

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Igor Gass Vegner

**PROJETO E APLICAÇÃO DE INDUTORES PLANARES EM
CONVERSORES ELETRÔNICOS**

Santa Maria, RS
2017

Igor Gass Vegner

**PROJETO E APLICAÇÃO DE INDUTORES PLANARES EM CONVERSORES
ELETRÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Ricardo Nederson do Prado, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2017

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Igor Gass Vegner. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: Rua Elpídio de Menezes, 77, APTO 306, Camobi, Rio Grande do Sul, CEP 97105-110.

Fone +55 55 9 9998-5381. E-mail: igorgassv@gmail.com

Igor Gass Vegner

**PROJETO E APLICAÇÃO DE INDUTORES PLANARES EM CONVERSORES
ELETRÔNICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica, da
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,
RS), como requisito parcial para obtenção do
grau de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 14 de dezembro de 2017:



Ricardo Nederson do Prado, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Marcelo Rafael Cosetin, Dr. Eng. (UFSM)
(Membro Convidado)



Paulo Cesar Vargas Luz, Dr. Eng. (UFSM)
(Membro Convidado)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ricardo Nerderson do Prado, não só por aceitar ser meu orientador, mas também por contribuir na minha formação acadêmica e por confiar em meu trabalho nesses últimos três anos.

Também agradeço ao grupo GEDRE e seus colaboradores, onde tive a oportunidade de aprender como nunca havia aprendido e onde passei boa parte de minha graduação. Em especial aos integrantes: Eduardo Bitencourt, Leonardo Medeiros, Alexander Dutra, Nórton Barth, Flávio Reck, Carlos Conrad e João Brum.

A banca examinadora, Marcelo Rafael Cosetin e Paulo Cesar Luz, pelo tempo disponibilizado na avaliação deste trabalho. Sinto-me honrado de ser avaliado por vocês que sempre estiveram presentes no grupo de pesquisa durante todos esses anos e sempre estão dispostos a ajudar o próximo.

Aos colegas e amigos que tive a felicidade de conhecer durante esses anos.

Inevitavelmente, agradeço ao Matheus Righi, não por ser meu amigo, mas por ser o irmão que nunca tive. *Bros before hoes.*

Agradeço imensamente a minha namorada, Bruna, pelo companheirismo, pelo carinho e principalmente pela paciência durante todos esses anos. A tua alegria e o teu sorriso me impressionam diariamente. Obrigado por me tornar uma pessoa melhor.

Por último, porém o mais importante, agradeço a toda minha família, em especial a aqueles que tornaram isso possível: meus pais, Odenir e Elsa, pelo esforço e dedicação durante todos esses anos, e a minha irmã Alana. Espero um dia poder retribuir por tudo o que fizeram e fazem por mim.

*“I won't back down. You can stand me up at
the gates of Hell. But I won't back down”*

Johnny Cash

RESUMO

PROJETO E APLICAÇÃO DE INDUTORES PLANARES EM CONVERSORES ELETRÔNICOS

AUTOR: IGOR GASS VEGNER

ORIENTADOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

O elevado rendimento proporcionado por conversores estáticos os torna competitivos e amplamente utilizados no acondicionamento e na conversão de energia, sendo aplicados desde a geração de energia até o consumidor final. Algumas dessas aplicações necessitam de elevada densidade de potência, requerendo volume e peso reduzidos. Conversores de potência possuem elementos reativos necessários para o funcionamento desses. Entre os demais componentes de um conversor de potência, indutores, capacitores e transformadores estão entre os mais pesados e volumosos. Visando o aumento da densidade de potência através da substituição de indutores convencionais por indutores planares com núcleo de ar, é proposta no presente trabalho uma metodologia de projeto de indutores planares, buscando valores de indutância através de simulações utilizando o método dos elementos finitos. Para a consolidação da teoria e do projeto abordado, simulações e experimentos com circuitos de filtros analógicos e conversores eletrônicos são realizados, empregando elementos planares a esses. Observando, também, as características desses dispositivos, comparando-os com os indutores de núcleo de ferrite já consolidados.

Palavras-chave: Densidade de potência; indutores planares; método dos elementos finitos.

ABSTRACT

PROJECT AND APPLICATION OF PLANAR INDUCTORS IN ELECTRONIC CONVERTERS

AUTHOR: IGOR GASS VEGNER

ADVISOR: RICARDO NEDERSON DO PRADO

The high efficiency provided by static converters makes them competitive and widely used in the energy conversion, being applied from the energy generation until the final consumer. Some of these applications require high power density, requiring reduced volume and weight. Power converters have reactive elements that are required for their operation. Among other components in a power converter, inductors, capacitors, and transformers are the heaviest and the bulkier. Aiming to increase power density by replacing conventional inductors with air core planar inductors, a design methodology is proposed, searching for optimized inductance values through finite element method simulations. Simulations and experiments using planar elements with analog filter and electronic converter circuits are performed for the theory and the project consolidation. The characteristics of these devices are observed, comparing them with the ferrite-core consolidated inductors.

Keywords: Power density; planar inductors; finite element method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Exemplos de indutores	14
Figura 2.2 – Tipos de indutores planares: (a) quadrado, (b) octogonal, (c) hexagonal e (d) circular	16
Figura 2.3 – Resposta ideal para os filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-banda e (d) rejeita-faixa	17
Figura 2.4 – Topologias geralmente utilizadas para filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-banda e (d) rejeita-faixa.....	18
Figura 2.5 – Filtro passa-baixa LC	18
Figura 2.6 – Conversor <i>Boost</i>	20
Figura 2.7 – Etapas de operação do conversor <i>Boost</i>	21
Figura 2.8 – Ambiente do <i>software</i> ANSYS ® Maxwell	23
Figura 3.1 – Número de espiras para as três equações propostas	27
Figura 3.2 – Variáveis utilizadas no projeto	28
Figura 3.3 – Elementos primitivos para a modelagem	29
Figura 3.4 – Retângulo a ser utilizado na varredura	29
Figura 3.5 – Indutor planar após a varredura dos elementos primitivos	29
Figura 3.6 – Excitações de corrente: (a) para fora do terminal e (b) para dentro do terminal	30
Figura 3.7 – Criação da caixa de ar	30
Figura 4.1 – Desenho de um indutor planar de 10 μ H.....	32
Figura 4.2 – Valor de indutância para o modelo projetado	32
Figura 4.3 – Circuito do filtro passa-baixa LC simulado no LTSpice ®.....	33
Figura 4.4 – Diagrama de Bode a partir dos valores da Tabela 4.2.....	34
Figura 4.5 – Topologia simulada em PSIM.....	36
Figura 4.6 – Resultados de simulação obtidos para o conversor <i>Boost</i>	37
Figura 4.7 – Conversores em operação: (a) indutor convencional e (b) indutor planar.....	38
Figura 4.8 – Formas de onda para o conversor <i>Boost</i> com indutor convencional. Ch. 1: V_{in} (20 V/div); Ch. 2: I_{in} (2 A/div); Ch. 3: V_{out} (50 V/div); Ch. 4: I_{out} (1 A/div).	40
Figura 4.9 – Formas de onda para o conversor <i>Boost</i> com indutor planar. Ch. 1: V_{in} (20 V/div); Ch. 2: I_{in} (2 A/div); Ch. 3: V_{out} (50 V/div); Ch. 4: I_{out} (1 A/div).	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Espaçamento de condutores em <i>PCBs</i>	24
Tabela 3.1 – Constantes da Equação (3.1).....	26
Tabela 3.2 – Constantes da Equação (3.2).....	26
Tabela 3.3 – Constantes da Equação (3.3).....	26
Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada e de saída para o projeto de indutores planares ...	31
Tabela 4.2 – Resultados obtidos nos filtros passa-baixa implementados	34
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos no projeto do conversor <i>Boost</i>	35

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{trace}	Área da trilha
C	Capacitância
C_f	Capacitância do filtro
C_{out}	Capacitor de saída
D	Razão cíclica do conversor
D_{bo}	Diodo do conversor <i>Boost</i>
d_{in}	Diâmetro interno
d_{out}	Diâmetro externo
f_c	Frequência de corte
f_{sw}	Frequência de comutação
I_{in}	Corrente de entrada
I_{out}	Corrente de saída
L	Indutância
L_{bo}	Indutância do conversor <i>Boost</i>
L_{conv}	Indutância do indutor convencional
L_f	Indutância do filtro
L_{planar}	Indutância do indutor planar
N	Número de espiras
R_{eq}	Resistência equivalente
R_{led}	Resistência do LED
S	Interruptor
t_1	Primeiro estágio do conversor
t_2	Segundo estágio do conversor
t_3	Terceiro estágio do conversor
V_{in}	Tensão de entrada
V_{led}	Tensão limiar do LED
V_{out}	Tensão de saída
W_{trace}	Largura da trilha
α_d	Relação de diâmetro
ΔI	<i>Ripple</i> de corrente
ΔT	Variação de temperatura ambiente
ΔV	<i>Ripple</i> de tensão
ρ	Fator de preenchimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.2	MOTIVAÇÃO.....	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	APLICABILIDADE DE INDUTORES PLANARES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.....	14
2.1	ELEMENTOS MAGNÉTICOS E INDUTORES PLANARES	14
2.2	FILTROS.....	16
2.3	CONVERSOR BOOST.....	19
2.4	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS	22
2.5	REGRAS DE PROJETO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	23
3	METODOLOGIA DE PROJETO DE INDUTORES PLANARES	25
3.1	PROJETO DE INDUTORES PLANARES	25
3.2	PROCEDIMENTOS PARA A MODELAGEM DE INDUTORES PLANARES	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS PARA INDUTORES PLANARES	31
4.2	COMPARAÇÃO DE FILTROS LC	33
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR <i>BOOST</i>	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
	APÊNDICE A – Script para MATLAB ® utilizado nos diagramas de <i>Bode</i>	45
	APÊNDICE B – Código de PWM utilizado no Micro Controlador ATmega32u4	46
	APÊNDICE C – <i>Layouts</i> das PCBs utilizadas.....	47
	APÊNDICE D – Modelo da Lâmpada Tubular LED	48

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da população mundial, a demanda por energia elétrica se eleva anualmente (EIA, 2011). Não só incentivos à utilização de fontes renováveis são necessários, mas também deve-se buscar o aumento no rendimento nos diversos estágios de acondicionamento e de conversão de energia elétrica, desde a geração desta até o consumidor final. A redução de perdas de energia no setor elétrico também auxilia na redução de emissão de gases poluentes, já que grande parte da energia elétrica é proveniente da queima de combustíveis fósseis (EDELNBOSCH *et al.*, 2017).

Nesse sentido, o elevado rendimento na conversão de energia elétrica fornecido por interruptores semicondutores eficientes e de comutação rápida possibilita a vasta utilização de conversores de potência em aplicações como: fontes DC e AC reguladas, iluminação, sistemas fotovoltaicos e acionamento de motores (HART, 2011). Algumas dessas aplicações necessitam de elevada densidade de potência, ou seja, devem possuir tamanho reduzido sem que a potência seja comprometida (HUA e LEE, 1993).

Além disso, conversores de potência possuem elementos reativos, necessários para o funcionamento desses dispositivos. Dentre os principais elementos reativos encontrados em conversores estáticos, estão os indutores e transformadores. Indutores e transformadores são construídos a partir de materiais ferromagnéticos e são comumente os componentes mais volumosos e os mais pesados encontrados em conversores de potência (CHAN *et al.*, 2006).

1.1 OBJETIVOS

Visando a mitigação de perdas e o aumento da densidade de potência de conversores estáticos, é proposta a substituição dos indutores convencionais, onde as espiras são constituídas de fios condutores, por indutores planares, onde as espiras são impressas na placa do circuito. O processo de construção de placas de circuito impresso é industrialmente consolidado e possui baixo custo, facilitando a implementação desses elementos.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e apresentar uma metodologia de projeto para indutores planares através de equações conhecidas, buscando valores otimizados de indutância e de resistência desses elementos. Então, o projeto é validado através de simulações utilizando o *software* MAXWELL® e através da utilização de indutores planares em conversores estáticos.

1.2 MOTIVAÇÃO

Indutores e transformadores convencionais ocupam a maior parte das aplicações em eletrônica de potência devido ao baixo custo e a facilidade de projeto. Embora robustos, a fabricação desses dispositivos não é simples e apresenta baixo fator de repetibilidade, onde o valor da indutância obtida pode sofrer variações devido a processos manuais na construção dos mesmos (EBERT, 2008).

Os elementos planares, além de serem capazes de minimizar as perdas magnéticas, também apresentam elevado fator de repetibilidade, uma vez que esses são construídos através de placas de circuito impresso. Podendo, assim, reduzir os custos de fabricação e aumentar a eficiência de conversores de potência (NAGEL e PARTRIDGE, 1994).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos, sendo este o primeiro.

No Capítulo 2, realiza-se revisão sobre a aplicabilidade de indutores planares em conversores eletrônicos de potência, evidenciando os conceitos utilizados ao longo deste trabalho.

No Capítulo 3, apresenta-se uma metodologia de projeto de indutores planares, observando as características e as equações utilizadas no processo, juntamente com a descrição do procedimento para a simulação desses componentes utilizando o método de elementos finitos.

No Capítulo 4 são descritos os resultados obtidos para a simulação de indutores planares no *software* de análise de elementos finitos, a comparação entre filtros passivos LC, um sendo composto por indutores convencionais e outro sendo construído a partir de indutores planares e, por fim, a implementação de um conversor *Boost*.

No Capítulo 5, considerações finais são descritas, apontando os principais resultados e o que foi desenvolvido no trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 APLICABILIDADE DE INDUTORES PLANARES EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Nesta seção, é vista a aplicabilidade de indutores planares em conversores estáticos, bem como a caracterização desses elementos e suas aplicações em filtros analógicos, uma vez que esses dispositivos são vastamente utilizados em estágios de correção de fator de potência (VLATKOVIC *et al.*, 1996). Através de uma revisão bibliográfica, filtros passivos e a topologia de conversor elevador de tensão, *Boost*, são estudados. Ainda, uma breve introdução à análise de elementos finitos é apresentada, juntamente com a descrição de regras e normativas a respeito do projeto de placas de circuito impresso, também denominadas de *PCB*.

2.1 ELEMENTOS MAGNÉTICOS E INDUTORES PLANARES

O emprego de elementos armazenadores de energia compreendem boa parte do estudo em eletrônica de potência. Dispositivos como indutores e transformadores são fundamentais para o funcionamento de diversas topologias de conversores estáticos, de circuitos reguladores, de filtros de correção de fator de potência e de filtros de distorções harmônicas (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 2007).

Indutores e transformadores podem ser construídos através de diversos materiais, dependendo diretamente da aplicação desejada, possuindo núcleos constituídos de ferrite, de ferro ou de ar. A Figura 2.1 mostra os principais tipos de indutores.

Figura 2.1 – Exemplos de indutores



Fonte:(CRTCELECTRONICS).

O projeto adequado de elementos magnéticos é crucial para o correto funcionamento de conversores, uma vez que não-idealidades como indutância de dispersão, indutância magnetizante e capacitâncias parasitas refletem no rendimento do circuito e no aumento de emissão de ruídos principalmente causados por interferência eletromagnética (BARBI *et al.*, 2002).

Indutores planares consistem, vide o nome, em elementos indutivos construídos em um plano. Tal característica garante a montagem de indutores em aplicações onde o baixo perfil é desejado, além de prover maior repetibilidade na construção desses dispositivos, como já citado anteriormente em (EBERT, 2008).

Elementos magnéticos planares oferecem boa performance térmica e menor indutância de dispersão devido ao melhor acoplamento magnético (QUIRKE *et al.*, 1992). Porém, quando a frequência de operação aumenta, efeitos como o efeito *skin* e o efeito de proximidade são amplificados, tornando a análise e a modelagem desses elementos mais complexa que a de indutores convencionais (CHEN *et al.*, 2016).

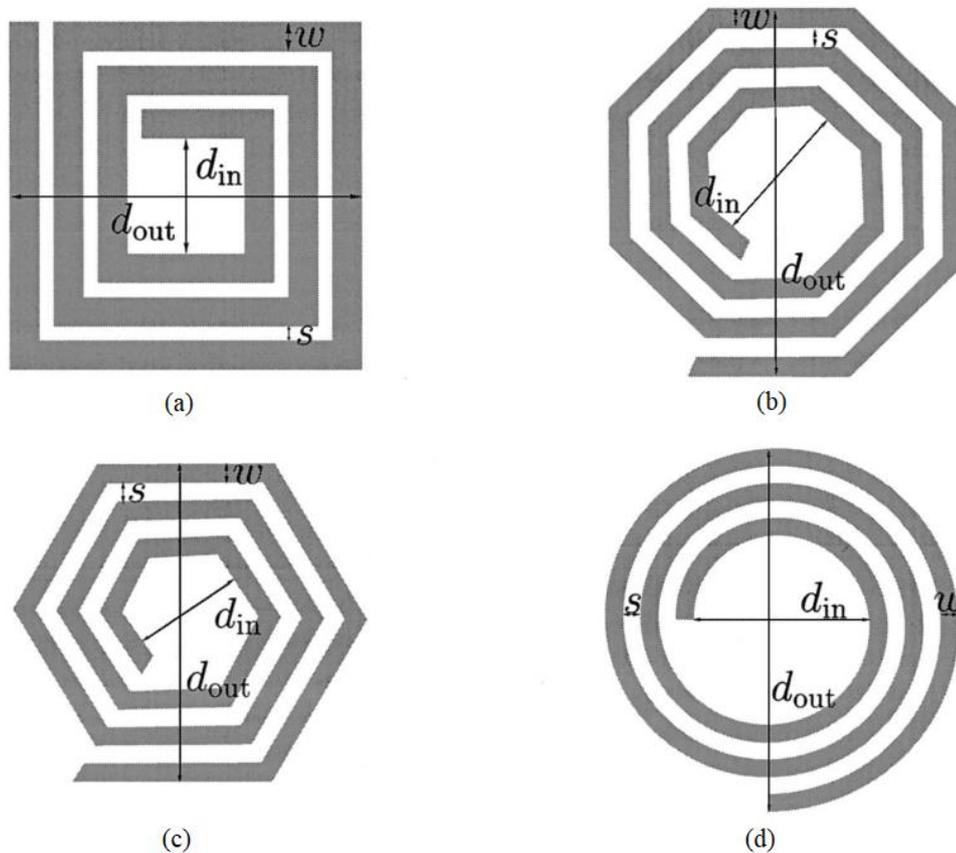
As primeiras menções sobre esses elementos ocorreram em meados dos anos 30, sendo utilizados em aplicações de radiofrequência, com as equações para indutância propostas por (WHEELER, 1928). A partir dessas equações propostas, metodologias de cálculo de indutância para diferentes tipos de indutores planares foram desenvolvidas, conforme visto em (MOHAN *et al.*, 1999).

Os indutores planares possuem usualmente as formas: quadrada, octogonal, hexagonal e circular, conforme ilustra a Figura 2.2. Também são mostradas na Figura 2.2 as variáveis iniciais de projeto que, por sua vez, serão utilizadas ao longo deste trabalho. Sendo w : largura da trilha, s : espaçamento entre trilhas, d_{in} : diâmetro interno e d_{out} : diâmetro externo.

A evolução dos dispositivos semicondutores viabiliza o aumento da frequência de operação de conversores estáticos sem que haja o aumento das perdas por comutação, proporcionando a redução do volume e do peso dos componentes presentes nesses dispositivos (ATALLA *et al.*, 2016). Tal evolução também possibilitou que indutores planares fossem utilizados em conversores de potência, uma vez que menores valores de indutância necessários quando a frequência de comutação é elevada.

Não só o baixo perfil proveniente do uso de indutores planares auxilia na redução das dimensões de conversores eletrônicos, mas também, na maioria dos casos, a utilização de componentes menores proporciona o aumento da densidade de potência, definida pela relação entre a quantidade de potência e o volume ocupado (GUAN *et al.*, 2016).

Figura 2.2 – Tipos de indutores planares: (a) quadrado, (b) octogonal, (c) hexagonal e (d) circular



Fonte: (MOHAN *et al.*, 1999).

2.2 FILTROS

Filtros elétricos são circuitos que tem como principal atributo capacidade de permitir ou de impedir a passagem de sinais com determinada frequência, modificando o sinal da entrada desses elementos (VAN VALKENBURG, 1982). Ainda, filtros são vastamente utilizados em circuitos de fontes chaveadas devido a capacidade de suprimir distorções harmônicas causadas pela comutação dos interruptores presentes nesses circuitos (DE SOUZA, 2000).

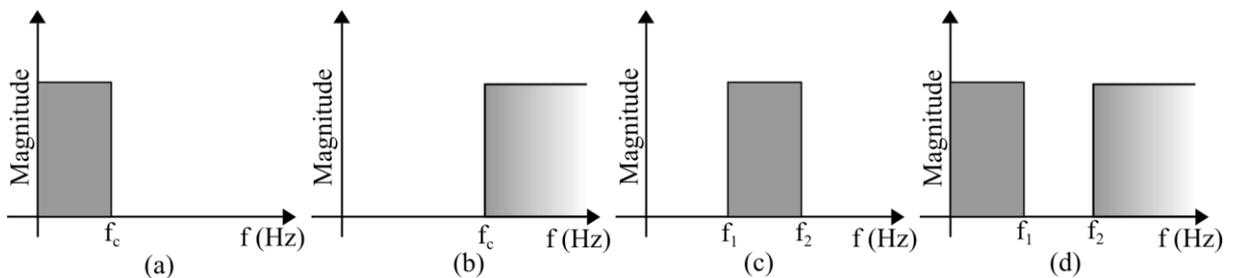
Esses dispositivos podem ser classificados como: filtros passivos, onde são constituídos apenas por elementos passivos como indutores e capacitores, filtros ativos, onde são empregados elementos ativos – como amplificadores operacionais e controladores – e filtros digitais, onde há a implementação do filtro através de sistemas digitais (MUSSOI e ESPERANÇA, 2004).

Além disso, os filtros são classificados conforme a função que exercem. Dentre as principais funções, têm-se:

- Filtros passa-baixa: filtros que só permitem sinais com anteriores à frequência de corte, f_c ;
- Filtros passa-alta: filtros que permitem sinais a partir de certa frequência, a partir de f_c (frequência de corte);
- Filtros passa-banda: filtros que permitem uma banda de frequência, de f_1 (frequência de corte inferior) à f_2 (frequência de corte superior);
- Filtros rejeita-faixa: filtros que rejeitam determinada faixa de frequência, após f_1 (frequência de corte inferior) e antes de f_2 (frequência de corte superior).

Portanto, a resposta em frequência desses filtros pode ser apresentada em diagramas de *Bode*, que representam a resposta do ganho desses circuitos de acordo com a frequência do sinal de entrada. Tal característica é ilustrada na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Resposta ideal para os filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-banda e (d) rejeita-faixa

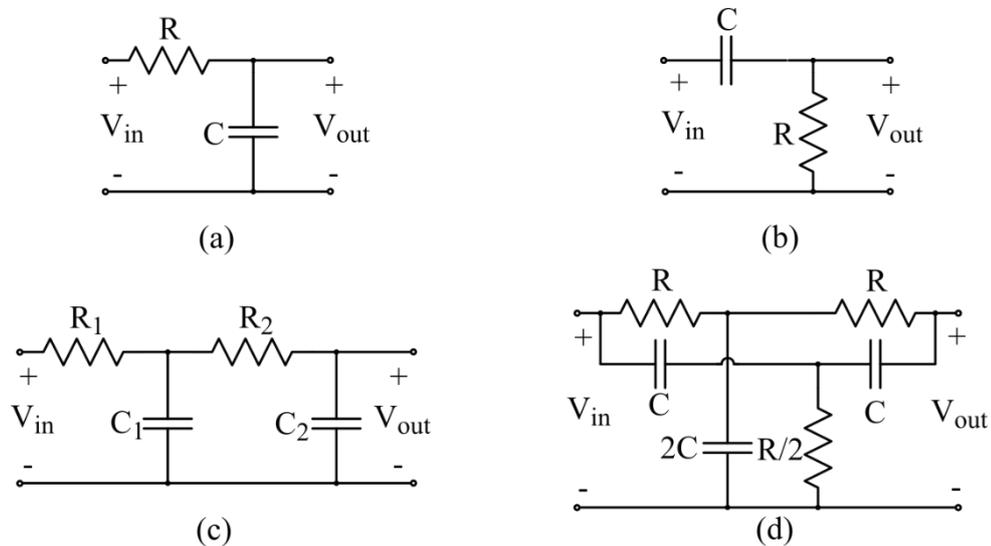


Fonte: Autor, adaptado de (ZUMBAHLEN, 2007).

Além disso, as topologias de filtros passivos comumente utilizados são mostradas na Figura 2.4. O filtro a ser utilizado no presente estudo é um filtro passa-baixa com resposta Butterworth de segunda ordem, composto por um indutor, um capacitor e uma resistência equivalente, proveniente da carga a ser filtrada, conforme ilustrado na Figura 2.5. A resistência de saída equivalente do filtro é normalmente especificada como parâmetro de projeto.

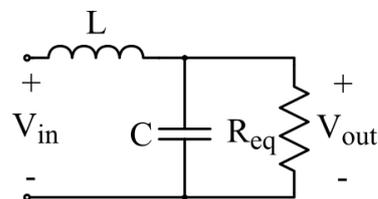
Os valores dos outros componentes dependem do fator de qualidade a ser utilizado, da frequência de corte desejada e do tipo de resposta do filtro. O indutor e o capacitor servem, portanto, como variáveis de projeto do filtro (SEDRA e BRACKETT, 1978).

Figura 2.4 – Topologias geralmente utilizadas para filtros: (a) passa-baixa, (b) passa-alta, (c) passa-banda e (d) rejeita-faixa



Fonte: Autor, adaptado de (SILVA, 2006).

Figura 2.5 – Filtro passa-baixa LC



Fonte: Autor, adaptado de (GEFFE, 1997).

O circuito de filtro passa-baixa composto por um indutor, um capacitor e uma resistência equivalente de saída pode ser analisado através da obtenção da função de transferência do mesmo, relacionando a tensão de saída V_{out} com a tensão de entrada V_{in} . Adquire-se tal relação através da obtenção da divisão de tensão entre a tensão do indutor e a tensão de saída quando o circuito é analisado no domínio da frequência, como mostra a Equação (2.1).

$$V_{out} = V_{in} \frac{\left(\frac{1}{sC}\right)}{sL + \frac{1}{sC}} \quad (2.1)$$

A partir dessa definição, é possível obter a equação que relaciona a frequência de corte f_c com os parâmetros de indutância e capacitância do filtro, conforme a Eq. (2.2). Comumente, escolhe-se valores de componentes de forma a se obter uma resposta Butterworth criticamente amortecida (TI, 2016). Nesse caso, o fator de qualidade Q é 0,707 e as equações para os valores de indutância e de capacitância podem ser obtidas.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

$$Q = R_{eq} \sqrt{\frac{C}{L}} = 0,707 \quad (2.3)$$

$$L = \frac{R_{eq}\sqrt{2}}{2\pi f_c} \quad (2.4)$$

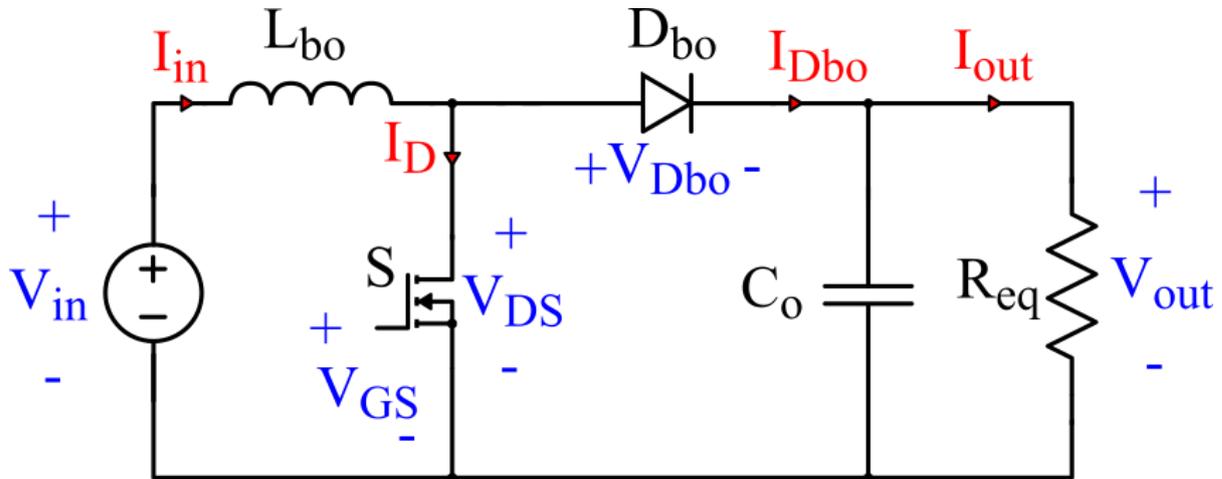
$$C = \frac{1}{2\pi f_c R_{eq}\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

2.3 CONVERTOR BOOST

O conversor *Boost* é um dos principais conversores elevadores de tensão, sendo vastamente utilizado em aplicações de correção de fator de potência e onde é preciso um nível de tensão maior que o disponível, como em circuitos alimentados por baterias. Trata-se de um conversor simples, possuindo poucos componentes para seu funcionamento.

Dentre as principais vantagens estão: valores menores de capacitância de saída devido à alta tensão de operação do capacitor de saída; o indutor presente na entrada do conversor absorve e é capaz de absorver picos de tensão; menor exigência de filtros de EMI, uma vez que a corrente de entrada não é interrompida.

A falta de proteção contra curto-circuito na carga e a impossibilidade de isolar a entrada da saída são as principais desvantagens desse conversor (POMILIO, 2007). A Figura 2.6 ilustra a topologia em estudo.

Figura 2.6 – Conversor *Boost*

Fonte: Autor, adaptado de (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 2007).

De forma a realizar o projeto do conversor *Boost*, adquirindo os valores de indutância e capacitância, bem como as especificações necessárias dos semicondutores, é realizada a análise das etapas do conversor. Assim, as equações de projeto são derivadas de acordo com o funcionamento deste, ilustrado na Figura 2.7.

Assim, define-se o valor de indutância L_{bo} como sendo 80% do valor da indutância obtida quando o conversor opera em CCM, conforme a Equação (2.8). Ainda, pode-se obter o tempo de condução do semicondutor, D_1 , conforme a Equação (2.10). Por fim, o valor da capacitância de saída é definido através da Equação (2.11) (TI, 2014).

$$D_{CCM} = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (2.6)$$

$$L_{CCM} = \frac{D_{CCM} V_{in}}{2I_{in} f_{sw}} \quad (2.7)$$

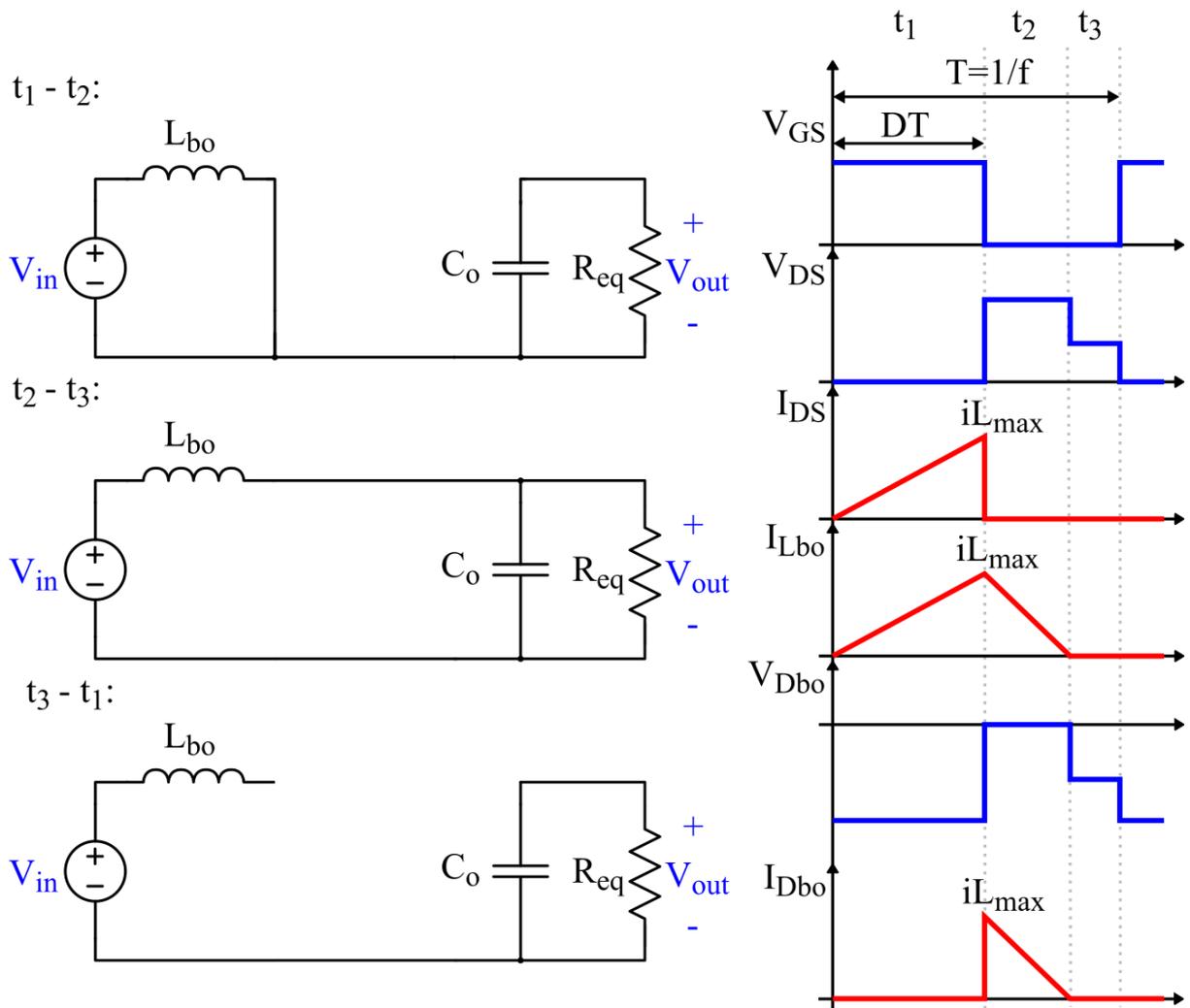
$$L_{bo} = L_{CCM} 80\% \quad (2.8)$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{I_{out} 2L_{bo} f_{sw}}{V_{in}} \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} - 1 \right)^{-1}} \quad (2.9)$$

$$D_1 = \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} - 1 \right) D_2 \quad (2.10)$$

$$C_{out} = \frac{I_{out} D_1}{f_{sw} V_{out} \Delta V} \quad (2.11)$$

Figura 2.7 – Etapas de operação do conversor *Boost*



Fonte: Autor.

2.4 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

Também conhecido como o método dos elementos finitos, *FEM*, esse tipo de análise consiste na discretização numérica de um meio contínuo em pequenos elementos que podem ser resolvidos por equações diferenciais parciais (MOAVENI, 2008). Os elementos finitos utilizados na subdivisão ou discretização da forma original são conectados entre si, formando o que se conhece por malha de elementos finitos (DE SOUZA, 2003). O problema é então solucionado pela interpolação das várias soluções aproximadas de cada elemento finito gerado na subdivisão.

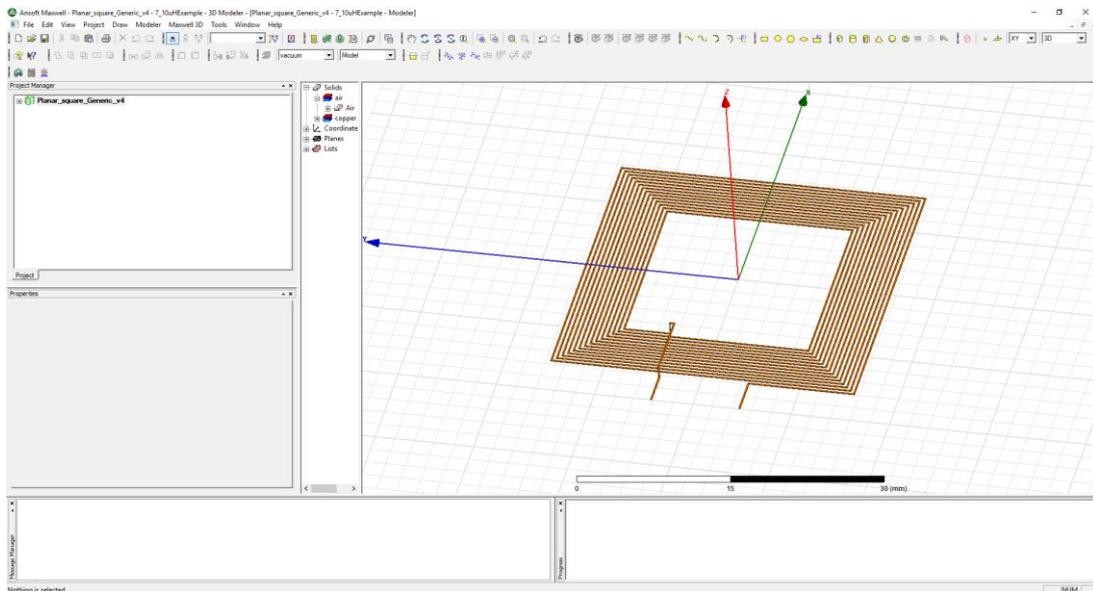
O método pode ser aplicado em diversas áreas da engenharia, se difundindo em tópicos como deformações mecânicas, transferência de calor, mecânica de fluidos e eletromagnetismo (IARONKA, 2014). Devido sua facilidade de uso e a sua robustez na solução de problemas numéricos, esse será o principal método de verificação do projeto dos elementos magnéticos propostos neste trabalho. Ainda, as simulações são desenvolvidas no *software* dedicado ao método de elementos finitos ANSYS® Maxwell.

Basicamente, a simulação em elementos finitos é constituída das etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento (SÁNCHEZ, 2001). Na primeira etapa, descreve-se a geometria do problema, considerando as características físicas dos materiais, a densidade da malha gerada pelos elementos finitos, as condições de contorno e o tipo de simulação desejada, observando parâmetros como excitação de corrente, excitação de tensão, isolamento, entre outros.

A segunda etapa consiste na solução das equações parciais com os valores de contorno gerados a partir da malha de elementos finitos através de algoritmos numéricos. Enfim, na terceira e última etapa, inspeciona-se a solução gerada pelo simulador, onde é possível plotar curvas relevantes à simulação buscando a comprovação da teoria abordada e a verificação de projetos (IARONKA, 2014).

Com base no estudo abordado anteriormente e com objetivo de exemplificar simulações no *software* ANSYS® Maxwell, é possível analisar indutores planares no ambiente do programa, conforme ilustrado na Figura 2.8. Após realização da simulação, observando os parâmetros envolvidos nesta, são apresentados os resultados obtidos, sendo o mais relevante desses o valor da indutância.

Figura 2.8 – Ambiente do software ANSYS ® Maxwell



Fonte: Autor.

2.5 REGRAS DE PROJETO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

O padrão da associação de indústrias eletrônicas, a IPC ®, descreve, de maneira genérica, os limites e as regras de projeto para *PCBs*, observando parâmetros como os diferentes tipos de materiais, os tipos de placa, as classes de performance, os fatores mecânicos, entre outros. Dentre as principais regras estabelecidas pelo padrão, está o item 6.2 do documento, que menciona os requerimentos para a largura e espessura de condutores da placa, sendo estabelecidas a Equação (2.12) e a Equação (2.13) (IPC, 2003).

$$I = k\Delta T^{0,44} A_{trace}^{0,725} \quad (2.12)$$

$$W_{trace} = \frac{A_{trace}}{1,378m_{copper}} \quad (2.13)$$

Onde k pode assumir dois valores: para camadas externas, $k = 0,048$ e para camadas internas, $k = 0,024$. I é a corrente máxima em Ampères. ΔT é o aumento de temperatura em °C, ou seja, a diferença entre a máxima temperatura de operação e a máxima temperatura do ambiente. A_{trace} é a área ocupada pelo cobre.

A largura da trilha de cobre W_{trace} a ser utilizada é, então obtida, sendo a relação entre a área ocupada e a massa do cobre, comumente encontrada em placas FR4 com valor típico de 1 oz/ft² (JLCPCB, 2017). Outra regra fundamental para o correto projeto de PCBs é a isolamento mínima entre trilhas, muitas vezes denominada de *clearance*.

Conforme visto na Tabela 2.1, utiliza-se os valores de espaçamento de acordo com a diferença de potencial entre os condutores da placa de circuito impresso. Onde B1: Condutores internos; B2: Condutores externos não revestidos, 0 – 3050 m; B3: Condutores externos não revestidos, > 3050 m; B4: Condutores externos com revestimento de polímero; A5: Condutores externos com revestimento isolante; A6: Terminação de componente sem revestimento; A7: Terminação de componente com revestimento isolante.

Tabela 2.1 – Espaçamento de condutores em PCBs

Tensão entre condutores	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0 – 15	0,05 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,13 mm
16 – 30	0,05 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,13 mm	0,25 mm	0,13 mm
31 – 50	0,1 mm	0,6 mm	0,6 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,4 mm	0,13 mm
51 – 100	0,1 mm	0,6 mm	1,5 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,5 mm	0,13 mm
101 – 150	0,2 mm	0,6 mm	3,2 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,4 mm
151 – 170	0,2 mm	1,25 mm	3,2 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,4 mm
171 – 250	0,2 mm	1,25 mm	6,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,4 mm
251 – 300	0,2 mm	1,25 mm	12,5 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,8 mm
301 – 500	0,25 mm	2,5 mm	12,5 mm	0,8 mm	0,8 mm	1,5 mm	0,8 mm
> 500	0,0025 mm/volt	0,005 mm/volt	0,025 mm/volt	0,00305 mm/volt	0,00305 mm/volt	0,00305 mm/volt	0,00305 mm/volt

Fonte: Autor, adaptado de (IPC, 2003).

Embora a espessura mínima da trilha seja determinada pela corrente que circula nesta, a dimensão mínima de trilhas encontradas industrialmente é de 0,15 mm (JLCPCB, 2017). Assim, se a espessura mínima calculada for menor que a espessura mínima encontrada industrialmente, deve-se optar pelo tamanho mínimo de trilha aceitado pela indústria, mesmo que esse seja maior.

3 METODOLOGIA DE PROJETO DE INDUTORES PLANARES

Nesta seção, é apresentada a metodologia de projeto utilizada para a obtenção dos parâmetros construtivos de indutores planares. Posteriormente, os parâmetros obtidos podem ser utilizados para a modelagem do componente em utilizando *FEM*, de forma a aferir os valores de indutância projetados.

3.1 PROJETO DE INDUTORES PLANARES

A partir dos formatos de indutores planares, bem como seus parâmetros, ilustrados na Figura 2.2, é possível obter o valor de indutância utilizando três equações distintas, propostas por (MOHAN *et al.*, 1999).

A Equação (3.1) é uma adaptação de outra proposta por (WHEELER, 1928), a Equação (3.2) aproxima as arestas das espiras como condutores retangulares simétricos e a Equação (3.3) obtém o valor da indutância através de aproximações com métodos numéricos, como o ajuste de curvas, ou *data fitting*. Onde ρ é o fator de preenchimento, ou *fill ratio*, definido na Equação (3.4) e α_d é a relação entre o diâmetro interno e o diâmetro externo, conforme a Equação (3.5).

Por fim, o diâmetro externo ainda pode ser definido na Equação (3.6), onde é definido como a largura total da geometria em questão, relacionando o espaçamento, a largura da trilha e o número de espiras do indutor. Além disso, as equações para indutância possuem constantes definidas para cada formato de indutor planar, sendo descritas na Tabela 3.1, na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3.

$$L_{modWheeler} = K_1 \mu_0 \frac{N^2 \left(\frac{d_{in} + d_{out}}{2} \right)}{1 + K_2 \rho} \quad (3.1)$$

$$L_{curSheet} = \frac{\mu_0 N^2 \left(\frac{d_{in} + d_{out}}{2} \right) C_1}{2} \left(\ln \left(\frac{C_2}{\rho} \right) + C_3 \rho + C_4 \rho^2 \right) \quad (3.2)$$

$$L_{dataFitted} = \beta d_{out} \alpha_1 W_{trace} \alpha_2 \left(\frac{d_{in} + d_{out}}{2} \right)^{\alpha_3} N^{\alpha_4} S_{trace}^{\alpha_5} \quad (3.3)$$

$$\rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}} \quad (3.4)$$

$$\alpha_d = \frac{d_{in}}{d_{out}} \quad (3.5)$$

$$d_{out} = d_{in} + 2w_{trace} + (W_{trace} + S_{trace})(N - 1) \quad (3.6)$$

Tabela 3.1 – Constantes da Equação (3.1)

Formato	K₁	K₂
Quadrado	2,34	2,75
Hexagonal	2.33	3.82
Octogonal	2.25	3.55

Fonte: (MOHAN *et al.*, 1999).

Tabela 3.2 – Constantes da Equação (3.2)

Formato	C₁	C₂	C₃	C₄
Quadrado	1,27	2,07	0,18	0,13
Hexagonal	1,09	2,23	0	0,17
Octogonal	1,07	2,29	0	0,19
Circular	1	2,46	0	0,2

Fonte:(MOHAN *et al.*, 1999).

Tabela 3.3 – Constantes da Equação (3.3)

Formato	β	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
Quadrado	$1,62 \times 10^{-3}$	-1,21	-0,147	2,4	1,78	-0,03
Hexagonal	$1,28 \times 10^{-3}$	-1,24	-0,174	2,47	1,77	-0,049
Octogonal	$1,33 \times 10^{-3}$	-1,21	-0,163	2,43	1,75	-0,049

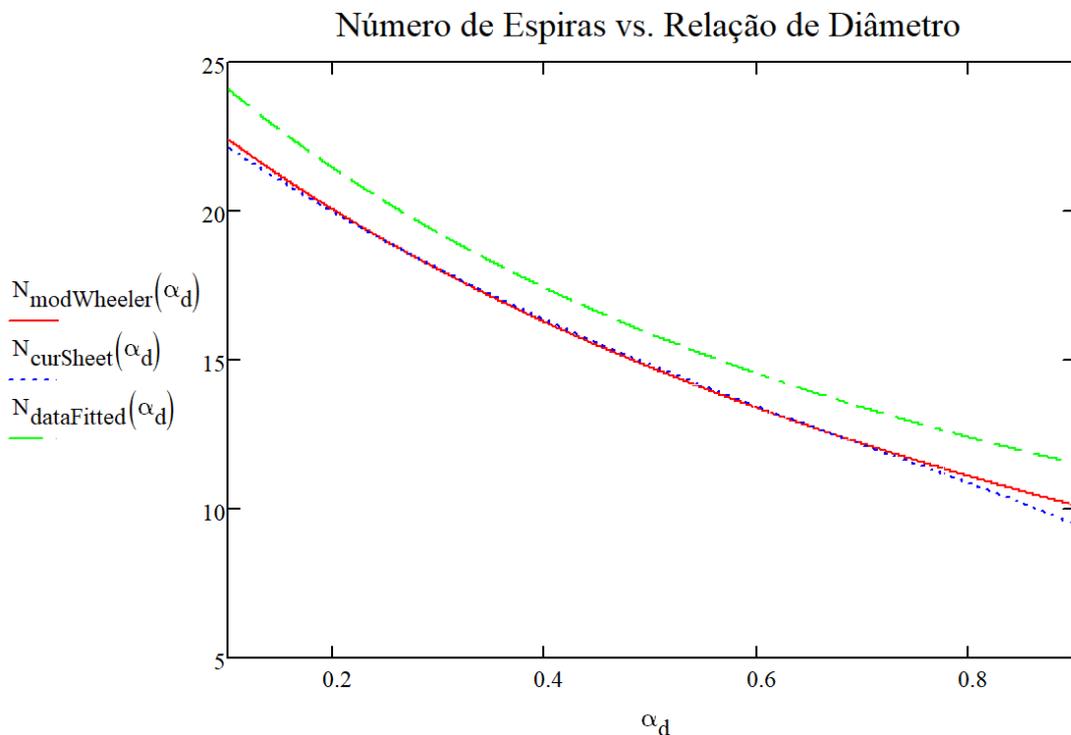
Fonte: (MOHAN *et al.*, 1999).

Após a descrição das equações de projeto, é necessário definir os parâmetros a serem utilizados. No presente projeto, o valor da indutância é conhecido e, assim, deve-se obter o valor do número das espiras para o indutor. Além disso, as variáveis de diâmetro d_{in} e d_{out} não são conhecidas e um diâmetro externo máximo deve ser estimado para posteriormente se obter os valores otimizados de d_{in} e d_{out} .

Por fim, obtém-se as curvas contendo o número de espiras para determinada relação de diâmetro α_d para cada uma das três equações utilizadas, conforme ilustrado na Figura 3.1. Nota-se que a curva em verde possui um *offset* no número de espiras. Isso se deve ao fato desta equação ser caracterizada a partir de métodos numéricos que estimam o valor da indutância e são dependentes da relação entre o espaçamento de trilhas S_{trace} e a largura das trilhas W_{trace} .

Ainda, nota-se que a curva vermelha e a curva azul convergem para uma relação de diâmetro α_d entre 0,25 e 0,7. Definindo, assim, os limites da curva a serem utilizados no projeto.

Figura 3.1 – Número de espiras para as três equações propostas



Fonte: Autor.

A partir do gráfico, é possível selecionar a relação α_d desejada. Para valores menores de α_d , o indutor planar se torna oco, com uma grande área não utilizada, enquanto que, para valores maiores, o indutor planar se torna mais preenchido.

Após a seleção da relação de diâmetro, é possível encontrar os parâmetros de saída do projeto, como os diâmetros internos e externos e o número de espiras. Já a largura e a espessura da trilha do indutor são obtidas a partir dos valores estabelecidos de corrente RMS e temperatura ambiente.

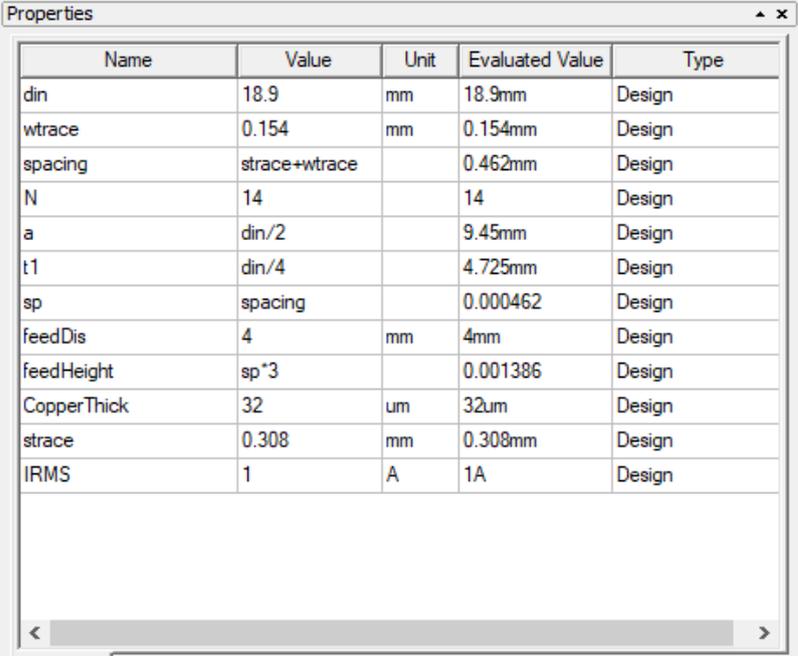
3.2 PROCEDIMENTOS PARA A MODELAGEM DE INDUTORES PLANARES

No processo de modelagem de indutores planares, são utilizadas as ferramentas do *software* para a construção do indutor planar. Sendo um processo composto pelos passos:

- 1) Atribuição de variáveis;
- 2) Construção de elementos primitivos a partir de variáveis;
- 3) União dos elementos primitivos;
- 4) Varredura ou *sweep* do elemento retangular que fornece a largura da trilha e a altura da camada de cobre;
- 5) Atribuição de excitações de corrente conforme o projeto;
- 6) Criação da caixa de ar, utilizada como limites de ambiente.

Desta maneira, os passos são demonstrados na Figura 3.2, na Figura 3.3, na Figura 3.4, na Figura 3.5, na Figura 3.6 e na Figura 3.7, respeitando a sequência de apresentação desses. Os procedimentos realizados para a modelagem são necessários para a obtenção do valor de indutância de projeto, validando o modelo e podendo realizar experimentos com os indutores planares projetados.

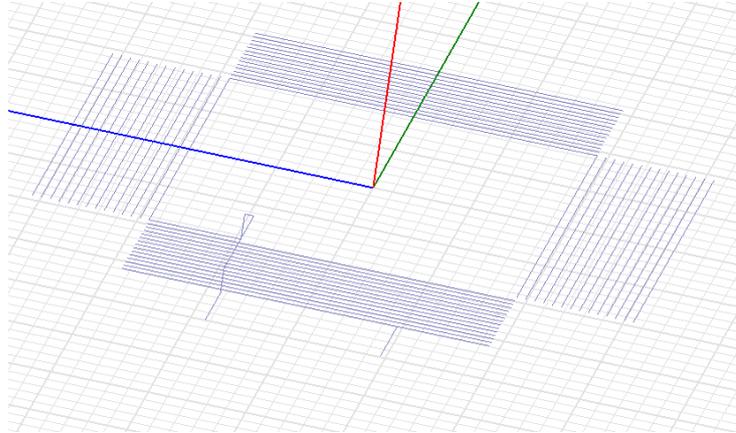
Figura 3.2 – Variáveis utilizadas no projeto



Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
din	18.9	mm	18.9mm	Design
wtrace	0.154	mm	0.154mm	Design
spacing	strace+wtrace		0.462mm	Design
N	14		14	Design
a	din/2		9.45mm	Design
t1	din/4		4.725mm	Design
sp	spacing		0.000462	Design
feedDis	4	mm	4mm	Design
feedHeight	sp*3		0.001386	Design
CopperThick	32	um	32um	Design
strace	0.308	mm	0.308mm	Design
IRMS	1	A	1A	Design

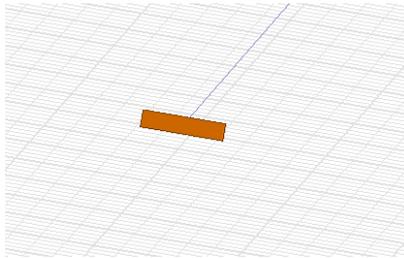
Fonte: Autor.

Figura 3.3 – Elementos primitivos para a modelagem



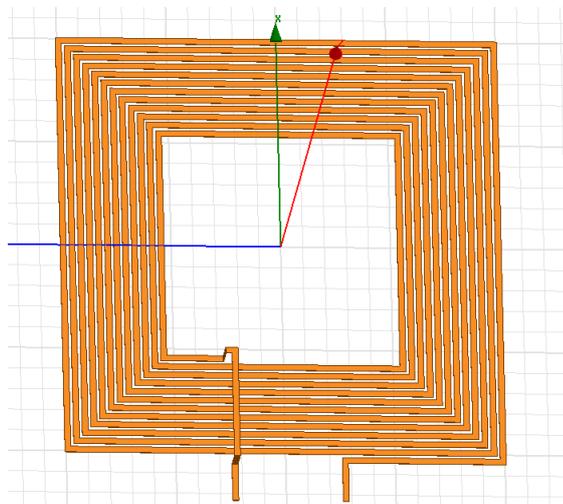
Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Retângulo a ser utilizado na varredura



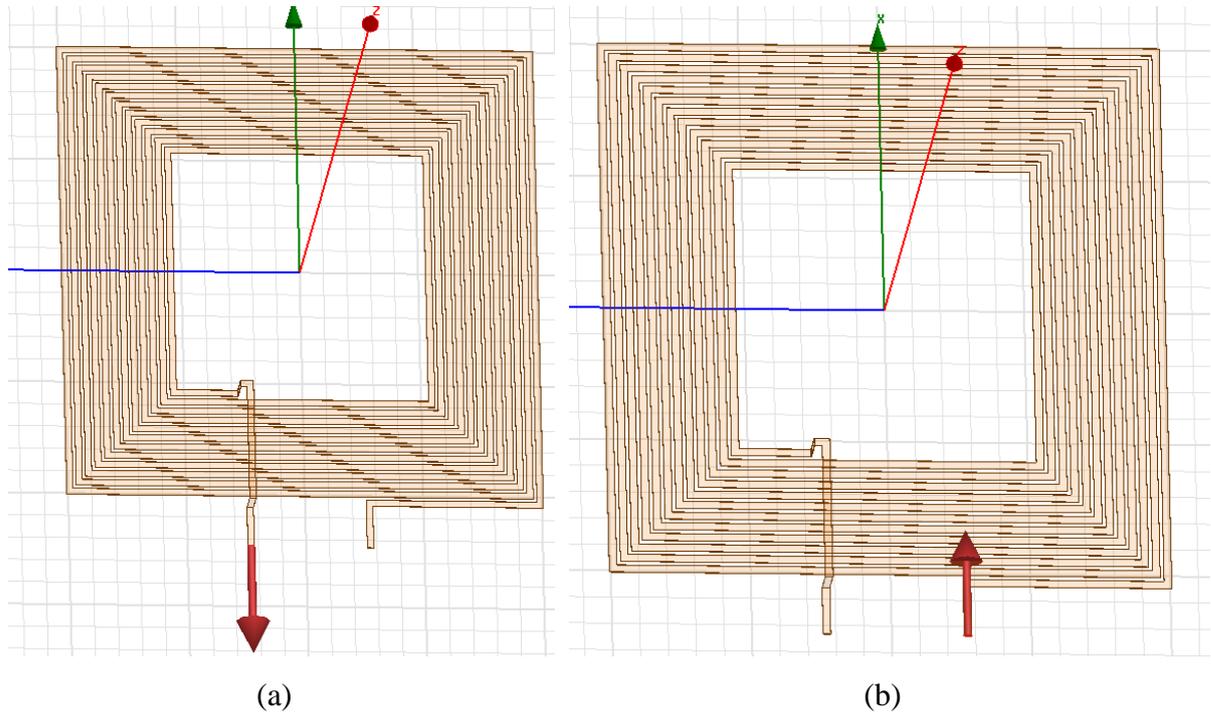
Fonte: Autor.

Figura 3.5 – Indutor planar após a varredura dos elementos primitivos



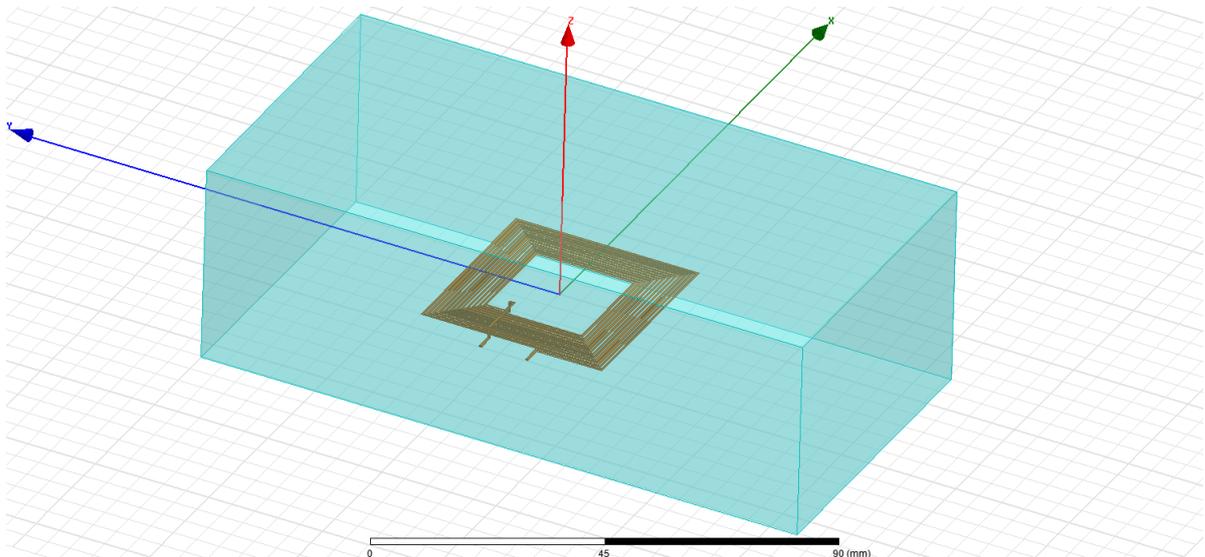
Fonte: Autor.

Figura 3.6 – Excitações de corrente: (a) para fora do terminal e (b) para dentro do terminal



Fonte: Autor.

Figura 3.7 – Criação da caixa de ar



Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos da análise de elementos finitos do indutor planar, na comparação da implementação de filtros passa-baixa LC e na implementação do conversor *Boost*. Buscando a simplificação da análise, são realizadas análises para um valor fixo de indutância de 10 μH . Assim, todos os circuitos descritos abaixo possuem o mesmo valor de indutância.

4.1 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS PARA INDUTORES PLANARES

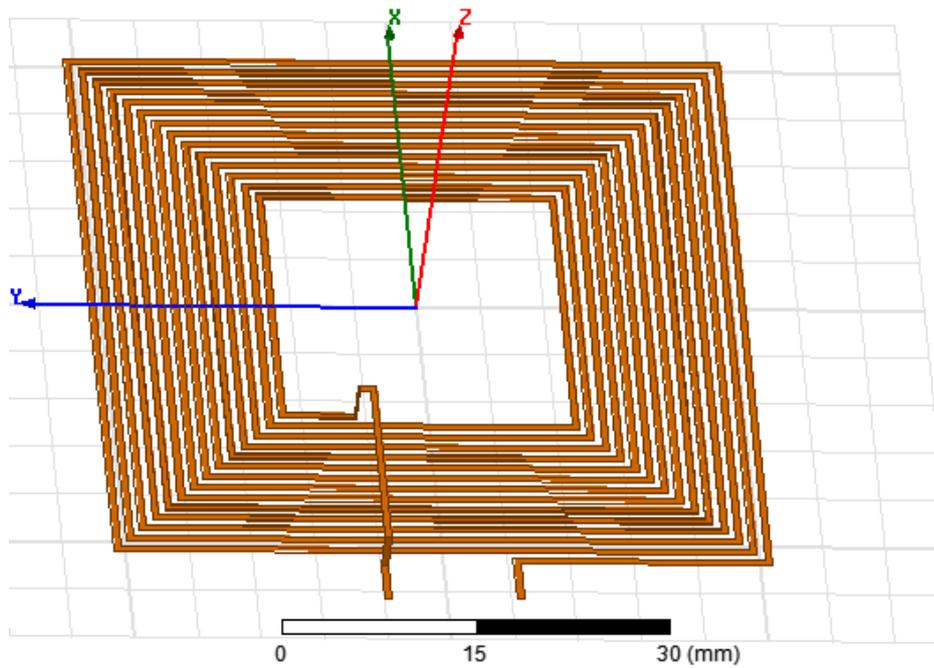
Para esta análise, utiliza-se a metodologia de projeto apresentada no capítulo anterior, observando os parâmetros desejados no circuito. Assim, os parâmetros de entrada e de saída do projeto são descritos na Tabela 4.1. De modo a verificar o valor da obtido no projeto, o indutor planar é desenhado e simulado em *software*, conforme a Figura 4.1, e, assim, obtém-se a Figura 4.2 que mostra o valor de indutância encontrado na simulação.

Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada e de saída para o projeto de indutores planares

Parâmetros de Entrada		Parâmetros de Saída	
L	10 μH	-	-
I_{RMS}	2,487 A	W_{trace}	0,542 mm
ΔT	30 $^{\circ}\text{C}$	S_{trace}	0,542 mm
<i>Formato</i>	Quadrado	N	14
d_{outMAX}	40 mm	d_{in}	23,107 mm
α_d	0,6	d_{out}	38,512 mm

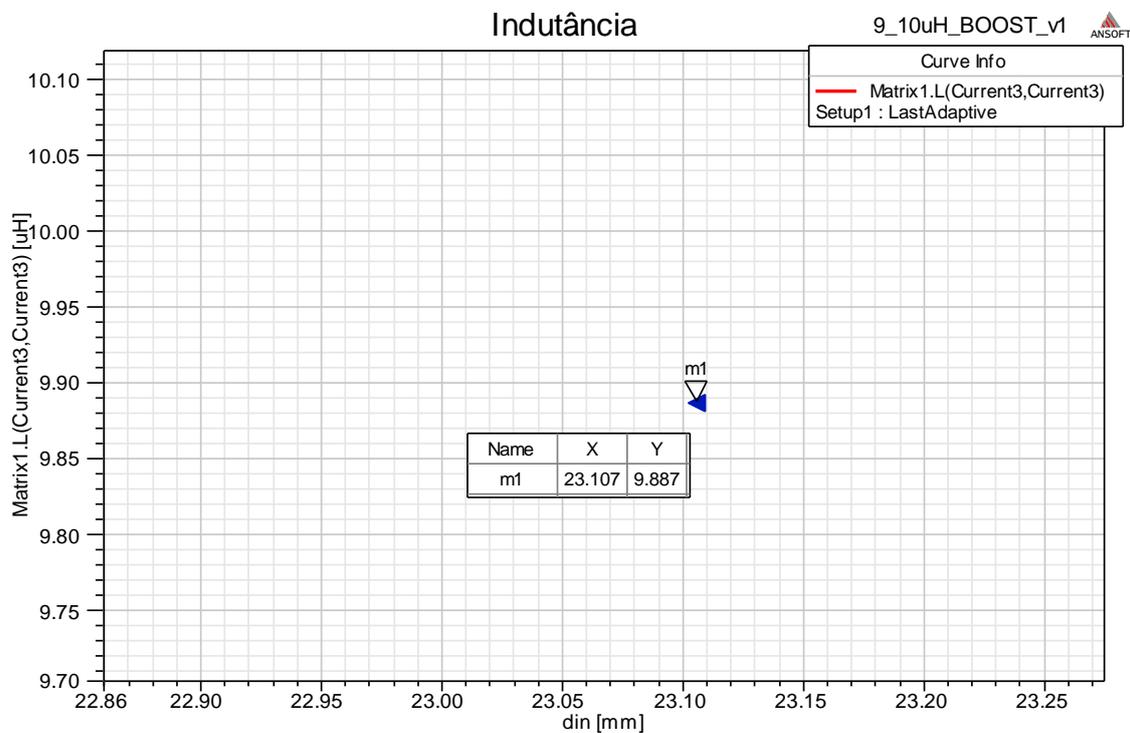
Fonte: Autor.

A simulação apresenta resultados satisfatórios, obtendo $L = 9,887\mu\text{H}$ para o indutor projetado, apresentando um erro de 1,2%. Além disso, simulações para diferentes tamanhos de caixa de ar foram realizados e constata-se que para dimensões de caixa maiores que cinco vezes a largura máxima do objeto o valor de indutância converge para o valor de projeto.

Figura 4.1 – Desenho de um indutor planar de 10 μH 

Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Valor de indutância para o modelo projetado



Fonte: Autor.

4.2 COMPARAÇÃO DE FILTROS LC

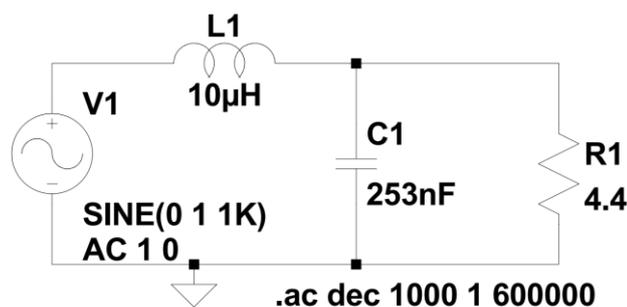
Após descrita a metodologia de projeto de indutores planares, é possível realizar um comparativo entre indutores convencionais e indutores planares através do projeto de um filtro passa-baixa LC, onde se tem o mesmo valor de indutância para ambos os casos. Podendo, dessa forma, comprovar a metodologia proposta, juntamente com a funcionalidade de indutores planares.

Para um projeto convencional, a resistência equivalente do circuito é fornecida através da característica tensão-corrente do dispositivo e, a partir desta, os valores de indutância e capacitância são encontrados. Já no presente projeto, deseja-se utilizar $L_f = 10 \mu\text{H}$ e não há restrições para a resistência equivalente do circuito, uma vez que o filtro será testado separadamente. Portanto, é definido $f_c = 100 \text{ kHz}$ e, a partir da Equação (2.4), obtém-se $R_{eq} = 4,4 \Omega$. Por fim, adquire-se $C_f = 253 \text{ nF}$ a partir da Equação (2.5).

O circuito pode ser então simulado utilizando o *software* LTSpice®, sendo realizada uma análise de pequenos sinais, conforme ilustra a Figura 4.3, obtendo o diagrama de *Bode* do circuito e sintetizando os resultados na Tabela 4.2. Por fim, é possível realizar a comparação dos resultados obtidos por meio da simulação com os resultados práticos, realizados para um circuito com indutor convencional e outro circuito com indutor planar.

Portanto, os dados para cada caso são expostos no gráfico ilustrado na Figura 4.4. Fundamentalmente, ambos os circuitos implementados cumprem o que foi proposto, a diferença dos resultados obtidos se dá principalmente devido a tolerância dos capacitores utilizados na implementação, bem como o valor da indutância dos indutores, sendo $L_{planar} = 10,12 \mu\text{H}$ e $L_{conv} = 9,87 \mu\text{H}$.

Figura 4.3 – Circuito do filtro passa-baixa LC simulado no LTSpice®



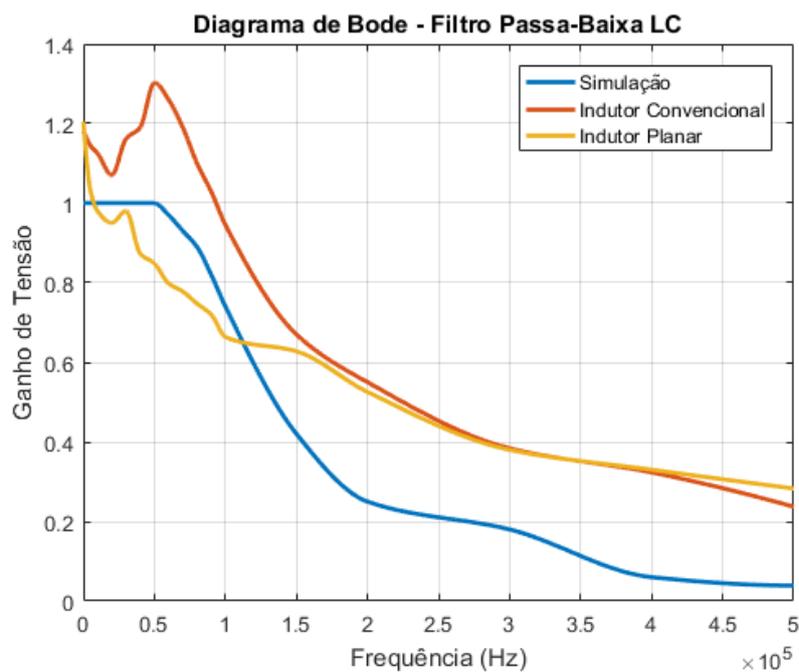
Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos nos filtros passa-baixa implementados

Frequência (kHz)	$ A_v $ Simulação	$ A_v $ Indutor convencional	$ A_v $ Indutor planar
1	1	1,17	1,16
5	1	1,14	1,03
10	1	1,12	0,98
20	1	1,07	0,95
30	1	1,16	0,98
40	1	1,19	0,87
50	1	1,30	0,85
60	0,97	1,26	0,79
70	0,93	1,19	0,78
80	0,89	1,1	0,75
90	0,82	1,03	0,72
100	0,74	0,94	0,66
150	0,42	0,67	0,63
200	0,25	0,55	0,53
300	0,18	0,38	0,38
400	0,06	0,32	0,33
500	0,04	0,24	0,28

Fonte: Autor.

Figura 4.4 – Diagrama de Bode a partir dos valores da Tabela 4.2



Fonte: Autor.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR *BOOST*

Com o objetivo de se utilizar uma indutância de 10 μH já projetada, é realizado o projeto do conversor *Boost* para alimentar uma lâmpada tubular LED de 23 W de potência, a partir de uma tensão de entrada de 12 V. Os parâmetros relacionados ao projeto do conversor são descritos na Tabela 4.3.

A partir desses, pode-se realizar a simulação do circuito no *software* PSIM®, de forma a aferir o projeto do conversor. O conversor é então implementado e os resultados práticos são discutidos a seguir.

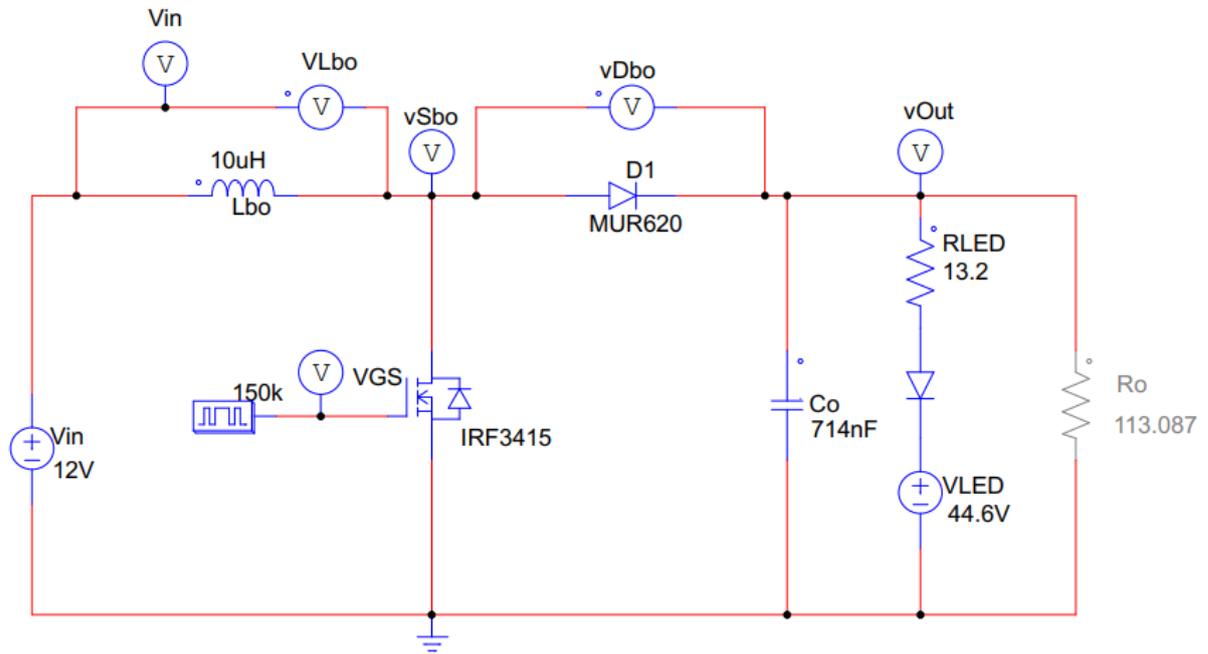
Tabela 4.3 – Parâmetros obtidos no projeto do conversor *Boost*

Parâmetros de Entrada		Parâmetros de Saída	
V_{in}	12 V	-	-
I_{in}	1,917 A	L_{bo}	10 μH
V_{out}	51 V	D	60,5 %
I_{out}	451 mA	t_1	4,036 μs
P_{out}	23 W	t_2	1,242 μs
R_{out}	113 Ω	t_3	1,389 μs
ΔV_{out}	5 %	C_{out}	714 nF
ΔI_{out}	5 %	S	IRF3415
f_{sw}	150 kHz	D_{bo}	MUR620

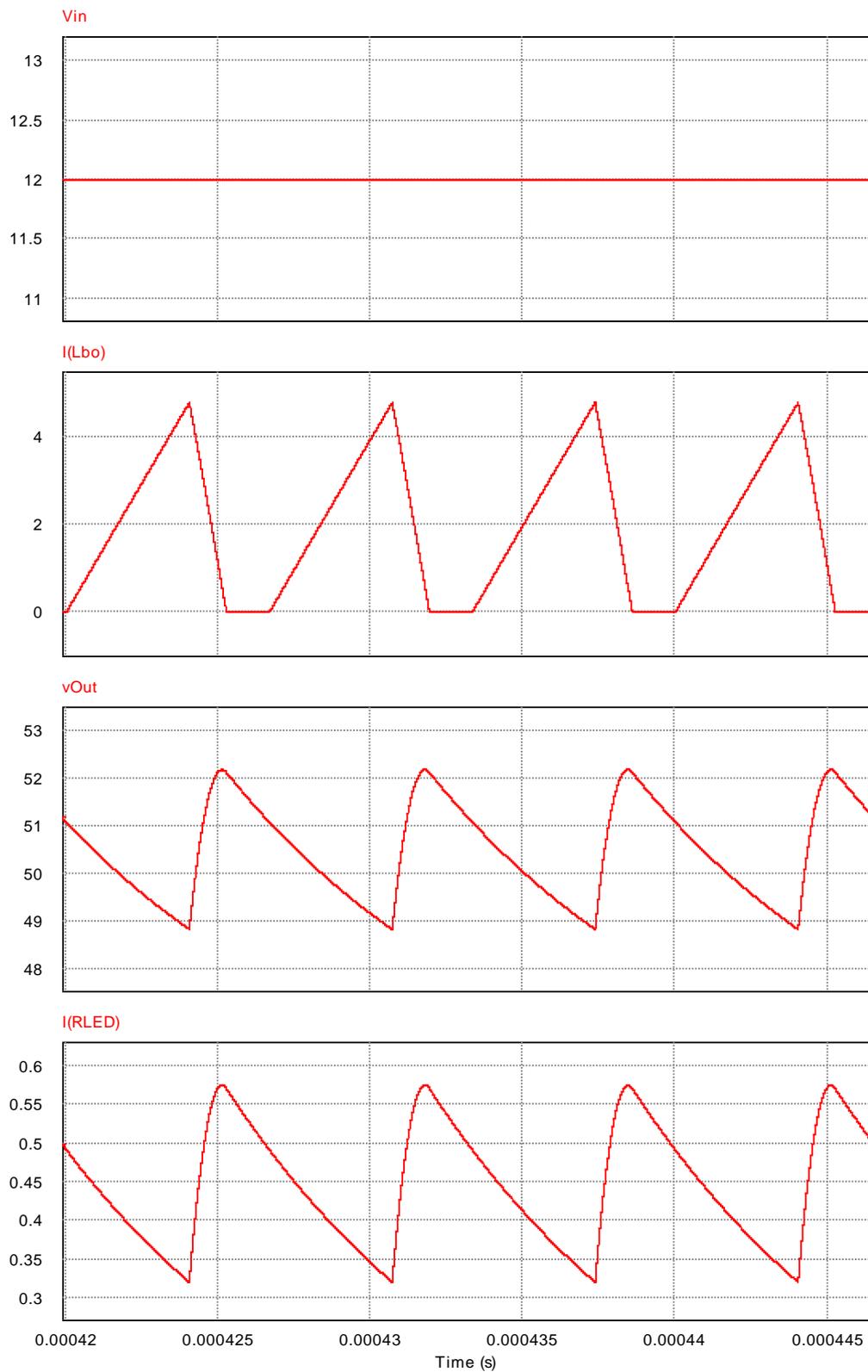
Fonte: Autor.

A simulação do dispositivo é ilustrada na Figura 4.5, sendo construída a partir dos parâmetros do projeto desenvolvido. Sendo a lâmpada LED representada pela resistência R_{LED} , um diodo e uma queda de tensão V_{LED} . Assim, os resultados de simulação podem ser obtidos, conforme mostra a Figura 4.6, apresentando valores adequados com os parâmetros de projeto.

Figura 4.5 – Topologia simulada em PSIM



Fonte: Autor.

Figura 4.6 – Resultados de simulação obtidos para o conversor *Boost*

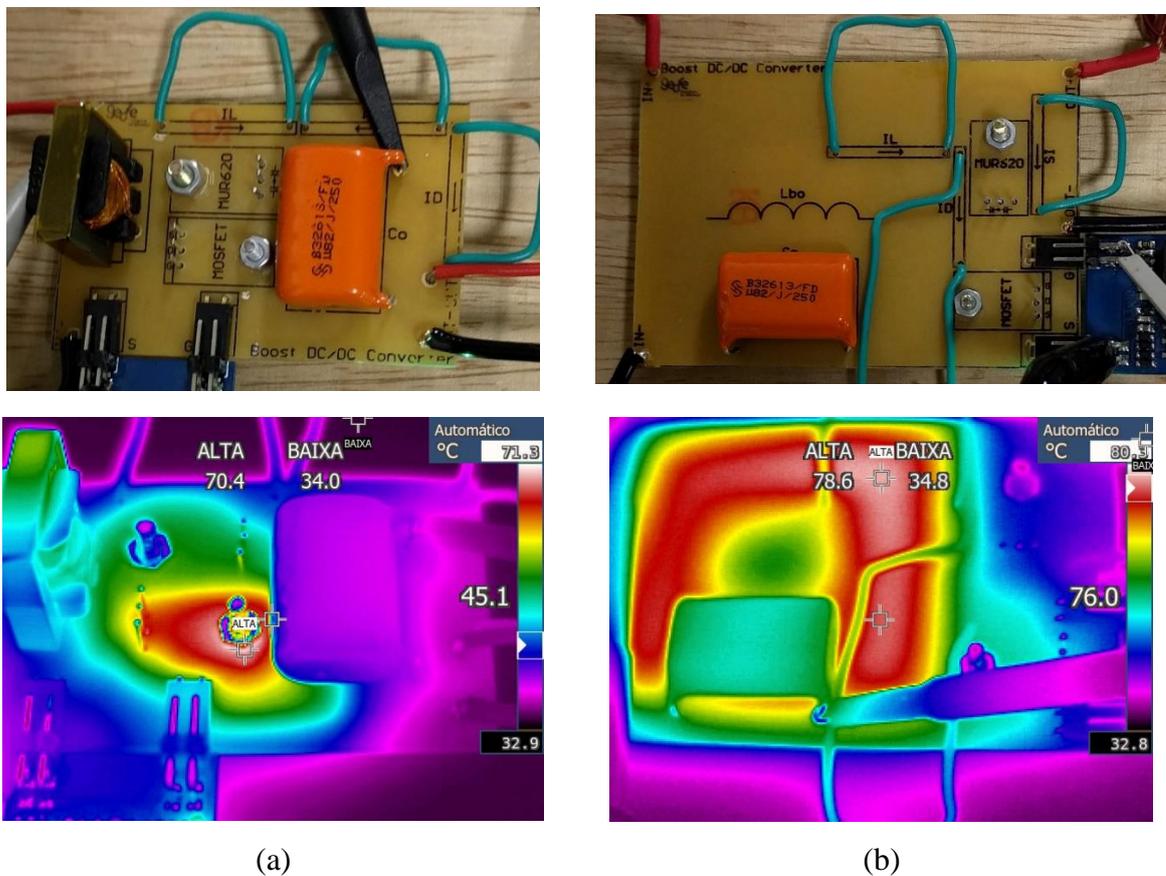
Fonte: Autor.

A seguir, é realizada a implementação do conversor em laboratório, utilizando um circuito de *gate driver* baseado no circuito integrado HCPL3120, sendo o sinal de comando gerado através de um micro controlador ATmega32u4. São experimentados dois circuitos, o primeiro construído com um indutor convencional, com núcleo EE16, e o segundo com um indutor planar.

A Figura 4.7 mostra os dois conversores em operação, juntamente com a imagem térmica das *PCBs*. Nota-se que o a dissipação do calor do conversor com indutor convencional é concentrada somente no interruptor do circuito. Já no conversor com indutor planar, a maior parte da potência dissipada encontra-se no elemento.

O conversor com indutor convencional apresenta uma densidade de potência de $0,62 \text{ W/cm}^3$, já o conversor com indutor planar apresenta uma densidade de potência de $0,98 \text{ W/cm}^3$. Assim, a utilização do indutor planar para o presente circuito fornece um aumento de 58 % na densidade de potência do conversor.

Figura 4.7 – Conversores em operação: (a) indutor convencional e (b) indutor planar



Fonte: Autor.

É possível observar na Figura 4.8 e na Figura 4.9 as formas de onda de ambos os conversores. No caso do conversor com indutor convencional, o circuito se comporta de maneira esperada e apresenta resultados semelhantes aos obtidos na simulação. Já o circuito com indutor planar não se comporta como a simulação devido a características não lineares presentes no elemento, provocados principalmente pela resistência elevada da trilha de cobre.

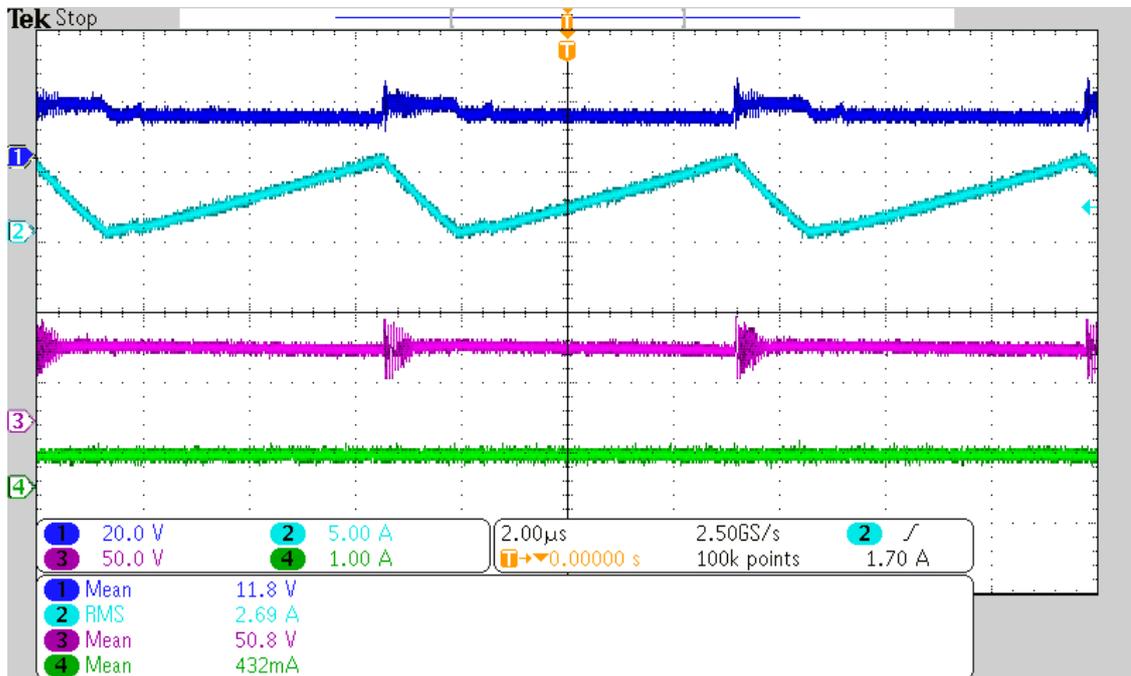
Nota-se, também, que grande parte da potência dissipada no conversor com indutor convencional está presente no semiconductor, enquanto que no conversor com indutor planar a potência dissipada encontra-se em sua grande maioria no enrolamento do indutor planar.

Para fins de comparação, a resistência do fio do indutor convencional é de $60 \text{ m}\Omega$. Enquanto que o indutor planar projetado possui uma resistência de 2Ω . Tal fato contribui no não funcionamento do circuito. Não sendo possível comparar e validar a aplicabilidade desses elementos em conversores de potência.

Ainda, a forma da corrente do conversor composto pelo indutor planar apresenta um arredondamento próximo ao pico de corrente. Capacitâncias parasitas presentes no elemento são a principal razão para o efeito, ocasionando a discrepância de resultados e a impossibilidade de viabilizar o projeto do conversor.

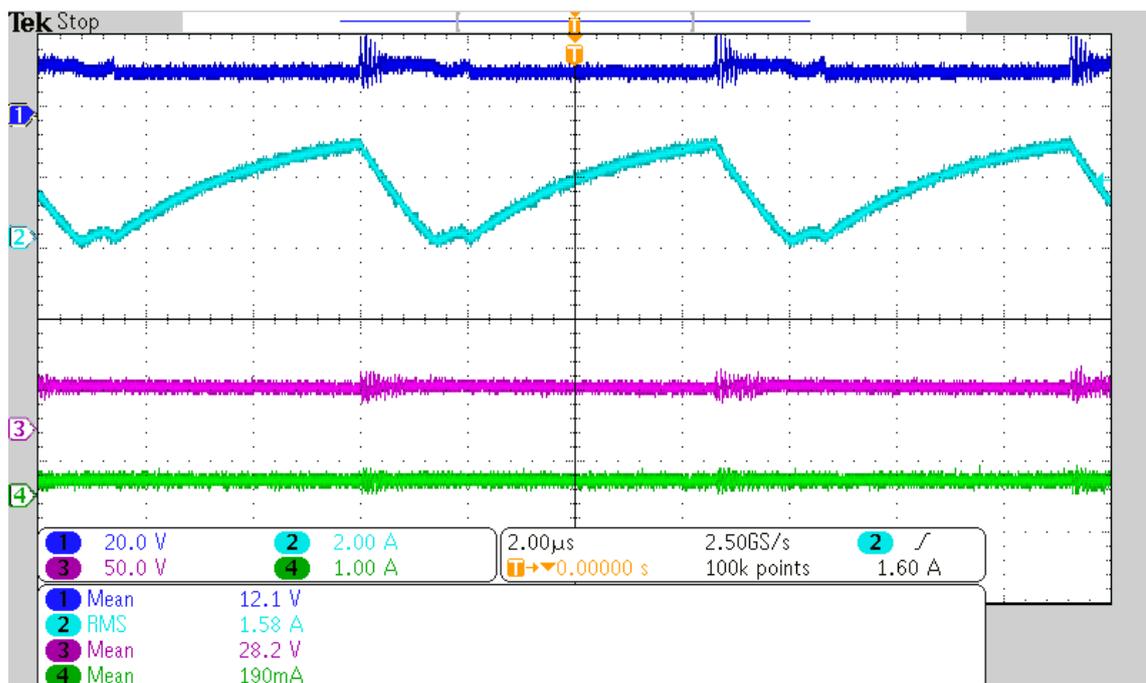
Para mitigar esses efeitos, deve-se otimizar o projeto do indutor planar de forma a reduzir a resistência do elemento. Selecionar *PCBs* que contenham uma quantidade de massa de cobre maior que a utilizada no presente trabalho pode auxiliar nessa redução, aumentando a condutividade do material utilizado na fabricação do indutor planar.

Figura 4.8 – Formas de onda para o conversor *Boost* com indutor convencional. Ch. 1: V_{in} (20 V/div); Ch. 2: I_{in} (2 A/div); Ch. 3: V_{out} (50 V/div); Ch. 4: I_{out} (1 A/div).



Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Formas de onda para o conversor *Boost* com indutor planar. Ch. 1: V_{in} (20 V/div); Ch. 2: I_{in} (2 A/div); Ch. 3: V_{out} (50 V/div); Ch. 4: I_{out} (1 A/div).



Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foi proposta uma metodologia de projeto de indutores planares aplicados a conversores de potência com a finalidade de reduzir o volume ocupado por estes dispositivos. Foram abordados aspectos teóricos e práticos dos conceitos envolvidos no trabalho, assim como a abordagem da análise de elementos finitos utilizada para a determinação da indutância dos elementos projetados.

O funcionamento dos circuitos é comprovado a partir de simulações e de experimentos realizados, apresentando as características e discutindo os resultados obtidos. A comparação entre dispositivos compostos por indutores convencionais e dispositivos compostos por indutores planares auxilia no aferimento dos resultados de maneira geral, observando as peculiaridades de cada experimento.

Apesar da metodologia de projeto ter sido comprovada, é ressaltado a importância da observação de características não lineares como capacitâncias parasitas, efeito de proximidade e efeito *skin* que influenciam de maneira negativa nos circuitos apresentados. A principal particularidade encontrada no desenvolvimento de indutores planares foi a elevada resistência apresentada por esses elementos, dependendo do tipo de material utilizado na placa de circuito impresso e do tamanho da trilha.

Assim, o presente trabalho aponta otimizações para a metodologia, sendo possível listar os possíveis trabalhos futuros que possam vir a contribuir para a modernização dessa técnica:

- a) Desenvolver métodos para a estimativa de efeitos não lineares em indutores;
- b) Aliar elementos planares com interruptores de comutação rápida e de alta eficiência, como interruptores baseados em GaN ou SiC;
- c) Estudar novas formas e novas topologias que viabilizam a redução da resistência elétrica de indutores planares;
- d) Simplificação da análise e do projeto de indutores planares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATALLA, A. et al. Advancements in high power high frequency transformer design for resonant converter circuits. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, 18-22 Sept. 2016. p.1-8.

BARBI, I.; FONT, C. I.; ALVES, R. L. Projeto físico de indutores e transformadores. **Documento Interno (INEP-2002)**, 2002.

BOLZAN, P. **CIRCUITOS DE ACIONAMENTO PARA LÂMPADA TUBULAR DE LEDS UTILIZANDO CONVERSORES A CAPACITOR CHAVEADO**. 2017. (Dissertação de Mestrado). UFSM

CHAN, H. L. et al. Study on Magnetic Materials Used in Power Transformer and Inductor. 2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2006, 12-14 Nov. 2006. p.165-169.

CHEN, M. et al. A Systematic Approach to Modeling Impedances and Current Distribution in Planar Magnetics. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 1, p. 560-580, 2016. ISSN 0885-8993.

CRTCELECTRONICS. Types of Inductors. Disponível em: <
<http://e101.webs.com/inductors.htm>>. Acesso em: 17/11/17.

DE SOUZA, F. P. **Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos**. 2000. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

DE SOUZA, R. M. O Método dos Elementos Finitos aplicado ao problema de condução de calor. **Apostila, Universidade Federal do Pará, Belém**, 2003.

EBERT, C. L. Projeto de elementos magnéticos planares utilizados em fontes de alimentação chaveadas visando a redução das perdas de energia. 2008.

EDELENBOSCH, O. Y. et al. Comparing projections of industrial energy demand and greenhouse gas emissions in long-term energy models. **Energy**, v. 122, p. 701-710, 3/1/ 2017. ISSN 0360-5442. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217300178>>.

EIA, U. Annual energy outlook 2011 with projections to 2035. **Washington DC: Energy Information Administration, United States Department of Energy**, 2011.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. **Fundamentals of power electronics**. Springer Science & Business Media, 2007. ISBN 0306480484.

GEFFE, P. R. LC Filter Design. **CRC Handbook of Electrical Filters**, p. 45, 1997. ISSN 0849389518.

GUAN, Y. et al. Analysis and design of planar inductor and transformer for resonant converter. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, 18-22 Sept. 2016. p.1-7.

HART, D. W. **Power electronics**. Tata McGraw-Hill Education, 2011. ISBN 0071321209.

HUA, G.; LEE, F. C. Soft-switching PWM techniques and their applications. 1993 Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993, 13-16 Sept. 1993. p.87-92 vol.3.

IARONKA, O. **Desenvolvimento de um Sistema de Refrigeração de Elevada Eficiência com o Método de Elementos Finitos para Transformadores de Distribuição**. 2014. (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)). UFSM

IPC. **IPC-2221A: Generic Standard on Printed Board Design** 2003.

JLCPCB. PCB Capabilities. 2017. Disponível em: <
<https://jlcpcb.com/capabilities/Capabilities> >.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, 3/e**. Pearson Education India, 2008. ISBN 8131760642.

MOHAN, S. S. et al. Simple accurate expressions for planar spiral inductances. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 34, n. 10, p. 1419-1424, 1999. ISSN 0018-9200.

MUSSOI, F. L. R.; ESPERANÇA, C. Resposta em frequência: Filtros passivos. **Florianópolis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina**, 2004.

NAGEL, R. L.; PARTRIDGE, M. E. Planar magnetic component development. **NASA STI/Recon Technical Report N**, v. 95, 1994.

POMILIO, J. A. Pré-reguladores de fator de potência-PFP. **Publicação FEE**, v. 3, p. 95, 2007.

QUIRKE, M. T.; BARRETT, J. J.; HAYES, M. Planar magnetic component technology-a review. **IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology**, v. 15, n. 5, p. 884-892, 1992. ISSN 0148-6411.

SÁNCHEZ. **Estudo de impacto usando elementos finitos e análise não linear**. 2001. Universidade de São Paulo

SEDRA, A. S.; BRACKETT, P. O. **Filter theory and design: active and passive**. Matrix Pub, 1978.

SILVA, L. M. C. D. Filtros Passivos. 2006. Disponível em: <
http://www.cp.utfpr.edu.br/chiesse/Eletronica/Filtros_passivos.pdf >. Acesso em: 15/11/17.

TI. **SLVA372C - Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage**. 2014

_____. **SLAA701A - LC Filter Design**. 2016

VAN VALKENBURG, M. **Analog filter design**. Holt, Rinehart, and Winston, 1982. ISBN 0030592461.

VLATKOVIC, V.; BOROJEVIC, D.; LEE, F. C. Input filter design for power factor correction circuits. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 11, n. 1, p. 199-205, 1996. ISSN 0885-8993.

WHEELER, H. A. Simple inductance formulas for radio coils. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 16, n. 10, p. 1398-1400, 1928. ISSN 0731-5996.

ZUMBAHLEN, H. Basic Linear Design. 2007. Disponível em: <
<http://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Basic-Linear-Design/Chapter8.pdf>>.

APÊNDICE A – Script para MATLAB® utilizado nos diagramas de Bode

```

%% Bode Diagram Plot  GEDRE - Intelligence in Lighting
% Igor Vegner
%% RST %%
clear all
close all
clc

%% DATA %%

freq = [1e3 5e3 10e3 20e3 30e3 40e3 50e3 60e3 70e3 80e3 90e3 100e3
        150e3 200e3 300e3 400e3 500e3];

conven = [1.22/1.04 1.19/1.04 1.17/1.04 1.07/1 1.15/0.99 1.19/1 1.29/0.99
          1.26/1 1.19/1 1.1/1 1.07/1.04 1.04/1.1 0.67/1 0.55/1 0.38/0.99
          0.32/0.99 0.23/0.97];
planar = [1.15/0.99 1.02/0.99 0.97/0.99 0.95/1 1/1.02 0.89/1.02 0.84/0.99
          0.79/0.99 0.77/0.99 0.74/0.99 0.72/1 0.69/1.04 0.64/1.02 0.52/0.99
          0.38/1 0.33/1 0.28/0.99];
theoretical = [1 1 1 1 1 1 1 1 0.97 0.93 0.89 0.82 0.74 0.42
               0.25 0.18 0.06 0.039 ];
%% COMPUTING & PLOT %%
accuracy = 0.5e-2;
newFreq= 0:accuracy:freq(end); % linspace with the desired
                                % accuracy
newConven = interp1(freq,conven,newFreq,'pchip');
newPlanar = interp1(freq,planar,newFreq,'pchip');
newTheoretical = interp1(freq,theoretical,newFreq,'pchip');

figure(1)
plot(newFreq, newTheoretical, 'LineWidth', 2)
hold on
plot(newFreq, newConven, 'LineWidth', 2)
hold on
plot(newFreq, newPlanar, 'LineWidth', 2)
grid on
title('Diagrama de Bode - Filtro Passa-Baixa LC');
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Ganho de Tensão');
legend('Simulação','Indutor Convencional', 'Indutor Planar');

```

APÊNDICE B – Código de PWM utilizado no Micro Controlador ATmega32u4

O micro controlador é programado através da IDE do Arduino.

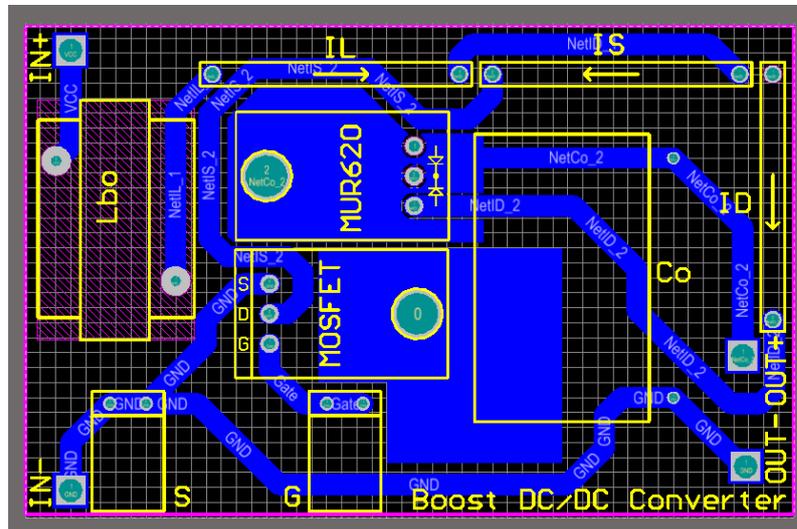
Código para PWM de 150 kHz e D = 60%:

```
/* PWM 150 kHz */
void setup ()
{
  pinMode (3, OUTPUT); // Pino de Saída PWM
  TCCR0A = 0x23;       // Modo de operação do Timer
  TCCR0B = 0x09;       // Divisão de clock (Prescale: 1)
  OCR0A = 105;         // Períodos de clock (16000000Hz/105=150 kHz)
  OCR0B = 330;         // Duty Cycle: 60 %
}

void loop()
{
}
}
```

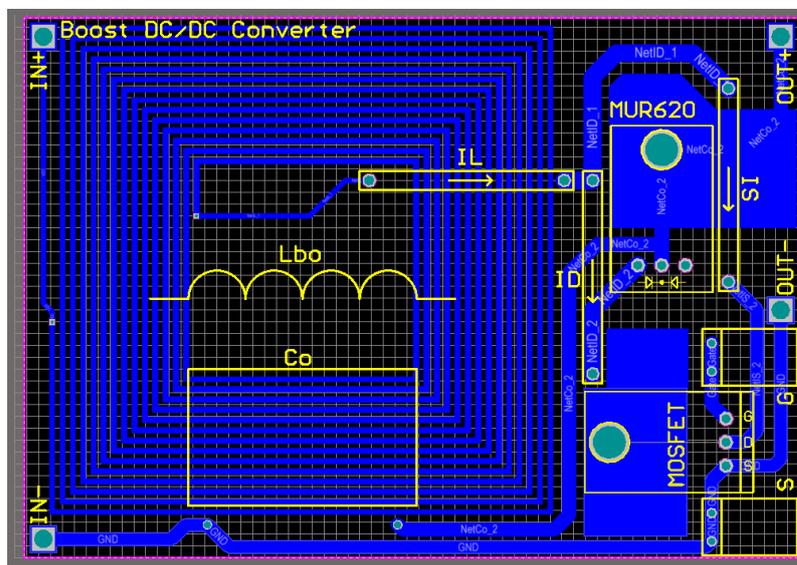
APÊNDICE C – Layouts das PCBs utilizadas

Figura A.1 – Layout do conversor *Boost* com indutor convencional



Fonte: Autor.

Figura A.2 – Layout do conversor *Boost* com indutor planar

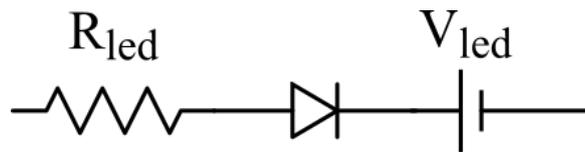


Fonte: Autor.

APÊNDICE D – Modelo da Lâmpada Tubular LED

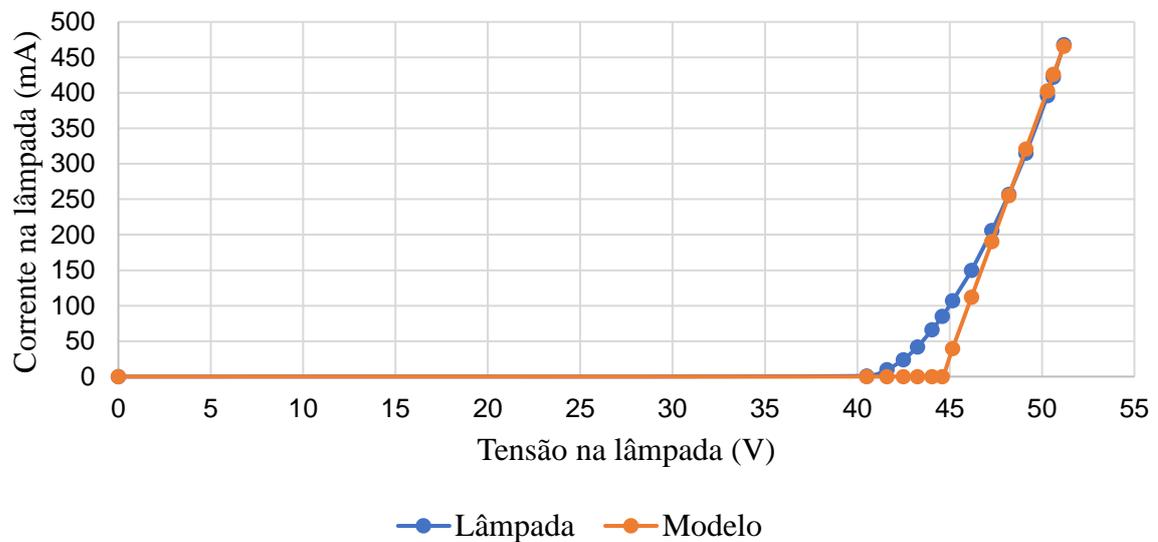
A lâmpada tubular utilizada no trabalho é modelada de acordo com a Figura D.1, onde o modelo do LED é definido. Calcula-se, dessa forma, os parâmetros resistência série R_{led} e a tensão limiar V_{led} . Obtendo $R_{led} = 14,12 \Omega$ e $V_{led} = 44,6 \text{ V}$.

Figura D.1 – Modelo do LED



Fonte: Autor.

Figura D.2 – Característica tensão – corrente da lâmpada utilizada



Fonte: (BOLZAN, 2017).