Figura 15 representa o circuito durante o segundo estágio.

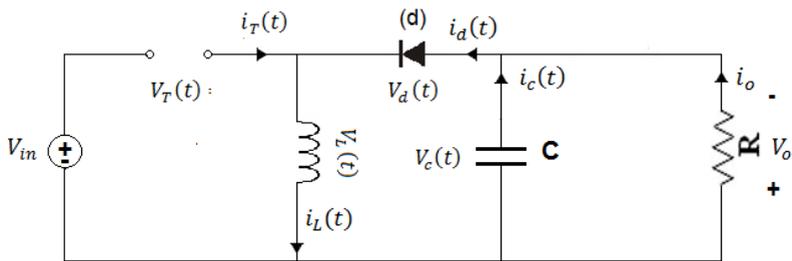


Figura 15 - Circuito equivalente do conversor Buck-Boost quando o transistor não está conduzindo.

Através das Leis de Kirchhoff é possível verificar as seguintes relações entre correntes e tensões:

$$i_T(t) = i_{in}(t) = 0 \quad (48)$$

$$i_d(t) = i_L(t) \quad (49)$$

$$i_c(t) = i_L(t) - i_o \quad (50)$$

$$V_L(t) = V_{in}(t) \quad (51)$$

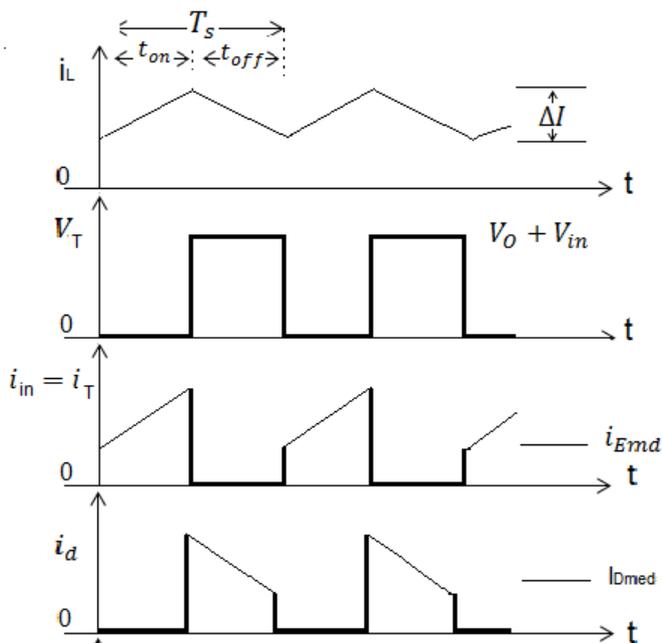
$$V_T(t) = V_o + V_{in}(t) \quad (52)$$

$$V_d(t) = 0 \quad (53)$$

$$V_L(t) = -V_o = -V_C(t) \quad (54)$$

3.2.1.2 Formas de onda básicas

As principais formas de ondas em MCC estão representadas na Figura 16:



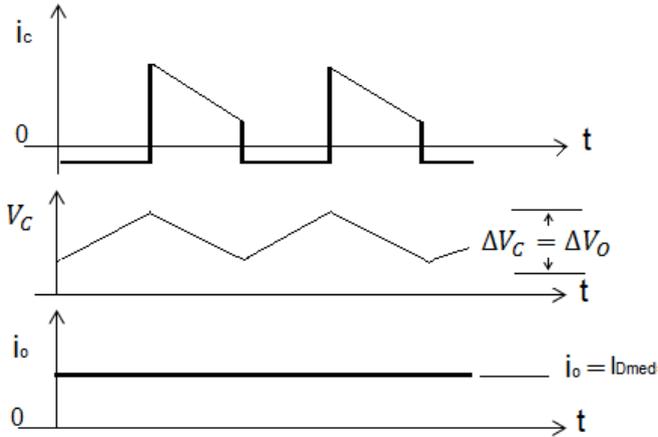


Figura 16 - Principais formas de ondas em MCC.

3.2.1.3 Ganho Estático Ideal

A razão entre a tensão de saída V_o e a tensão da fonte de alimentação V_{in} é denominada como ganho de tensão G_V .

A energia quando o transistor está aberto W_{on} e quando está fechado W_{off} disponibilizado pela fonte são representados pelas equações:

$$W_{on} = V_{in} \cdot i_{in} \cdot t_{on} \quad (55)$$

$$W_{off} = V_o \cdot i_{in} \cdot t_{off} \quad (56)$$

Uma vez que os componentes do circuito são ideais e não tem perdas, podemos descrever:

$$W_{on} = W_{off} \quad (57)$$

$$V_{in} \cdot i_{in} \cdot t_{on} = V_o \cdot i_{in} \cdot t_{off} \quad (58)$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{t_{on}}{t_{off}} \quad (59)$$

Substituindo, $D = \frac{t_{on.}}{T_s}$:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D \cdot T_s}{T_s(1 - D)} \quad (60)$$

$$G_V = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(1 - D)} \quad (61)$$

O Ganho de tensão G_V conforme a Figura 17:

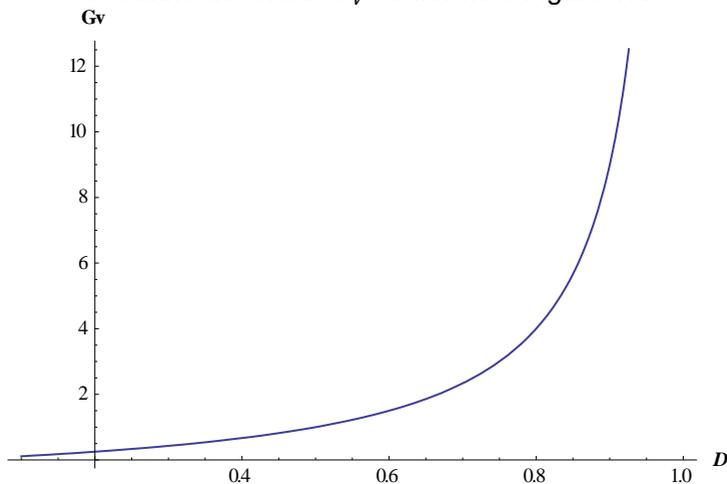


Figura 17 - Ganho de tensão.

É possível dizer que a potência de entrada P_{in} é igual à potência de saída P_o :

$$P_{in} = P_o \quad (62)$$

$$V_{in} \cdot i_{in} = V_o \cdot i_o \quad (63)$$

$$V_{in} \cdot i_{in} = \frac{D \cdot V_{in}}{(1 - D)} \cdot i_o \quad (64)$$

$$G_i = \frac{i_o}{i_{in}} = \frac{1}{D} \quad (65)$$

$$G_i = \frac{1}{D} \quad (66)$$

O Ganho de corrente G_i conforme a Figura 18:

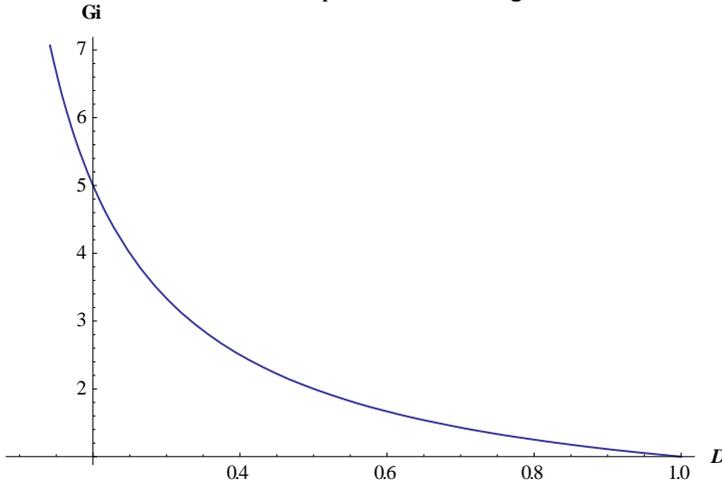


Figura 18 - Ganho de corrente

Através do equacionamento do ganho de corrente e tensão é possível deduzir que a variação de tensão e a corrente está intrinsicamente ligada à razão cíclica D .

3.2.1.4 Ondulação de Corrente dos Indutores

A Figura 19 apresenta o comportamento para a corrente no indutor operando em MCC. Quando a chave está conduzindo a corrente cresce linearmente (o indutor está armazenando energia através de seu campo magnético), quando a chave bloqueia a corrente decresce linearmente no tempo (o indutor transfere energia para a carga).

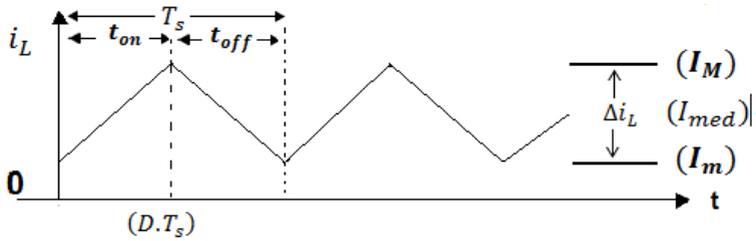


Figura 19 - Ondulação da corrente no indutor Buck-Boost

A sequência de equações descreve a variação da corrente Δi_L no indutor, também conhecida por ondulação de ripple.

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t V_{in} \cdot dt + i_L(0) \quad (67)$$

$$i_L(t) = \frac{V_{in}}{L} \cdot t + i_L(0) \quad (68)$$

Considerando que no instante de tempo $t = 0$ a corrente no indutor é mínima $i_L(0) = I_m$, e no instante de tempo $t = D \cdot T_s$ a corrente no indutor é máxima $i_L(D \cdot T_s) = I_M$, temos:

$$I_M = \frac{V_{in}}{L} \cdot D \cdot T_s + I_m \quad (69)$$

$$I_M - I_m = \frac{V_{in}}{L} \cdot D \cdot T_s \quad (70)$$

Sendo que a frequência é $f = \frac{1}{T_s}$ a forma simplificada é:

$$\Delta i_L = I_M - I_m = \frac{D \cdot V_{in}}{L \cdot f} \quad (71)$$

$$L = \frac{D \cdot V_{in}}{\Delta i_L \cdot f} \quad (72)$$

Para isolar os valores I_M e I_m é possível simplificar a partir

do valor médio de corrente no indutor, considerando que $i_{in} = i_l \cdot D$;

$$i_l = \frac{I_M + I_m}{2} \quad (73)$$

$$i_{in} = \left(\frac{I_M + I_m}{2} \right) \cdot D \quad (74)$$

Considerando que a potência na saída é a mesma da entrada:

$$P_{in} = P_o \quad (75)$$

$$V_{in} \cdot i_{in} = \frac{V_o^2}{R} \quad (76)$$

$$\left(\frac{I_M + I_m}{2} \right) \cdot D \cdot V_{in} = \frac{V_o^2}{R} \quad (77)$$

$$I_M + I_m = \frac{V_o^2 \cdot 2}{R \cdot D \cdot V_{in}} \quad (78)$$

Substituindo V_o :

$$I_M + I_m = \frac{2 \cdot D \cdot V_{in}}{R \cdot (1 - D)^2} \quad (79)$$

Simplificando as equações:

$$I_M = V_{in} \cdot D \left[\frac{1}{R \cdot (1 - D)^2} + \frac{1}{2 \cdot L \cdot f} \right] \quad (80)$$

Analogamente substituindo I_m :

$$I_m = V_{in} \cdot D \left[\frac{1}{R \cdot (1 - D)^2} - \frac{1}{2 \cdot L \cdot f} \right] \quad (81)$$

O mesmo raciocínio demonstrado no conversor Boost onde se obteve a equação do capacitor C é realizada para o conversor Buck-Boost:

$$C = \frac{i_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_c} \quad (82)$$

4 PROJETO DOS CONVERSORES BOOST E BUCK-BOOST

O projeto dos conversores pode ser dividido em circuito de comando e circuito de potência. A seguir, apresenta-se o projeto para o circuito de potência e simulação dos conversores Boost e Buck-Boost, verifica-se os valores de correntes e tensões em simulação, é comparado o rendimento dos dois conversores em simulação, é realizada uma concisa descrição sobre o circuito de comando e conforme os dados obtidos são estipulados os componentes.

4.1 Conversor Boost

Para dimensionar o circuito do conversor Boost é preciso partir de algumas especificações. A Tabela 1 apresenta as especificações para o projeto do conversor:

| Especificações do Projeto | |
|----------------------------------|----------------------------|
| V_{in} | 30V |
| V_o | 100V |
| P_o | 40W |
| f | $50 \cdot 10^3 \text{ Hz}$ |
| Δi | 20% |
| ΔV | 1% |
| k_w | 0.7 |
| B_{max} | 0.4 T |
| J_{max} | 450 A/cm^2 |

Tabela 1- Especificações para o conversor Boost.

De acordo com a tensão de entrada e a tensão de saída é possível calcular a razão cíclica:

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o}$$
$$D = \frac{100 - 30}{100}$$

$$D = 0,7$$

Solução para a corrente de saída:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{40}{100}$$

$$I_o = 0,4 \text{ A}$$

Solução para a corrente de entrada, sendo que potência fornecida na entrada é igual a da saída para componentes ideais:

$$i_{in} = \frac{P_o}{V_{in}}$$

$$i_{in} = \frac{40}{30}$$

$$i_{in} = 1,33 \text{ A}$$

Dimensionamento do resistor de saída:

$$R_o = \frac{V_o}{I_o}$$

$$R_o = \frac{100}{0,4}$$

$$R_o = 250\Omega$$

Com os valores equacionados é possível ter o valor do indutor, considerando a variação da corrente Δi de 20% é uma boa prática para seu dimensionamento:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot \Delta i_L}$$

$$L = \frac{30 \cdot 0,7}{50000 \cdot 0,26}$$

$$L = 1,57 \cdot 10^{-3} H$$

Onde,

$$\Delta i_L = \Delta i \cdot i_{in}$$

É possível verificar que o conversor está conduzindo em modo de condução contínua devido ao fluxo de corrente que é sempre maior do que zero no período em que a chave está aberta, como descreve a equação da indução crítica L_c :

$$L_c = \frac{(1 - D)^2 \cdot D}{f \cdot 2} \cdot R$$

$$L_c = \frac{(1 - 0,7)^2 \cdot 0,7 \cdot 250}{50 \cdot 10^3 \cdot 2}$$

$$L_c = 0,1575 \cdot 10^{-3} H$$

Dimensionamento do capacitor:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_c}$$

$$C = \frac{0,4 \cdot 0,7}{50 \cdot 10^3 \cdot 10}$$

$$C = 5,6 \cdot 10^{-6} F$$

Onde,

$$\Delta V_c = \Delta V \cdot V_o$$

4.2.1 Projeto Físico para o Indutor

Os parâmetros usados neste dimensionamento são da tabela da Thornton, de material IP12 e temperatura Curie > 210 .
Considerando o produto das áreas do núcleo como:

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{pk}^2 \cdot 10^4}{k_w \cdot B_{max} \cdot J_{max}}$$

$$A_e A_w = \frac{1,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1,59^2 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,4 \cdot 450}$$

$$A_e A_w = 0,315 \text{ cm}^4$$

Onde,

$$I_{pk} = i_{in} + 0,4 \cdot \frac{i_{in}}{2}$$

De acordo com a tabela Thornton, o núcleo EE que possui a aproximação das dimensões do produto das áreas $A_e A_w$ é o 30/14, sendo que $A_e = 1,2 \text{ cm}^2$ e $A_w = 0,85 \text{ cm}^2$.

O número de espiras N é verificado na equação:

$$N = \frac{L \cdot I_{pk} \cdot 10^4}{A_e \cdot B_{max}}$$

$$N = \frac{1,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1,59 \cdot 10^4}{1,2 \cdot 0,4}$$

$$N = 52$$

Para que a corrente flua no indutor adequadamente é preciso verificar a secção do condutor S_{cu} na equação:

$$S_{cu} = \frac{I_{in}}{J_{max}}$$

$$S_{cu} = \frac{1,33}{450}$$

$$S_{cu} = 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Cálculo do efeito pelicular Δ é necessário devido à existência de indutâncias para frequências elevadas:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}}$$

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{50 \cdot 10^3}}$$

$$\Delta = 0,034 \text{ cm}$$

Logo o diâmetro máximo D_{max} para que a corrente possa percorrer o condutor sem apresentar perdas devido ao efeito pelicular é:

$$D_{max} = 2 \cdot \Delta$$

$$D_{max} = 0,068 \text{ cm}$$

Então, a área máxima do condutor A_{max} é:

$$A_{max} = \frac{\pi \cdot D_{max}^2}{4}$$

$$A_{max} = \frac{\pi \cdot 0,068^2}{4}$$

$$A_{max} = 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

O fio escolhido é o AWG-22 que tem $S_{cu22} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$, sendo $A_{max} > S_{cu22}$ recomendado para diminuição do efeito pelicular.

Cálculo do entreferro lg :

$$lg = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e \cdot 10^2}{L}$$

$$lg = \frac{49^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}}{1,57 \cdot 10^{-3}}$$

$$l_g = 0,23 \text{ cm}$$

Sendo,

μ_0 = Permeabilidade magnética no vácuo.

Considerando o fator de ocupação razoável abaixo de 0,7, temos a equação:

$$K_u = \frac{N \cdot S_{cu22}}{A_w}$$

$$K_u = \frac{49 \cdot 3,25 \cdot 10^{-3}}{0,85}$$

$$K_u = 0,187$$

4.2.2 Simulação do conversor Boost

A empresa POWERSIM disponibiliza em seu site, o download gratuito do software PSIMDEMO. Apesar de algumas limitações como a utilização de no máximo 34 elementos no circuito e de tempo de simulação, o software foi satisfatório para a aplicação desejada.

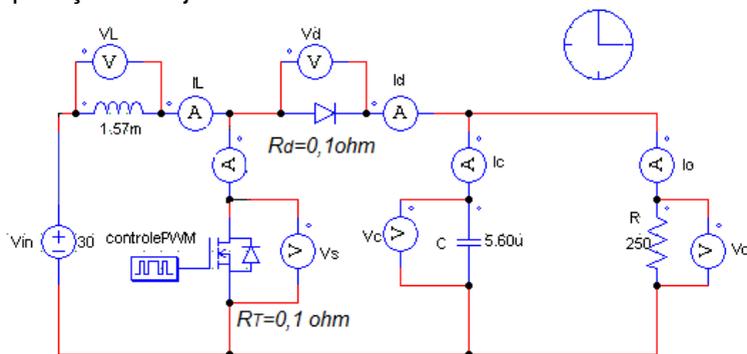


Figura 20 – Circuito utilizado na simulação.

As formas de ondas para as tensões simuladas são apresentadas na Figura 21:

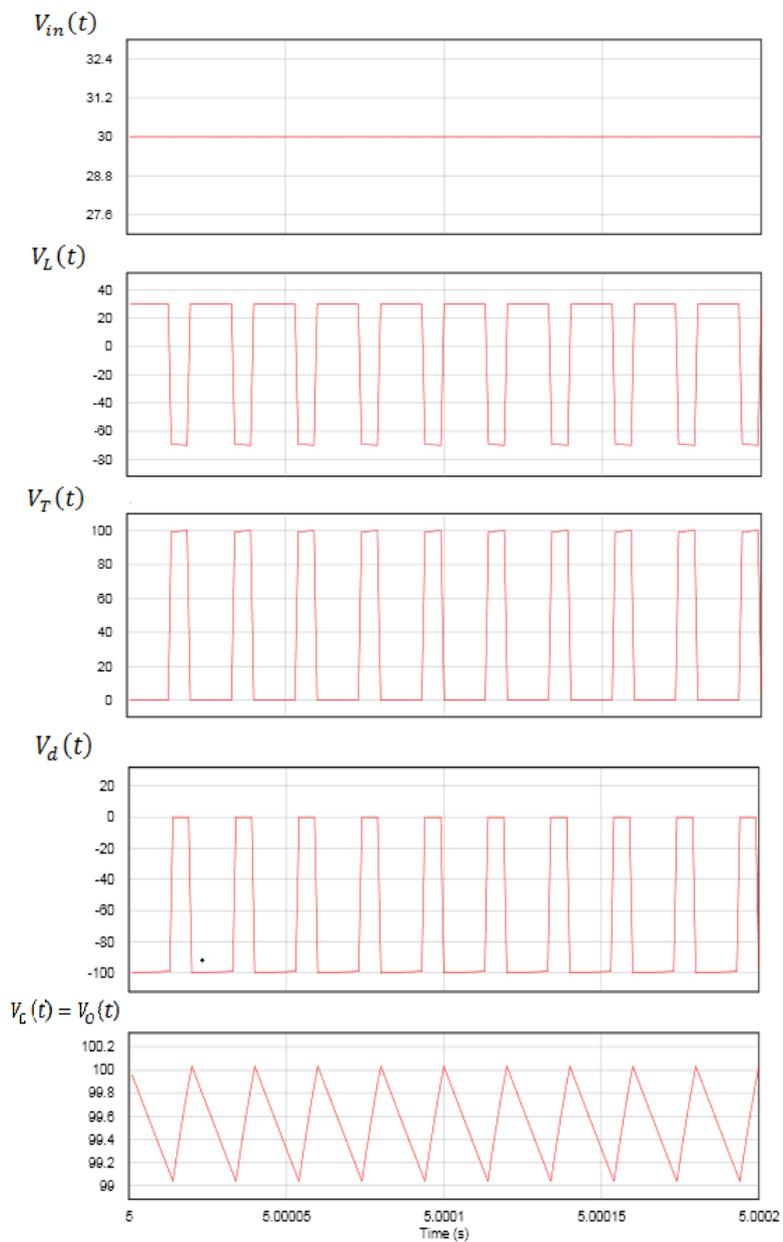
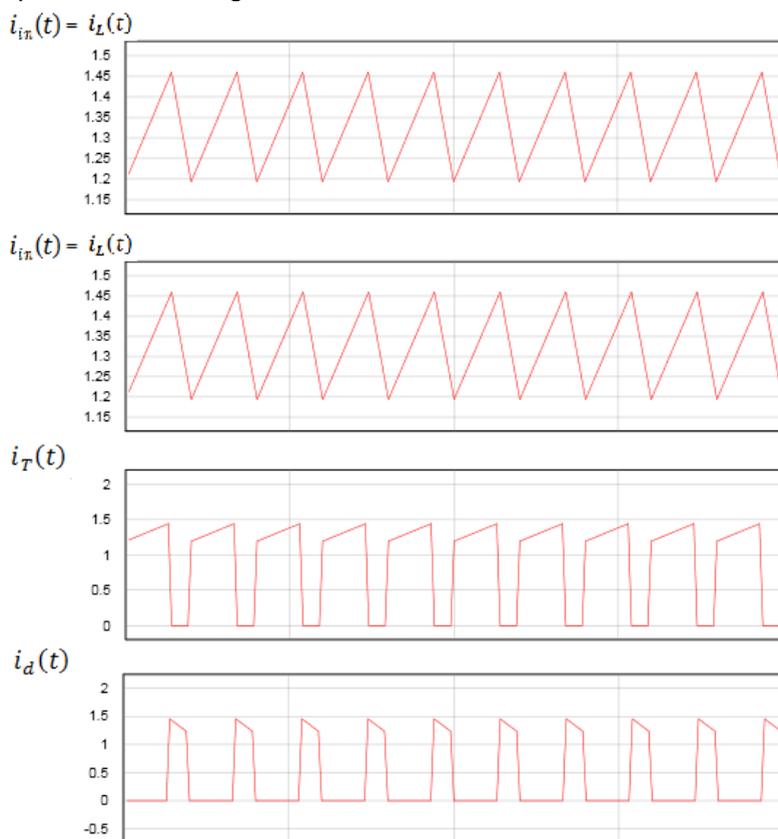


Figura 21 - Tensões no conversor Boost.

As formas de ondas simuladas para as correntes são apresentada na Figura 22:



50

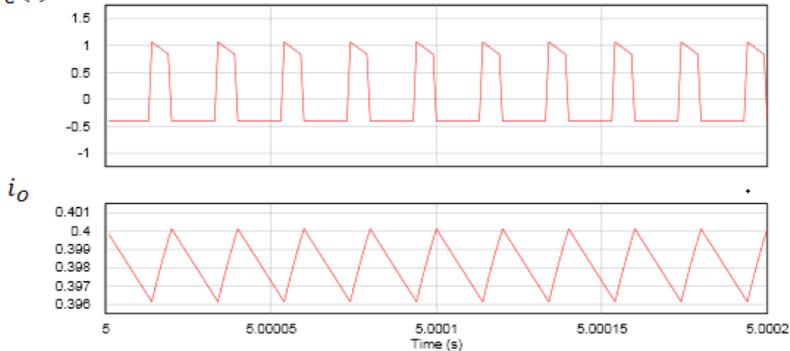
 $i_c(t)$ 

Figura 22– Corrente no conversor Boost.

Alguns resultados para a simulação são apresentados na Tabela 2:

| Tensões e correntes do conversor Boost | |
|---|----------|
| Tensão de média na entrada | 30 V |
| Tensão de média no indutor | 0,025 V |
| Tensão de média no diodo | -69,56 V |
| Tensão de média no transistor | 29,97 V |
| Tensão de média no capacitor | 99,54 V |
| Tensão de média na saída | 99,54 V |
| Corrente média de entrada | 1,327 A |
| Corrente média no indutor | 1,327 A |
| Corrente média no diodo | 0,40 A |
| Corrente média no transistor | 0,92 A |
| Corrente média no capacitor | 0,006 A |
| Corrente média na saída | 0,3981 A |

Tabela 2– Tensões e correntes retiradas do PSIMDEMO.

Os resultados da simulação serão discutidos no subtítulo 4.4 deste capítulo.

4.3.3 Conversor Buck-Boost

Para dimensionar o circuito do conversor Buck-Boost são

descritos os mesmos passos do conversor Boost, tendo as mesmas especificações, conforme a Tabela 1, sendo mais adequado para comparar os resultados.

De acordo com a tensão de entrada e a tensão de saída é possível calcular a razão cíclica necessária para obter a tensão de saída:

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_{in}}$$

$$D = \frac{100}{100 + 30}$$

$$D = 0,769$$

Solução para a corrente de saída:

$$I_o = \frac{P_o}{V_o}$$

$$I_o = \frac{40}{100}$$

$$I_o = 0,4 \text{ A}$$

Solução para a corrente de entrada, sendo que potência fornecida na entrada é igual a da saída:

$$i_{in} = \frac{P_o}{V_{in}}$$

$$i_{in} = \frac{40}{30}$$

$$i_{in} = 1,33 \text{ A}$$

Dimensionamento do resistor de saída:

$$R_o = \frac{V_o}{I_o}$$

$$R_o = \frac{100}{0,4}$$

$$R_o = 250\Omega$$

É necessário estipular um valor para a indutância L considerando o valor da indutância crítica L_c para que o conversor Buck-Boost opere em modo de condução contínua:

$$L_c = \frac{(1 - D)^2 \cdot D}{f_s \cdot 2} \cdot R$$

$$L_c = \frac{(1 - 0,769)^2 \cdot 0,769}{50 \cdot 10^3 \cdot 2} \cdot 250$$

$$L_c = 0,102 \cdot 10^{-3} H$$

Estipulando um valor para a indutância de $L = 2,5 \cdot 10^3 H$, verifica-se que o valor da corrente média no indutor i_{Lmed} :

$$I_M = V_{in} \cdot D \left[\frac{1}{R \cdot (1 - D)^2} + \frac{1}{2 \cdot L \cdot f} \right]$$

$$I_M = 1,82 A$$

$$I_m = V_{in} \cdot D \left[\frac{1}{R \cdot (1 - D)^2} - \frac{1}{2 \cdot L \cdot f} \right]$$

$$I_m = 1,64 A$$

$$i_{Lmed} = \frac{I_m + I_M}{2}$$

$$i_{Lmed} = 1,73 A$$

Com os valores equacionados é possível ter o valor do indutor, considerando a variação da corrente $\Delta i = 20\%$ uma boa prática para seu dimensionamento:

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{f_s \cdot \Delta i_L}$$

$$L = \frac{30 \cdot 0,769}{50000 \cdot 0,2 \cdot 1,73}$$

$$L = 1,33 \cdot 10^{-3} H$$

Dimensionamento do capacitor:

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f_s \cdot \Delta V_c}$$

$$C = \frac{0,4 \cdot 0,769}{50 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 0,01}$$

$$C = 6,152 \cdot 10^{-6} F$$

4.3.4 Projeto Físico para o Indutor do conversor Buck-Boost

Parâmetros usados neste dimensionamento são da tabela da Thornton, de material IP12 e temperatura Curie > 210.

Considerando o produto das áreas do núcleo como:

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{pk}^2 \cdot 10^4}{k_w \cdot B_{max} \cdot J_{max}}$$

$$A_e A_w = \frac{1,33 \cdot 10^{-3} \cdot 1,82^2 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,4 \cdot 450}$$

$$A_e A_w = 0,351 \text{ cm}^4$$

De acordo com a tabela Thornton, o núcleo EE que possui a aproximação das dimensões do produto das áreas $A_e A_w$ é o 30/14, sendo que $A_e = 1.2 \text{ cm}^2$ e $A_w = 0.85 \text{ cm}^2$.

O número de espiras N é verificado na equação:

$$N = \frac{L \cdot I_{pk} \cdot 10^4}{A_e \cdot B_{max}}$$

$$N = \frac{1,33 \cdot 10^{-3} \cdot 1,82 \cdot 10^4}{1,2 \cdot 0,4}$$

$$N = 51$$

Para que a corrente flua no indutor adequadamente é preciso verificar a secção do condutor S_{cu} na equação:

$$S_{cu} = \frac{I_{in}}{J_{max}}$$

$$S_{cu} = \frac{1,33}{450}$$

$$S_{cu} = 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

Cálculo do efeito pelicular Δ :

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}}$$

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{50 \cdot 10^3}}$$

$$\Delta = 0,034 \text{ cm}$$

Logo o diâmetro máximo D_{max} é:

$$D_{max} = 2 \cdot \Delta$$

$$D_{max} = 0,068 \text{ cm}$$

Então, a área máxima do condutor A_{max} é:

$$A_{max} = \frac{\pi \cdot D_{max}^2}{4}$$

$$A_{max} = \frac{\pi \cdot 0,068^2}{4}$$

$$A_{max} = 3,63 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$$

O fio escolhido é o AWG-22 que tem

$S_{cu22} = 3,25 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$, sendo $A_{max} > S_{cu22}$ recomendado devido ao efeito pelicular.

Cálculo do entreferro lg :

$$lg = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e \cdot 10^{-2}}{L}$$

$$lg = \frac{51^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}}{1,57 \cdot 10^{-3}}$$

$$lg = 0,29 \text{ cm}$$

Sendo que,

μ_o = Permeabilidade magnética no vácuo.

Considerando o fator de ocupação razoável abaixo de 0,7, temos a equação:

$$K_u = \frac{N \cdot S_{cu22}}{A_w}$$

$$K_u = \frac{51 \cdot 3,25 \cdot 10^{-3}}{0,85}$$

$$K_u = 0,187$$

4.3.5 Simulação do conversor Buck-Boost

A Figura 23 apresenta o circuito para simulação, e os resultados da simulação serão discutidos no subtítulo 4.4 deste capítulo.

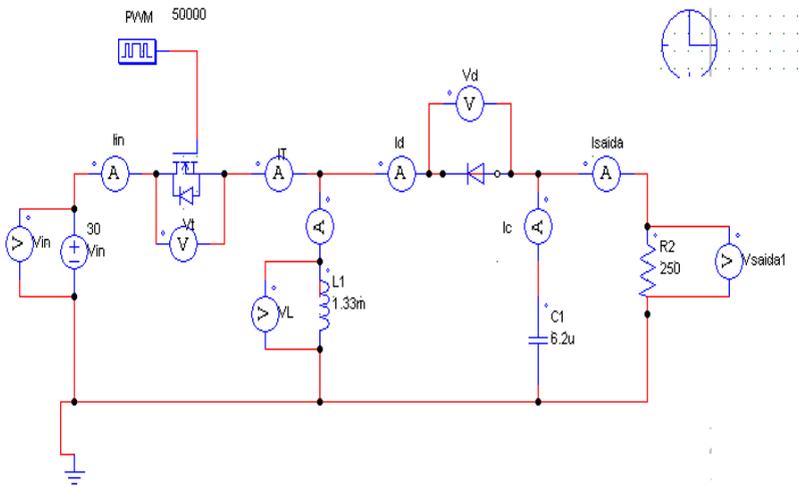


Figura 23 – Circuito utilizado na simulação.

As formas de ondas simuladas para as tensões são apresentada na Figura 24:

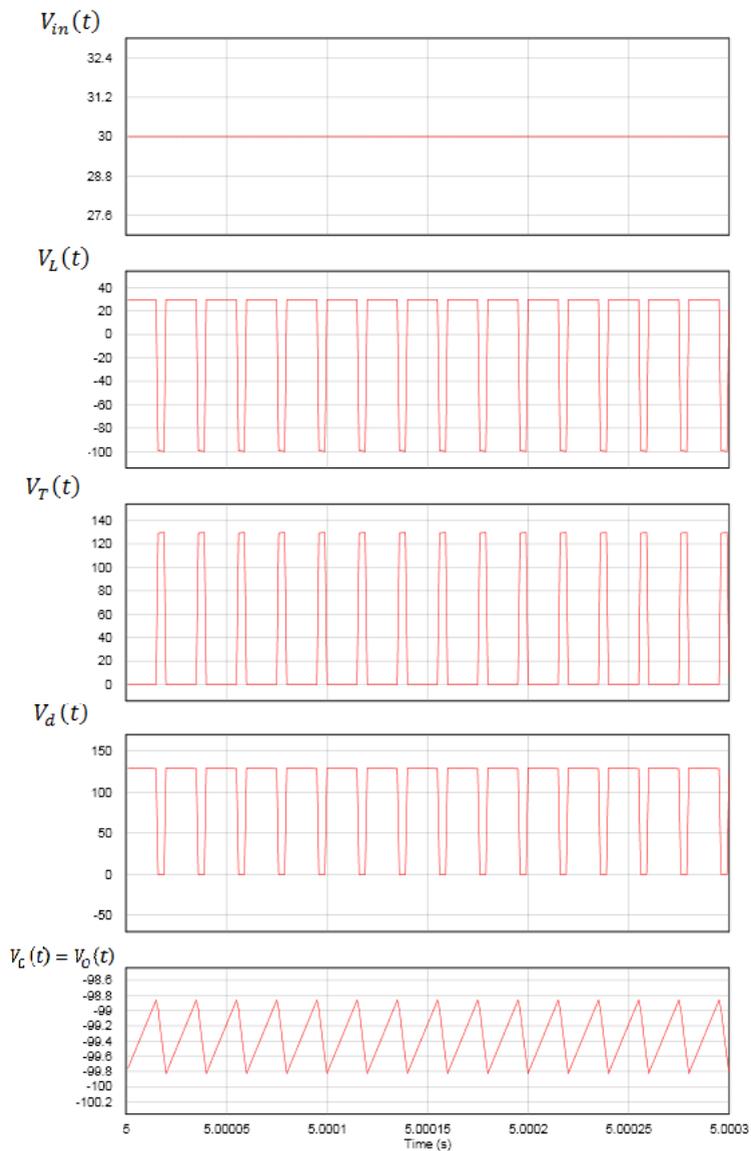


Figura 24 - Simulações das tensões no conversor Buck-Boost.

As formas de ondas simuladas para as correntes são apresentada na Figura 25:

$$i_{in}(t) = i_T(t)$$

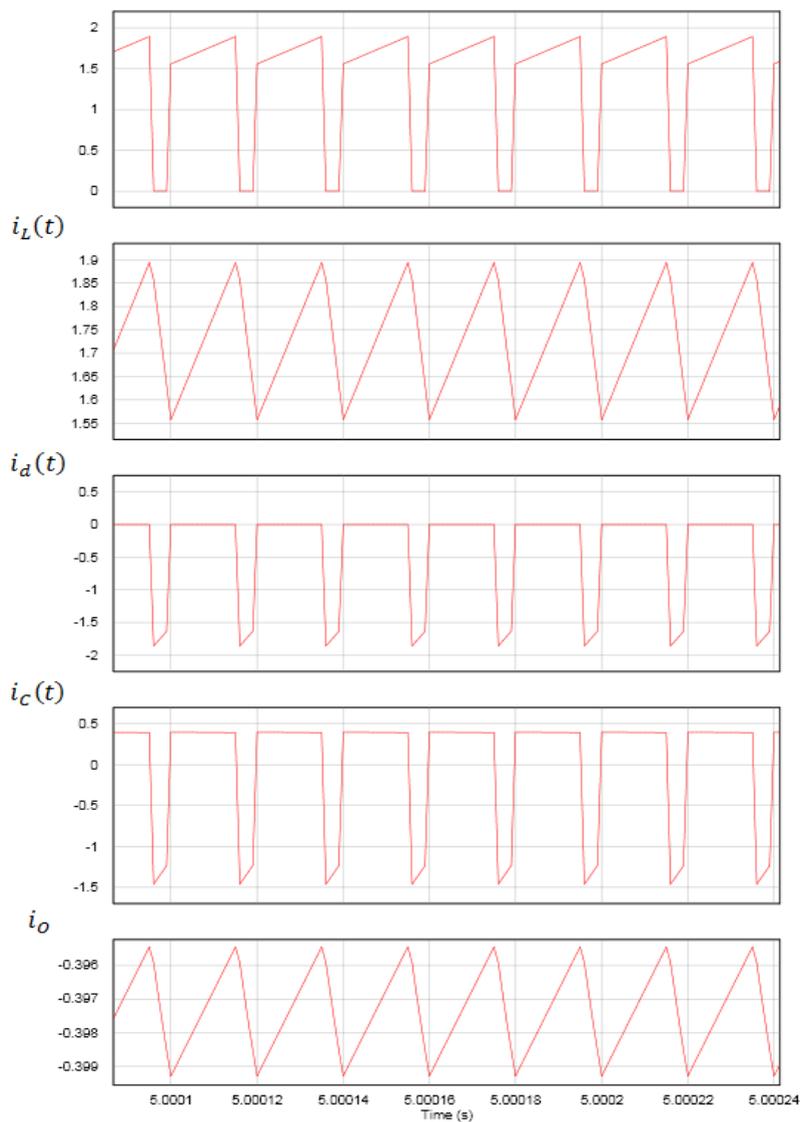


Figura 25- Simulações das correntes no conversor Buck-Boost.

Resultados da simulação apresentados na Tabela 3:

| Tensões e correntes do conversor Buck-Boost | |
|--|----------|
| Tensão média na entrada | 30 V |
| Tensão média no indutor | 3,96 V |
| Tensão média no diodo | 103,30 V |
| Tensão média no transistor | 26,03 V |
| Tensão média no capacitor | -99,33 V |
| Tensão média na saída | -99,33 V |
| Corrente média de entrada | 1,381 A |
| Corrente média no indutor | 1,73 A |
| Corrente média no diodo | -0,35 A |
| Corrente média no transistor | 1,38 A |
| Corrente média no capacitor | 0,048 A |
| Corrente média na saída | -0,3973A |

Tabela 3- Tensões e correntes médias na simulação.

Os resultados da simulação serão discutidos no subtítulo 4.4 deste capítulo.

4.4 Comparações entre os Conversores Simulados

As tensões nos interruptores e diodos do conversor Boost e Buck-Boost verificadas na simulação são comparadas com as equações teóricas para que se possa ter um melhor entendimento sobre seus esforços e validar as equações. As condições de simulação ocorreram com uma resistência para o diodo $R_d = 0,1\Omega$ e para o transistor $R_{DS} = 0,1\Omega$ em ambos os conversores.

Como o valor da tensão média de saída na simulação do conversor Boost é $V_o = 99,54 V$, é possível verificar na Tabela 4 a igualdade dos dados práticos com o simulado.

| Conversor Boost | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Equações Teóricas | Valores Obtidos na Simulação |
| $V_d = -V_o$ | $V_d = -99,54 V$ |

| | |
|-------------|-----------------|
| $V_T = V_0$ | $V_T = 99,54 V$ |
|-------------|-----------------|

Tabela 4 – Tensões no diodo e transistor na simulação.

Sendo que o valor da tensão média de saída na simulação do conversor Buck-Boost é $V_o = 99,33 V$, é possível verificar na Tabela 5 a igualdade dos dados práticos com o simulado.

| Conversor Buck-Boost | |
|-----------------------|------------------------------|
| Equações Teóricas | Valores Obtidos na Simulação |
| $V_d = -V_0 - V_{in}$ | $V_d = -129,33 V$ |
| $V_T = V_0 + V_{in}$ | $V_T = 129,33 V$ |

Tabela 5 – Tensões no diodo e transistor na simulação.

Através dos valores de tensão na simulação obtidos nos transistores e diodos foi possível verificar que o conversor Buck-Boost impõe tensões maiores nesses componentes.

. De acordo com as Tabelas 2 e 3 é possível calcular a eficiência dos conversores Boost η_{Bs} e Buck-Boost η_{Bbs} em simulação, onde:

Conversor Boost simulação:

$$\eta_{Bs} = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100$$

$$\eta_{Bs} = 99,5\%$$

Conversor Buck-Boost simulação:

$$\eta_{Bbs} = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100$$

$$\eta_{Bbs} = 95,2\%$$

4.5 Circuito de comando SG3524

O circuito integrado SG3524 possui diagrama funcional

mostrado na Figura 26, sendo construído para atender aplicações que necessitem de um sinal PWM para comando de interruptores em fontes chaveadas. Seu funcionamento estabelece uma frequência fixa que é programada pelo resistor R_T de cronometragem.

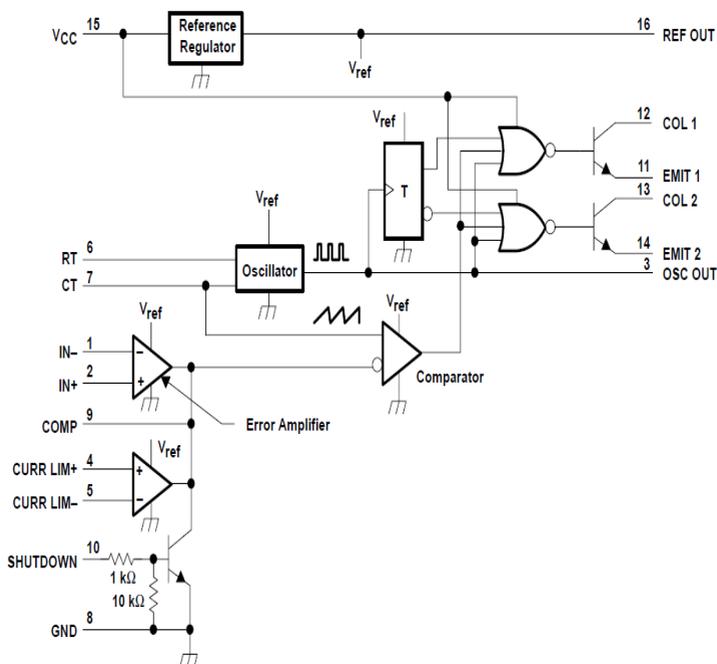


Figura 26 - Diagrama funcional.

Fonte: Datasheet SG3524.

O PWM de saída é gerado através da comparação de um sinal dente de serra gerado por um oscilador com um amplificador de erro que tem como função assegurar a estabilidade do sinal.

O SG3524 é usado em malha aberta, representado na Figura 27 e os pinos 11 e 14 são ligados a um resistor que excita o BC557 e BC548 que tem a função de amplificar o sinal. Esse interfaceamento entre o circuito de potência e conhecido como de driver de comando.

Descrição do circuito de controle:

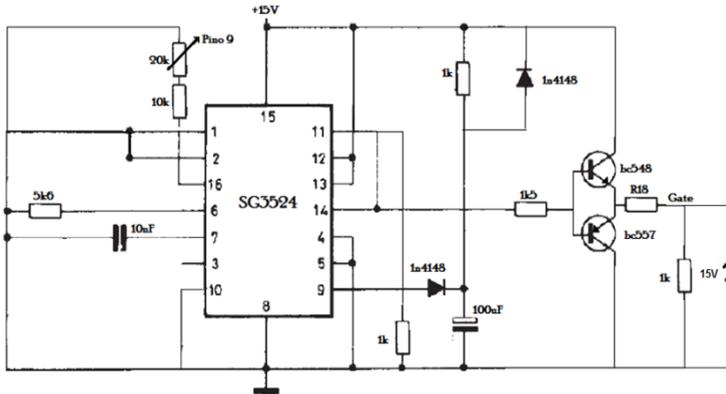


Figura 27 - Aplicação para o comando de um MOSFET.

O controle da largura de pulso do circuito é feito através de um resistor variável que está ligado entre os pinos 16 e 9 do circuito integrado.

4.6 Escolha dos componentes

A escolha dos elementos ativos para o circuito de potência, diodo, MOSFET e os elementos passivos, o capacitor e indutor levam em consideração tensão e corrente conforme o dimensionamento realizado anteriormente.

Circuito de potência com os componentes dimensionados para o conversor Boost como disposto na Figura 28.

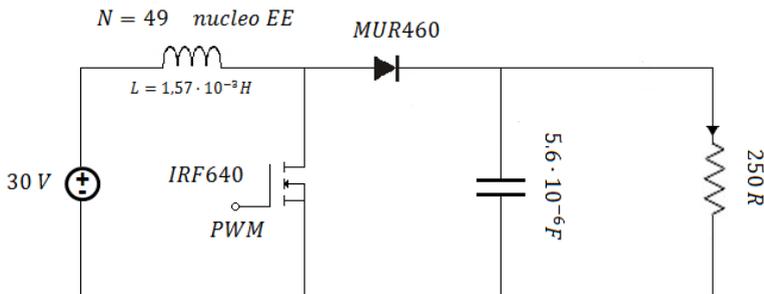


Figura 28 - Componentes no conversor Boost.

Circuito de potência com os componentes dimensionados para o conversor Buck-Boost está disposto na Figura 29:

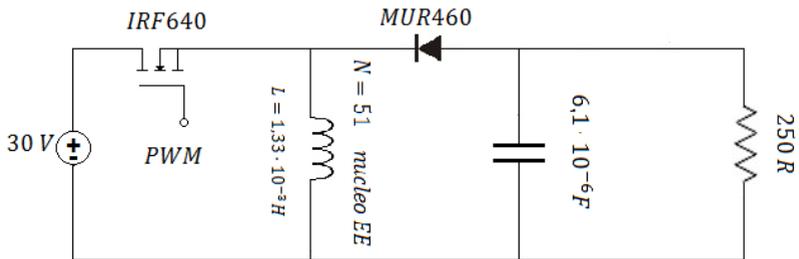


Figura 29 - Componentes no conversor Buck-Boost.

O principais dados dos interruptores apresentados na Tabela 6:

| Principais dados dos Interruptores | |
|---|-------------------------------------|
| IRF640 | MUR460 |
| $V_{DSmax} = 200V$ | $V_{RRM} = 600V$ |
| $I_D = 18 A$ | $I_{F(AV)} = 4 A$ |
| $R_{DS_on} = 0,18\Omega$ | $t_{rr} = 50 ns$ |

Tabela 6 - Principais dados dos Interruptores.

Fonte: Datasheet MUR460 (fabricante VISHAY) e IRF640 (fabricante FAIRCHILD).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS PRÁTICOS

Os testes práticos são apresentados neste capítulo para validar o que foi escrito nos capítulos anteriores. A eficiência é uma característica importante dos conversores de potência, o emprego de novas tecnologias permitem dispositivos com perdas reduzidas e propicia baixa queda de tensão quando em condução.

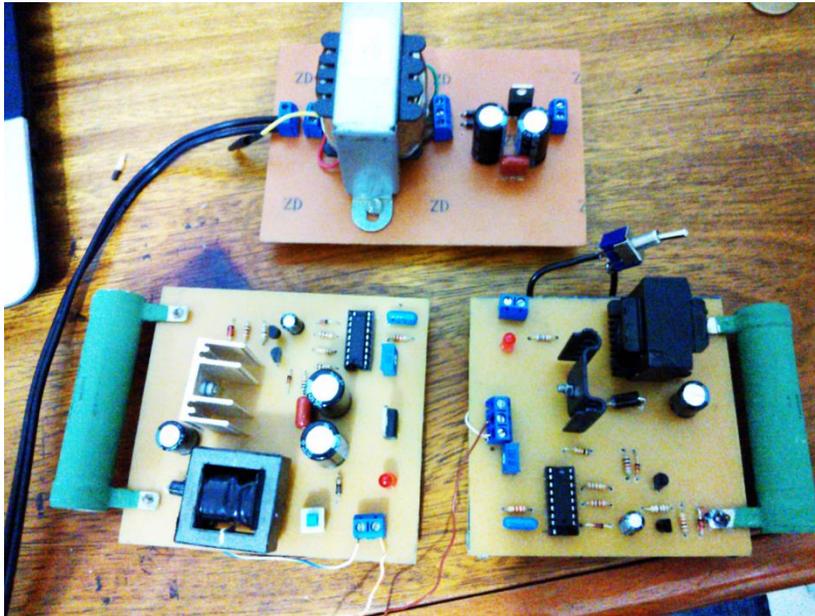


Figura 30 – Conversores Boost e Buck-Boost.

5.1 Resultados Práticos para o Conversor Boost

A largura de pulso do PWM é calculada a partir da razão cíclica e frequência, para o projeto do conversor Boost, a razão cíclica é de $D = 0,7$, para uma frequência $f_s = 50 \cdot 10^3 \text{ Hz}$, temos uma largura de pulso igual a $14 \mu\text{s}$, demonstrada na figura:

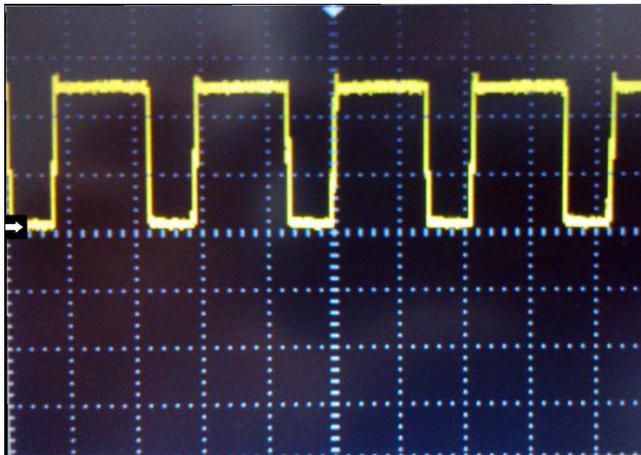


Figura 31 - Forma de onda do PWM (5 V/div; 10 μ s/div).

Essa forma de onda é a mesma que está no Gate do IRF640 com uma tensão de pico é igual a 13,6V que induz ao chaveamento.

A tensão no indutor está relacionada com os pulsos de chaveamento do IRF640, o valor da tensão mínima medida no osciloscópio é de 40V e a máxima de -82V.

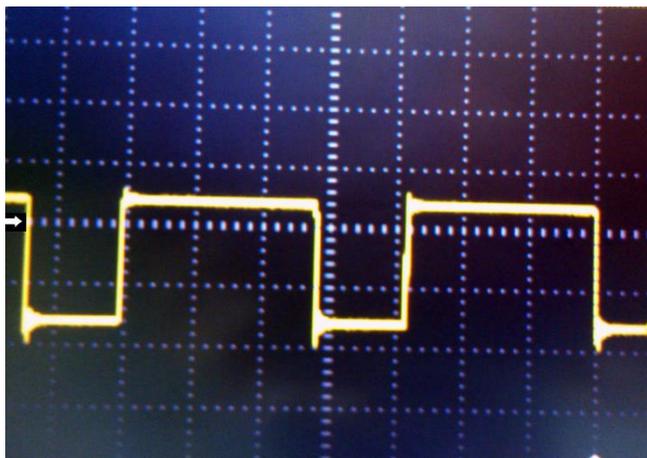


Figura 32 - Tensão no indutor (50 V/div; 5 μ s/div).

A tensão máxima no transistor foi de 106V, apresentado na Figura 33.

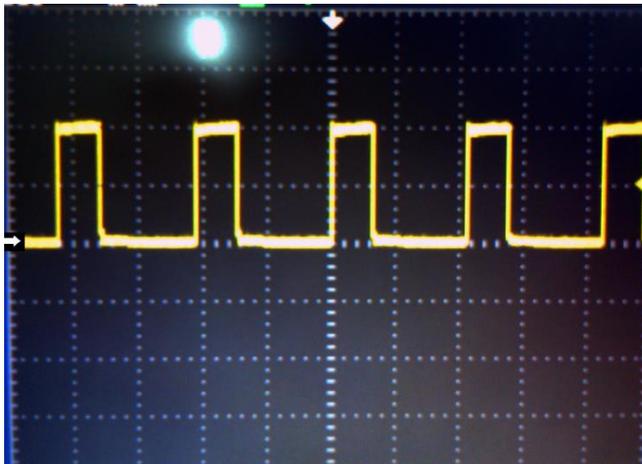


Figura 33 - Tensão no transistor (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$).

A tensão máxima no diodo é de -104 V , que se apresentou na Figura 34.

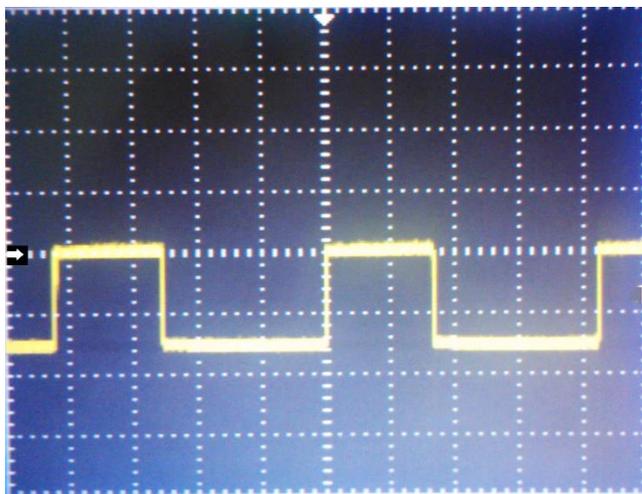


Figura 34- Tensão no diodo (50 V/div ; $5\mu\text{s/div}$).

O valor da tensão média na saída do conversor Boost no osciloscópio foi de $96,6\text{ V}$, considerando os valores iniciais do projeto.

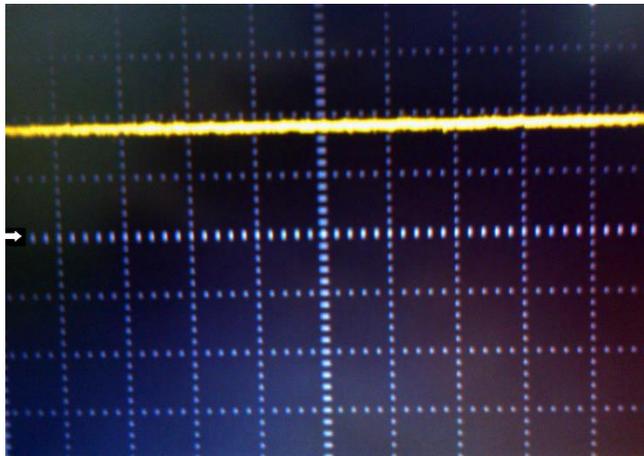


Figura 35 - Tensão de saída (50 V/div; 50 μ s/div).

5.1.4 Eficiência do conversor Boost

Com os dados adquiridos nos testes práticos é possível calcular a eficiência do conversor Boost, sendo que a corrente de entrada é de $i_{in} = 1,38 A$ e a corrente de saída é $i_o = 0,4 A$:

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{96,6 \cdot 0,4}{30 \cdot 1,38} \cdot 100$$

$$\eta = 93,3\%$$

5.2 Resultados Práticos para o Conversor Buck-Boost

Para uma razão cíclica de $D = 0,769$, e uma frequência $f_s = 50 \cdot 10^3 Hz$, tem-se uma largura de pulso igual a $15,38 \mu s$, demonstrada na Figura 36:



Figura 36 - Forma de onda do PWM (5 V/div ; $10\mu\text{s/div}$).

É possível verificar em testes práticos que existência de tensões transientes devido à comutação e os componentes não serem ideais há uma tensão de pico igual a 224 V no IRF640 de acordo com a Figura 37:

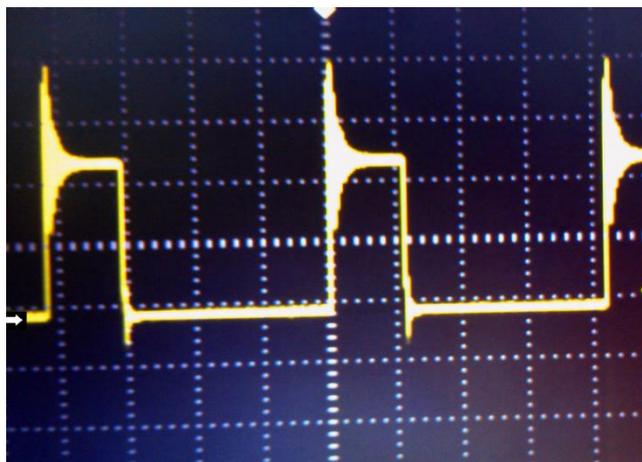


Figura 37- Tensão no transistor 50 V/div ; $5\mu\text{s/div}$).

A tensão de pico no indutor 398 V , apresentado na Figura 40.

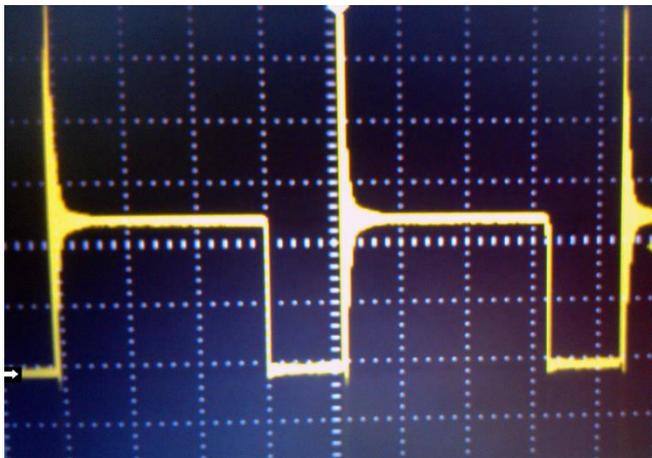


Figura 38 - Tensão no Indutor (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$).

A tensão no diodo é igual à somatória da tensão de entrada mais a tensão da saída, que é igual $126,6\text{ V}$, sendo que a tensão pico a pico no diodo foi de 398 V .



Figura 39 - Tensão no Diodo (50 V/div ; $10\mu\text{s/div}$).

A tensão média na saída do conversor Buck-Boost medida no osciloscópio digital é de $-96,6\text{ V}$.

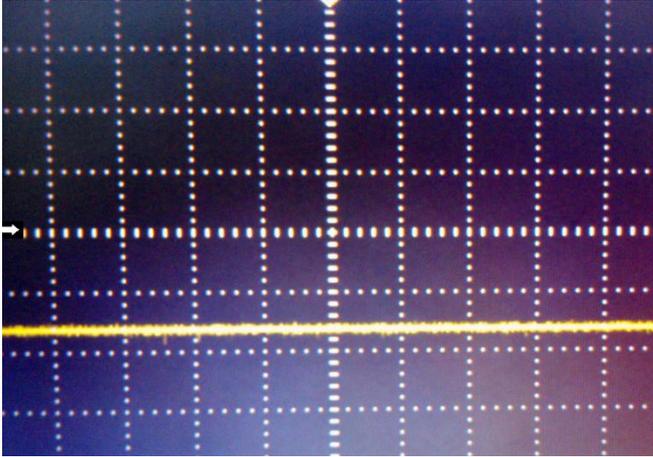


Figura 40 - Tensão de saída (50 V/div; 10 μ s/div).

5.2.4 Eficiência do Conversor Buck-Boost

Com os dados adquiridos nos testes práticos é possível calcular a eficiência do conversor Buck-Boost, sendo que a corrente de entrada é de $i_{in} = 1,41 A$ e a corrente de saída é $i_o = 0,39 A$:

$$\eta_{Bb} = \frac{P_o}{P_{in}} \cdot 100$$

$$\eta_{Bb} = \frac{96,6 \cdot 0,39}{30 \cdot 1,41} \cdot 100$$

$$\eta_{Bb} = 89,1\%$$

5.3 Comparações entre os conversores Boost e Buck-Boost

Os resultados das tensões verificadas no transistor e no diodo do conversor Boost, sejam na simulação ou nos testes práticos, foram aproximados e compatíveis com as equações teóricas, conseqüentemente o transistor IRF640 e o diodo MUR460 operaram adequadamente para as especificações do conversor.

Os resultados das tensões verificados no transistor e no diodo do conversor Buck-Boost, sejam na simulação ou nos testes práticos foram aproximados, sendo que nos testes práticos foi possível constatar a existência de tensões transientes, causando um maior esforço sobre esses componentes, no entanto as especificações do transistor IRF640 e o diodo MUR460 se mostraram adequadas para os valores do conversor.

Os resultados de eficiência no conversor Boost e Buck-Boost, sejam na simulação ou nos testes práticos, foram aproximados, validando o que foi escrito nos capítulos anteriores sobre sua alta eficiência.

O conversor Boost teve uma eficiência superior em relação ao conversor Buck-Boost, observando os valores das eficiências, foi possível verificar que a corrente de entrada no conversor Buck-Boost é maior.

Os esforços de tensão sobre os interruptores nos conversores foram menores no conversor Boost em comparação com o conversor Buck-Boost, sendo possível verificar na Tabela 7 as comparações.

| Tabela comparativa | | | |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Simulação | | Testes práticos | |
| Boost | Buck-Boost | Boost | Buck-Boost |
| $V_T = 99,54V$ | $V_T = 129,33V$ | $V_T = 106V$ | $V_T = 224V$ |
| $V_d = -99,54V$ | $V_d = 129,3V$ | $V_d = -104V$ | $V_d = 398V$ |
| $\eta_{Bs} = 99,5\%$ | $\eta_{Bbs} = 95,2\%$ | $\eta = 93,3\%$ | $\eta = 89,1\%$ |

Tabela 7-Tabela comparativa dos conversores Boost e Buck-Boost.

5.4 Dificuldades encontradas no projeto

Para repassar o conhecimento adquirido em bancada e facilitar um novo projeto, são listadas as seguintes recomendações para o projetista na construção do conversor Boost ou Buck-Boost:

- Na construção do indutor o projetista deve estar atento ao número de voltas e a indutância, utilizando aparelho medidor de indutância para verificação final;
- Para frequências acima de 20KHz os componentes apresentam maiores esforços, recomendam-se dispositivos ultrarrápidos e com resistências internas menores;
- A construção do circuito de comando em layout separado do circuito de potência apresenta maiores vantagens;
- Para o circuito de comando do conversor Buck-Boost é necessário referenciar a tensão aplicada à porta do MOSFET em relação à fonte do transistor, podendo ser utilizada uma fonte externa, transformador de pulso, optoacopladores ou outras técnicas.

6 CONCLUSÕES

Os resultados foram satisfatórios, as equações descritas no decorrer dos capítulos foram constatadas nas simulações e na prática, sendo mensurada uma eficiência simulada próxima a dos testes práticos para os conversores.

A sequência dos capítulos foi escrita com a intenção de comparar os conversores e estabelecer um entendimento sobre o seu funcionamento. A eletrônica de potência está em evolução constante, é possível inserir lógica de programação aliada a componentes eletrônicos para o controle em malha fechada dos conversores.

A escolha dos componentes e todo o processo de prototipagem influenciam no resultado, conseqüentemente o projeto pode ser melhorado.

É possível concluir que tanto em simulação quanto em bancada o conversor Boost apresentou melhor rendimento e menores esforços sobre os interruptores.

7 REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1ª ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2000. 479p.

ARRABAÇA, Devair Aparecido. **Conversores de energia elétrica CC/CC para aplicações em eletrônica de potencia: conceitos, metodologia de análise e simulação**. 1ª ed. Editora Erica, 2013.

BOMFIM, G. A. **Metodologia para desenvolvimento de projetos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 1995.

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: conversores cc-cc básicos não isolados**. Florianópolis: Ed. Dos autores, 2000. 377p.

POMILIO, José A. **Eletrônica de Potência**. UNICAMP. Disponível:<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>>. Acesso em: 12 fev. 2014.

8 BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

POMILIO, José A. **Breve História da eletricidade industrial e da eletrônica de Potência**. UNICAMP. Disponível em :<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/elpot.html> Acesso em: 12 mar. 2014.

ALVES, Anderson; SIMÃO, Claudinei; PETRY, Clóvis Antônio. **Circuito de Comando isolado Usando Transformador de Pulsos**. Florianópolis: UFSC, 2000. 27 p.

BASCOPE, René Pastor T.; GOMES, Ícaro S. Freitas; FONTENELE, Nestor Rocha Monte. **Circuitos de Comando para MOSFETs e IGBTs de Potência**. Abr. de 2013. 24p. Notas de aula. Slides.

CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA. Anais do XIX, 2012, Campina Grande. **Conexão de Conversores com Processamento Parcial de Energia Aplicada à Alimentação de LEDS**. Santa Maria: UFSM, 2012, 7p.