

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS FERREIRA TERRES

**BANCADA DIDÁTICA DE CONVERSORES BÁSICOS NÃO
ISOLADOS**

JOINVILLE

2017

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCAS FERREIRA TERRES

**BANCADA DIDÁTICA DE CONVERSORES BÁSICOS NÃO
ISOLADOS**

Trabalho de conclusão de curso submetido
ao curso de Bacharelado em Engenharia
Elétrica, da Universidade do Estado de Santa
Catarina, para a obtenção do grau de Ba-
charel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Joselito Anastácio
Heerdt

JOINVILLE

2017

**"BANCADA DIDÁTICA DE CONVERSORES BÁSICOS NÃO
ISOLADOS"**

por

Lucas Ferreira Terres

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção
do título de

Bacharel em Engenharia Elétrica

e aprovado em sua forma final pelo

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARTINA

Dr. Joselito Anastácio Heerdt
CCT/UDESC (Orientador/presidente)

Banca Examinadora:
Joinville, de 2017.

Dr. Yales Rômulo de Novaes
CCT/UDESC

Dr. Alessandro Luiz Batschauer
CCT/UDESC

Dr. Sérgio Vidal Garcia Oliveira
CCT/UDESC (Suplente)

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram e me deram forças.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me iluminou nos momentos mais difíceis e que me guiou para que eu chegassem até aqui. Agradeço também aos meus pais que sempre estiveram presentes e me deram força para continuar. Aos professores que me ajudaram na elaboração e implementação do projeto, em especial ao professor Joselito Anastácio Heerdt pela paciência na orientação. Aos meus amigos e colegas de laboratório que me apoiaram e ajudaram ao longo do caminho.

RESUMO

Ao analisar a necessidade de conversores para o laboratório de eletrônica de potência, desenvolveu-se uma bancada para suprir esta demanda. Esta bancada didática possui os conversores *Buck*, *Boost*, *Buck – Boost*, Meia-Ponte e Ponte Completa monofásico, ou seja, os conversores utilizados na disciplina de eletrônica de potência. Realizou-se o projeto dos componentes utilizados, implementação e testes da bancada para validar este trabalho.

Palavras-chave: Bancada didática, *Buck*, *Boost*, *Buck – Boost*, Inversor Monofásico.

ABSTRACT

When analyzing a need for converters for the power electronics lab, a bench was developed to fulfill this demand. This didactic workbench has the *Buck*, *Boost*, *Buck – Boost*, Half-Bridge and Full Bridge monophasic converters, that is, converters used in power electronics discipline. The design of the components used, the implementation and the tests of the bench was carried out to validate this work..

Keywords: didactic workbench, *Buck*, *Boost*, *Buck – Boost*, Single Phase Inverter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Conversor CC-CC	27
Figura 2.1 Esquemático do conversor Ponte Completa com relés.....	31
Figura 2.2 Microcontrolador Arduino® UNO.....	43
Figura 2.3 Esquemático de alimentação do Arduino® e relés.....	44
Figura 2.4 Esquema de Ligação de Optoacoplador.....	45
Figura 2.5 Circuito de driver utilizado para o comando dos transistores.	46
Figura 2.6 Diagrama de blocos do programa Utilizado.....	47
Figura 2.7 Conversor em Ponte Completa.....	48
Figura 2.8 Conversor Buck.....	48
Figura 2.9 Conversor Boost.....	49
Figura 2.10 Conversor Buck-Boost.....	50
Figura 2.11 Conversor Meia-Ponte.....	51
Figura 2.12 Comando do conversor Meia-Ponte.....	51
Figura 2.13 Tempo morto do conversor comando do conversor Meia-Ponte.	52
Figura 2.14 Topologia do conversor Ponte Completa.....	53
Figura 2.15 Esquemático completo da bancada didática.....	54
Figura 2.16 Placa da bancada didática com separação dos componentes.	55
Figura 3.1 Resultados de simulação do conversor buck - tensão e corrente na carga.....	58
Figura 3.2 Resultados experimentais do conversor buck - tensão e corrente na carga.....	58
Figura 3.3 Resultados de simulação do conversor Buck - tensão e corrente no interruptor.....	59
Figura 3.4 Resultados experimentais do conversor Buck - tensão e corrente no interruptor.....	59
Figura 3.5 Resultados de simulação do conversor Buck - tensão e corrente no indutor.....	60
Figura 3.6 Resultados Experimentais do Conversor <i>Buck</i> - Tensão e Corrente no Indutor.....	60
Figura 3.7 Resultados de simulação do conversor Buck - tensão e corrente no diodo.....	61
Figura 3.8 Resultados experimentais do conversor Buck - tensão e corrente no diodo.....	62

Figura 3.9 Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente na carga.	62
Figura 3.10 Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente na carga.	63
Figura 3.11 Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente no interruptor.	63
Figura 3.12 Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente no interruptor.	64
Figura 3.13 Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente no indutor.	64
Figura 3.14 Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente no indutor.	65
Figura 3.15 Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente no diodo.	65
Figura 3.16 Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente no diodo.	66
Figura 3.17 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente na carga.	67
Figura 3.18 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente na carga.	67
Figura 3.19 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente na carga.	68
Figura 3.20 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente na carga.	68
Figura 3.21 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente na carga.	69
Figura 3.22 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no interruptor.	70
Figura 3.23 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no interruptor.	70
Figura 3.24 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no interruptor.	71
Figura 3.25 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no interruptor.	71
Figura 3.26 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no indutor.	72
Figura 3.27 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando	

em modo Buck - tensão e corrente no indutor.....	72
Figura 3.28 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no indutor.....	73
Figura 3.29 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no indutor.....	73
Figura 3.30 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no diodo.....	74
Figura 3.31 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no diodo.....	74
Figura 3.32 Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no diodo.....	75
Figura 3.33 Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no diodo.....	75
Figura 3.34 Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente na saída do conversor.....	76
Figura 3.35 Resultados experimental do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente no indutor do filtro de saída.....	77
Figura 3.36 Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente no resistor de saída.....	77
Figura 3.37 Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente no resistor de saída com frequência reduzida.....	78
Figura 3.38 Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão no interruptor.....	79
Figura 3.39 Resultados experimentais do conversor Meia-Ponte - tensão no interruptor.....	79
Figura 3.40 Resultados de simulação do conversor Ponte Completa - tensão e corrente na saída do conversor	80
Figura 3.41 Resultados de simulação do conversor Ponte Completa - tensão e corrente na carga	80
Figura 3.42 Resultados de simulação do conversor Ponte Completa - tensão na carga com frequência reduzida.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Comparação de quantidade de material para a bancada e para conversores individuais.....	30
Tabela 2.1 Estados dos relés para alimentação do circuito de potência e operação do conversor desejado.	32
Tabela 2.2 Operação dos interruptores para o conversor desejado.	32
Tabela 2.3 Comparação entre correntes eficaz e média para os conversores Buck, Boost e Buck-Boost.....	32
Tabela 2.4 Valores de tensão de pico entrada	35
Tabela 2.5 Tabela de validação de valores	36
Tabela 2.6 Parâmetros do núcleo tipo EE-42/15.....	41
Tabela 2.7 Número a ser apresentado no display de acordo com o conversor escolhido.	44
Tabela 2.8 Referências numéricas na placa da Bancada para conectores.	55

LISTA DE SÍMBOLOS

$CC - CC$	Corrente contínua para corrente contínua
$CA - CA$	Corrente alternada para corrente alternada
$CC - CA$	Corrente contínua para corrente alternada
D_x	Diodo
D	Razão cíclica
F_s	Frequência de Comutação
I_o	Corrente de saída
L	Indutância
PWM	Modulação por largura de pulso
S_x	Interruptor
T_s	Período de Chaveamento
V_{in}	Tensão de entrada
V_{out}	Tensão de saída

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Bancadas comerciais	25
1.2 Objetivos	26
1.3 Conversores <i>CC-CC</i>	26
1.3.1 Conversor Buck	27
1.3.2 Conversor Boost	28
1.3.3 Conversor Buck-Boost	28
1.4 Conversores CC-CA	28
1.4.1 Conversor monofásico Meia-Ponte	29
1.4.2 Conversor monofásico Ponte Completa	29
1.5 Bancada Didática	29
2 PROJETO DA BANCADA DIDÁTICA	31
2.1 Introdução	31
2.2 Projeto e definição dos componentes da bancada	33
2.2.1 Barramento de entrada	34
2.2.2 Projeto e escolha do transistor	38
2.2.3 Relés	39
2.2.4 Indutor	40
2.2.5 Capacitor de saída	41
2.2.6 Eficiência do conversor	42
2.2.7 Microcontrolador	43
2.2.8 Optoacoplador	45
2.3 Configuração e operação da bancada didática	46
2.3.1 Conversor <i>Buck</i>	48
2.3.2 Conversor <i>Boost</i>	49
2.3.3 Conversor <i>Buck-Boost</i>	49
2.3.4 Conversor Meia-Ponte	50
2.3.5 Conversor Ponte Completa	52
2.3.6 A Bancada Didática	53
3 RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS	57
3.1 Conversor Buck	57
3.1.1 Tensão e corrente na carga do conversor buck	57
3.1.2 Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck	58
3.1.3 Tensão e corrente no indutor do conversor Buck	60
3.1.4 Tensão e corrente no diodo do conversor Buck	61

3.2	Conversor Boost	62
3.2.1	Tensão e corrente na carga do conversor Boost	62
3.2.2	Tensão e corrente no interruptor do conversor Boost	63
3.2.3	Tensão e corrente no indutor do conversor Boost	64
3.2.4	Tensão e corrente no diodo do conversor Boost	65
3.3	Conversor Buck-Boost	66
3.3.1	Tensão e corrente na carga do conversor Buck-Boost	66
3.3.1.1	Tensão e corrente na carga do conversor Buck-Boost operando em modo Buck	66
3.3.1.2	Tensão e corrente na carga do conversor Buck-Boost operando em modo Boost	67
3.3.2	Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck-Boost	69
3.3.2.1	Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck-Boost operando em modo Buck	69
3.3.2.2	Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck-Boost operando em modo Boost	70
3.3.3	Tensão e Corrente no Indutor do Conversor Buck-Boost	72
3.3.3.1	Tensão e Corrente no Indutor do Conversor Buck-Boost operando em modo Buck	72
3.3.3.2	Tensão e Corrente no Indutor do Conversor Buck-Boost operando em modo Boost	73
3.3.4	Tensão e Corrente no Diodo do Conversor Buck-Boost	74
3.3.4.1	Tensão e Corrente no Diodo do Conversor Buck-Boost operando em modo Buck	74
3.3.4.2	Tensão e Corrente no Diodo do Conversor Buck-Boost operando em modo Boost	75
3.4	Conversor Meia-Ponte	76
3.4.1	Tensão e corrente na saída do conversor Meia-Ponte	76
3.4.2	Tensão no interruptor do conversor Meia-Ponte	78
3.5	Conversor Ponte Completa	78
3.5.1	Tensão e Corrente na Carga do Conversor Ponte Completa	79
4	CONCLUSÃO	83
4.1	Dificuldades do Trabalho	83
4.2	Contribuições do trabalho	83
4.3	Trabalhos Futuros	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85	
Apêndice A - Lista de Componentes	87	

Apêndice B - Projeto Completo do Elemento Magnético	89
Apêndice C - Programação utilizada no Arduino	93

1 INTRODUÇÃO

O ensino da disciplina de eletrônica de potência no curso de engenharia elétrica é baseado nos retificadores à diodo e tiristor e nos conversores chaveados isolados e não isolados . Estes conversores são a base da disciplina, então neste trabalho é projetado uma bancada que contém alguns dos conversores vistos em sala de aula, para servir de protótipo para realização de experimentos no laboratório.

Os retificadores são a parte introdutória da disciplina e os conversores chaveados o restante. Na bancada didática é onde é possível ver o funcionamento dos conversores chaveados não isolados Buck, Boost, Buck-Boost, Meia-Ponte e Ponte Completa. Utilizam-se teorias que foram aprendidas em sala de aula para o entendimento do funcionamento dos conversores. A implementação da bancada auxilia no aprendizado dos alunos por ser a parte prática da disciplina e serem comprovadas as teorias ensinadas na sala de aula.

No laboratório da UDESC atualmente existem os conversores e retificadores citados montados em protótipos individuais, porém para a turma inteira, é utilizado apenas 1 conversor por aula. O fato de possuir apenas um único conversor para a aula poder impactar no entendimento dos alunos, visto que apenas uma parte do grupo de fato opera o conversor. Também os conversores da disciplina atualmente não são versáteis e de fácil entendimento. Por este fator decidiu-se realizar este projeto, que tem como objetivo principal a implementação de uma bancada que possua 5 conversores. Esta bancada irá utilizar o conversor Ponte Completa como base da topologia dos outros conversores.

1.1 BANCADAS COMERCIAIS

Este trabalho de projeto e implementação de uma bancada visa um custo menos às bancadas disponíveis em mercado. Foi realizada uma pesquisa de valores para bancadas de mesmo propósito e comparado valor com o valor gasto para este protótipo. Os componentes utilizados para a implementação foram de disponibilização do laboratório mas foi realizada uma pesquisa de custos para a bancada que resultou em um valor de aproximadamente R\$ 150,00.

A empresa *Jinan Should Shine* possui diversos equipamentos de pro-

pósitos semelhantes ao deste projeto, porém são bancadas maiores e que, além das funções propostas neste trabalho, possuem diversos outros modos de operação. O tamanho destas bancadas são de aproximadamente 2 x 2 m. Os preços de importação destas bancadas vão de \$ 400 à \$ 3.000 dólares.

Também a empresa *De Lorenzo* fornece bancadas didáticas como a DCA203, com o propósito de serem utilizadas em laboratório. Esta bancada possui os conversores Buck e Boost e possuem outras funcionalidades que fogem do objetivo deste trabalho, como controle de motor e conversores chaveados isolados. Também devido às outras características o preço tende a ser mais elevado.

1.2 OBJETIVOS

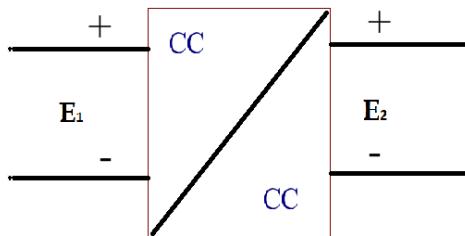
Neste capítulo são apresentados os conversores utilizados neste trabalho. O objetivo deste trabalho é projetar e implementar uma bancada didática com alguns conversores chaveados básicos não isolados vistos na disciplina de eletrônica de potência, sendo eles o conversor Buck, Boost, Buck-Boost, Meia-Ponte e Ponte Completa. Esta bancada será de utilização do laboratório para aulas práticas.

1.3 CONVERSORES CC – CC

Os conversores CC-CC são conversores estáticos, que utilizam transistores e elementos magnéticos para converter energia. Estes conversores trabalham em sua essência com correntes contínuas, seja elevando ou abaixando a tensão. Seu funcionamento básico se dá de forma chaveada e dependente da razão cíclica, ou seja, "acionando e desligando" as chaves do circuito.

A Figura (1.1) mostra que através de conversão CC-CC é possível transformar a tensão de entrada E_1 em outra tensão CC E_2 .

Figura 1.1 – Conversor CC-CC



Fonte: Do Autor.

Em (BARBI, 2006a), livro utilizado na disciplina de eletrônica de potência, existem alguns conversores básicos CC-CC não isolados e para este trabalho utilizou-se os seguintes:

- Conversor Buck;
- Conversor Boost;
- Conversor Buck-Boost.

1.3.1 Conversor Buck

O conversor CC-CC Buck é um conversor abaixador de tensão, ou seja, V_{out} é menor do que V_{in} . O conversor Buck, assim como a maioria dos conversores estáticos chaveados, é composto por transistores, diodos e indutores, que são os componentes que fazem com que o conversor opere de forma a armazenar energia no elemento magnético e descarregar na carga.

A expressão do ganho estático do conversor Buck, no modo de condução contínua, é apresentada na Equação (1.1) (BARBI, 2006a):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (1.1)$$

A razão cíclica do conversor Buck pode variar de 0 até 1, sendo 0 uma tensão nula na saída e 1 a tensão de entrada aparece na saída.

1.3.2 Conversor Boost

O conversor Boost é um conversor elevador de tensão, ou seja, sua tensão de saída, V_{out} é mais elevada que sua tensão de entrada V_{in} , sendo o ganho estático do conversor dado pela Expressão (1.2) (BARBI, 2006a):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (1.2)$$

De modo semelhante ao conversor Buck, este conversor também possui a célula de comutação, porém com os elementos dispostos de maneira diferente ao conversor anterior, formando a topologia Boost. A razão cíclica deste conversor pode variar de zero à um, porém, na prática, sua eficiência diminui exponencialmente após um duty cycle de aproximadamente 0,7.

1.3.3 Conversor Buck-Boost

O conversor Buck-Boost tem a característica dos dois conversores citados acima, de elevar ou abaixar a tensão de saída. Sabe-se que sua razão cíclica pode variar de 0 a 1, na teoria, para os conversores citados. Então para o Buck-Boost, quando sua razão cíclica for menor que 0,5 o conversor atuará como Buck, e para razão cíclica maior que 0,5 atuará como Boost (BARBI, 2006a). Sua equação do ganho estático é mostrada na Expressão (1.3) (BARBI, 2006a):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (1.3)$$

No capítulo 3 será apresentado todas as formas de onda dos conversores CC-CC citados.

1.4 CONVERSORES CC-CA

A modulação dos conversores CC-CA podem possuir valor de PWM constante ou variável. Para as modulações constantes a tensão na saída do conversor é positiva e negativa instantaneamente mas a média pode ser positiva ou negativa. Para uma modulação variável senoidal a tensão média na saída é zero, pois sua característica de de tensão CA.

Os conversores Meia-Ponte e Ponte Completa podem operar de várias maneiras, dependendo da modulação escolhida, tais como reversível em tensão, reversível em corrente ou até conversor de 4 quadrantes. Para os con-

versores utilizados a modulação utilizada é de 2 níveis, podendo ser aplicado V_{in} e $-V_{in}$ ou V_{in} e 0. Nestes inversores poderia ser implementado a modulação em 3 níveis, porém não é o foco deste trabalho.

1.4.1 Conversor monofásico Meia-Ponte

Os conversores estáticos CC-CA são chamados de inversores, pois convertem a tensão contínua de entrada, V_{in} , em uma tensão alternada de saída, V_{out} . Para o conversor Meia-Ponte a tensão de entrada possui um ponto médio, fazendo com que a tensão aplicada na saída seja de $+V_{in}/2$ e $-V_{in}/2$. A característica da tensão de saída é dada por um PWM senoidal ou retangular, com uma determinada frequência e com alto conteúdo harmônico (BARBI, 2005).

Este conversor possui a célula de comutação, que opera de forma complementar entre dois transistores para aplicar a tensão na saída. Estes dois transistores são dispostos em uma topologia que formam um braço de comutação no conversor.

1.4.2 Conversor monofásico Ponte Completa

A estrutura do conversor em Ponte Completa se dá por dois braços inversores, compostos por um par de interruptores conectados em anti-paralelo com diodos. Segundo (BARBI, 2005) esta topologia é usualmente empregada para potências superiores à do conversor apresentado anteriormente, pelo fato de apresentar menores esforços de tensão e corrente em seus componentes.

1.5 BANCADA DIDÁTICA

Devido às bancadas serem separadas e ser mais difícil de realizar os testes e replicar os conversores, implementou-se neste trabalho, uma bancada didática com alguns dos conversores básicos chaveados não isolados estudados na disciplina de eletrônica de potência. Esta bancada possui os conversores Buck, Boost, Buck-Boost, Meia-Ponte e Ponte Completa. os conversores Meia-Ponte e Ponte Completa podem operar em modo de conversor CC-CC ou CC-CA.

A bancada conta com todos os elementos existentes nos conversores, sendo os componentes transistores, diodos, indutor, capacitores e periféricos de comandos. Também optou-se por utilizar relés, para fazer a mudança de

um conversor para outro, ao invés de jumpers, para deixar a bancada mais funcional para facilitar o aprendizado. A ideia também de se implementar uma placa com vários conversores é por viabilizar a réplica desta bancada, pois a quantidade de material requerido é menor. Além destes fatores também é interessante para instigar o aluno a ver outros conversores na topologia do conversor Ponte Completa.

Outras universidades possuem em seus laboratórios de eletrônica uma grade de aulas que ensinam os retificadores não controlados, controlados, inversores e então os conversores CC-CC. Este é o caso da UFMT(UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO). Ao final das aulas de laboratório é requerido dos alunos o desenvolvimento, projeto e testes de um conversor Buck, Boost ou Buck-Boost.

Se feita uma comparação de quantidade de componentes necessários para a implementação da bancada contendo 5 conversores e de 5 placas separadas para os conversores, o resultado é mostrado na Tabela

Tabela 1.1 – Comparaçāo de quantidade de material para a bancada e para conversores individuais.

Material	Bancada	Conversores Individuais
Transistor	4	9
Diodo	4	9
Indutor	1	5

Fonte: Do Autor.

2 PROJETO DA BANCADA DIDÁTICA

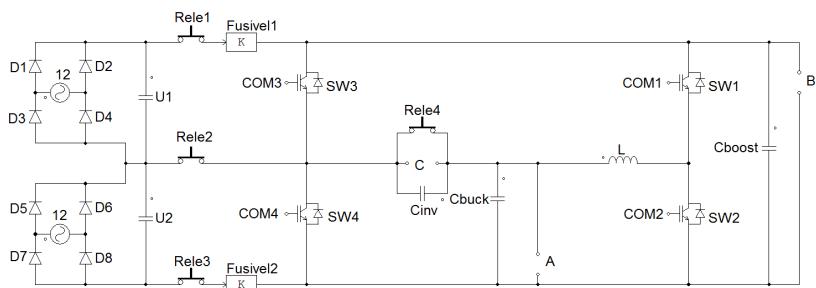
2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado toda a parte de projeto, dimensionamento, cálculo e montagem da bancada. Todo o projeto da bancada será baseado nos livros de conversores CC-CC básicos não isolados (BARBI, 2006a) e (BARBI, 2005).

Na disciplina de eletrônica de potência são estudados os conversores CC-CC básicos não isolados. Dentre os conversores estudados está o conversor em ponte completa, o conversor de operação em 4 quadrantes. Este conversor será a base funcional da bancada, pois será possível configurar para operar todos os outros conversores.

A estrutura do conversor monofásico Ponte completa será utilizada para operar como todas as topologias propostas neste trabalho, ou seja, poderá operar como os conversores CC-CC Buck, Boost, Buck-Boost, Meia-Ponte e Ponte Completa, além dos conversores CC-CA Meia-Ponte e Ponte Completa. A Figura (2.1) mostra como será a topologia da bancada. Nota-se no esquemático abaixo que possui 3 bornes A, B e C, que são as cargas do Buck/Buck-Boost, Boost e inversores, respectivamente.

Figura 2.1 – Esquemático do conversor Ponte Completa com relés.



Fonte: Do Autor.

Para a operação conforme os diferentes tipos de conversores desejados foi utilizada uma configuração por relés, que essencialmente mudam os pontos de conexão das fontes CC de alimentação e para cada conversor escolhido deverá ser conectado sua respectiva carga . O estado de cada relé pode ser

observado na Tabela (2.1).

Tabela 2.1 – Estados dos relés para alimentação do circuito de potência e operação do conversor desejado.

Conversor	Relé 1	Relé 2	Relé 3	Relé 4
Buck	ON	OFF	ON	ON/OFF
Boost	OFF	ON	ON	ON
Buck-Boost	ON	ON	OFF	ON
Meia Ponte	ON	ON	ON	OFF
Ponte Completa	ON	OFF	ON	OFF

Fonte: Do Autor.

Tabela 2.2 – Operação dos interruptores para o conversor desejado.

Conversor	SW1	SW2	SW3	SW4
Buck	Operando	OFF	OFF	OFF
Boost	OFF	Operando	OFF	OFF
Buck-Boost	Operando	OFF	OFF	OFF
Meia Ponte	Operando	Operando	OFF	OFF
Ponte Completa	Operando	Operando	Operando	Operando

Fonte: Do Autor.

A Tabela (2.2) apresenta a operação de cada interruptor para cada conversor.

A Tabela (2.3) apresenta uma comparação das correntes eficazes e médias nos interruptores, indutores e diodos dos conversores Buck, Boost e Buck-Boost.

Tabela 2.3 – Comparaçāo entre correntes eficaz e média para os conversores Buck, Boost e Buck-Boost.

Conversor	I_{Srms}	I_{Srned}	I_{Lrms}	I_{Lmed}	I_{Drms}	I_{Dmed}	unid.
Buck	1,68	1,41	2	2	1,08	0,6	[A]
Boost	1,56	0,862	2,81	2,81	2,34	1,95	[A]
Buck-Boost	3,8	3	4,45	4,45	2,95	1,81	[A]

Fonte: Do Autor.

É possível perceber que as correntes do conversor Buck-Boost são de valores maiores e por isto o projeto do indutor foi feito com base nestes valores. Também as perdas nos semicondutores calculadas para este conversor.

2.2 PROJETO E DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA

Para o projeto da bancada são necessários alguns valores de definição, como os apresentados abaixo:

- Tensão de entrada: $U_1=17 + U_2=17$ [V];
- Tensão de saída do Buck: De 0 à 24 [V];
- Tensão de saída do Boost: De U_1 à 24 [V];
- Tensão de saída do Buck-Boost: De 0 à 24 [V];
- Tensão de saída do Meia-Ponte CC: De 0 à U_1 [V];
- Tensão de saída da Ponte Completa CC: De 0 à $U_1 + U_2$ [V];
- Tensão de saída da Meia-Ponte CA: De 0 à U_1 [V];
- Tensão de saída da Ponte Completa CA: De 0 à $U_1 + U_2$ [V];
- Carga do conversor Buck: 12 [Ω];
- Carga do conversor Boost: 12 [Ω];
- Carga do conversor Buck-Boost: 12 ou 6 [Ω];
- Carga do conversor Meia-Ponte: 8,5 [Ω];
- Carga do conversor Ponte Completa: 17 [Ω];
- Potência nominal de saída: 48 [W];
- ΔV_o : 5 %;
- ΔI_L : 10 %;
- Frequência de operação: 30 [kHz];
- Corrente nominal de saída: 2 [A];
- Razão cíclica Buck: De 0 à 0,7.
- Razão cíclica Boost: De 0 à 0,3.
- Razão cíclica Buck-Boost: De 0 à 0,585.
- Razão cíclica Meia-Ponte: De 0 à 1.

- Razão cíclica Ponte Completa: De 0 à 1.

Foram definidos valores nas faixas mostradas acima para que o aluno consiga entender claramente o funcionamento do conversor sem que esteja exposta a nenhum risco, já que a maioria das pessoas envolvidas nos experimentos são estudantes. Foi definido para este trabalho que a operação dos conversores seria em condição contínua. Também estes valores são adequados para uma boa visualização da forma de onda.

2.2.1 Barramento de entrada

A tensão de entrada dos conversores é obtida através de transformadores. Estes transformadores terão um valor de tensão eficaz de 220 V em seu primário e 12 V no secundário. Esta tensão possui um valor de pico igual à $V_{cpico} = 17$ V. Quando retificada esta tensão, o valor médio CC, com uma baixa ondulação, será de aproximadamente 17 V. Obteve-se, para uma ondulação de aproximadamente 10% na tensão de barramento, com um $V_{cmin} = 15,27$ V e um $V_{cpico} = 17$ V, um resistor de calculado pela potência de entrada de $R = 5,24 \Omega$, uma frequência de $f = 60$ Hz, que a relação de V_{cmin} por V_{cpico} igual à 0,9. Então utilizando o abaco (BARBI, 2006b), o valor de $\omega RC = 25,3$. A Equação (2.1) mostra o cálculo do capacitor, sendo $\omega = 2\pi f$.

$$C_{in} = \frac{55}{(\omega * R)} \quad (2.1)$$

A Equação (2.1) fornece um valor $C_{in} = 12,8$ mF. Para esta capacitância utilizou-se 5 capacitores de 2200 uF em paralelo, que resultaria em uma capacitância igual à $C_{in} = 11$ mF, que eram os disponíveis em laboratório. Não foi utilizado uma capacitância maior pois seria possível mostrar para os alunos a ondulação de entrada e como ela afeta a ondulação de saída.

O diodo escolhido para a retificação da tensão de entrada foi dimensionado para atender à uma corrente média de entrada de $I_{Dinmed} = 2,8$ A e corrente eficaz de entrada de $I_{Dinrms} = 3,67$ A, que foram obtidas através de simulação. O diodo escolhido foi o *NFB28G*.

$$P_{din} = (V_{TO} * I_{Dinmed}) + (r_t * I_{Dinrms}^2) \quad (2.2)$$

De acordo com o datasheet deste diodo, seu $V_{TO} = 0.8$ V, e sua resistência série $r_t = 60$ mΩ. Sua perda por condução é apresentada na Equação (2.3).

$$P_{din} = (0,8 * 2,8) + (60m * 3,67^2) \quad (2.3)$$

$$P_{din} = 3,0W \quad (2.4)$$

Para o cálculo térmico do diodo utilizou-se uma temperatura ambiente de 30°C, a potência dissipada no componente no valor de $P_{din} = 3,0$ W.

O cálculo termico do diodo pode ser obtido através dos valores de resistência térmica do semicondutor. A Equação (2.5) apresenta este cálculo:

$$R_{da} = R_{ja} - R_{jc} - R_{cd} \quad (2.5)$$

$$R_{ja} = \frac{T_J - T_a}{P} \quad (2.6)$$

Para a Equação (2.5), tem-se que R_{ja} é a resistência térmica entre a junção e o ambiente (°C/W), R_{jc} resistência térmica entre a junção e cápsula (°C/W), R_{cd} resistência térmica entre o componente e dissipador (°C/W) e T_J é a temperatura de junção do semicondutor. Conforme datasheet deste condutor $R_{jc} = 3$ °C/W, $R_{cd} = 1$ °C/W e para R_{ja} foi utilizado uma temperatura máxima do componente de 100 °C e temperatura ambiente de 30 °C resultando em uma resistência de 19,3 °C/W. Para este valor é escolhido um dissipados da K9 - M4.

Também é valido realizar uma validação para o caso de haver uma oscilação na tensão CA de entrada do conversor. Esta oscilação na tensão de entrada é dada pela rede de energia que é utilizada para a alimentação do conversor. A Tabela (2.5) apresenta os valores de tensão do transformador.

Tabela 2.4 – Valores de tensão de pico entrada

Tensão	Mínima	Típica	Máxima	Unid.
Primário do trafo	248,8	311	373,2	[V]
Secundário do trafo	13,6	17	20,4	[V]

Fonte: Do Autor.

Na tabela acima foi considerado uma variação de $\pm 20\%$ na tensão de entrada. Ao analisar o caso de a tensão de entrada ser mais baixa que a típica deve-se analisar a alimentação dos relés, microcontrolador e optoacopladores, pois caso não atinjam a tensão mínima para o funcionamento, o conversor não entra em operação. O mesmo deve ser feito para o caso de tensão mais elevada.

Caso 1 - Tensão baixa: a faixa de operação dos relés é de 11 até 19

V, de acordo com o datasheet do componente. Como este componente possui um regulador de tensão para garantir sua operação, o valor mínimo ainda atenderá às especificações. O microcontrolador também possui um regulador de tensão para 5 V, que garante sua operação com uma tensão de entrada reduzida. E por fim o optoacoplador possui sua faixa de operação entre 10 a 30 V e é alimentado diretamente pelo secundário do trafo, garantindo sua operação. Para a parte de potência a tensão reduzida impacta apenas nos valores de medições do conversor.

Caso 2 - Tensão elevada: para uma tensão 20% mais elevada que a típica os relés e o microcontrolador não são afetados devido ao regulador de tensão. A tensão de alimentação do optoacoplador será mais elevada mas ainda está dentro dos níveis de operação do CI. A tensão de barramento poderá apresentar uma ondulação maior já que os capacitores de entrada foram projetados para a tensão típica.

A Tabela (2.5) apresenta uma validação dos valores obtidos experimentalmente e simulados para o conversor Buck-Boost operando em modo Boost:

Tabela 2.5 – Tabela de validação de valores

Componente	Experimental	Simulado	Unid.
V_o	22,100	24	[V]
I_o	0,400	2	[A]
I_{Lmed}	0,949	4,80	[A]
I_{Lrms}	1,095	4,80	[A]
I_{Lpico}	1,240	5,15	[A]
I_{Smed}	0,640	2,97	[A]
I_{Srms}	0,853	3,84	[A]
I_{Spico}	1,320	5,20	[A]
I_{Dmed}	0,734	1,97	[A]
I_{Drms}	0,400	3,13	[A]
I_{Dpico}	1,240	5,20	[A]

Fonte: Do Autor.

Esta tabela apresenta os valores de corrente obtidos experimentalmente abaixo do esperado e isto já era previsto já que o conversor Buck-Boost estava

operando com carga elevada. Esta tabela nos fornece valores de resultados experimentais utilizando um indutor que não foi adequadamente projetado para este conversor, pois sua indutância se mostra diferente da projetada. Isto resulta em um valor de ondulação maior para a forma em que o conversor está operando, porém comprova que o conversor funciona.

2.2.2 Projeto e escolha do transistor

No projeto deste componente, a tensão de entrada V_{in} é de 17 V, então o interruptor deve suportar uma tensão de bloqueio igual à $V_{in} + V_o$, no caso do Buck-Boost, pois quando este conversor está na segunda etapa de operação, o interruptor recebe a tensão de entrada mais a tensão de saída. Esta tensão de bloqueio é igual à $V_b = 41$ V. Esta tensão é devido à tensão de saída do conversor Buck-Boost, 24 V, mais a tensão de entrada 17 V. É preciso também levar em conta sobretensão ocasionadas por capacitâncias e indutâncias parasitas.

A escolha do interruptor deve ser feita, primeiramente, baseando-se no valor médio de corrente e de tensão de bloqueio. A corrente eficaz que passará por este transistors é igual à $I_{Srms} = 3,8$ A. Deve-se observar também as características dinâmicas do semicondutor (t_r, t_f), que são os tempos de bloqueio e de entrada em condução (PETRY, 2014). Pode-se utilizar para esta bancada o transistors IRGB20B60, cuja características estão listadas abaixo:

- $V_{CES} = 600$ V
- $I_{Cmax} = 24$ A
- $V_{CE} = 1,65$ V
- $t_r = 30$ ns
- $t_f = 40$ ns
- $t_{on} = 19,5$ μ s

O valor instantâneo de corrente no interruptor adquirido via simulação é de $I_C = 4,9$ A. As perdas por comutação são calculadas e expressadas pela Fórmula (2.7):

$$P_{scom} = (I_C * V_b * t_{don} * 0,5) \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) apresenta um valor de potência igual à $P = 5 \mu\text{W}$. Perdas por condução:

$$P_{scond} = I_C * V_{CE} * t_{on} \quad (2.8)$$

As perdas por condução calculadas acima de $P_{scond} = 158 \mu\text{W}$. Então a potência total dissipada na chave é de:

$$P_s = P_{scom} + P_{scond} \quad (2.9)$$

As perdas totais nos interruptores são calculadas como mostra a Equação (2.10):

$$P_{sT} = \frac{P_{scm} + P_{scond}}{t_c} \quad (2.10)$$

A Equação acima fornece um valor de $P_{sT} = 4,89$ W, utilizando $t_s = 19,5 \mu s$.

O IGBT que está sendo utilizado possui um diodo interno em anti paralelo, como mostrado na Figura (2.1). As perdas neste diodo também são consideráveis para o resultado final.

Os diodos que operam no circuito de alta frequência possuem perdas que podem ser calculadas utilizando a mesma equação dos diodos de retificação de entrada. Conforme apresentado na Equação (2.2), as perdas nos diodos de potência são mostradas abaixo:

$$P_{dp} = (1 * 1,81) + (0,053 * 2,95^2) \quad (2.11)$$

Então as perdas por condução no diodo de potência é $P_{dp} = 2,27$ W.

O cálculo térmico do transistor pode ser obtido através dos valores de resistência térmica do semicondutor. A Equação (2.5) apresenta este cálculo:

Conforme datasheet deste condutor $R_{jc} = 1,53$ °C/W, $R_{cd} = 1$ °C/W e para R_{ja} foi utilizado uma temperatura máxima de 100 °C e temperatura ambiente de 30 °C resultando em uma resistência de 11,8 °C/W. Para este valor é escolhido um dissipador da K9 - M4.

2.2.3 Relés

Os relés utilizados neste projeto tem a função de, em uma mesma bancada, alterar o funcionamento do conversor. Com os mesmos componentes na bancada consegue-se, através dos relés, diferentes conversores, como o Buck, Boost, Buck-Boost, meia-ponte e ponte completa.

Estes relés possuem 3 contatos, um NA (Normal Aberto), um NF (Normal Fechado) e o contato comum (BRAGA, 2011). O contato NF é ligado ao contato comum quando o relé não está em funcionamento.

A bobina do relé utilizado é alimentada com 12 V DC. Para realizar a alimentação das bobinas será montado uma fonte auxiliar, isolada da fonte de potência de entrada e com regulador de tensão. Para o acionamento dos mesmos foi feito um circuito utilizando transistores bipolares. Utiliza-se, os transistores bipolares como chaves para alimentar, ou não a bobina do relé. Em série com a bobina, um bjt, que é acionado por um comando que vem do microcontrolador. Quando o bjt não está recebendo o comando, fica em

aberto (SEDRA, 1996) e como está em série com a bobina do relé, não a deixa ser energizada. Quando recebe o comando, fecha o circuito permitindo então a passagem de corrente pela bobina do relé, fazendo com o que o contado do relé seja fechado. Foi adicionado um diodo de roda-livre com as bobinas dos relés, para que quando o circuito seja interrompido haja caminho de circulação da corrente da bobina (indutor) do relé e não cause uma sobretensão que pode, ocasionalmente, queimar o transistor. Para atender as características do projeto utilizou-se o relé Finder 36.11.

2.2.4 Indutor

Com base nas informações da seção (2.2) pode-se fazer o cálculo do indutor.

O valor da indutância deste indutor para o projeto é (BARBI, 2006a):

$$L = \frac{D * V_{in}}{f * \Delta I_L} \quad (2.12)$$

$$L = \frac{0,585 * 17}{30000 * 0,482} \quad (2.13)$$

Da Equação (2.12) resultou em um valor de indutor igual à $L = 688 \mu\text{H}$, Utilizando um valor de razão cíclica igual á 0,585, valor referente à tensão de saída de 24 V do conversor Buck-Boost.

Deve-se primeiramente escolher qual tipo de núcleo utilizar. para este projeto foi decidido utilizar um núcleo do tipo EE. Então seu $A_e A_w$, como mostra a Equação (2.14).

$$A_e A_w = \frac{L * I_{Lpico} * I_{Lrms}}{K_e * B_m * J_m} \quad (2.14)$$

$$A_e A_w = \frac{687 * 10^{-6} * 5,3 * 4,82}{0,7 * 0,35 * 450} \quad (2.15)$$

Para a Equação (2.14) definiu-se estes valores de constantes:

- $K_e = 0,7$; → Fator de Enrolamento
- $B_m = 0,35 \text{ T}$; → Densidade máxima de fluxo
- $J_m = 450 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ → Densidade de Corrente

Da Equação (2.14), sabendo que $I_{Lpico} = 5,3 \text{ A}$ e $I_{Lrms} = 4,82 \text{ A}$, resulta um valor de $A_e A_w = 1,594 \text{ cm}^4$. Com isso faz-se a escolha do núcleo EE-42/15, cuja especificação encontra-se na Tabela (2.6).

Tabela 2.6 – Parâmetros do núcleo tipo EE-42/15

Núcleo	$A_e (cm^2)$	$A_w (cm^2)$	l_e (cm)	l_t (cm)	$V_n (cm^3)$	$A_e A_w (cm^4)$
EE-42/15	1,8	1,57	9,7	8,7	17,6	2,84

Fonte: Do Autor.

Para o cálculo do número de espiras, a Equação (2.16):

$$N = \frac{L * I_{Lpico}}{B_m * A_e} \quad (2.16)$$

$$N = \frac{687 * 10^{-6} * 5,3}{0,35 * 1,8} \quad (2.17)$$

O número de espiras resultante para o indutor é de $N = 52$ espiras (PETRY, 2007). Este indutor possuirá um entreferro de tamanho $lg = 0,93$ mm, cujo cálculo detalhado está no apêndice.

Diâmetro máximo do fio utilizado é mostrado na Equação (2.19) (PETRY, 2007).

$$s = \frac{7,5}{\sqrt{30000}} \quad (2.18)$$

$$Dmax = 2 * s = 0.866mm \quad (2.19)$$

Utiliza-se o fio 20 AWG obtém-se um fator de ocupação no indutor de 0,753, que é um valor aceitável para a construção. Também com esses valores obtidos, calculou-se uma elevação de temperatura de 5,5 °C e perdas totais no indutor de $P_{LT} = 0,353$ W. Vide apêndice A para cálculo completo do elemento magnético.

2.2.5 Capacitor de saída

Cada conversor que montado na bancada possui sua carga e seu capacitor de saída. Nos casos de Buck e Buck-Boost, estes conversores possuem a mesma saída, logo o projeto será para o pior caso, assim como no conversor Meia-Ponte e Ponte Completa.

Para o pior caso, na saída dos conversores Buck e Buck-Boost ocorre quando o Buck-Boost está operando na condição de Boost. O cálculo do capacitor para esta saída é mostrado na Equação (2.20) (ASSEF, 2013).

$$C_{bb} = \frac{I_o * D}{f * \Delta V_o} \quad (2.20)$$

A tensão de saída dos conversores é de 24 V, por ser um valor comercial, com exceção do Buck-Boost operando como Buck, que é de 12 V, entretanto como utiliza a mesma saída, também será o mesmo capacitor. A Equação (2.20) resultou em um $C = 32,5 \mu\text{F}$, então será utilizado um capacitor eletrolítico de $C = 33 \mu\text{F}$, que é valor comercial.

Para o conversor Boost, a fórmula para o capacitor de saída é dada pela Equação (2.21) (BARBI, 2006a):

$$C_{Boost} = \frac{I_o * (V_o - V_{in})}{f * V_o * \Delta V_o} \quad (2.21)$$

Então o capacitor de saída do conversor Boost é $C = 16,2 \mu\text{F}$.

2.2.6 Eficiência do conversor

A potência total de entrada da bancada é adquirida primeiramente utilizando a formula da Equação (2.22) onde $P_{din} = 3 \text{ W}$, $P_{sT} = 4,89 \text{ W}$, $P_{LT} = 0,353 \text{ W}$, $P_{dp} = 2,27 \text{ W}$ e $P_o = 48 \text{ W}$:

$$P_{in} = P_{din} + P_{sT} + P_{LT} + P_{dp} + P_o \quad (2.22)$$

Para a equação acima P_{din} é a potência total dissipada nos diodos de entrada, P_{sT} é a potência total dissipada nos interruptores, P_{LT} é a potência total dissipada no indutor, P_{dp} é a potência dissipada no diodo do conversor e P_o é a potência de saída do conversor.

A Equação (2.22) apresenta um valor de potência de entrada igual à $P_{in} = 58,5 \text{ W}$. Possuindo este valor pode-se calcular a eficiência do conversor.

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad (2.23)$$

A Equação (2.23) resultou em um valor de eficiência de $\eta = 82 \%$. Os valores utilizados para o cálculo de perdas do conversor foram obtidos a partir de simulação.

2.2.7 Microcontrolador

Para a implementação desta bancada, decidiu-se utilizar o microcontrolador Arduino®. A escolha deste componente baseou-se no fato de ser um microcontrolador de baixo custo, de fácil entendimento e utilização e que seria suficiente para executar todas as tarefas necessárias para a montagem, acionamento e comando dos conversores. Também, além da modulação, este conversor permite que seja escolhido o conversor desejado na bancada mudando a topologia através dos relés, apresenta o valor do conversor desejado em um display de 7 segmentos e possui uma fácil programação.

Este componente possui características suficientes para o projeto, sendo:

- Frequência máxima 62 kHz;
- 13 entradas e saídas digitais;
- 6 entradas e saídas analógicas;
- Alimentação 5 até 20 V;
- Capacidade de corrente de saída 24 mA em cada porta.

A Figura (2.2) apresenta o microcontrolador físico.

Figura 2.2 – Microcontrolador Arduino® UNO.



Fonte: [Arduino.cc](http://arduino.cc).

Também foi optado por utilizar um display de 7 segmentos para identificar qual conversor está em operação.

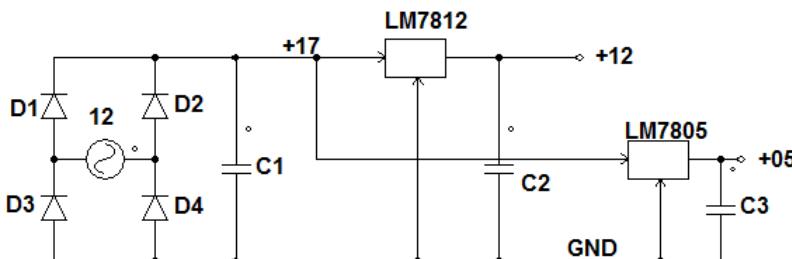
Tabela 2.7 – Número a ser apresentado no display de acordo com o conversor escolhido.

Conversor	Display
Buck	1
Boost	2
Buck-Boost	3
Meia-Ponte	4
Ponte Completa	5

Fonte: Do Autor.

Para alimentar o Arduino® utilizou-se um regulador de tensão para 5 V(CI LM7805), que regula a tensão de entrada da fonte auxiliar para se adequar à tensão de entrada do Arduino. Também utilizou-se o regulador de 12 V para a alimentação dos relés (LM7812).

Figura 2.3 – Esquemático de alimentação do Arduino® e relés.



Fonte: Do Autor.

A Figura (2.3) apresenta as tensões de entrada do circuito. Os 12 V RMS do transformador. A tensão de 17 V é a tensão de barramento do circuito. Após o LM7812 a tensão é regulada para 12 V para alimentar a bobina dos relés. Após o LM7805 a tensão é regulada para 5 V para alimentar o Arduino®. Cada regulador possui um capacitor eletrolítico de 480 μ F, e um de 150 nF de polipropileno para filtrar esta tensão.

As ligações no microcontrolador são as seguintes:

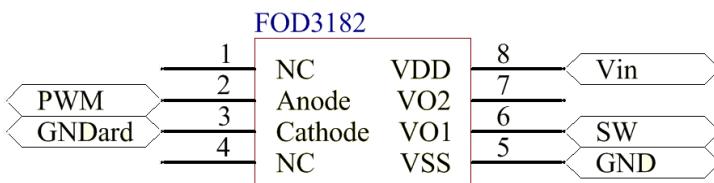
- Porta 01 → Relé 2;
- Porta 02 → Relé 3;
- Porta 03 → PWM 3;
- Porta 04 → Relé 4;
- Porta 05 → Push Buttom;
- Porta 06 → Bit 0;
- Porta 07 → Relé 1;
- Porta 08 → Bit 1;
- Porta 09 → PWM1;
- Porta 10 → PWM2;
- Porta 11 → PWM4;
- Porta 12 → Bit 2;
- Porta 13 → Bit 3;
- Porta A0 → potenciômetro para mudança do PWM;
- Porta A1 → potenciômetro para seleção de conversor;
- Porta 5V → 5Vard;
- Porta Vin → +05;
- Porta GND → GND05;

Os pinos PWM são os que comandam as chaves S1, S2, S3 e S4. Essas portas de PWM do microcontrolador, estarão ligadas nos optoacopladores, que executarão o comando das chaves. O esquemático dos drivers está representado na Figura (2.4).

O Push Buttom será responsável pelo comando para a escolha do conversor. Ao pressiona-lo, os relés fecharam contato e o comando da chave do conversor escolhido será acionado.

2.2.8 Optoacoplador

Figura 2.4 – Esquema de Ligação de Optoacoplador.

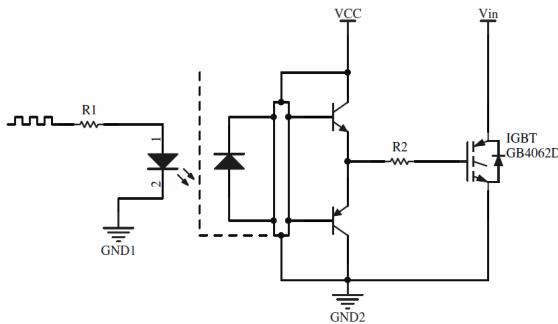


Fonte: Do Autor.

Para este projeto definiu-se a utilização dos optoacopladores FOD3182.

Os drivers que comandam as chaves inferiores serão alimentados por uma mesma fonte auxiliar. E os optoacopladores dos interruptores superiores, S1 e S3, cada um terá sua alimentação isolada. Os pinos SW, que são as saídas dos optoacopladores, serão ligadas ao resistor de gate do IGBT, que foi utilizado $22\ \Omega$ que apresenta um tempo de subida do comando do optoacoplador igual a $t_r = 200\ \text{ns}$. O pino de PWM se refere ao circuito onde é gerada a onda de comando, que é uma das saídas do arduino. GNDard refere-se ao pino de terra do microcontrolador. os pinos Vin e GND são os pinos de ligação dos drivers que também será a tensão aplicada no gate source do transistor. A Figura (2.5) apresenta o circuito de driver do igbt.

Figura 2.5 – Circuito de driver utilizado para o comando dos transistores.



Fonte: Do Autor.

As portas bit 0 a 3 são utilizadas para mostrar o número do conversor que estará sendo executado. Para o comando do display será utilizado um decodificador de 7 segmentos(74ls47). Este decodificador utiliza em sua entrada um valor de 4 bits binário e seus pinos de saída acionarão o display.

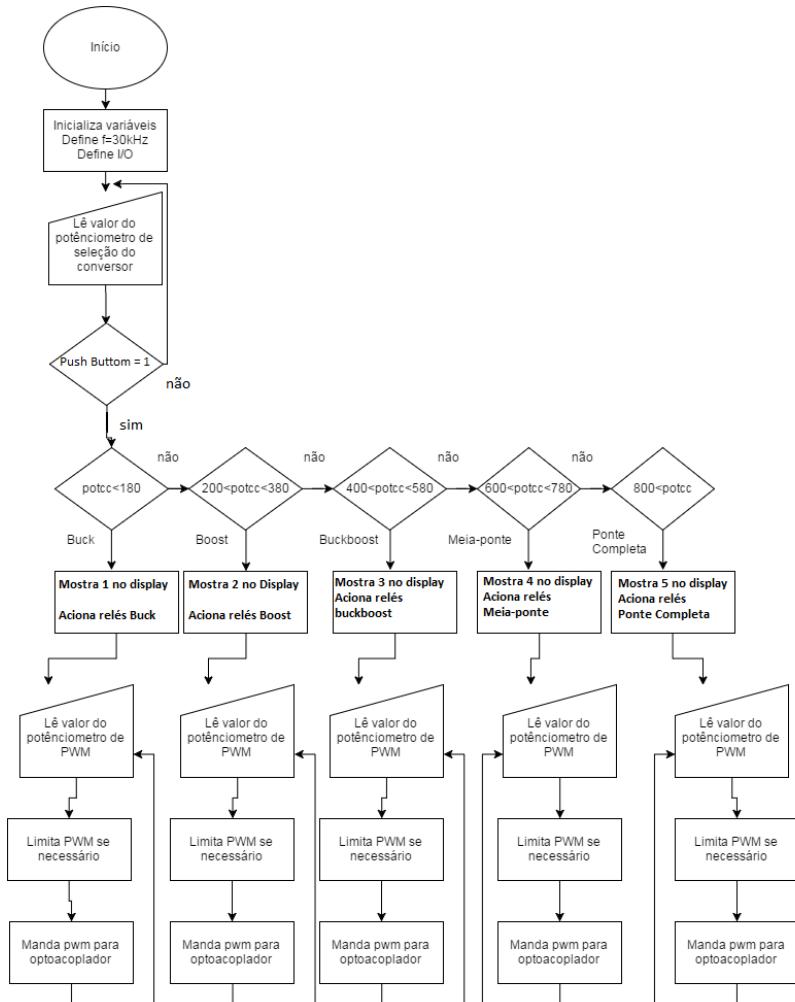
A Figura (2.6) apresenta o fluxograma do programa utilizado para este projeto.

O programa utilizado no microcontrolador é apresentado no Apêndice B.

2.3 CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO DA BANCADA DIDÁTICA

Cada conversor tem sua topologia, porém pode-se perceber que na mudança de um conversor para outro apenas os relés atuam. No caso do Buck, Boost e Buck-Boost é apenas a disposição da célula de comutação. Sabendo disso pensou-se em utilizar o conversor em Ponte Completa como base para os outros conversores.

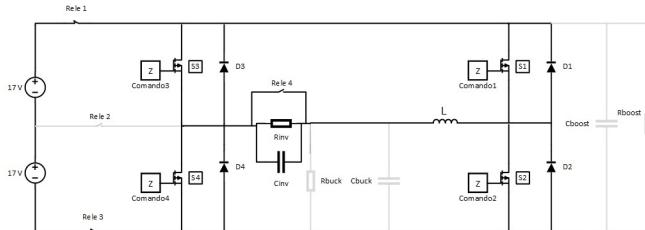
Figura 2.6 – Diagrama de blocos do programa Utilizado.



Fonte: Do Autor.

É possível perceber na Figura (2.7) que o conversor ponte completa possui 4 chaves com 4 diodos em anti-paralelo e o indutor no centro do circuito, então a partir deste conversor é possível montar os outros conversores.

Figura 2.7 – Conversor em Ponte Completa.

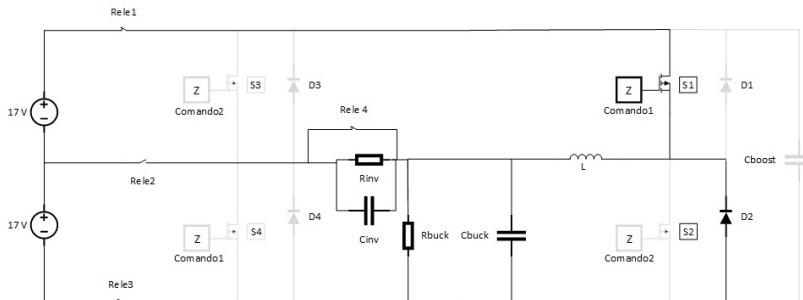


Fonte: Do Autor.

2.3.1 Conversor Buck

Como o conversor possui um braço de chaves formado por S1 e S2, juntamente com D1 e D2, pode-se utilizar estes transistores e diodos para montar o conversor Buck. Para que isto aconteça, basta que acione-se os relés 1, 3 e 4. Fazendo isto, a topologia obtida é a do conversor Buck, como mostra a Figura (2.8). Nesta montagem, percebe-se que não se utiliza todo o circuito do Ponte Completa, e sim uma chave e um diodo do mesmo. Após isto basta ligar a carga no circuito do conversor Buck.

Figura 2.8 – Conversor Buck.



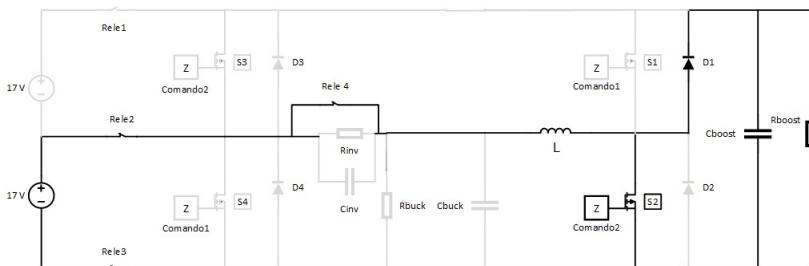
Fonte: Do Autor.

A tensão de entrada do conversor Buck é dada pela associação de fontes que estão no barramento de entrada do circuito de potência, como mostra a Figura (2.11). Então a tensão de saída deverá ser menor que 34 V sempre. Para uma aplicação de 2 A de saída deve-se definir uma razão cíclica de 0,7 e a carga com um valor de 12Ω , para que potência desejada na saída seja de 48 W.

2.3.2 Conversor Boost

Para a montagem do conversor Boost utiliza-se a fonte U_2 da bancada para o fornecimento de energia ao conversor. O interruptor S2 realiza a comutação do circuito utilizando o diodo D1 como roda livre do circuito, como pode ser visto na Figura (2.9).

Figura 2.9 – Conversor Boost.



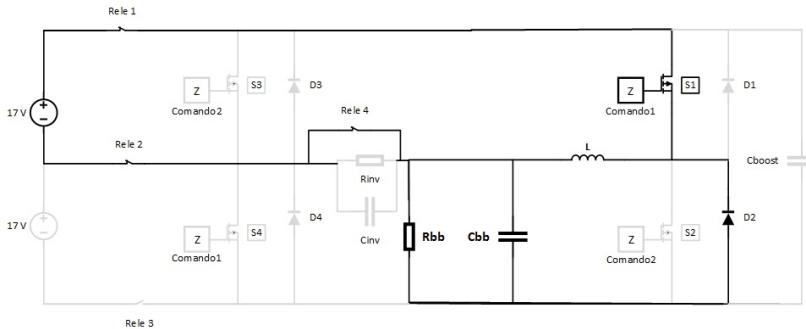
Fonte: Do Autor.

Uma carga em paralelo com o braço 1 do conversor deve ser adicionada para o Boost. Se a carga utilizada estivesse no mesmo lugar que estava com o conversor Buck, esta estaria diretamente em paralelo com a fonte e não teria função alguma no circuito. Como a entrada de tensão do conversor Boost é de 17 V sua razão cíclica deve ser de 0,29 para que a saída seja de 24 V. Coloca-se também uma carga de $12\ \Omega$ para que a corrente na saída do conversor seja de 2 A, como o projetado.

2.3.3 Conversor Buck – Boost

A topologia do conversor Buck-Boost é bastante semelhante com a do Buck, pois utiliza-se a mesma carga para ambos os conversores. O conversor final será apresentado na Figura (2.10):

Figura 2.10 – Conversor Buck-Boost.



Fonte: Do Autor.

Percebe-se que a mesma chave é utilizada, assim como o diodo e a mesma carga do Buck, porém com a fonte U_1 apenas, isto faz este conversor funcionar como Buck-Boost.

A carga para esta topologia pode ser definida levando em consideração o seu estado de funcionamento como Boost, $D = 0,585$. Então esta carga pode ser definida como 12Ω para que seja cumprida a especificação do projeto de corrente de saída.

2.3.4 Conversor Meia-Ponte

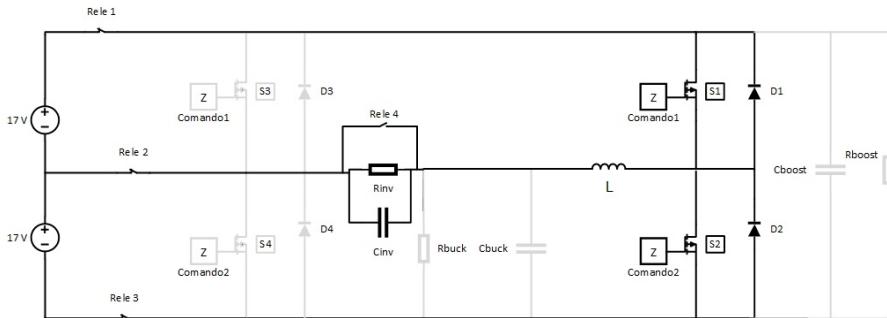
O conversor Meia-Ponte pode ser operado tanto como CC-CC como CC-CA. Como o conversor base desta bancada é o Ponte Completa, a topologia do Meia-Ponte fica fácil de ser obtida apenas fechando-se os relés 1, 2 e 3 para que exista um ponto médio entre as fontes de entrada do conversor. Também deve-se abrir o relé 4 para que o bypass da carga seja desativado, como apresentado na Figura 2.11.

Neste conversor então, utiliza-se ambas as chaves, com seus respectivos diodos em anti-paralelo. Estas chaves devem ser comandadas complementarmente, com o tempo morto.

Como o barramento de entrada é de 17 V + 17 V a saída na carga então será uma tensão alternada de +17 V e -17 V.

O comando deste conversor deve ser feito de forma complementar entre as chaves, como mostra a Figura (2.12). Deve-se tomar cuidado com o tempo morto na comutação deste braço, pois caso não haja este tempo, as chaves comutam simultaneamente e ocorre uma falha no conversor devido ao

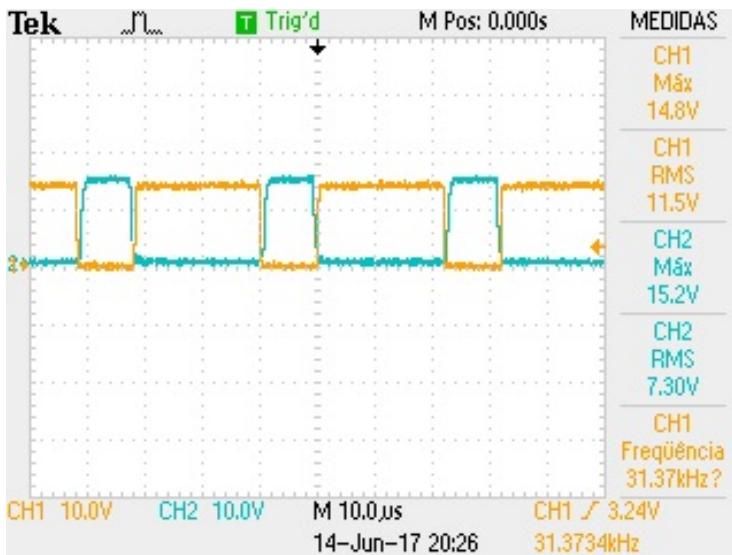
Figura 2.11 – Conversor Meia-Ponte.



Fonte: Do Autor.

curto-circuito causado pelos transistores.

Figura 2.12 – Comando do conversor Meia-Ponte.

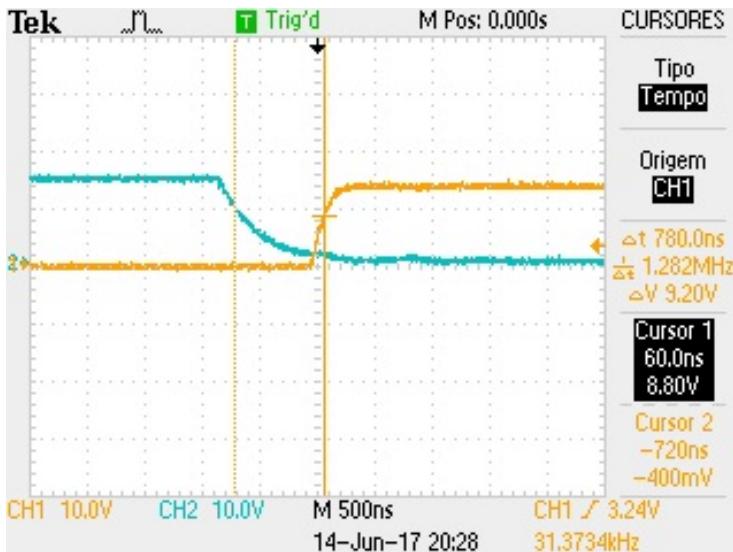


Fonte: Do Autor.

O tempo morto é mostrado na Figura (2.13). Para este circuito foi utilizado um tempo morto de aproximadamente 780 ns. Nas especificações do interruptor é parâmetro que $t_r = 31$ ns e $t_f = 41$ ns, porém ao analizar os tempos para o microcontrolador enviar o sinal de gatilho para o circuito do

driver e tempo para o optoacoplador enviar o sinal para o gate do interruptor, optou-se por utilizar um tempo morto maior do que o que é usualmente implementado por questões de segurança da bancada.

Figura 2.13 – Tempo morto do conversor comando do conversor Meia-Ponte.



Fonte: Do Autor.

2.3.5 Conversor Ponte Completa

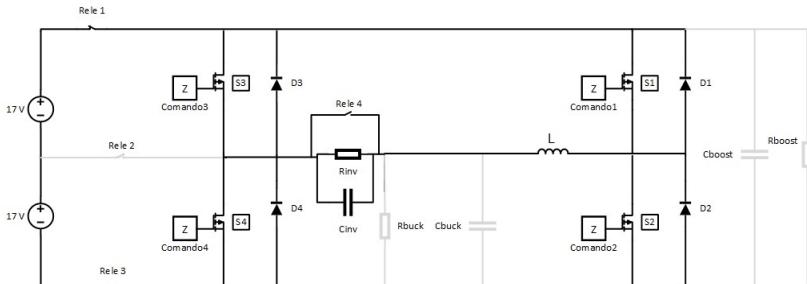
Esta topologia é a mais completa da bancada, pois utiliza os 4 transistores e as 4 diodos do circuito. Para o funcionamento deste conversor teremos que obter o circuito mostrado na Figura (2.14).

Usa-se neste conversor duas vezes a tensão nominal de entrada, 34 V, que será aplicada na carga, ora positiva, ora negativa. O filtro do ponte completa será o mesmo utilizado no Meia-Ponte para facilitar o layout da bancada do conversor e também otimizar o conversor ao máximo.

O comando para esta topologia deve ser complementar também, de modo a acionar S1 e S4, S2 e S3 simultaneamente. Os comandos para os transistores são isolados porém sincronizados.

Para esta topologia, aciona-se os relés 1 e 3, da entrada e o relé de carga 4, deixando assim as cargas dos outros conversores em aberto.

Figura 2.14 – Topologia do conversor Ponte Completa.



Fonte: Do Autor.

Foi calculado o filtro de saída dos inversores fixando-se o valor de indutância previamente calculado para o conversor Buck-Boost. O valor de capacitância também foi calculado levando em conta o pior caso dos conversores Meia-ponte e Ponte completa. A Equação (2.24) apresenta um valor de capacitância $C_{inv} = 4 \mu\text{F}$ para os valores de ondulação definidos anteriormente.

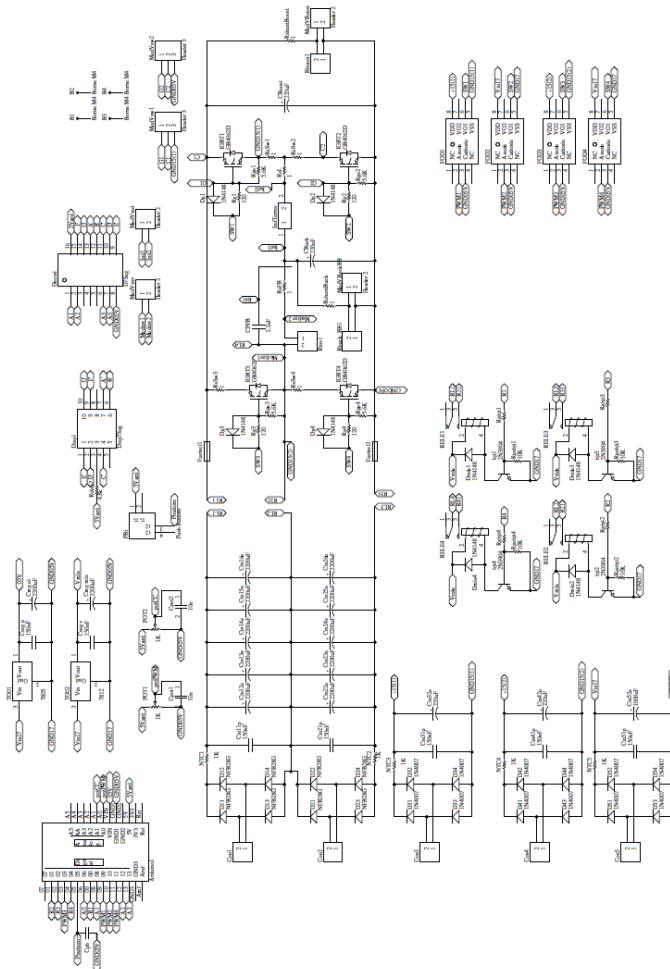
$$C_{inv} = \frac{\Delta I_L}{f_s * \Delta V_o} \quad (2.24)$$

2.3.6 A Bancada Didática

A placa onde foi montada a bancada didática possui um layout que visa facilitar o entendimento do aluno e também maximizar o aprendizado. Deste modo, utilizou-se trimpots para a seleção de conversor mas devem ser utilizados potenciômetros de mesmo valor por serem mais robustos e suportarem o uso intenso de alunos. Os números de cada conversor seriam exibidos no display de sete segmentos. Após a escolha do conversor o push button deve ser pressionado para iniciar o comando dos relés e dos interruptores. Após a conexão da carga na bancada restaria conectar a fonte de alimentação da potência para o funcionamento dos conversores.

O esquemático completo utilizado para o projeto da bancada é apresentado na Figura (2.16) :

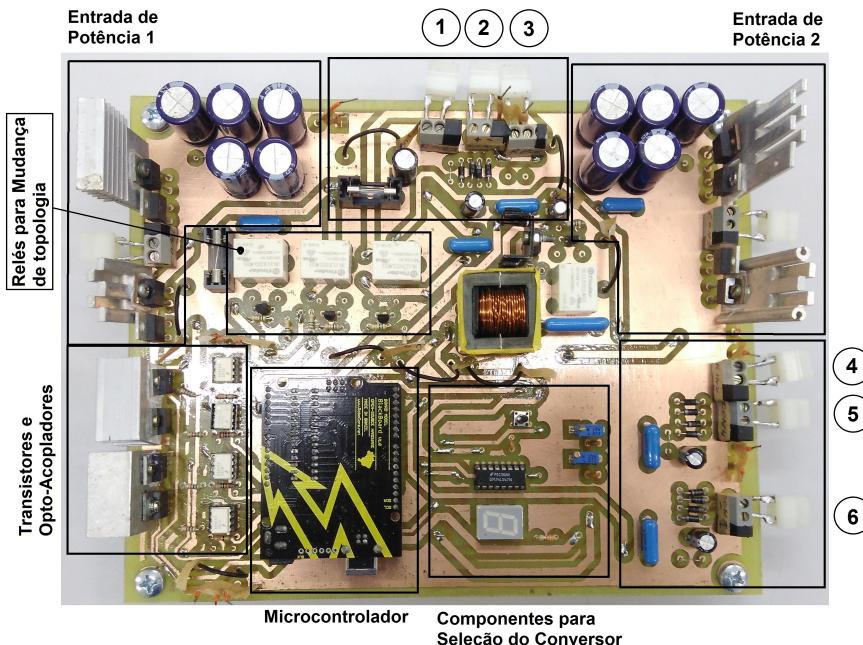
Figura 2.15 – Esquemático completo da bancada didática.



Fonte: Do Autor.

O layout do protótipo utilizado é a quarta versão de placa e foram melhorados alguns pontos desde sua primeira versão, tais como pontos de medição, disposição de componentes e conectores para fontes e carga. Para que facilitasse o entendimento, foi marcado regiões para explicação da bancada, como mostra a Figura (2.16).

Figura 2.16 – Placa da bancada didática com separação dos componentes.



Fonte: Do Autor.

A Tabela (2.8) apresenta a indicação numérica representada na Figura (2.16).

Tabela 2.8 – Referências numéricas na placa da Bancada para conectores.

Conektor	Número
Carga do Boost	1
Fonte auxiliar para opto-acoplador 1	2
Carga do Buck e Buck-Boost	3
Carga do inversor	4
Fonte auxiliar para opto-acoplador 3	5
Fonte auxiliar para arduino, relés e opto-acopladores 2 e 4	6

Fonte: Do Autor.

3 RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

Os resultados de simulação foram obtidos através do software de simulação PSIM. As simulações são com componentes ideais e não foram considerados ruídos, interferências, problemas na aquisição dos valores de medição, quedas de tensão e outros fatores que poderiam influenciar o resultado real do conversor. Também a aquisição de dados experimentais possui alguns ruídos e eventuais interferências.

Todos os resultados experimentais obtidos para este trabalho foram realizados utilizando uma fonte CC na entrada de potência, porém a topologia utilizou os retificadores e capacitores de entrada. Não foi utilizado o transformador na entrada para que fosse possível controlar a tensão na entrada dos conversores para os testes. Também houve diferenças de indutância para o indutor que influenciou bastante os resultados experimentais. Entretanto mesmo com o indutor com valor diferente do projetado os resultados se mostraram satisfatórios considerando os erros.

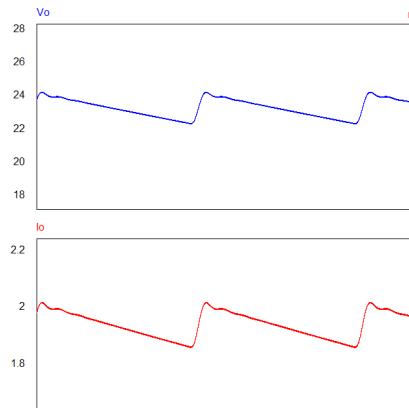
3.1 CONVERSOR BUCK

3.1.1 Tensão e corrente na carga do conversor buck

A simulação de tensão e corrente na carga é mostrada na Figura (3.1). Esta simulação não leva em conta as perdas em nenhum componente. A simulação consiste em um *duty cycle* de 0,7, um resistor de carga de $R = 12 \Omega$ e tensão de entrada de $V_{in} = 34 V$ para uma tensão na saída de $V_o = 24 V$. Também é possível notar uma ondulação em baixa frequência na tensão e corrente devido a ondulação da tensão de entrada no barramento do conversor que foi definida com valor de $\Delta V_{in} = 10\%$.

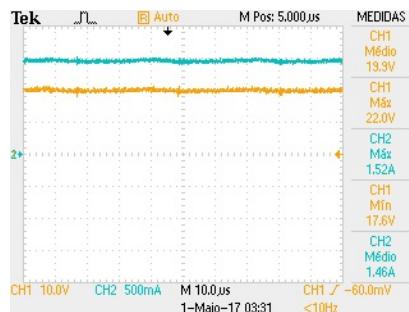
A Figura (3.2) apresenta a forma de onda obtida experimentalmente. Nota-se uma tensão de $V_o = 20 V$ devido às perdas existentes em todos os componentes do conversor. Foi utilizado um resistor para a carga com o vlor de $R_o = 14 \Omega$. Não é possível ver a ondulação em baixa frequência na forma de onda porque foram utilizados fontes CC para a obtenção dos resultados.

Figura 3.1 – Resultados de simulação do conversor buck - tensão e corrente na carga.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.2 – Resultados experimentais do conversor buck - tensão e corrente na carga.

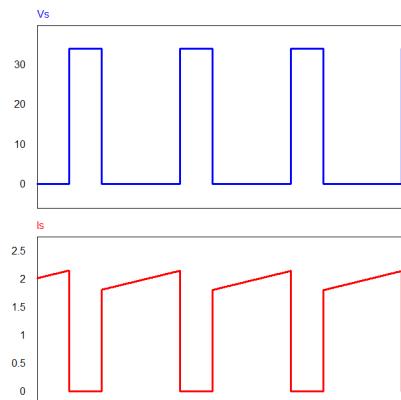


Fonte: Do Autor.

3.1.2 Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck

Na Figura (3.3) é apresentado a forma de onda de tensão e corrente no interruptor do conversor Buck. A forma de onda de tensão esperada para o interruptor é apresentar a tensão de entrada quando estiver bloqueado e V_{CEsat} conduzindo.

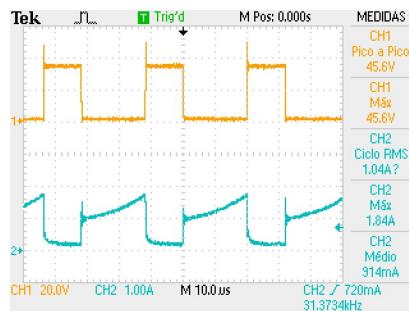
Figura 3.3 – Resultados de simulação do conversor Buck - tensão e corrente no interruptor.



Fonte: Do Autor.

Observa-se que a tensão apresentada na Figura (3.4), quando o transístor está bloqueado chega no nível dos 34 V. Este valor é o valor da tensão de bloqueio no transistor do conversor *Buck*. Também nota-se um pico de tensão, no valor de $V_{spico} = 45,6$ V no momento em que o interruptor bloqueia, devido às capacitâncias e indutâncias parasitas do sistema.

Figura 3.4 – Resultados experimentais do conversor Buck - tensão e corrente no interruptor.

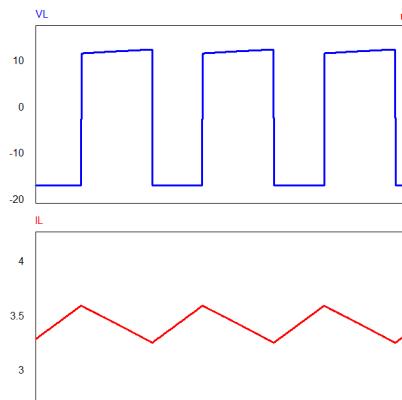


Fonte: Do Autor.

3.1.3 Tensão e corrente no indutor do conversor Buck

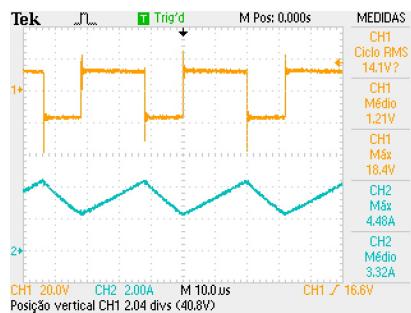
Sabe-se que a tensão média no indutor, dentro de um período, deve ser igual à zero. nota-se também que quando o interruptor está conduzindo a corrente no indutor aumenta linearmente. Na Figura (3.5) é apresentado a forma de onda simulada do conversor.

Figura 3.5 – Resultados de simulação do conversor Buck - tensão e corrente no indutor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.6 – Resultados Experimentais do Conversor *Buck* - Tensão e Corrente no Indutor.



Fonte: Do Autor.

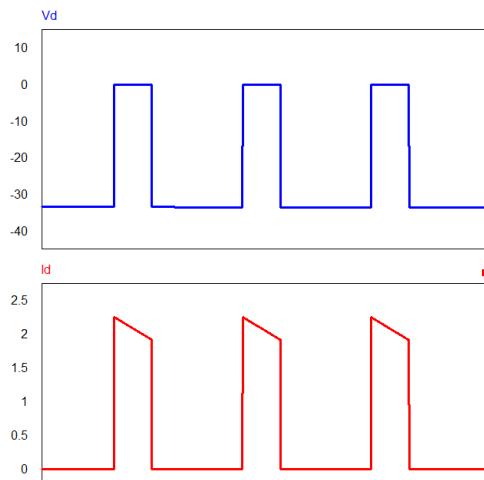
Já na Figura (3.6) é apresentada a forma de onda experimental do con-

vensor. Percebe-se uma ondulação maior do que o projetada devido às diferenças no valor do indutor utilizado experimentalmente.

3.1.4 Tensão e corrente no diodo do conversor Buck

A Figura (3.7) apresenta as formas de ondas simuladas no componente.

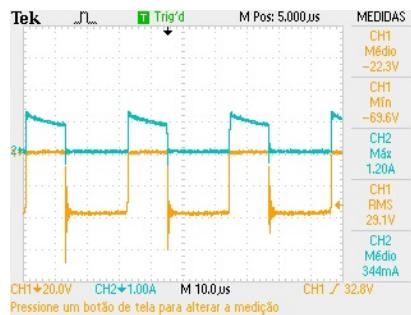
Figura 3.7 – Resultados de simulação do conversor Buck - tensão e corrente no diodo.



Fonte: Do Autor.

A Figura (3.8) apresenta a forma de onda de simulação do diodo do conversor Buck. identifica-se que quando a tensão em cima do diodo é zero, a corrente do conversor flui por ele, diminuindo, pois o indutor está entregando a energia que armazenou na primeira etapa.

Figura 3.8 – Resultados experimentais do conversor Buck - tensão e corrente no diodo.



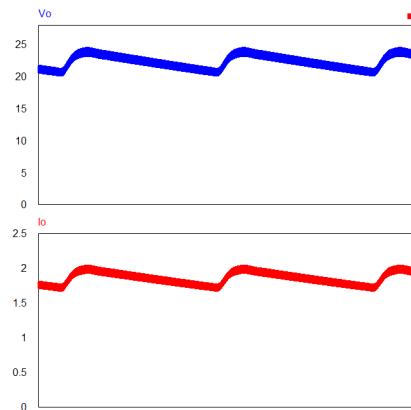
Fonte: Do Autor.

3.2 CONVERSOR BOOST

3.2.1 Tensão e corrente na carga do conversor Boost

Utilizou-se para realizar os testes no conversor Boost a tensão de entrada de $V_{in} = 17$ V, uma carga de $R = 28 \Omega$ e uma razão cíclica de $D = 0,29$.

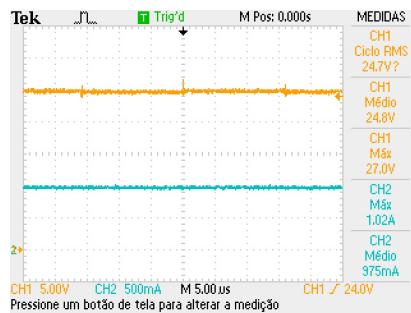
Figura 3.9 – Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente na carga.



Fonte: Do Autor.

A Figura (3.9) apresenta a forma de onda de simulação do conversor.

Figura 3.10 – Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente na carga.



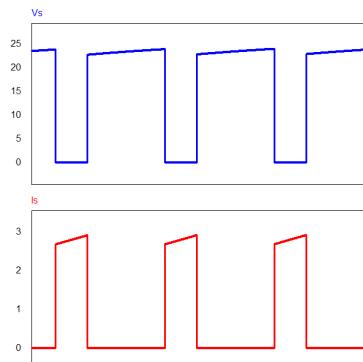
Fonte: Do Autor.

Também pode-se notar uma ondulação de baixa frequência na tensão de saída. Na Figura (3.10) é apresentada as formas de ondas obtidas experimentalmente para o conversor.

3.2.2 Tensão e corrente no interruptor do conversor Boost

A Figura (3.11) apresenta a forma de onda ideal do conversor. A Figura (3.12) apresenta a medição na bancada.

Figura 3.11 – Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente no interruptor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.12 – Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente no interruptor.



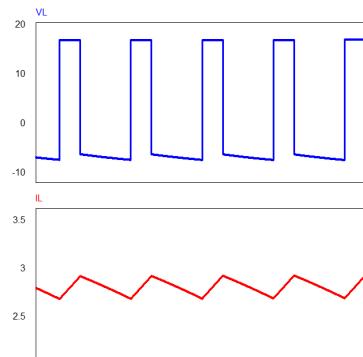
Fonte: Do Autor.

Nota-se uma sobrecorrente no momento em que o interruptor entra em condução porém estes valores absurdos são devidos aos erros de medição das ponteiras.

3.2.3 Tensão e corrente no indutor do conversor Boost

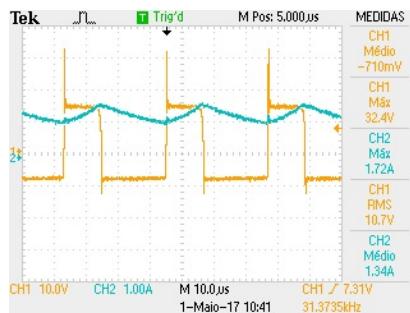
A Figura (3.13) apresenta os valores de simulação no indutor do conversor. Os resultados experimentais são apresentados na Figura (3.14).

Figura 3.13 – Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente no indutor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.14 – Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente no indutor.



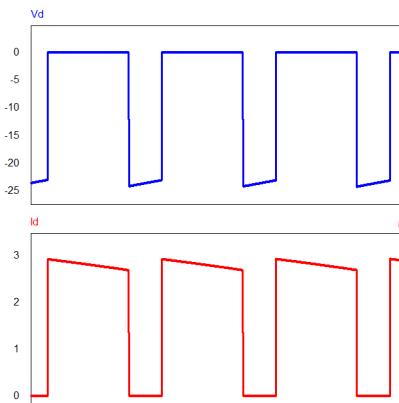
Fonte: Do Autor.

A corrente do indutor experimental é menor devido à carga estar reduzida, porém ainda é possível enxergar a ondulação.

3.2.4 Tensão e corrente no diodo do conversor Boost

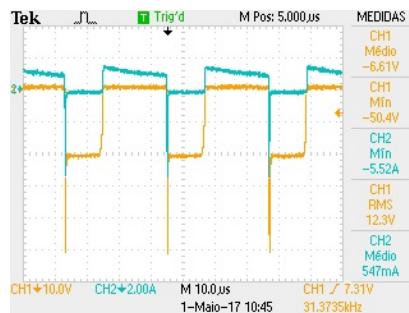
Na Figura (3.16) é apresentado o resultado de simulação do conversor.

Figura 3.15 – Resultados de simulação do conversor Boost - tensão e corrente no diodo.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.16 – Resultados experimentais do conversor Boost - tensão e corrente no diodo.



Fonte: Do Autor.

O esforço de tensão do diodo não é alto pois recebe a tensão de saída do conversor no período em que o transistor está em operação. Na Figura (3.16) é apresentado os valores de tensão e corrente experimentais do conversor. A ondulação de corrente no diodo é visível porém reduzida devido à carga estar elevada.

3.3 CONVERSOR BUCK-BOOST

Para os resultados experimentais do conversor Buck-Boost utilizou-se para o modo Buck uma tensão de entrada de $V_{in} = 17$ V, duty cycle de 0,29 e uma cara no valor de $R_o = 14 \Omega$ e para o modo Boost um duty cycle de 0,585 que foi a base do projeto pois é o pior caso, e uma carga na saída com o valor de $R_o = 56 \Omega$. Foi utilizada esta carga para garantir a operação do conversor devido a diferença na indutância do projeto para o prático.

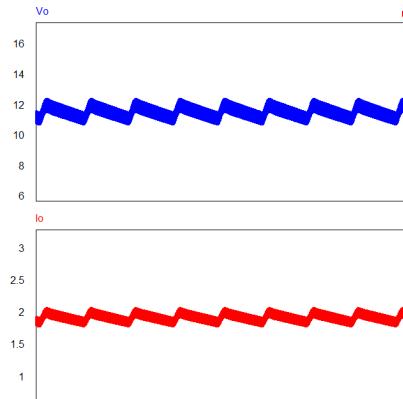
3.3.1 Tensão e corrente na carga do conversor Buck-Boost

3.3.1.1 Tensão e corrente na carga do conversor Buck-Boost operando em modo Buck

A Figura (3.17) apresenta as formas de ondas na saída do conversor. A ondulação em baixa frequência é dada pela tensão de barramento. Para a obtenção dos resultados utilizou-se uma razão cíclica menor devido à diferença no valor do indutor e por isso um valor de tensão menor que o simulado na

carga, como pode ser visto na Figura (3.18).

Figura 3.17 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente na carga.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.18 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente na carga.



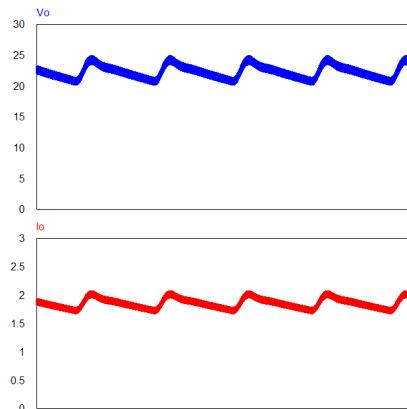
Fonte: Do Autor.

3.3.1.2 Tensão e corrente na carga do conversor Buck-Boost operando em modo Boost

Estes resultados são os mais importantes devido ao projeto dos componentes da bancada ser baseado nos dados destes resultados. A Figura (3.19)

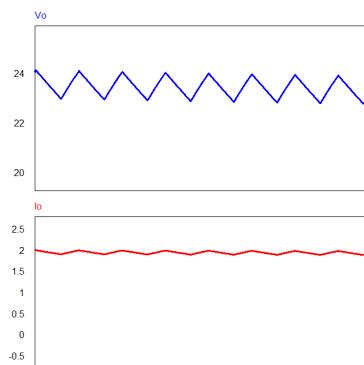
apresenta os valores de tensão e corrente na carga do conversor, mostrando um período para uma frequência de 60 Hz onde pode ser visto a ondulação na saída devido a ondulação no barramento de entrada. A Figura (3.20) mostra a ondulação na frequência de 30 kHz da onda de tensão e corrente. O valor projetado foi para uma ondulação de $\Delta V_o = 5\%$, o que foi comprovado na simulação.

Figura 3.19 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente na carga.



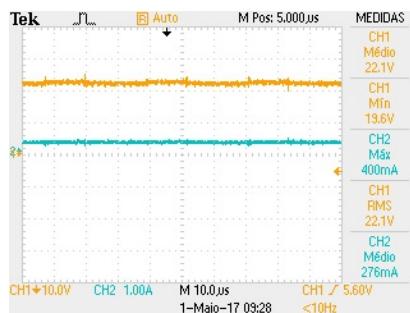
Fonte: Do Autor.

Figura 3.20 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente na carga.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.21 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente na carga.



Fonte: Do Autor.

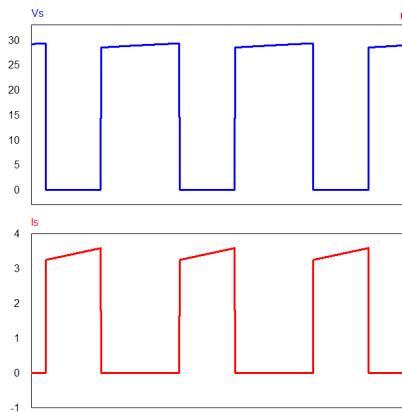
A Figura (3.21) apresenta as formas de ondas de tensão e corrente na carga do conversor. Não é possível visualizar a ondulação em baixa frequência devido à entrada de barramento que foi utilizado uma fonte CC controlada para os testes. Também o nível médio de tensão está adequado como projetado. A ondulação da tensão de saída não foi obtida porém pode-se perceber uma ondulação na forma de onda.

3.3.2 Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck-Boost

3.3.2.1 Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck-Boost operando em modo Buck

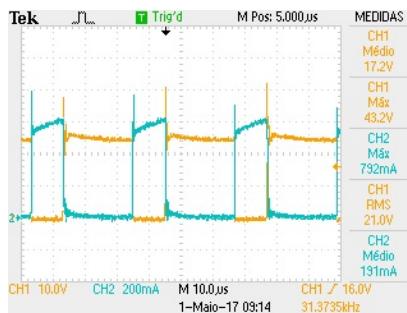
Na Figura (3.22) é mostrada as formas de ondas de tensão e corrente no interruptor obtidas através de simulação. É possível visualizar a ondulação de corrente no conversor, conforme foi projetado. E na Figura (3.23) é mostrada as formas de ondas obtidas experimentalmente para este modo de operação da bancada. Mesmo com o nível de corrente reduzido é possível perceber a ondulação a forma de onda experimental. Para o resultado simulado foi utilizado um valor de razão cíclica de 0,414 que resulta em 12 V na saída do conversor e para o experimental utilizou-se 0,29 apenas para os testes.

Figura 3.22 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no interruptor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.23 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no interruptor.



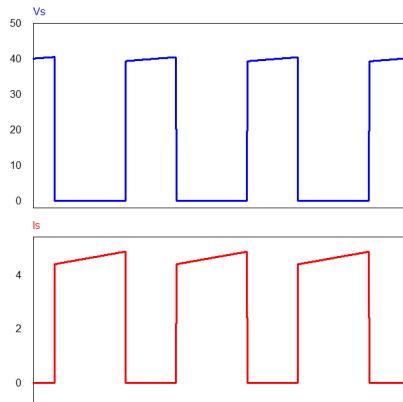
Fonte: Do Autor.

3.3.2.2 Tensão e corrente no interruptor do conversor Buck-Boost operando em modo Boost

A Figura (3.24) apresenta as formas de ondas de tensão e corrente no interruptor. Este modo de operação é o que possui o pior caso e foi baseado nele o projeto do elemento magnético e de perdas dos conversores. Percebe-se na simulação e na Figura (3.25) que a tensão no interruptor é de aproximadamente $V_s = 41$ V, conforme o projetado. Também a ondulação de 10% pode

ser vista nas imagens.

Figura 3.24 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no interruptor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.25 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no interruptor.



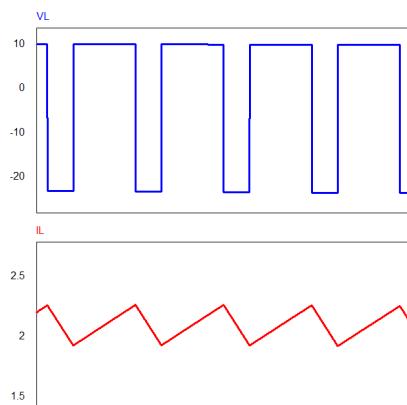
Fonte: Do Autor.

3.3.3 Tensão e Corrente no Indutor do Conversor Buck-Boost

3.3.3.1 Tensão e Corrente no Indutor do Conversor Buck-Boost operando em modo Buck

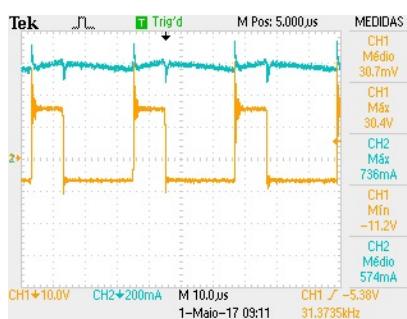
As Figuras (3.26) e (3.27) apresentam os valores de tensão e corrente no indutor do conversor Buck-Boost.

Figura 3.26 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no indutor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.27 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no indutor.



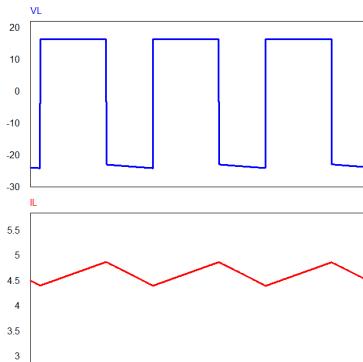
Fonte: Do Autor.

3.3.3.2 Tensão e Corrente no Indutor do Conversor Buck-Boost operando em modo Boost

A Figura (3.28) apresenta os valores de tensão e corrente no indutor. O indutor foi projetado para este conversor e segundo as especificações projetadas está funcionando adequadamente. Pode ser visto a ondulação na corrente do indutor com valor de $\Delta I_L = 0,482$ A.

Devido à diferença entre o valor de projeto e o valor do indutor na prática, o valor de ondulação nos resultados experimentais não são muito coerentes com a prática, como pode ser visto na Figura (3.29).

Figura 3.28 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no indutor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.29 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no indutor.



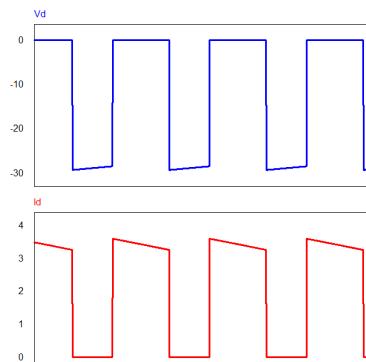
Fonte: Do Autor.

3.3.4 Tensão e Corrente no Díodo do Conversor Buck-Boost

3.3.4.1 Tensão e Corrente no Díodo do Conversor Buck-Boost operando em modo Buck

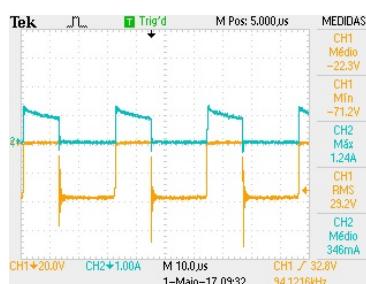
As Figuras (3.30) e (3.31) apresentam os valores de tensão e corrente no diodo do conversor. Na prática este valor está reduzido devido à tensão de saída do conversor estar reduzida também.

Figura 3.30 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no diodo.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.31 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Buck - tensão e corrente no diodo.

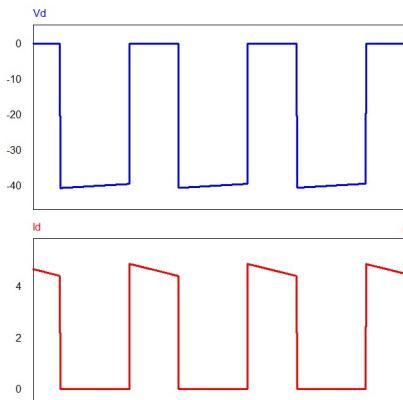


Fonte: Do Autor.

3.3.4.2 Tensão e Corrente no Diodo do Conversor Buck-Boost operando em modo Boost

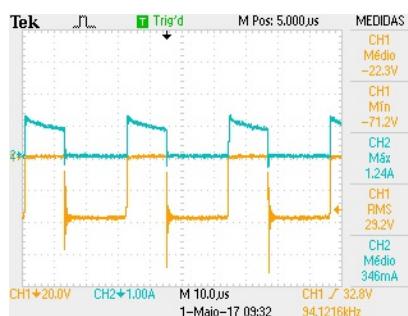
As Figuras (3.32) e (3.33) apresentam as formas de ondas simuladas e experimentais de tensão e corrente no diodo do conversor. Os valores de tensão se assemelham bastante porém a corrente diverge um pouco devido à diferença do projeto do indutor.

Figura 3.32 – Resultados de simulação do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no diodo.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.33 – Resultados experimentais do conversor Buck-Boost operando em modo Boost - tensão e corrente no diodo.



Fonte: Do Autor.

3.4 CONVERSOR MEIA-PONTE

Para as formas de onda deste inversor foi utilizado uma modulação de *PWM* constante para uma tensão positiva na saída. Para o conversor Meia-ponte foi utilizado resistência de $15\ \Omega$ para uma tensão de entrada de $V_{in} = 8+8$ V. Foi utilizada uma tensão menor que a nominal devido à barulhos de ressonância presentes no indutor. Por este motivo os valores escolhidos foram apenas para realizar testes no conversor e validar o experimento. A frequência de corte do filtro é de $\omega_o = 19$ kHz, como mostra a Equação (3.1):

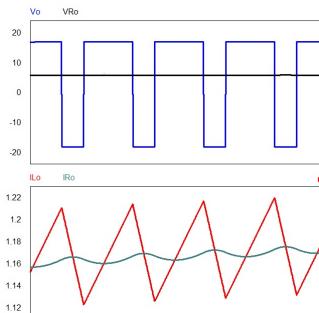
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L * C_{inv}}} \quad (3.1)$$

Também devido à diferença de valor na indutância do indutor construído o valor do filtro de saída não ficou adequado, apresentando mal funcionamentos como mencionado acima.

3.4.1 Tensão e corrente na saída do conversor Meia-Ponte

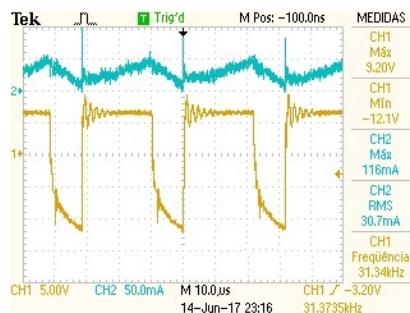
Este conversor possui a característica de inverter a tensão de entrada, aplicando ora positiva ora negativa. A Figura (3.34) apresenta os valores de tensão na saída do conversor. A tensão na saída do conversor é a saída invertida e a tensão resultante na carga é uma tensão CC. Foi utilizado uma razão cíclica no valor de 0,7. Pode-se notar que a corrente no indutor possui uma ondulação maior que a corrente no resistor de saída.

Figura 3.34 – Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente na saída do conversor.



Fonte: Do Autor.

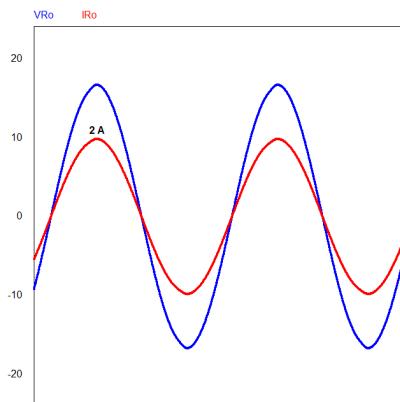
Figura 3.35 – Resultados experimental do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente no indutor do filtro de saída.



Fonte: Do Autor.

Na Figura (3.35) percebe-se que a parte negativa da tensão no filtro está com uma amplitude maior que a parte positiva e com uma certa atenuação. Um fator que influenciou na obtenção destes resultados foi o desbalanceamento das fontes de entrada e a questão do filtro de saída estar com valor diferente do projetado.

Figura 3.36 – Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente no resistor de saída.

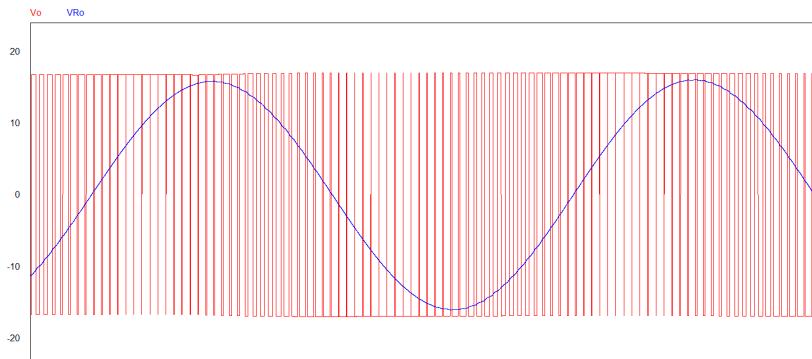


Fonte: Do Autor.

Na Figura (3.36) é apresentada as formas de ondas de tensão e corrente na carga. A característica da onda é devido à modulação senoidal utilizada no PWM. Diferente dos resultados obtidos nas Figuras (3.34) e (3.35) que

utilizam modulação PWM constante, esta possui modulação com PWM variável como mostra a Figura (3.37). Nesta imagem a frequência de saída foi diminuida para 500 Hz para que fosse possível visualizar o pwm variando.

Figura 3.37 – Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão e corrente no resistor de saída com frequência reduzida.



Fonte: Do Autor.

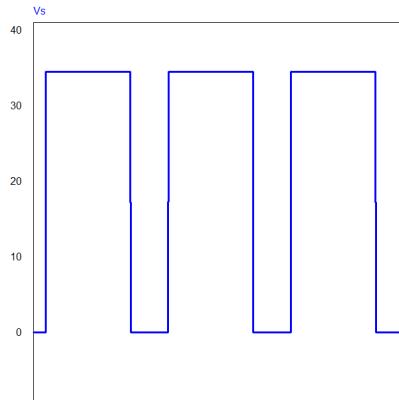
3.4.2 Tensão no interruptor do conversor Meia-Ponte

A Figura (3.39) apresenta a forma de onda experimental de tensão no interruptor do conversor. Existem oscilações na forma de onda experimental e estas oscilações são ocasionadas devido à não idealidade dos componentes. Estas não idealidades são capacitâncias e indutâncias parasitas existentes nos componentes, que entram em ressonância no circuito. A Figura (3.38) apresenta a forma de onda simulada de tensão no componente.

3.5 CONVERSOR PONTE COMPLETA

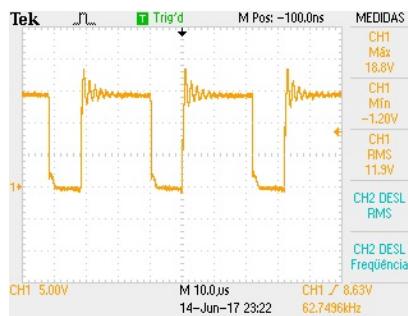
Para o conversor Ponte Completa realizou-se simulações com a tensão nominal do sistema e com uma modulação senoidal (*SPWM*) e modulação constante. De forma semelhante ao conversor Meia-Ponte, que foi apresentado anteriormente, se utilizarmos a modulação senoidal no sistema, o conversor terá uma tensão quadrada antes do filtro, variando apenas o *duty cycle*, mas com valores de pico de $+V_{in}$ e $-V_{in}$. Realizando medições depois do filtro percebe-se uma onda senoidal, como mostrado na Figura 3.40.

Figura 3.38 – Resultados de simulação do conversor Meia-Ponte - tensão no interruptor.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.39 – Resultados experimentais do conversor Meia-Ponte - tensão no interruptor.



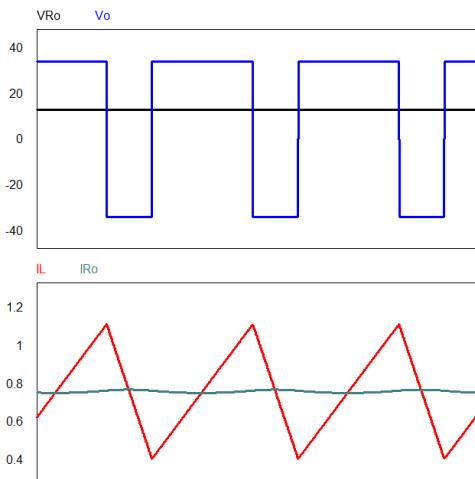
Fonte: Do Autor.

Para as simulações foram utilizados resistor de carga $R_o = 17 \Omega$ e $V_{in} = 34$ V

3.5.1 Tensão e Corrente na Carga do Conversor Ponte Completa

A Figura (3.40) apresenta a forma de onda na saída do conversor e na carga. A tensão que está invertida variando de $-V_{in}$ à $+V_{in}$ é na saída do conversor e a tensão constante é a tensão na carga do conversor.

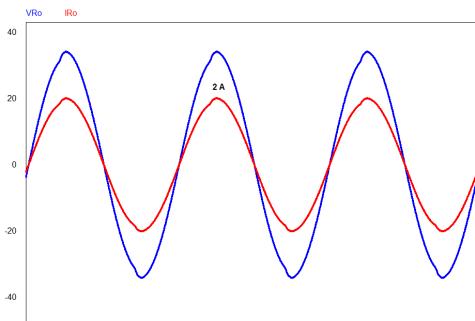
Figura 3.40 – Resultados de simulação do conversor Ponte Completa - tensão e corrente na saída do conversor.



Fonte: Do Autor.

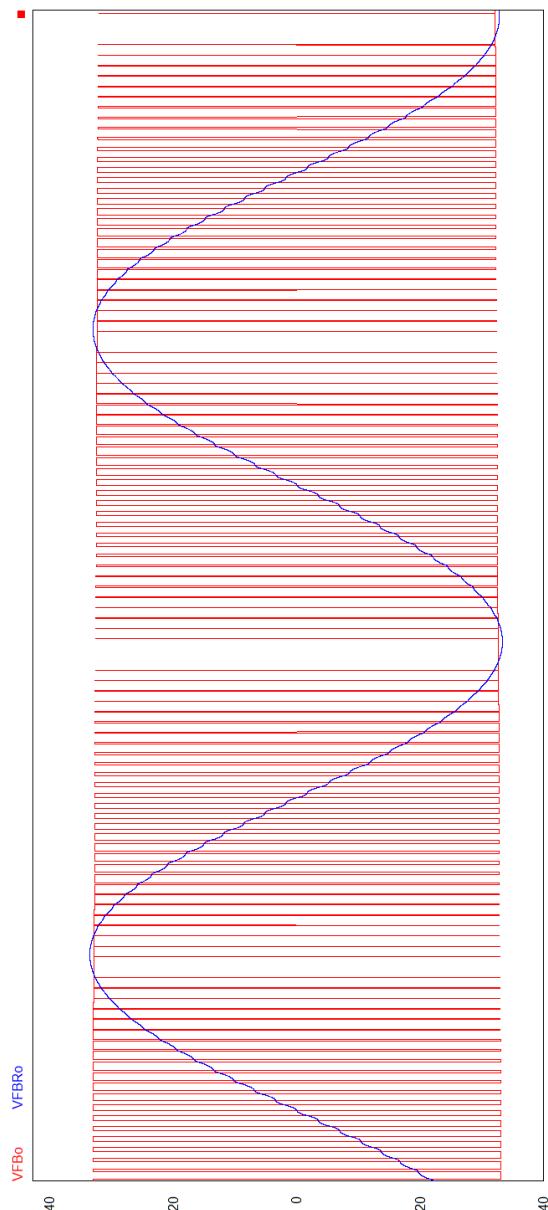
Na Figura (3.41) apresenta as formas de ondas na carga do conversor Ponte Completa. Utilizou-se uma modulação senoidal para a obtenção da forma de onda invertida.

Figura 3.41 – Resultados de simulação do conversor Ponte Completa - tensão e corrente na carga.



Fonte: Do Autor.

Figura 3.42 – Resultados de simulação do conversor Ponte Completa - tensão na carga com frequência reduzida.



Fonte: Do Autor.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou um estudo sobre a implementação de uma bancada didática para o laboratório de eletrônica de potência. Estudou-se os conversores Buck, Boost, Buck-Boost, Meia-ponte e Ponte Completa.

Aplicou-se técnicas de modulação PWM para Arduino® para o comando dos interruptores utilizados nos conversores. Também utilizou-se o microcontrolador para o acionamento dos relés de mudança de topologia.

O principal objetivo do trabalho foi atingido, pois foi feita uma avaliação de implementação dos conversores em uma bancada. Foram feitas revisões bibliográficas, simulações e análise de resultados experimentais para a validação final do projeto.

Para a obtenção destes resultados foi utilizado um indutor com especificações diferentes do que foi projetado para este trabalho. Este engano ocasionou um valor de oscilação na corrente dos conversores que não valida o indutor para as especificações desejadas para este projeto, porém a simulação comprovou o funcionamento e a bancada cumpriu o propósito de ter várias topologias em uma placa.

4.1 DIFICULDADES DO TRABALHO

As principais dificuldades de execução deste projeto mostraram-se na montagem do protótipo. Desde a parte do layout até a soldagem dos componentes afetaram muito no desempenho da bancada, uma vez que podem haver muitas interferências de um componente no outro, principalmente os componentes que trabalham com a frequência de chaveamento, 30 kHz.

Também uma dificuldade encontrada foi a de diferença de valores e projeto do indutor que apresentou uma indutância diferente da utilizada na prática.

4.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A partir do estudo dos conversores utilizados na bancada verificou-se que os conversores possuíam componentes em comum. Pensou-se então, em fazer uma bancada didática com todos estes conversores juntos. Estudou-se o funcionamento e topologia dos conversores para fazer um layout otimizado.

Para otimizar-se o design da placa utilizou-se componentes comuns para os conversores, tais como indutor e transistor.

O projeto e implementação da bancada mostrou-se satisfatório para este trabalho. Levando em conta o erro de projeto e execução do indutor utilizado para o projeto, as formas de ondas mostraram-se funcionando de acordo com o esperado.

4.3 TRABALHOS FUTUROS

Para possíveis trabalhos pode-se realizar o controle dos conversores através de métodos analógicos ou digitais, pois foram disponibilizados pontos para medição.

Também pode-se realizar um estudo para a implementação de snubbers caso haja necessidade.

Poderia ser realizado um estudo de corrente de pico nos capacitores de saída dos conversores no momento em que os relés fecham os contatos, visto que estão descarregados inicialmente, e a implementação de resistores NTC para limitar esta corrente.

Também para trabalhos futuros, realizar mais versões de layout da placa para que facilite o trabalho dos alunos no momento de executar medições nos conversores, e alcançar um layout final para a bancada.

Por fim realizar um estudo para a operação dos conversores em operação em modo descontínuo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSEF, A. **Conversor CC-CC por acumulação indutiva.** [S.l.], 2013.
- BARBI, I. **Eletrônica de potência: introdução ao estudo dos conversores CC-CA.** [S.l.]: Edição dos Autores, 2005.
- BARBI, I. **Conversores CC-CC básicos não isolados.** [S.l.: s.n.], 2006.
- BARBI, I. **Eletrônica de potência.** [S.l.: s.n.], 2006.
- BRAGA, N. C. Relés eletromecânicos. **Metaltex**, 2011. 2011.
- PETRY, C. A. Projeto de indutor de alta frequência. 2007. 2007.
- PETRY, C. A. Semicondutores, perdas e cálculo térmico. 2014. 2014.
- RODRIGUES, L. G. Estudo e desenvolvimento de um conversor dc-dc de topologia buck para aplicação arrovespacial. In: . [S.l.: s.n.], 2007.
- SEDRA. **Transistores Bipolares de Junção.** [S.l.: s.n.], 1996.
- SEGALA, J. J. C. Estudo e modelagem de um inversor modulado por valores instantaneos. In: . [S.l.: s.n.], 1993.

APÊNDICE A - LISTA DE COMPONENTES

Material	Quantidade
Capacitor cerâmico 10 nF	3
Capacitor Eletrolítico 22 uF 50 V	1
Capacitor Eletrolítico 220 uF 50 V	4
Capacitor Eletrolítico 2200 uF 50 V	10
Capacitor Eletrolítico 33uF 50 V	1
Capacitor Polipropileno 100 nF 50 V	6
Capacitor Polipropileno 2,2 uF 50 V	1
Conector duplo macho e fêmea	8
Decodificador para disp 7 segmentos	1
Diodo 1N4001	12
Diodo NFB28G	8
Diodo Ultrafast (1N4148)	8
Display 7 segmentos	1
Fusível 4 A	2
Microcontrolador Arduino	1
Optoacoplador (FOD3182)	4
Potenciômetro 1 kΩ	2
Push Buttom	1
Regulador de Tensão (LM7805)	1
Relé finder 36.11 12 V	4
Resistor 12 Ω 50 W	1
Resistor 120 Ω 1/4 W	1
Resistor 5,6 kΩ 1/4 W	8
Resistor 56 Ω 1/4 W	12
Resistor NTC 1kΩ	5
Transistor BJT	4
Transistor de Potência (GB4062)	4

APÊNDICE B - PROJETO COMPLETO DO ELEMENTO MAGNÉTICO

Cálculo do Indutor para o conversor Buck-Boost

Para Uma ondulação de corrente de 10%

Definições do projeto

$$f_s := 30000 \text{Hz} = 3 \times 10^4 \frac{1}{\text{s}} \quad T_s := \frac{1}{f_s} = 3.333 \times 10^{-5} \text{s}$$

$$D := 0.585 \quad \text{Este valor de } D \text{ refere-se ao valor de tensão de saída}$$

$$T_{on} := \frac{D}{f_s} = 1.95 \times 10^{-5} \text{s} \quad T_{off} := \frac{(1 - D)}{f_s} = 1.383 \times 10^{-5} \text{s}$$

$$V_{in} := 17 \text{V} \quad V_o := 24 \text{V} \quad I_o := 2 \text{A} \quad R_o := 24 \Omega$$

$$\Delta V_o := 0.05 \cdot V_o = 1.2 \text{V}$$

$$I_{Lmed} := \frac{I_o}{(1 - D)} = 4.819 \text{A} \quad \Delta I_L := 0.10 \cdot I_{Lmed} = 0.482 \text{A}$$

$$I_{Lrms} := 4.82 \text{A} \quad I_{Lpico} := I_{Lmed} + \Delta I_L = 5.301 \text{A}$$

Cálculo do indutor:

$$L_o := \frac{(D \cdot V_{in})}{f_s \cdot \Delta I_L} = 687.863 \cdot \mu H$$

Projeto físico do indutor:

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{(Wb \cdot m)}{A} \quad \text{Permeabilidade no vácuo}$$

$$B_m := 0.35 T \quad \text{Densidade de fluxo máxima}$$

$$J_m := 450 \frac{A}{cm^2} \quad \text{Densidade de corrente}$$

$$K_e := 0.7 \quad \text{Fator de enrolamento}$$

$$K_h := 4 \cdot 10^{-5} \quad K_E := 4 \cdot 10^{-10}$$

Escolha do nucleo:

$$AeAw_{necess} := \frac{(L_o \cdot I_{lpico} \cdot I_{Lrms})}{K_e \cdot B_m \cdot J_m} = 1.594 \cdot cm^4 \quad AeAw \text{ necessário}$$

O núcleo disponível para este AeAw é o núcleo tipo EE 42/15 cuja especificação está descrita abaixo:

$$AeAw := 2.84 cm^4$$

$$l_t := 8.7 cm$$

$$A_w := 1.57 cm^2$$

$$A_e := 1.81 \cdot cm^2$$

Cálculo do número de espiras:

$$N_e := \frac{(L_o \cdot I_{LRms})}{B_m \cdot A_e} = 52.336 \quad \text{Espiras}$$

Cálculo do Entreferro:

$$l_g := \frac{\left(N_e^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e \cdot 10^{-2} \right)}{L_o} \quad l_g := \frac{\left(53^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1.81 \cdot 10^{-2} \right)}{687.8 \cdot 10^{-6}} = 0.093 \text{ cm}$$

Perdas no Núcleo:

$$P_n := \Delta B^{2.4} \cdot (K_E \cdot f_s^2 + K_h \cdot f_s) \cdot 8 =$$

$$P_n := 0.035^{(2.4)} \cdot \left(4 \cdot 10^{-5} \cdot 30000 + 30000^2 \cdot 4 \cdot 10^{-10} \right) \cdot 8$$

$$P_n := 4 \text{ mW}$$

Diâmetro máximo do fio:

$$\delta_1 := \frac{7.5 \text{ cm}}{\sqrt{30000}} = 4.33 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$D_{fim\max} := 2 \cdot \delta_1 = 8.66 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$D_{fim\max} = 0.866 \cdot \text{mm}$$

De acordo com a disponibilidade comercial dos fios o escolhido para este indutor foi 20 AWG

$$A_{cu} := 0.515 \text{ mm}^2$$

Seção dos condutores

$$\rho_{20} := 32.99 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad \text{Resistência do condutor por km}$$

$$R_{fio} := N_e \cdot l_t \cdot \rho_{20} = 0.15 \Omega \quad \text{Resistência do condutor utilizado}$$

Perdas no cobre:

$$P_{cu} := R_{fio} \cdot I_{Lrms}^2 = 3.49 \text{ W}$$

Perdas Totais:

$$P_T := P_n + P_{cu} = 3.494 \text{ W}$$

Elevação de temperatura:

$$R_t := 23 \cdot \left(\left(A_e A_w^{-0.37} \right) \right)$$

$$R_t := \frac{15.6 \text{ } ^\circ\text{C}}{W}$$

$$\Delta T := R_t \cdot P_T \quad \Delta T := 54.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Fator de ocupação:

$$A_{wnecessário} := \frac{(N_e \cdot A_{cu})}{0.7} = 3.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$K_{ocup} := \frac{A_{wnecessário}}{A_w} = 0.245$$

APÊNDICE C - PROGRAMAÇÃO UTILIZADA NO ARDUINO

```

int pot pwm=0, pot cc=0, buck=0, boost=0, buck boost=0, meia ponte=0,
ponte completa=0, start=0;
int pwmbuck=0, pwm boost=0, pwmbuck boost=0, a=0, i=0, deadtime=10,
selecao=0, sinal go=0, pb, hh.jj, kk, ll, dc=0;
int sinx[] = 127,130,133,136,139,143,146,149,152,155,158,161,164,167,
170,173,176,178,181,184,187,190,192,195,198,200,203,205,
208,210,212,215,217,219,221,223,225,227,229,231,233,234,
236,238,239,240,242,243,244,245,247,248,249,249,250,251,
252,252,253,253,253,254,254,254,254,254,254,254,254,253,253,
253,252,252,251,250,249,249,248,247,245,244,243,242,240,
239,238,236,234,233,231,229,227,225,223,221,219,217,215,
212,210,208,205,203,200,198,195,192,190,187,184,181,178,
176,173,170,167,164,161,158,155,152,149,146,143,139,136,
133,130,127,124,121,118,115,111,108,105,102,99,96,93,90,
87,84,81,78,76,73,70,67,64,62,59,56,54,51,49,46,44,42,39,
37,35,33,31,29,27,25,23,21,20,18,16,15,14,12,11,10,9,7,6,
5,5,4,3,2,2,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,2,2,3,4,5,5,6,7,9,
10,11,12,14,15,16,18,20,21,23,25,27,29,31,33,35,37,39,42,
44,46,49,51,54,56,59,62,64,67,70,73,76,78,81,84,87,90,93,
96,99,102,105,108,111,115,118,121,124;
#define pb button 5
#define rele1 7
#define rele2 16
#define rele3 2
#define rele4 4
#define sw1 9
#define sw2 10
#define sw3 3
#define sw4 11
void setup()
Serial.begin(9600);
delay(1000);
void setPwmFrequency(int pin, int divisor); // função pwm para frequencia
setPwmFrequency(3,1); // todos pwms com 30k
setPwmFrequency(9,1);
setPwmFrequency(10,1);

```

```
setPwmFrequency(11,1);
pinMode(A0, INPUT);
pinMode(A1, INPUT);
pinMode(0, OUTPUT);
pinMode(1, OUTPUT);
pinMode(2, OUTPUT);
pinMode(3, OUTPUT);
pinMode(4, OUTPUT);
pinMode(5, INPUT);
pinMode(6, OUTPUT);
pinMode(7, OUTPUT);
pinMode(8, OUTPUT);
pinMode(9, OUTPUT);
pinMode(10, OUTPUT);
pinMode(11, OUTPUT);
pinMode(12, OUTPUT);
pinMode(13, OUTPUT);
pinMode(16, OUTPUT);
TCCR1A = (TCCR1A & 0x0F) | 0xB0 ;
TCCR2A = (TCCR2A & 0x0F) | 0x40 ;
digitalWrite(0, LOW);
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(5, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(7, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(9, LOW);
digitalWrite(10, LOW);
digitalWrite(11, LOW);
digitalWrite(12,LOW);
digitalWrite(13, LOW);
digitalWrite(1, LOW);
digitalWrite(16, LOW);
analogWrite(A2, 0);
void loop()
pot pwm = analogRead(A1);
pb = digitalRead(pbutton);
selecao = pb + sinalgo;
potcc = analogRead(A0);
```

```
if ( selecao ==0 )
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
if(potcc > 250 && potcc < 400) // conversor buck
buck=1;
boost=0;
buckboost=0;
meiaponte=0;
pontecompleta=0;
digitalWrite(6, HIGH);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
if(potcc > 400 && potcc < 550) // conversor boost
buck=0;
boost=1;
buckboost=0;
meiaponte=0;
pontecompleta=0;
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
if(potcc > 550 && potcc < 700) // conversor buckboost
buck=0;
boost=0;
buckboost=1;
meiaponte=0;
pontecompleta=0;
digitalWrite(6, HIGH);
digitalWrite(8, HIGH);
digitalWrite(12, LOW);
digitalWrite(13, LOW);
if(potcc > 700 && potcc < 850) // conversor meia ponte
buck=0;
boost=0;
buckboost=0;
meiaponte=1;
pontecompleta=0;
```

```
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(12, HIGH);
digitalWrite(13, LOW);
if(potcc > 850 && potcc < 1023) // conversor ponte completa
buck=0;
boost=0;
buckboost=0;
meiaponte=0;
pontecompleta=1;
digitalWrite(6, HIGH);
digitalWrite(8, LOW);
digitalWrite(12, HIGH);
digitalWrite(13, LOW);
if ( selecao == 1 )
sinalgo = 1;
if(buck ==1)
if (dc == 0)
delay(800);
digitalWrite(rele1, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele2, LOW);
delay(800);
digitalWrite(rele3, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele4, HIGH);
digitalWrite(sw2, LOW);
digitalWrite(sw3, LOW);
digitalWrite(sw4, LOW);
dc = 1;
pwmbuck = potpwm*0.25; if(pwmbuck<20) pwmbuck=20;
if(pwmbuck>240) pwmbuck=240; analogWrite(sw1, 255-pwmbuck)
;
if(boost ==1)
delay(800);
digitalWrite(rele1, LOW);
delay(800);
digitalWrite(rele2, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele3, HIGH);
delay(800);
```

```
digitalWrite(rele4, HIGH);
digitalWrite(sw1, LOW);
digitalWrite(sw3, LOW);
digitalWrite(sw4, LOW);
pwmboost = pot pwm*0.25;
if(pwmboost<50)
pwmboost=50;
if(pwmboost>230)
pwmboost=230;
analogWrite(sw2, pwmboost );
if(buckboost ==1)
if (dc == 0)
delay(800);
digitalWrite(rele1, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele2, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele3, LOW);
delay(800);
digitalWrite(rele4, HIGH);
digitalWrite(sw2, LOW);
digitalWrite(sw3, LOW);
digitalWrite(sw4, LOW);
dc = 1;
pwmbuckboost = pot pwm*0.25;
if(pwmbuckboost<50)
pwmbuckboost=50;
if(pwmbuckboost>180)
pwmbuckboost=180;
analogWrite(sw1, 255-pwmbuckboost );
if(meiaponte ==1)
delay(800);
digitalWrite(rele1, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele2, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele3, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele4, LOW);
digitalWrite(sw3, LOW);
digitalWrite(sw4, LOW);
```

```
if (a<3)
analogWrite(sw1, 127+deadtime);
analogWrite(sw2, 127-deadtime);
//delay(100);
i=(i+3);
if (i>254)
a=4;
if (a>3)
i=0;
a=0;
if(pontecompleta ==1)
delay(800);
digitalWrite(rele1, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele2, LOW);
delay(800);
digitalWrite(rele3, HIGH);
delay(800);
digitalWrite(rele4, LOW);
if (a<3)
analogWrite(sw1, sinx[i]);
analogWrite(sw2, sinx[i]);
analogWrite(sw3, (sinx[i]-deadtime));
analogWrite(sw4, (sinx[i]-deadtime));
i=(i+3);
if (i>254)
a=4;
if (a>3)
i=0;
a=0;
void setPwmFrequency(int pin, int divisor)
byte mode;
if(pin == 5 || pin == 6 || pin == 9 || pin == 10)
switch(divisor)
case 1: mode = 0x01; break;
case 8: mode = 0x02; break;
case 64: mode = 0x03; break;
case 256: mode = 0x04; break;
case 1024: mode = 0x05; break;
default: return;
if(pin == 5 || pin == 6)
```

```
TCCR0B = TCCR0B & 0b11111000 | mode;
else
TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | mode;
else if(pin == 3 || pin == 11)
switch(divisor)
case 1: mode = 0x01; break;
case 8: mode = 0x02; break;
case 32: mode = 0x03; break;
case 64: mode = 0x04; break;
case 128: mode = 0x05; break;
case 256: mode = 0x06; break;
case 1024: mode = 0x7; break;
default: return;
TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | mode;
fIM DO PROGRAMA
```