



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS SOBRAL

CURSO: ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO FINAL

DISCIPLINA: ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

CONVERSOR BOOST

FLÁVIA PEROZA RUIZ – 375188

JULIO CESAR FERREIRA LIMA - 393849

MATHEUS PIRES DE FARIAS – 356821

YARA MACHADO OLIVEIRA – 375213

Sobral, 16 de junho de 2018

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	4
1.1. CONVERSOR BOOST	4
1.1.1. Chave fechada	5
1.1.2. CHAVE ABERTA	6
1.1.3. Ganho	6
1.1.4. Cálculo da corrente	6
1.1.5. Indutância mínima	7
1.1.6. Ondulação de tensão na saída	8
1.1.7. Corrente no diodo	9
1.2. GERADOR DE PWM	9
1.2.1. Circuito de chaveamento do mosfet	10
1.3. CARGA	10
<b>2. OBJETIVOS</b>	11
<b>3. METODOLOGIA</b>	12
<b>4. PROCEDIMENTO</b>	14
4.1. CÁLCULOS DO CONVERSOR BOOST	14
4.1.1. Resistência e tensão de saída	14
4.1.2. Corrente média no indutor	15
4.1.3. Indutância mínima	15
4.1.4. Cálculo do indutor	15
4.1.4.1 Corrente no indutor	16
4.1.4.2 Corrente de saída	16
4.1.5. Cálculo do capacitor	17
4.2. DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR	17
4.2.1. Núcleos magnéticos	17
4.2.2. Cálculos dos parâmetros	19
4.2.3. Número de espiras	19
4.2.4. Entreferro	19
4.2.5. Secção dos condutores	20
4.3. CIRCUITO SIMULADO	21
<b>5. EXPERIMENTO</b>	27
5.1. CIRCUITO DE CHAVEAMENTO	27
5.2. CIRCUITO DE POTÊNCIA	28
5.3. CIRCUITO DE CARGA	30
<b>6. CONCLUSÃO</b>	31

<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>32</b>
<b>8. REPOSITÓRIO.....</b>	<b>33</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>34</b>
9.1. CIRCUITO DESENVOLVIDO NO KICAD EM 3D (ILUSTRATIVO).....	34
9.2. ESQUEMÁTICO DESENVOLVIDO NO KICAD .....	34
9.3. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA NO KICAD (ILUSTRATIVO).....	34
9.4. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA NO KICAD (PRONTA PARA EXECUÇÃO) .....	34

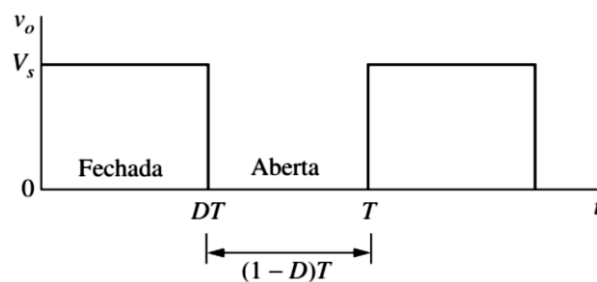
## 1. INTRODUÇÃO

Quando se trata de mudanças em níveis de tensão em corrente contínua, não é possível ser feito através de transformadores. A conversão de uma tensão contínua de um nível a outro é feita a partir de conversores CC.

Existem algumas topologias de circuitos conversores, dentre elas quatro se destacam: buck, boost, buck-boost e cùk. Todas essas topologias são baseadas no uso de chaves eletrônicas (diodos, MOSFETs, etc) e indutores. O uso de capacitores em circuitos conversores é comum pois são usados como filtros da tensão de saída.

Esses conversores normalmente são usados como reguladores chaveados. A regulação é feita a partir de um PWM de frequência e uma chave (MOSFET, TGJ ou IGBT). Para um melhor entendimento do processo de chaveamento é necessário o conceito inicial de tempo de chave aberta e fechada, em um período  $T$  e uma razão cíclica (duty cycle). O princípio do duty cycle é mostrado na figura 1.

Figura 1: Chaveamento em uma tensão de entrada  $V_s$ .

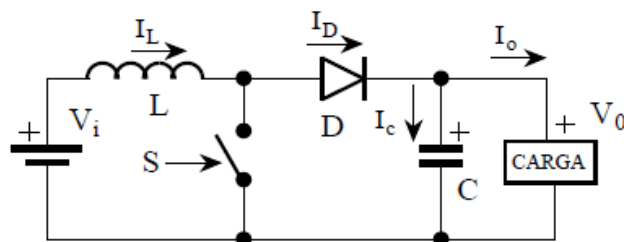


Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

### 1.1. CONVERSOR BOOST

O conversor boost é um conversor chaveado elevador, ou seja, fornece um ganho de tensão na saída. Além disso, também apresenta características de fonte de corrente na entrada e fonte de tensão na saída. O circuito do conversor boost é mostrado na figura 2.

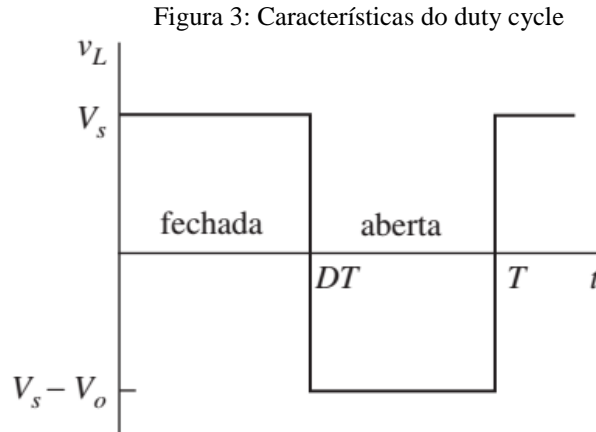
Figura 2: Conversor boost



Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

Analisando esse circuito em seus dois modos de operação referentes ao chaveamento, chave aberta e chave fechada, podemos observar duas situações para a variação de corrente do indutor.

Para as análises feitas a seguir, consideraremos as seguintes características do *duty cycle*, como mostrada na figura 3 e a equação 1.1.

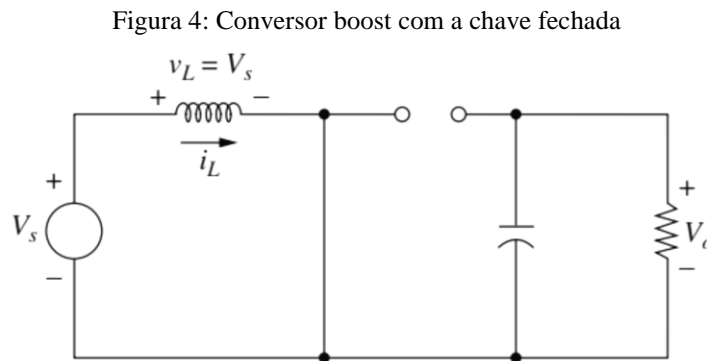


Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

$$V_L = L \frac{d(i_L)}{dt} \quad (1.1)$$

### 1.1.1. Chave fechada

Analisando a figura 4, conversor com a chave fechada, percebemos que a tensão em cima do indutor,  $V_L$ , é a mesma que  $V_s$  de entrada.



Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

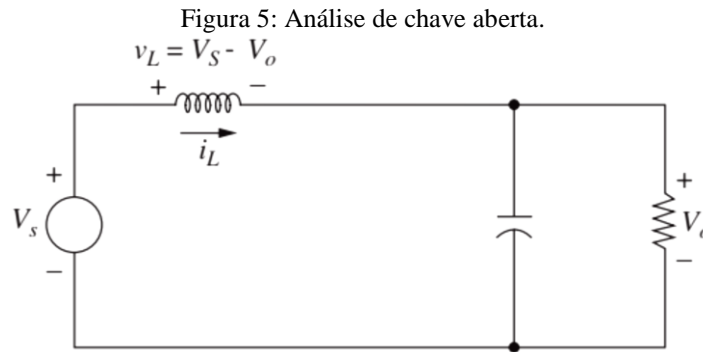
Considerando a taxa de variação da corrente como constante, aumentando linearmente enquanto a chave estiver fechada, e que o tempo em que a chave permanece fechada é  $DT$ , a variação da corrente pode ser calculada por:

$$\frac{\Delta I_L}{\Delta t} = \frac{\Delta I_L}{DT} = \frac{V_s}{L} \quad (1.2)$$

$$\Delta I_L = \frac{V_S \times D \times T}{L} \quad (1.3)$$

### 1.1.2. CHAVE ABERTA

A figura 5 demonstra o funcionamento do circuito com a chave aberta. Analisando percebemos que a tensão em cima do indutor se torna ( $V_S - V_O$ ).



Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

Fazendo a mesma análise para a variação da corrente feita para a chave fechada, consideramos o tempo de chave aberto como  $(1-D)T$ . A equação 1.4 nos fornece a variação da corrente no indutor para o circuito com a chave aberta.

$$\Delta I_L = \frac{(V_S - V_O)(1-D)T}{L} \quad (1.4)$$

### 1.1.3. Ganho

Tomando as equações 1.3 e 1.4 como referência e igualando, obtemos a expressão de ganho do conversor boost, mostrada na equação 1.5.

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{(1-D)} \quad (1.5)$$

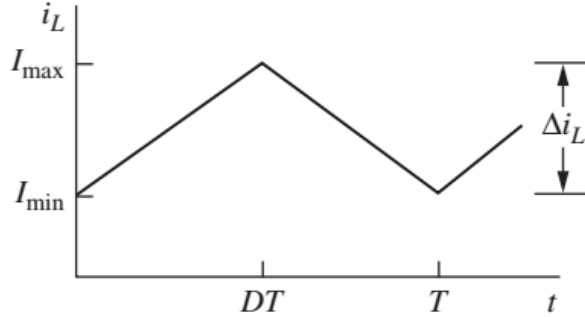
### 1.1.4. Cálculo da corrente

Em conversores ideais podemos considerar a potência de entrada e de saída como as mesmas. A partir disso encontramos uma reação para a corrente média do indutor, dada pela equação 1.6.

$$I_S = I_L = \frac{V_O \times I_O}{V_S} \quad (1.6)$$

Partindo disso são determinados os valores máximos e mínimos da corrente no indutor. Observamos através da figura 6 o valor médio e as variações.

Figura 6: Corrente no indutor



Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

Ao analisar a figura 6 podem ser extraídas as seguintes equações:

$$I_{\min} = I_L - \Delta I_L \quad (1.7)$$

$$I_{\max} = I_L + \Delta I_L \quad (1.8)$$

### 1.1.5. Indutância mínima

Para uma condução contínua de corrente no indutor, a corrente deve ser maior que zero. Igualamos então a equação 1.7 a zero para obtermos a indutância mínima no modo contínuo.

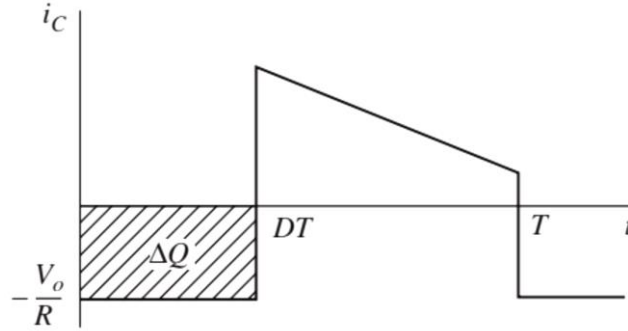
$$L_{\min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (1.9)$$

Vale ressaltar que este valor é o de indutância mínima, não é o mesmo usado no projeto. O indutor usado no conversor será calculado através das equações 1.3 e 1.4, de acordo com os parâmetros que serão usados no projeto.

### 1.1.6. Ondulação de tensão na saída

De acordo com a forma de onda da figura 7 encontramos a carga no capacitor apenas calculando a área coberta de ranhuras.

Figura 7: Corrente no capacitor



Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

Partindo da equação 1.10, observamos que a corrente do capacitor é proporcional à derivada da tensão de saída. Considerando que corrente é a derivada da carga em função do tempo, obtemos a equação 1.11.

$$I_C = C \times \frac{d(V_o)}{dt} \quad (1.10)$$

$$\Delta Q = C \times \Delta V_o \quad (1.11)$$

Com isso, encontramos a expressão característica da variação da tensão de saída de um conversor boost.

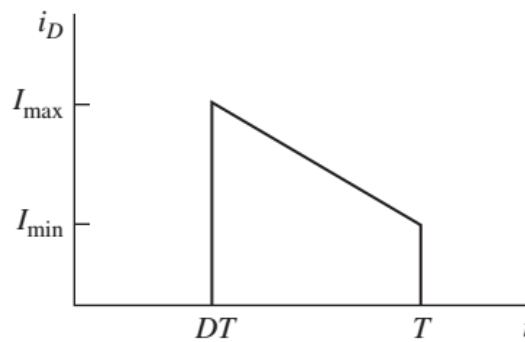
$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{RCf} \quad (1.12)$$



### 1.1.7. Corrente no diodo

No conversor boost, o diodo se encontra em série com o indutor quando a chave está aberta, a forma de onda será similar à da corrente no indutor quando o a chave estiver aberta e zero quando a chave estiver fechada, como mostra a figura 8.

Figura 8: Corrente no diodo

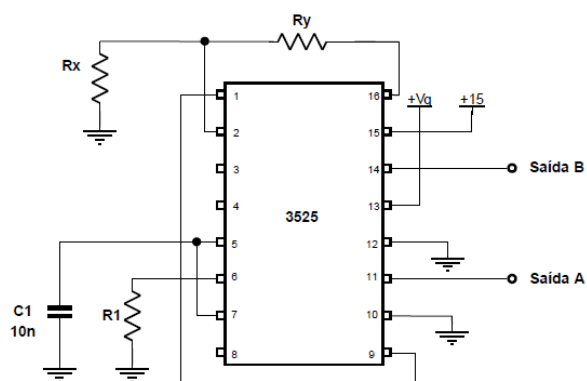


Fonte: Eletrônica de Potência, Daniel W. Hart.

### 1.2. GERADOR DE PWM

O CI usado para realizar o chaveamento do projeto é o SG3525, através de um PWM (modulação por largura de pulso). O circuito montado é similar ao da figura 9, onde em  $R_X$  é feito o ajuste da razão cíclica e em  $R_1$  a frequência.

Figura 9: Gerador de PWM



Fonte: Práticas de laboratório de Eletrônica de Potência.

Teoricamente, a saída do SG3525 deveria ser ligada na chave (MOSFET). Porém, ao realizar essa ligação direta poderia gerar riscos de queimar os componentes. No projeto, foi montado um circuito de chaveamento do MOSFET.



## **2. OBJETIVOS**

Projetar um conversor boost com uma elevação de tensão de 15V na entrada para 35V na saída, com 70W de potência na saída. As ondulações máximas na corrente do indutor, na tensão e na corrente de saída devem ser de 10%. Após isso, realizar a comparação entre o que foi simulado e os resultados obtidos experimentalmente.

### 3. METODOLOGIA

Ao longo do projeto, sabia-se que muitas modificações seriam feitas e haveriam muitas contas a se fazer e a se refazer. Devido a essa problemática, buscando otimizar o tempo na determinação de parâmetros foi elaborada uma planilha, em que todas as fórmulas foram inseridas de modo visual, assim como todas os cálculos. Cada variável foi adotada um nome de forma que em caso de erro era possível visualizar a fórmula com nomes e não mais apenas com um rótulo aleatório o que poderia ter gerado muitos erros.

No intuito de validar a planilha, todos os cálculos e resultados providos por ela foram refeitos a mão, no entanto apenas uma vez, todas as outras vezes os cálculos foram validados por esta prévia validação. No entanto com o uso a modificação de dados poderia levar a modificação de fórmulas de maneira descontrolada e imprevisível sem a garantia que alguém percebesse tal modificação. Com o objetivo de contornar esta problemática, fora bloqueada todas as células da planilha que não fossem entrada de dados e apenas permitidas as que correspondessem aos parâmetros de projeto, as variáveis de entrada se encontram abaixo, juntamente com seus valores utilizados. Não fora adotada nenhuma senha em caso de necessidade de mudança de algo, bastando apenas clicar no botão para desbloquear, contudo o fato de obrigatoriamente ter de se clicar em um específico botão, já garante um maior nível de confiabilidade nos cálculos. A planilha desenvolvida encontra-se no repositório público [3].

- Potência: 70W
- $\Delta I_s$  Percentual: 10%
- $\Delta I_o$  Percentual: 10%
- $\Delta V_o$  Percentual: 10%
- Frequência: 20000 Hz
- Tensão de entrada: 15V

No desenvolvimento das placas de circuito impresso, foi utilizado o software Kicad, que é Open Source e agrega muito de outros softwares industriais como o Altium. Com facilidade é possível gerar um projeto de eletrônica com este, uma vez que ele se assemelha em muito a softwares de simulação como PSIM, Proteus, etc, no entanto ele destina-se apenas ao design.

A maior facilidade que o Kicad oferece, é por conter uma vasta quantidade de componentes de comuns no mercado, assim como o encapsulamento destes, muitos em 3D. Outra grande vantagem na sua utilização, é na facilidade de se anexar novos dispositivos encontrados por meio da Internet, por conta de uma vasta comunidade que

se dedica a compartilhar estes, assim como a concepção de novos componentes, inclusive em 3D. A possibilidade de visualização em 3D possibilita que problemas de espaço característicos desses tipos de projeto sejam resolvidos ainda durante a fase de projeto, não onerando tempo na prototipagem [ANEXO 9.1]. Com isso o esquemático desenvolvido em todos os circuitos está demonstrado no anexo [ANEXO 9.2]. Também fora disponibilizado uma visão da placa de circuito impresso com a legenda dos componentes no intuito de facilitar a montagem [ANEXO 9.3]. Assim como foi disponibilizado o arquivo, que se impresso e utilizada a técnica de produção de placas de circuito impresso termotransferência, poderá ser reproduzido o protótipo aqui desenvolvido [ANEXO 9.3].

Os arquivos aqui desenvolvidos, como esquemático e placa referentes ao software Kicad, assim como as simulações desenvolvidas no software PSIM encontram-se no repositório público [3].

## 4. PROCEDIMENTO

Para a implementação do conversor boost foram necessários cálculos para o dimensionamento correto dos componentes. Para esses cálculos foram usados os parâmetros da tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do projeto

Tensão de Entrada ( $V_S$ )	15 V
Tensão de Saída ( $V_O$ )	35 V
Potência de Saída (P)	70 W
Frequência (f)	20 kHz
Ondulação de Tensão na Saída ( $\frac{\Delta V}{V_O}$ )	10%
Ondulação de Corrente na Saída ( $\frac{\Delta i}{i}$ )	10%
Resistência Equivalente (carga) ( $R_{eq}$ )	18,18 $\Omega$

Fonte: Autoral

A partir da especificação dos parâmetros do projeto foram realizados os cálculos dos componentes para implementar o conversor.

### 4.1. CÁLCULOS DO CONVERSOR BOOST

#### 4.1.1. Resistência e tensão de saída

Para a escolha da tensão de saída, usamos como parâmetros os valores das resistências de 10W que tínhamos disponíveis. Para obtenção do valor de potência exigido (70W) utilizamos 7 resistores de 39 $\Omega$  que dissipam 10W de potência, obtendo uma carga equivalente de cerca de 18,18 $\Omega$ . Com os resistores já definidos, partimos da equação da potência para a definição da tensão de saída, que é demonstrada na equação 3.1.

$$P = \frac{V_o^2}{R} \quad (3.1)$$

Substituindo os valores fornecidos anteriormente, obtemos uma tensão de saída de aproximadamente 35,67V

#### 4.1.2. Corrente média no indutor

Tomando como base a equação de ganho de um conversor boost e considerando que a tensão da fonte adotada foi de 15V, podemos encontrar um valor para o duty cycle, como mostrado na equação 3.2.

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o} \quad (3.2)$$

Adotando os valores mostrados acima obtemos um duty cycle de aproximadamente 0,57952.

A corrente média no indutor pode ser calculada a partir da equação 3.3, já demonstrada na introdução.

$$I_L = \frac{V_s}{(1-D)^2 \times R} \quad (3.3)$$

Obtendo assim uma corrente média no indutor de 4,6667A.

#### 4.1.3 Indutância mínima

Uma preocupação necessária no projeto do conversor é que o indutor opere de modo contínuo, sendo assim, é necessário que asseguremos que o valor utilizado seja superior ao valor obtido na expressão abaixo.

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (3.4)$$

Portanto:

$$L_{min} = \frac{0,57952(1 - 0,57952)^2 18,18}{2 \times 20 \times 10^3} \rightarrow L_{min} = 0,046569 \text{ mH}$$

Assim, para garantir que o indutor opere de modo contínuo, garantindo que a corrente que passe por ele seja sempre positiva, se faz necessário assegura-se que o valor do indutor utilizado seja maior que o valor obtido a partir da equação 3.4.

#### 4.1.4 Cálculo do indutor

Primeiramente foi calculado a corrente de entrada de acordo com a potência de saída e a tensão de entrada.

#### 4.1.4.1 Corrente no indutor

A partir da equação que segue, podemos obter a corrente de entrada, que é igual a corrente no indutor.

$$I_L = I_s = \frac{V_s}{R \times (1 - D)^2} \quad (3.5)$$
$$I_L = I_s = 4,67 \text{ A}$$

#### 4.1.4.2 Corrente de saída

Utilizando a potência de saída e a tensão de saída, podemos obter a corrente de saída a partir da equação abaixo:

$$I_o = \frac{P}{V_o} \quad (3.6)$$
$$I_o = 1,96 \text{ A}$$

Com os valores obtidos, finalmente podemos calcular o valor teórico do indutor, de acordo com a tensão de saída, ondulação de corrente de entrada, o ciclo de trabalho e a frequência a partir da equação que segue, levando em consideração que a ondulação de corrente deve estar em função da tensão de entrada, do ciclo de trabalho, da indutância e a frequência,  $\Delta i$ :

$$\Delta i_s = \Delta i_L = 0,47 \text{ A}$$
$$L = \frac{V_s * D}{\Delta i_L * f} \quad (3.7)$$

$$L = 0,92 \text{ mH}$$

O indutor implementado na prática foi feito de forma manual, obtendo um valor de 1,5 mH, garantindo dessa forma a ondulação de corrente no mesmo em um valor de 10%.



#### 4.1.5 Cálculo do capacitor

Tendo como sendo 10% de ondulação de saída uma das limitações do projeto, temos que tomar esse parâmetro para projetar o capacitor capaz de atender a essa demanda. Para tal, foi utilizado a equação que segue:

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{D}{R \times C \times f} \quad (3.8)$$

Assim, isolando o C e substituindo a ondulação de tensão sobre o capacitor, obtemos o seguinte resultado:

$$C = \frac{D}{0,1 \times R \times f}$$

Substituindo os valores correspondentes a cada uma das incógnitas dessa equação, temos:

$$C = \frac{D}{0,1 \times 18,18 \times 20 \times 10^3} \rightarrow C = 15,938 \mu F$$

Na prática utilizamos um capacitor 22uF, que foi o suficiente para que o ripple da tensão sobre o capacitor não ultrapassasse os 10%.

## 4.2. DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR

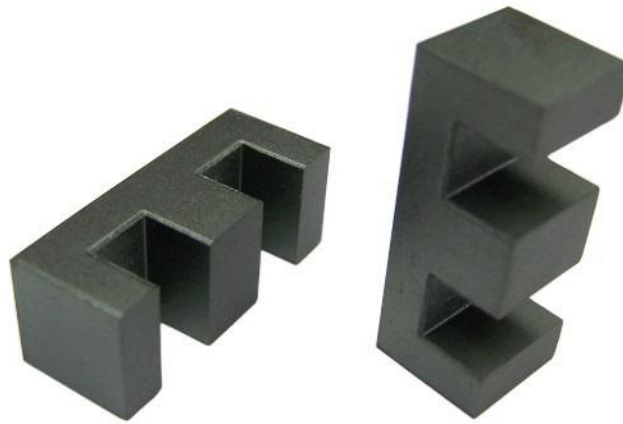
### 4.2.1. Núcleos magnéticos

Para a construção o mais próximo do ideal do conversor, todos os elementos que o constituem devem ser devidamente projetados, porém na construção de conversores CC-CC, fatores como o surgimento de componentes parasitas devem ser levados em consideração, como por exemplo: Capacitâncias parasitas, indutâncias de magnetização, etc.

Na construção do núcleo magnético do indutor geralmente é usado um material chamado ferrite, composto por óxido de ferro e possui poucas perdas quando é utilizado

em altas frequências, tendo como um dos problemas da sua utilização a sua fragilidade, podendo ser comparada a fragilidade do vidro comum.

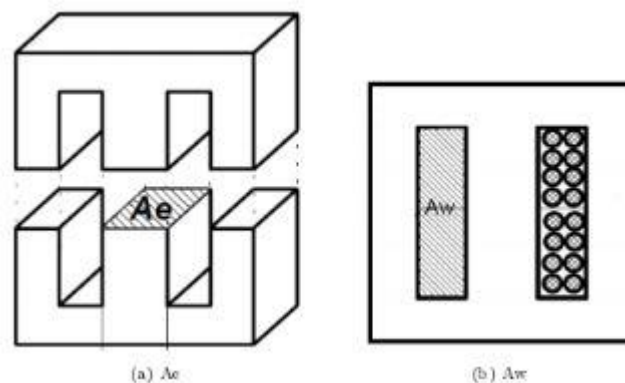
Figura 11: Núcleo de Ferrite tipo E-E.



Fonte: Google Imagens.

Duas informações importantes do núcleo são a Área de secção transversal ( $A_e$ ) e a Área da Janela ( $A_w$ ). Dados esses dois valores, pode-se calcular os demais dados do mesmo.

Figura 12: Núcleo de Ferrite tipo E-E, enfatizando suas áreas de janela e transversal.



Fonte: Projeto físico de indutores e transformadores, Prof. Ivo Barbi.

#### 4.2.2. Cálculos dos parâmetros.

O projeto do indutor se baseia nas Leis de Faraday e Àmpere, onde através de algumas manipulações matemáticas se obterá:

$$A_E A_W = \frac{L * I_{PICO} * I_{EFICAZ} *}{B_{MAX} * J_{MAX} * K_W} \quad (3.9)$$

Onde,

$B_{MAX}$  é densidade de fluxo de saturação do núcleo, onde da ferrite é 0,3T;

$J_{MAX}$  é a densidade de corrente, onde tipicamente é 450 A/cm<sup>2</sup> ;

$K_W$  é o fator de ocupação do cobre dentro do carretel, tipicamente utilizado 0,7.

#### 4.2.3. Número de espiras

Para o número de espiras, tem-se a seguinte equação:

$$N = \frac{L * I_{PICO}}{B_{MAX} * A_E} \quad (3.10)$$

#### 4.2.4. Entreferro

É necessário a utilização do entreferro no circuito magnético, sendo a indutância proporcional ao número de espiras ao quadrado e inversamente proporcional a relutância.

Por mais alta que seja a permeabilidade magnética do material, ele possui uma relutância. Nesse caso o valor da indutância independe da relutância do núcleo, assim:

$$L = \frac{N^2}{R_{ENTREFERRO}} \quad (3.11)$$

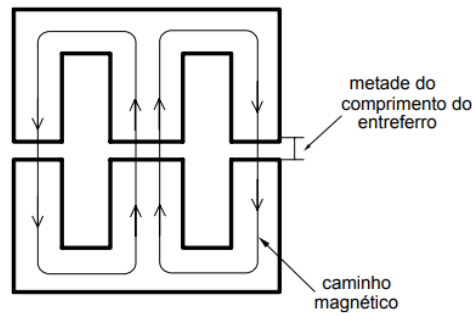
$$R_{ENTREFERRO} = \frac{l_{ENTREFERRO}}{\mu_0 * A_E} \quad (3.12)$$

Assim:

$$l_{ENTREFERRO} = \frac{N^2 * \mu_0 * A_E}{L} \quad (3.13)$$

O valor do entreferro será distribuído igualmente nas pernas laterais do núcleo.

Figura 13 – Distribuição do entreferro.



Fonte: Google Imagens.

#### 4.2.5. Secção dos condutores

Considerando que o conversor opera em uma alta frequência, devido ao seu chaveamento, assim, um efeito pelicular considerável, uma vez que a densidade de corrente ficará na periferia, causando uma redução na área efetiva do condutor.

A equação a seguir define qual a bitola do condutor para conduzir a corrente do enrolamento:

$$S_{FIO} = \frac{I_{EFICAZ}}{J_{MAX}} \quad (3.14)$$

Assim sendo necessário calcular o número de condutores em paralelo para que seja possível a condução da corrente necessária sem que exista um superaquecimento dos mesmos.

$$S_{PELICULAR} = 2 * \frac{7,5}{\sqrt{f}} \quad (3.15)$$

$$N_{COND} = \frac{S_{COND}}{S_{PELICULAR}} \quad (3.16)$$

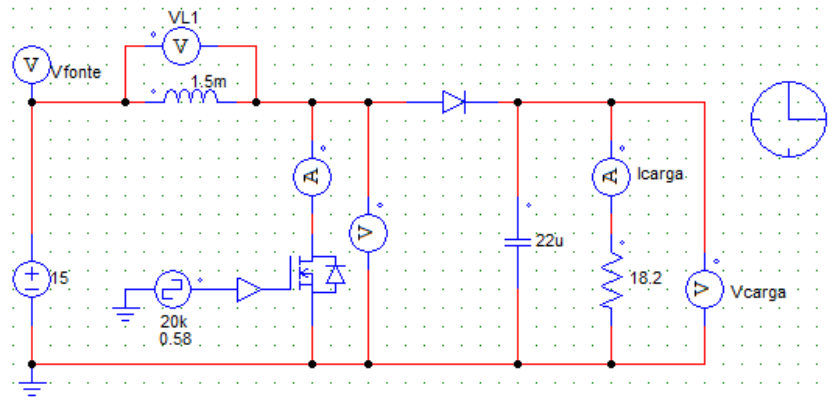
Para a última etapa do projeto do indutor, temos que verificar se é possível associar estes condutores na janela do núcleo. Assim, se  $Ex < 1$  é possível a utilização deste núcleo, verificando essa máxima, utilizamos:

$$AW_{MIN} = \frac{N * N_{COND} * S_{FIO}}{K_W} \quad (3.17)$$

#### 4.3. CIRCUITO SIMULADO

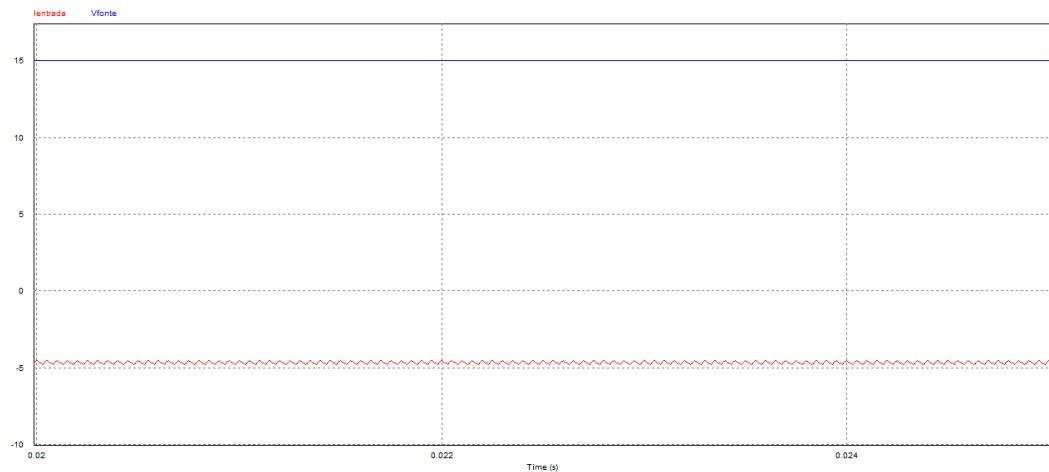
Após os cálculos dos parâmetros do conversor Boost, o mesmo foi simulado utilizando o software PSIM para que posteriormente pudesse ser implementado no circuito físico.

Figura 11: Conversor Boost



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

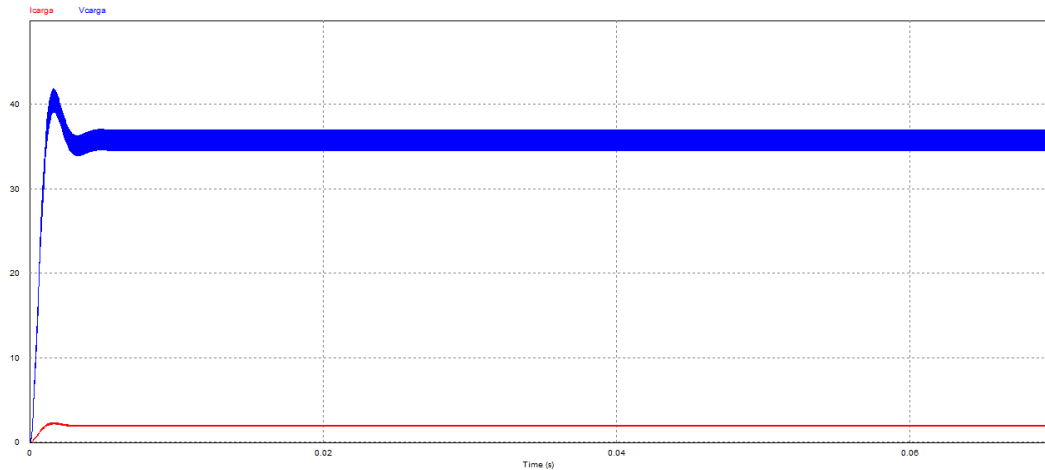
Figura 12: Formas de Onda da Tensão e de Corrente de Entrada



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

A tensão na fonte, onda em azul, é constante, visto que este é um conversor CC-CC e foi implementada uma fonte de tensão contínua de 15V. Já a corrente passa apenas pelo indutor com a chave fechada, carregando-o e, quando a chave está aberta, ele é descarregado através do capacitor e carga, passando pelo diodo, com corrente eficaz de 4,66A.

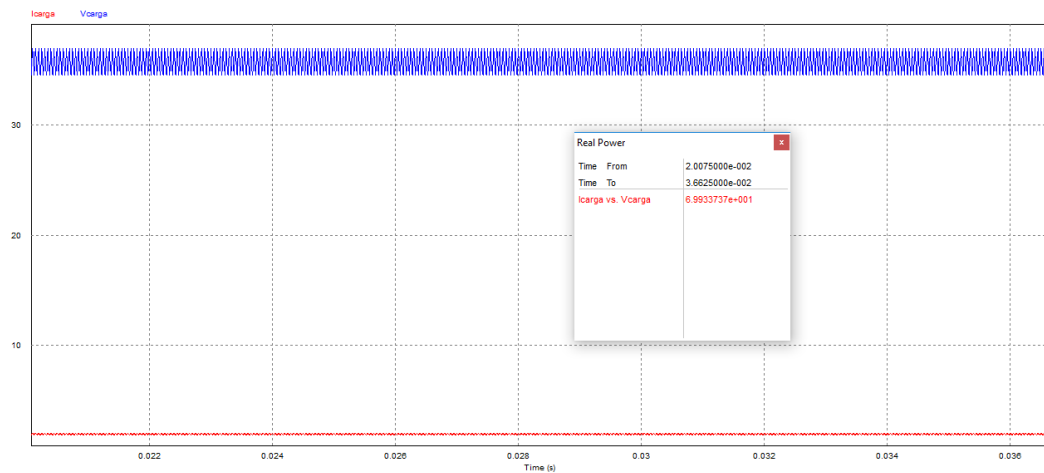
Figura 13: Formas de Onda de Tensão e Corrente na Carga



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

Na figura 13 observa-se as formas de onda de tensão (em azul) e de corrente (vermelha) na carga a partir do momento que o conversor é ligado. A ondulação de tensão de saída corresponde a 6,85% da tensão rms, que é de 35,68V e a ondulação de corrente na carga também é de 6,85% da corrente rms, que é 1,96A. Para melhor observar estas formas de onda na carga, elas são apresentadas ampliadas na figura 14.

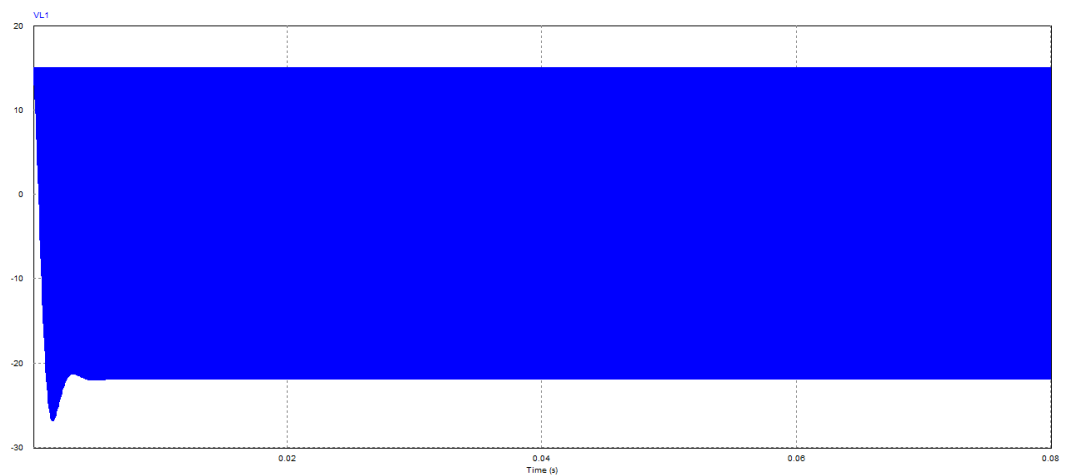
Figura 14: Formas de Onda de Tensão e Corrente na Carga



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

Com isso, é mostrada também a potência ativa de saída, igual a  $69,94W$ , praticamente igual à potência solicitada nas especificações, que é de  $70W$ .

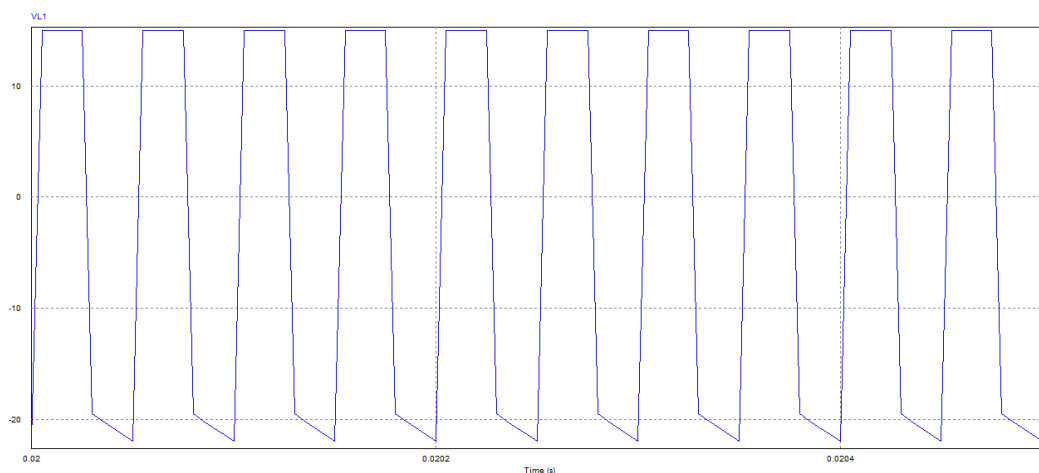
Figura 15: Forma de Onda de Tensão no Indutor



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

Para melhor visualização da forma de onda a mesma foi ampliada, obtendo o mostrado na figura 16.

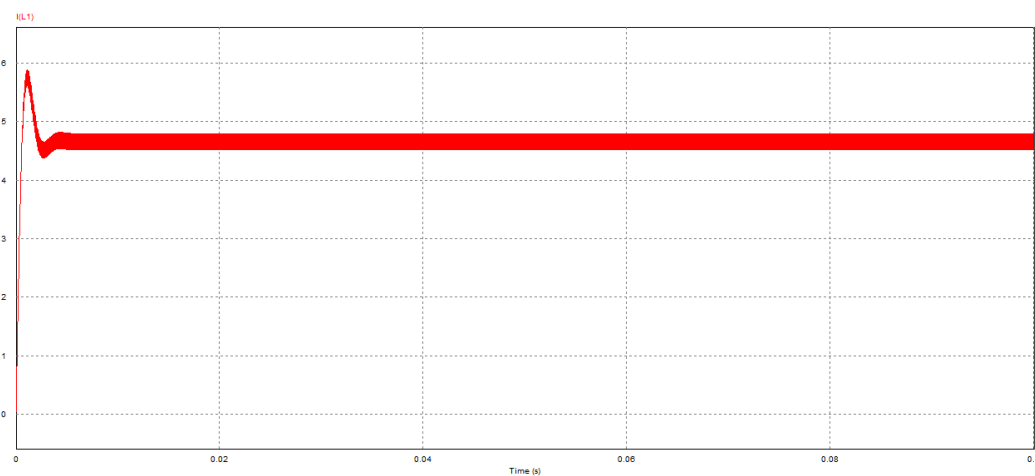
Figura 16: Forma de Onda de Tensão no Indutor



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

Com a chave fechada a corrente que sai da fonte passa totalmente pelo indutor, que se carrega e se mantém assim até que a chave abra e ele comece a descarregar pelo capacitor, por isso a onda é desta forma, com valor rms igual a 18,14V.

Figura 17: Forma de Onda de Corrente no Indutor

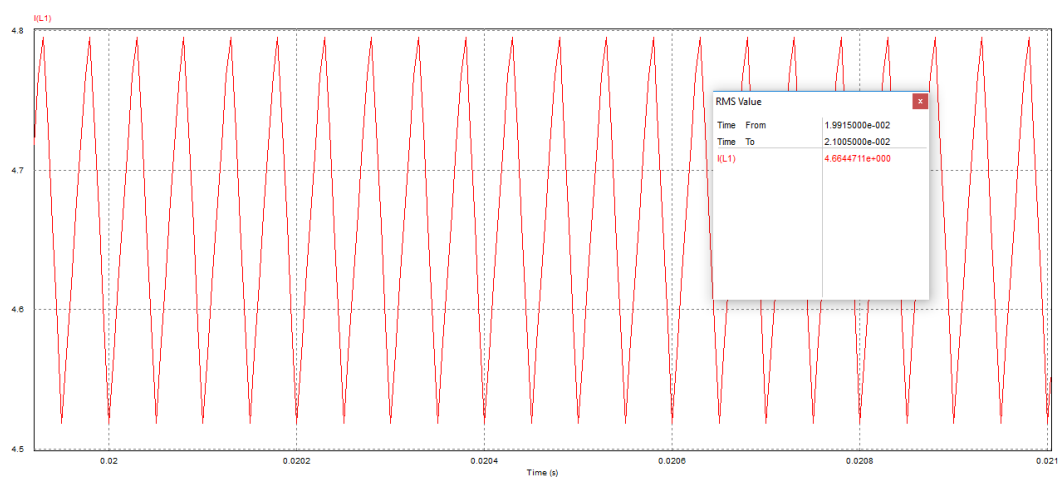


Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

O mesmo ocorre para a forma de onda da corrente, foi mostrado desde o momento em que o circuito começa seu funcionamento na figura 17, mas para melhor analisá-la é necessário dar *zoom*.



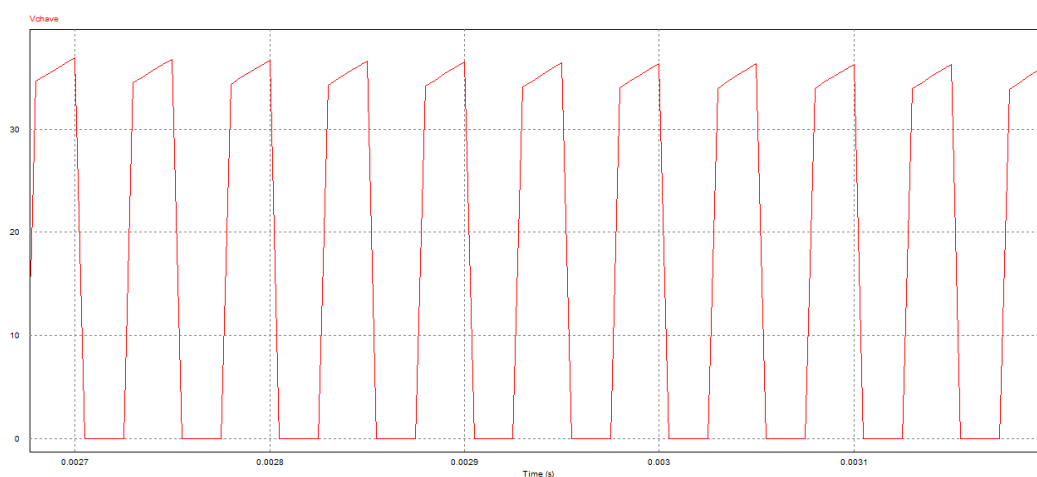
Figura 18: Forma de Onda de Corrente no Indutor



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

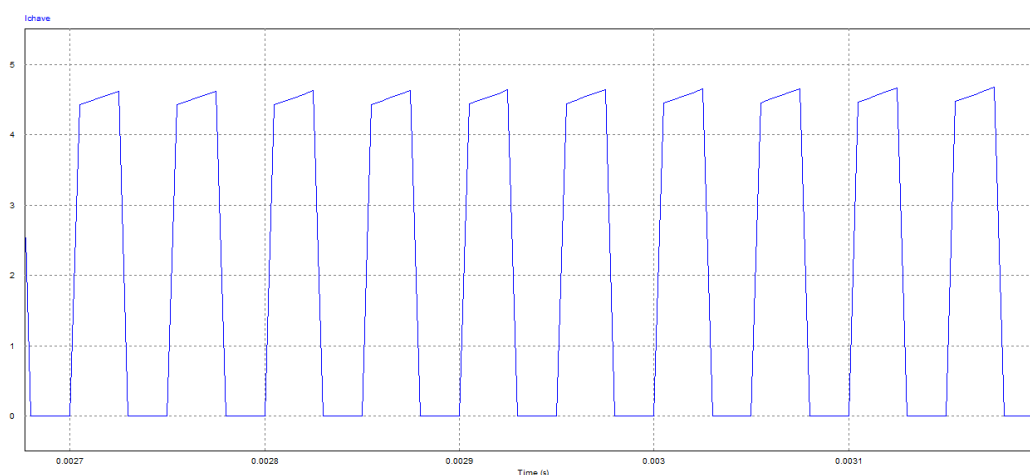
O valor rms da corrente no indutor é de  $4,66A$  e ela aumenta enquanto a chave está fechada e começa a decair quando a chave se abre. A ondulação de corrente nesse componente é de  $5,94\%$ , um valor dentro do aceitável.

Figura 19: Forma de Onda de Tensão na Chave



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

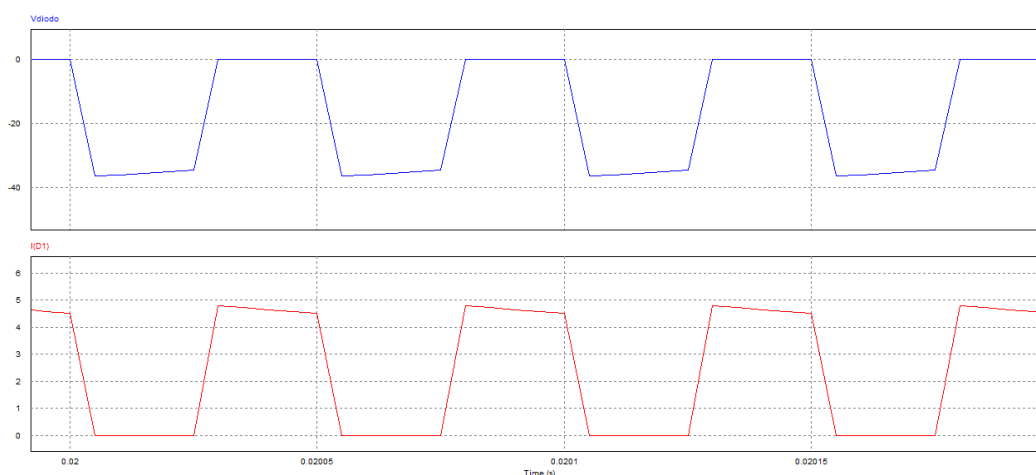
Figura 20: Forma de Onda de Corrente na Chave



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

O valor eficaz de tensão na chave obtido nesta simulação é de 25,30V e o de corrente é de 3,30A. Como no software os componentes são tratados como ideal, quando não há corrente na chave a tensão na mesma é máxima, visto que ela está aberta, podendo ser considerada um circuito aberto. Já quando a tensão é nula, a corrente é máxima, então a chave pode ser considerada um curto-circuito.

Figura 21: Formas de Onda de Tensão e Corrente no Diodo



Fonte: Simulado no PSIM pelos autores.

O valor eficaz de tensão no diodo é de 24,28V e de corrente é equivalente a 3,40A. A partir das formas de onda acima é possível notar que quando há corrente no diodo a tensão no mesmo é nula, pois, como é considerado ideal, se comporta como um curto-circuito, do mesmo modo que ocorre com a chave mostrada anteriormente. Já quando o diodo está em aberto a tensão é negativa pois é a tensão reversa nele, que possui valor igual à tensão na carga (aproximadamente 36V), porém com sinal oposto.

## 5. EXPERIMENTO

### 5.1. CIRCUITO DE CHAVEAMENTO

O circuito de drive montado é o demonstrado na figura 22, um integrador que gera uma onda PWM em dois canais. Foram feitos os ajustes necessários para suprir as especificações do projeto, a uma frequência de 20kHz a fim de obter o chaveamento necessário para o Mosfet(IRF640), a partir disso dimensionamos o valor do capacitor  $C_1$  para 10nF,  $R_1$  é um resistor variável (Trimpot 50K), onde podemos realizar o ajuste para obter a frequência ideal. Para o resistor  $R_y$  foi usado um resistor de 10K. Em  $R_x$  também foi usado um resistor variável (Trimpot 50K), para ser feito o ajuste do duty-cycle.

Um circuito totem pole foi usado para melhoria do funcionamento do driver. Esse circuito é obtido através da associação de dois diodos para aumentar o duty-cycle a partir das tuas portas do CI-3525, obtendo uma onda de até cerca de 90% de ciclo de trabalho. Os diodos usados foram do tipo Shotcky, de modo que o tempo de recuperação fosse baixo.

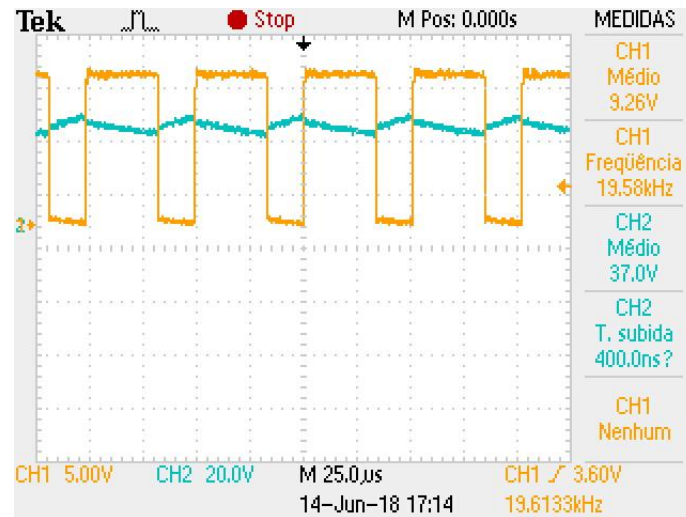
Figura 22: Circuito de chaveamento



Fonte: Autoral

Usando o osciloscópio para medir a onda do chaveamento PWM, obtemos as formas especificadas na figura 23. Vale destacar que o driver foi alimentado com uma tensão de 15V e frequência de 20kHz.

Figura 23: Forma de onda do PWM (laranja) x Tensão na saída (azul)

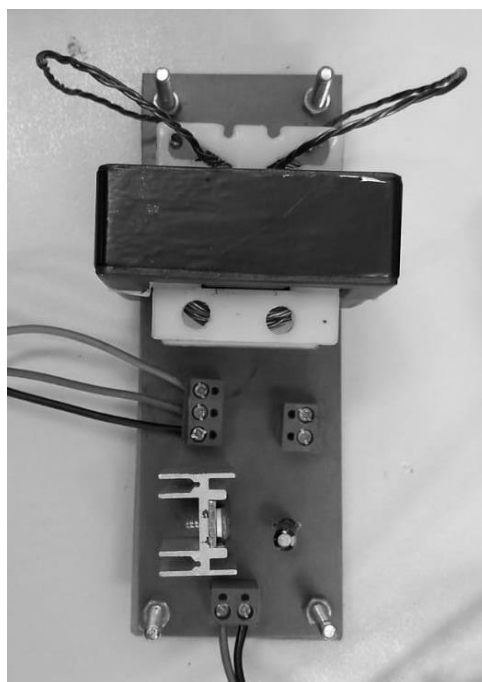


Fonte: Autoral

## 5.2. CIRCUITO DE POTÊNCIA

Após os cálculos e simulações feitas no PSIM, foi realizada a montagem da parte prática, como mostrado na figura 24 e 25.

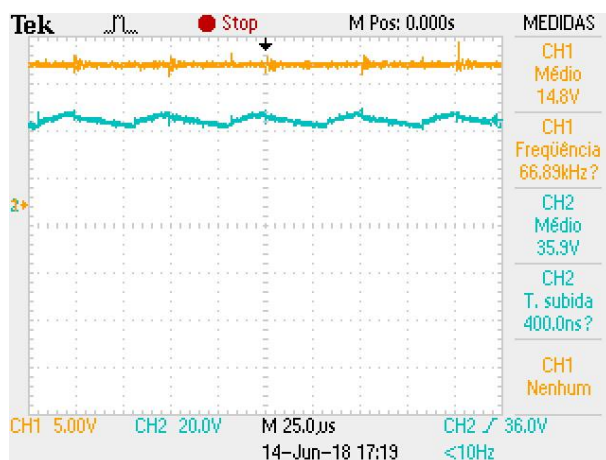
Figura 24: Montagem do circuito de potência



Fonte: Autores

Após a montagem do circuito foram feitas as devidas medições. Os parâmetros estabelecidos pela equipe eram de 15V na entrada e 35V na saída.

Figura 25: Leitura do osciloscópio Tensão de entrada (laranja) x Tensão de saída (azul)

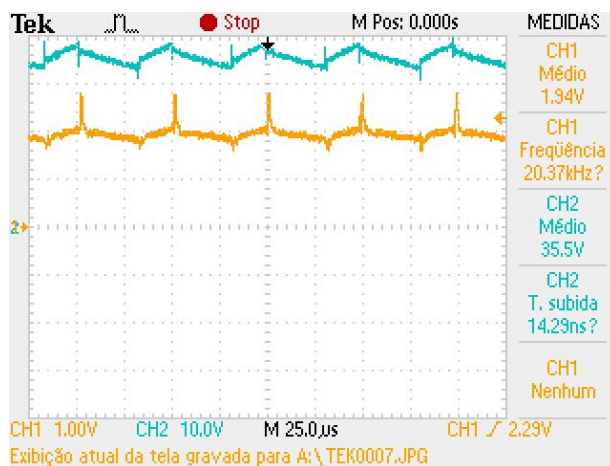


Fonte: Autores

Ao compararmos a onda obtida com a simulada, observamos que a onda medida contém leves ruídos, porém estes não são de grande relevância na medição da tensão final, gerando uma tensão de 14,8V, o que representa uma diferença de cerca de 1,33% do valor previamente estabelecido. Com a placa alimentada nos 15V de entrada, a tensão na saída foi medida. O valor médio encontrado foi de 35,9V, possuindo um erro de cerca de 1,02% do valor estipulado, observados na figura 26. Comparando com a simulação, o resultado foi bem satisfatório.

Com a alicate amperímetro do osciloscópio, foram medidos os valores de corrente na carga, que estão comparados aos de tensão.

Figura 26 Corrente na saída (laranja) x tensão na saída (azul)



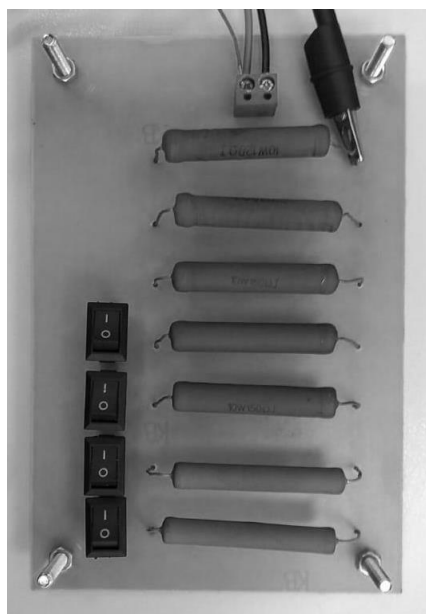
Fonte: Autoral

O valor de corrente médio obtido gira em torno de 2%. Sendo assim, notamos que o conversor boost projetado está gerando resultados satisfatórios e coerentes com a simulação.

### 5.3. CIRCUITO DE CARGA

Com o intuito de verificar de fato a potência calculada fora montada uma placa exclusivamente para teste, que consistem em uma associação de resistores (3x 150 $\Omega$ , 3x 120 $\Omega$  e 1x 100 $\Omega$ ) todos em paralelo que combinadas dão aproximadamente a resistência de carga 18.18 $\Omega$ , na prática devido a tolerância dos resistores a resistência de carga modificou-se um pouco ao que foi estimado, no entanto o circuito ainda comportou-se de forma estável superando os cálculos de potência. Segue abaixo a figura 27 do resultado.

Figura 27: Montagem do circuito de carga



Fonte: Autores

As chaves encontradas na placa possibilitam o teste com variação de carga, assim como também um distúrbio, em caso de futura implementação de uma malha fechada por meio de um controle. A placa de driver, já está pronta para essa expansão, contando com bornes de saída para alimentação do controlador, assim como um borne de entrada com o valor da saída do controlador. Nesse intuito poderiam ser utilizados controladores PID e PI, pelo menos. Desse modo os efeitos provocados pela variação da carga, seriam estabilizados por meio dos controladores, assim a tensão deveria ainda ficar estável, sem necessidade de modificação do duty-cycle de modo manual, a modificação deste ficaria a cargo do controlador.

## 6. CONCLUSÃO

Em resumo, o conversor Boost funciona sendo alimentado por uma tensão CC e a eleva na saída de forma que essa tensão também seja constante. Como os dispositivos utilizados são chave, diodo, indutor, capacitor e resistor e a maioria deles opera como circuito aberto ou como curto circuito em diferentes momentos, há uma certa ondulação de tensão e corrente na carga, porém dentro do aceitável de acordo com as especificações de projeto.

A simulação do circuito foi de suma importância para analisar seu funcionamento e comportamento quando alguns parâmetros eram modificados, assim alterações poderiam ser feitas antes da execução do projeto na placa. Apesar de ser possível fazer determinadas previsões, deve-se lembrar que a teoria e a prática diferem um pouco, visto que em cálculos e em simulações são considerados componentes ideais, e não reais. Os elementos reais dissipam calor, perdendo energia, entre outros fatores como a obtenção manual do indutor calculado, que fazem com que a execução do projeto se torne mais difícil.

É relevante citar foi necessário implementar dissipadores, pois componentes como o MOSFET dissipam muito calor, dada a potência trabalhada, que é de 70W. Além disso, para que o conversor funcionasse com um *duty cycle* maior que 0,5 foi preciso utilizar as duas saídas do CI SG3525 num pequeno circuito eletrônico que somasse as duas, pois o ciclo de trabalho do projeto em questão era de 0,58.

Pelo fato de não ser controlado, caso este conversor CC-CC do tipo Boost tenha alguns de seus parâmetros alterados, os demais não serão ajustados, obtendo valores diferentes dos esperados.

Com isso, na execução do projeto final da disciplina de Eletrônica de Potência, observou-se a importância de um bom planejamento e estudo do funcionamento do circuito a ser implementado. Em função disso, o conversor teve uma boa resposta e, como esperado, elevou a tensão de 15V de entrada para uma tensão de 35V de saída, ambas contínuas, com a carga estabelecida, obedecendo os parâmetros de projeto, possibilitando um maior conhecimento prático desse conteúdo, além das práticas em laboratório.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Hart, D. W. (2012). Eletrônica de Potência. (R. Abdo, Trad.) Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: AMGH Editora Ltda.
- [2] BARBI, Ivo. (2011). Projetos de fontes chaveadas. Florianópolis: Edição do Autor.



## 8. REPOSITÓRIO

Indo ao encontro da comunidade Open Source, todos os arquivos produzidos neste trabalho serão disponibilizados na plataforma GitHub, juntamente com esse relatório, tornando-o não capaz, no entanto, mais possível, que esse trabalho se torne útil a outrem.

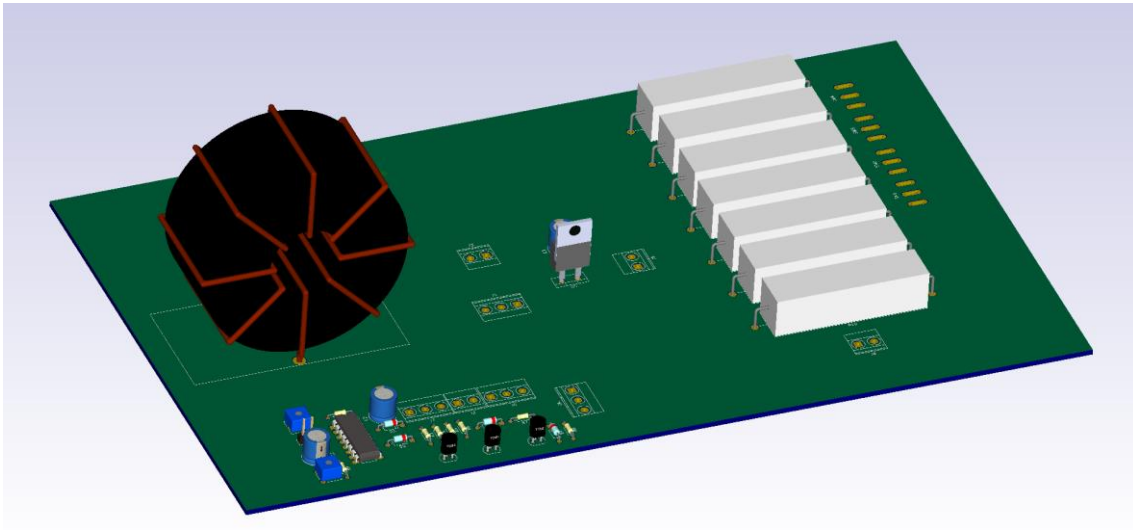
[3] RUIZ, Flávia P.; LIMA; Julio C. F.; FARIAS, Matheus P.; OLIVEIRA, Yara M. Conversor Boost. Universidade Federal do Ceará, Disciplina de Eletrônica de Potência, Curso de Engenharia Elétrica. Ceará, Sobral, 2018. Disponível em: <<https://github.com/juloko/Conversor-Boost>>.

## 9. ANEXOS

As próximas páginas deste relatório destinam-se aos anexos que podem ser utilizados durante a execução de um projeto. No intuito de garantir que os arquivos de referência possam ser impressos, serão listados abaixo os títulos respectivamente de acordo com a ordem de apresentação de cada página que virá a seguir. Com exceção do Anexo 9.1.

### 9.1. CIRCUITO DESENVOLVIDO NO KICAD EM 3D (ILUSTRATIVO)

Figura 28: Montagem de todo o circuitos em 3D

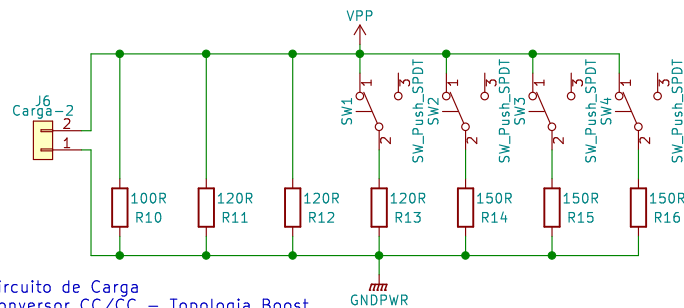
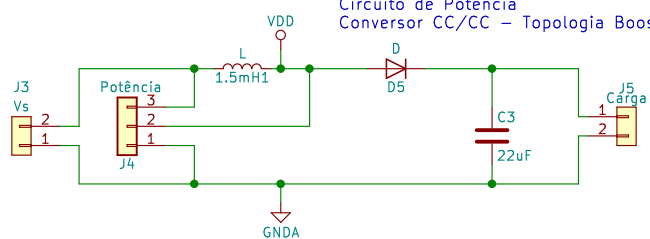
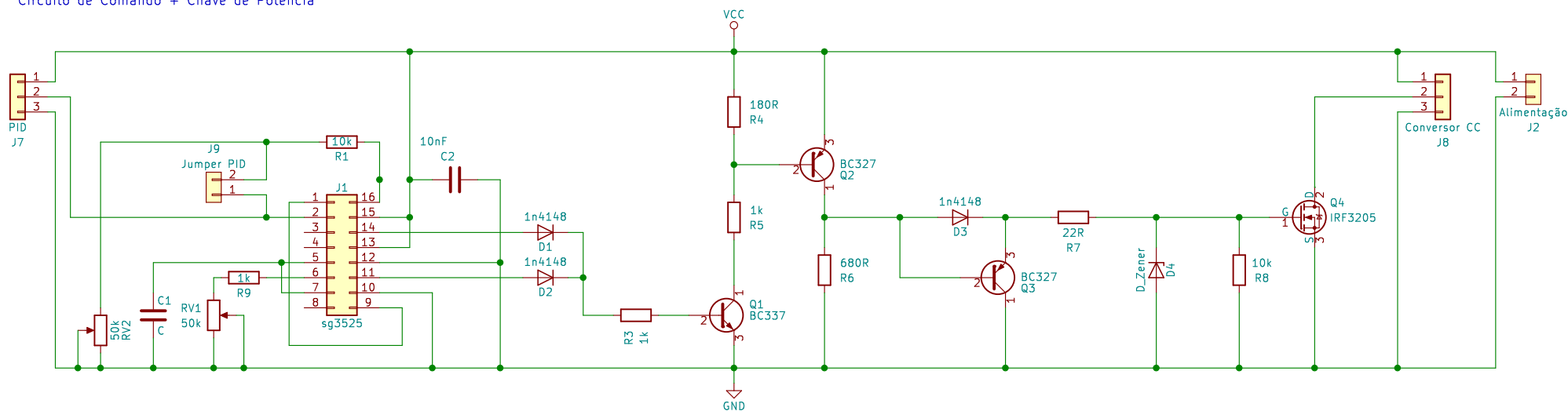


Fonte: Autores

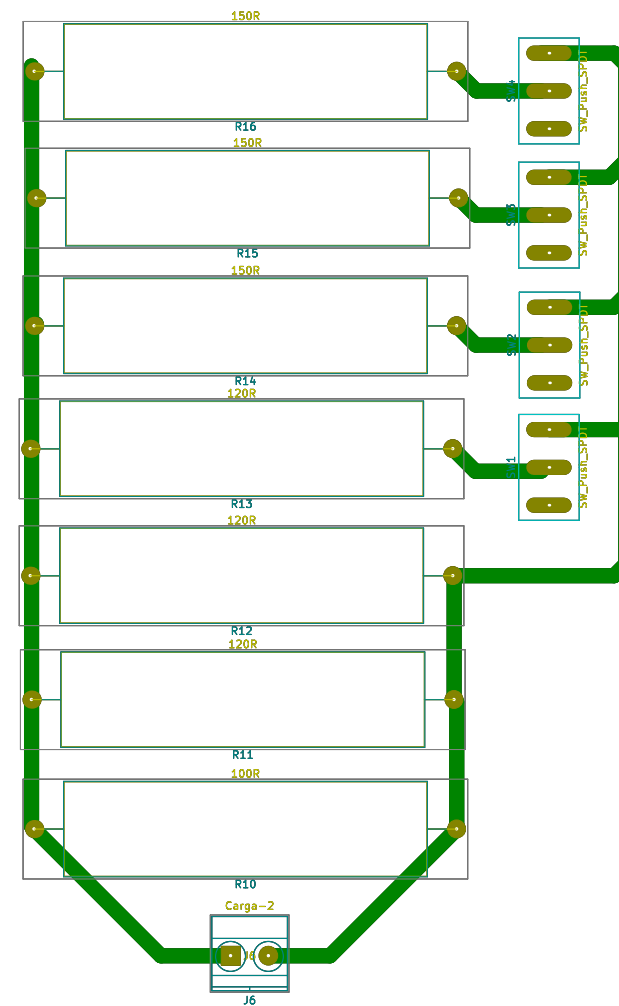
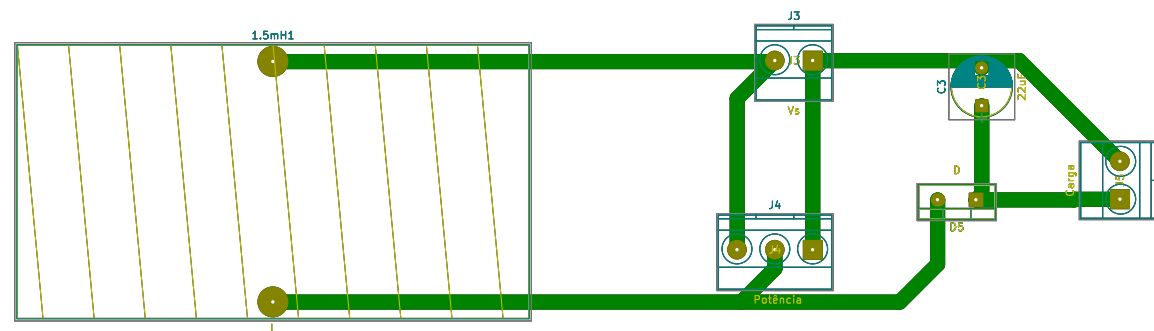
### 9.2. ESQUEMÁTICO DESENVOLVIDO NO KICAD

### 9.3. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA NO KICAD (ILUSTRATIVO)

### 9.4. PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DESENVOLVIDA NO KICAD (PRONTA PARA EXECUÇÃO)



Rev:  
Id: 1/1



Rev:  
Id: 1/1

