

Otacílio de Oliveira Carneiro Filho

**ESTUDO E PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS
PLANARES**

Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) submetido ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Jean Viane Leite,
Dr.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Carneiro Filho, Otacilio de Oliveira
Estudo e projeto de elementos magnéticos
planares / Otacilio de Oliveira Carneiro Filho ;
orientador, Jean Viane Leite, 2019.
56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Elementos magnéticos
planares. 3. Projeto de elementos magnéticos. 4.
Operação em alta frequência. I. Leite, Jean Viane.
II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Otacílio de Oliveira Carneiro Filho

**ESTUDO E PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS
PLANARES**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 11 de julho de 2019.



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em
exercício

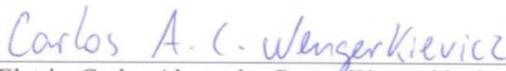
Banca Examinadora:



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Walter Pereira Carpes Jr., Dr.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Eletric. Carlos Alexandre Correa Wengerkievicz, Me.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Otacílio e Henriete.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Otacílio e Henriete, e à minha família, pelo apoio incondicional ao longo de todos esses anos, que tornaram possível a realização desse curso. Espero poder retribuir todo esse apoio e confiança depositada em mim.

À minha namorada, Jéssica, pelo apoio e compreensão durante a realização deste trabalho.

A todos os professores da Universidade Federal de Santa Catarina que em algum momento da formação acadêmica contribuíram com enormes ensinamentos tanto teóricos quanto práticos.

Ao meu orientador Jean Viane Leite, pelo apoio e suporte na realização deste trabalho.

À toda a equipe de servidores e técnicos da UFSC pelo auxílio prestado nos diversos problemas de naturezas distintas.

Aos meus amigos de curso, por todos os momentos inesquecíveis no decorrer desses anos, incluindo inúmeras horas de estudo, conversas e risadas. São amigos que levo para o resto da vida.

À CAPES, pelas oportunidades de participar dos programas Jovens Talentos para a Ciência e Ciência sem Fronteiras. Essas experiências trouxeram um enorme crescimento pessoal e profissional.

À equipe de P&D do Setor de Desenvolvimento de Inversores de Baixa Tensão da WEG, onde tive a oportunidade de realizar estágio. Os conhecimentos adquiridos durante esse período proporcionaram uma nova visão da engenharia, que dificilmente se percebe em sala de aula.

A Deus, por tudo.

Por fim, a todos que em algum momento da minha vida apoiaram a realização desse curso e deram suporte das mais diversas formas.

Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente.
(Roger von Oech)

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre elementos magnéticos planares, bem como um comparativo desses com elementos magnéticos convencionais. Nessa comparação, são mostradas quais características dos elementos planares são vantajosas ou não em relação aos convencionais. Um estudo teórico é apresentado com o equacionamento básico dos elementos e seus princípios de funcionamento, incluindo as características dos materiais que podem ser utilizados no projeto e possíveis aplicações. É definida uma metodologia para a realização de um projeto partindo das especificações iniciais das grandezas desejadas pelo projetista elétrico e resultando nos valores que possibilitam a construção do elemento, seja um protótipo ou em escala. As metodologias são apresentadas para indutores e transformadores. Os projetos são executados para obter placas de circuito impresso com auxílio de um software.

Palavras-chave: Elementos magnéticos planares. Projeto de elementos magnéticos. Operação em alta frequência.

ABSTRACT

This work presents a study about planar magnetic elements, as well as a comparative with conventional magnetic elements. In this comparative it is shown what features are beneficial or not in relation to conventional elements. A theoretical study is carried with basic equations for the elements and its working principles, including the materials that can be used in the project and its possible applications. The project methodology is defined starting from the initial specifications of the quantities intended by the electrical designer, resulting in the quantities that make the manufacturing of the element possible, being it a prototype or built on larger scale. These project methods are shown for inductor and transformers. The projects are implemented to obtain printed circuit boards with the aid of a software.

Keywords: Planar magnetic elements. Magnetic elements project. High frequency operation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Exemplos de aplicação de indutores e transformadores nos conversores Boost e Flyback..... | 31 |
| Figura 2 – Elemento magnético construído de maneira convencional.. | 31 |
| Figura 3 – Elemento magnético planar construído com placas de circuito impresso. | 33 |
| Figura 4 – Elemento magnético planar construído com condutores estampados. | 34 |
| Figura 5 – Exemplos de geometrias de núcleos planares. | 35 |
| Figura 6 – Parâmetros dos núcleos planares tipo E e tipo I..... | 36 |
| Figura 7 – Modelo do circuito elétrico de um transformador com os parâmetros referenciados ao primário. | 39 |
| Figura 8 – Placa de circuito impresso projetada para o indutor planar. | 48 |
| Figura 9 – Placa de circuito impresso projetada para o indutor planar. | 50 |
| Figura 10 – $B \times J$ para o núcleo E-I 22..... | 55 |
| Figura 11 – $B \times J$ para o núcleo E-I 38..... | 56 |
| Figura 12 – $B \times J$ para o núcleo E-I 64..... | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores típicos para produção de PCIs..... | 38 |
| Tabela 2 – Definição dos elementos do modelo do transformador com os parâmetros referenciados ao primário | 39 |
| Tabela 3 – Banco de dados com parâmetros dos núcleos planares | 43 |
| Tabela 4 – Especificações e limitações da PCI utilizada para o projeto | 43 |
| Tabela 5 – Valores do fator de forma de onda. | 45 |
| Tabela 6 – Especificações de projeto do indutor planar..... | 47 |
| Tabela 7 – Valores obtidos de projeto do indutor planar | 48 |
| Tabela 8 – Especificações de projeto do transformador planar..... | 49 |
| Tabela 9 – Valores obtidos de projeto do transformador planar | 50 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Σh_i – Somatório dos isolamentos
 δ – Profundidade de penetração (m)
 ΔI_L – Variação de corrente no indutor (%)
 μ_0 – Permeabilidade magnética do ar (H/m)
 μ_r – Permeabilidade magnética relativa
 ρ – Resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)
 A_e – Área da seção transversal da coluna central do núcleo (m^2)
 b_w – Largura disponível do enrolamento no núcleo (mm)
 B – Indução magnética (T)
 B_s – Indução magnética de saturação (T)
cd – Creepage distance (mm)
CA – Corrente alternada (A)
CC – Corrente contínua (A)
EMP – Elemento magnético planar
f – Frequência (Hz)
 h_{pci} – Espessura total da placa de circuito impresso (mm)
 h_w – Espessura da trilha (mm)
 I_{2ef} – Corrente eficaz no secundário (A)
J – Densidade de corrente (A/m^2)
 K_v – Fator de forma de onda
 l_e – Caminho geométrico médio do núcleo (m)
 l_g – tamanho do entreferro (m)
L – Indutância (H)
 L_1 – Indutância de dispersão do enrolamento primário (H)
 L_2 – Indutância de dispersão do enrolamento secundário referenciado ao primário (H)
 L_m – Indutância de magnetização (H)
MLT – Comprimento médio de uma espira (m)
 $m_{núcleo}$ – Massa do núcleo (kg)
 n_{face} – número de faces da placa de circuito impresso
 n_{max} – Número máximo de camadas condutoras
 N_{max} – Número máximo de espiras por camada
 N_i – Número de espiras
 N_t – Número total de espiras
PCI – Placa de circuito impresso
 R_1 – Resistência do enrolamento primário (Ω)
 R_2 – Resistência do enrolamento secundário referenciado ao primário (Ω)
 R_f – Resistência do ramo magnetizante (Ω)
s – Espaçamento entre trilhas (mm)

V_1 – Tensão no primário (V)
 V_2 – Tensão no secundário (V)
 V_{2p} – Tensão de pico no secundário (V)
 V_L – Tensão no indutor (V)
 V_{pL} – Tensão de pico no indutor (V)
 $V_{\text{núcleo}}$ – Volume do núcleo (m^3)
 W_a – Área da janela do núcleo (m^2)
 w_t – Largura da trilha (mm)
 w_{tmin} – Largura mínima da trilha (mm)

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 28 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 28 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 28 |
| 1.2 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 28 |
| 2 | ELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES | 31 |
| 2.1 | TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DO EMP | 32 |
| 2.2 | PARÂMETROS DO NÚCLEO | 34 |
| 2.3 | CONSTRUÇÃO DAS TRILHAS DA PCI | 37 |
| 2.4 | INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO | 38 |
| 2.5 | CAPACITÂNCIAS PARASITAS | 40 |
| 2.6 | PERDAS NO NÚCLEO E NOS ENROLAMENTOS | 40 |
| 2.7 | EFEITO PELICULAR | 41 |
| 2.8 | EFEITO DE PROXIMIDADE | 42 |
| 2.9 | CONCLUSÃO DO CAPÍTULO | 42 |
| 3 | METODOLOGIA DE PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES | 43 |
| 3.1 | METODOLOGIA DE PROJETO DE INDUTORES PLANARES | 44 |
| 3.2 | METODOLOGIA DE PROJETO DE TRANSFORMADORES PLANARES | 46 |
| 4 | EXEMPLOS DE PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES | 47 |
| 4.1 | PROJETO DE UM INDUTOR PLANAR | 47 |
| 4.2 | PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DO INDUTOR PLANAR | 48 |
| 4.3 | PROJETO DE UM TRANSFORMADOR PLANAR | 49 |
| 4.4 | PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DO TRANSFORMADOR PLANAR | 50 |
| 5 | CONCLUSÃO | 51 |
| | REFERÊNCIAS | 53 |

ANEXO A – Gráficos B x J para projeto de indutores e transformadores..... 55

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento da tecnologia nos últimos anos, a competitividade entre as indústrias de produtos eletrônicos tem se tornado cada vez mais acirrada, com empresas buscando desenvolver produtos com algum diferencial para o mercado. Esse diferencial pode ser menor custo final, menor consumo de energia, maior densidade de potência ou ainda uma maior qualidade do produto.

As fontes de alimentação representam uma fatia considerável do mercado de produtos eletrônicos e buscam os diferenciais citados. Tipicamente, as fontes de alimentação são construídas com base em conversores chaveados. O projetista do conversor define a frequência de chaveamento com que o conversor opera. Basicamente, quanto maior a frequência utilizada, menores são os volumes dos componentes do circuito, como por exemplo indutores e capacitores, resultando em uma maior densidade de potência. Entretanto, quanto maior a frequência, maiores são as perdas e, conseqüentemente, a elevação de temperatura do produto é maior, podendo causar danos irreversíveis ao produto, no caso dessa temperatura ultrapassar as temperaturas limites dos componentes utilizados.

Outro fator que limita a frequência de operação utilizada tem relação com o elemento magnético utilizado, seja indutor ou transformador. Esses componentes geralmente representam grande parte do volume e da massa do conversor (VEGNER, 2017). Os elementos magnéticos construídos de forma convencional apresentam diversos processos manuais em sua fabricação, podendo mudar as características eletromagnéticas do elemento (EBERT, 2008). Além disso, quando operando em frequências mais altas, os efeitos parasitas são agravados, podendo resultar em um elemento magnético que não opere como o desejado no projeto. Em alguns casos, onde a frequência de operação utilizada é alta, acaba-se fazendo um sobredimensionamento do elemento, acarretando excesso de material e maiores volume e massa final (SOUZA, 2018).

Uma solução alternativa para esse problema é a utilização de elementos magnéticos planares (EMP). Um EMP é geralmente composto por um núcleo planar e enrolamentos feitos em placas de circuito impresso (PCIs) ou enrolamentos feitos de condutores estampados. A utilização dos EMPs apresenta uma série de características que são desejadas pelo projetista, especialmente operando em frequências mais altas. Dentre essas características, podem ser citadas o menor volume, a menor indutância de dispersão (SOUZA,

2018), a alta repetibilidade, entre outros que serão mais bem detalhados mais adiante. Porém, alguns aspectos do EMP podem ser desvantajosos se não forem tomados os devidos cuidados no projeto. Como desvantagens podem ser citados as capacitâncias parasitas, o baixo fator de utilização da janela do núcleo e a inviabilidade em aplicações de altas potências.

Pelas suas características geométricas, com baixo perfil, o EMP pode ser utilizado de forma eficiente em aplicações embarcadas, como notebooks, drives para acionamento e controle de velocidade de motores elétricos, dentre outros produtos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo sobre elementos magnéticos planares operando em frequências altas (maiores do que 100 kHz), apresentando e detalhando suas principais características e elaborando uma metodologia de projeto desses elementos.

1.1.2 Objetivos específicos

Realizar uma análise das características de elementos magnéticos planares, mostrando suas vantagens e desvantagens em relação a elementos magnéticos convencionais.

Apresentar uma metodologia de projeto para elementos magnéticos planares.

Executar o projeto com o auxílio de software específico para design de placa de circuito impresso.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

O primeiro capítulo é introdutório, apresentando o tema de estudo e os objetivos do trabalho.

O segundo capítulo traz uma fundamentação teórica sobre elementos magnéticos planares, com suas características construtivas e seus aspectos vantajosos e desvantajosos, servindo de base para o restante do trabalho.

O terceiro capítulo consiste na definição da metodologia de projeto a ser utilizada, com o equacionamento e os passos de projeto detalhados, tanto para indutores quanto para transformadores.

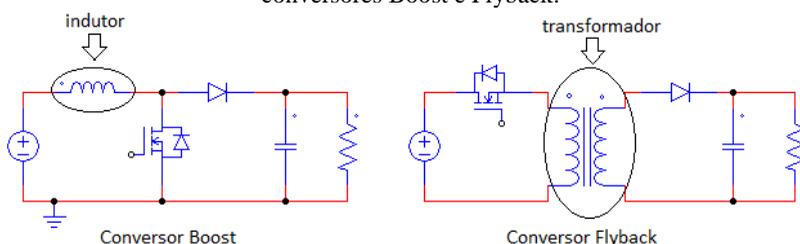
O quarto capítulo apresenta o projeto de um indutor e de um transformador planar.

O quinto e último capítulo consiste das conclusões obtidas, uma breve discussão e sugestões para trabalhos futuros.

2 ELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES

Os elementos magnéticos em geral, sejam indutores ou transformadores, apresentam grande aplicabilidade em vários setores da engenharia elétrica. Destaca-se nos últimos anos a aplicação em sistemas eletrônicos, sobretudo em fontes chaveadas de alimentação. A Figura 1 mostra exemplos de aplicação de indutores e transformadores em conversores CC-CC do tipo *Boost* e *Flyback*, enquanto a Figura 2 mostra um elemento magnético construído de maneira convencional.

Figura 1 – Exemplos de aplicação de indutores e transformadores nos conversores Boost e Flyback.



Fonte: Autor.

O indutor é empregado no conversor *Boost* como filtro, enquanto o transformador tem como função no conversor *Flyback* a adequação do valor de tensão de saída, além de prover isolamento elétrico entre saída e entrada.

Figura 2 – Elemento magnético construído de maneira convencional.



Fonte: Autor.

Os elementos magnéticos planares (EMPs) se mostram como uma solução alternativa para a construção desses componentes, apresentando características que podem trazer maior eficiência ao sistema utilizado, quando projetado corretamente, além de ocupar menor volume. O elemento magnético planar se difere do convencional na sua construção devido à configuração de seus enrolamentos, fazendo com que o núcleo planar tenha um perfil mais baixo (EBERT, 2018). Dentre as diversas opções de construção, destaca-se a utilização de placas de circuito impresso (PCI) em substituição aos enrolamentos convencionais, comumente de fio de cobre esmaltado. A construção do EMP pode ser feita de modo isolado, podendo ser utilizado em diversos sistemas, ou de forma integrada à placa do circuito, eliminando a necessidade de conexões externas. É interessante também citar que a tecnologia de PCI multicamadas proporciona a oportunidade da construção de transformadores com mais de um secundário, que são amplamente utilizados em fontes chaveadas.

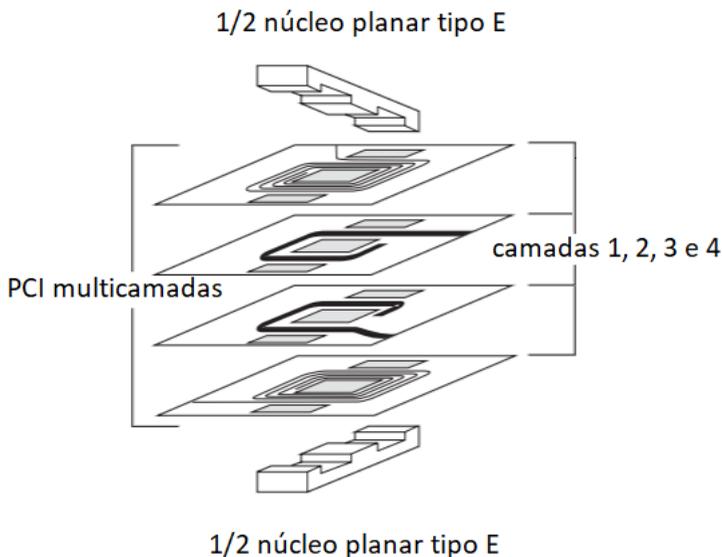
Tratando-se de fontes de alimentação chaveadas, utilizam-se frequências de chaveamento altas, o que resulta em elementos com menor volume e peso, aumentando a densidade de potência. Entretanto, a frequência de chaveamento é normalmente limitada. Isso se deve ao fato de quanto maior for a frequência de chaveamento, maiores são as perdas nos componentes do circuito, podendo, em casos extremos, danificar o sistema e seus componentes. Além disso, outros fatores a serem considerados em um elemento magnético operando em frequências elevadas são os efeitos parasitas, como a indutância de dispersão e as capacitâncias parasitas. O EMP tem se mostrado bastante eficiente, especialmente em aplicações em frequências acima de 100 kHz (ERICKSON e MAKSIMOVIC, 2007). Os aspectos dessa aplicação são analisados com mais detalhes nos itens a seguir.

2.1 TECNOLOGIAS DE CONSTRUÇÃO DO EMP

O método de construção de elementos magnéticos planares mais comum é o que utiliza um núcleo planar em conjunto com uma placa de circuito impresso, podendo esta ser de multicamadas. A Figura 3 mostra um EMP construído com PCI, sendo esse construído de forma isolada. É interessante notar que o EMP pode também ser projetado de forma integrada aos demais circuitos do projeto. O elemento da Figura 3 é formado por duas metades de núcleos de ferrite tipo E, além de quatro camadas de placa de circuito impresso com trilhas de cobre. As camadas

1 e 4 contém o enrolamento primário de um transformador planar e as camadas 2 e 3 contém o enrolamento secundário. Nota-se que o projeto da PCI foi feito de tal forma que a placa é encaixada no núcleo de ferrite.

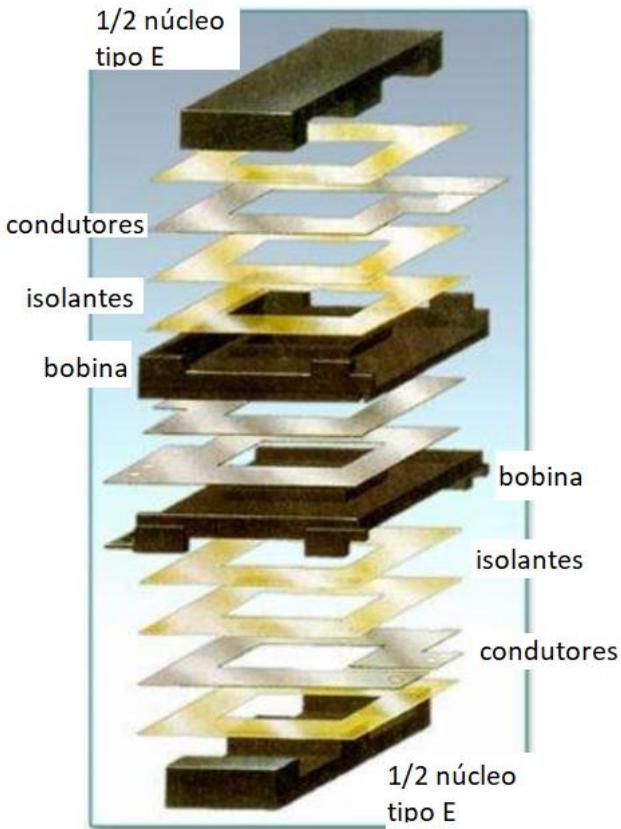
Figura 3 – Elemento magnético planar construído com placas de circuito impresso.



Fonte: adaptado de PHILIPS MAGNETICS PRODUCTS.

Entretanto, existem algumas soluções alternativas, como por exemplo, a utilização de condutores estampados. Geralmente, essa solução é empregada em casos onde a densidade de potência desejada é mais alta, o que pode inviabilizar a utilização de placas de circuito impresso tradicionais. Um EMP construído com condutores estampados é apresentado na Figura 4. A construção é composta por dois núcleos de ferrite do tipo E, além das camadas intercaladas de condutores e isolantes. Os condutores formam os enrolamentos do elemento magnético, enquanto os isolantes impedem o contato das camadas condutoras entre si, evitando um possível curto circuito no enrolamento. Além disso, há as bobinas, que tem como função manter as camadas condutoras e isolantes acomodadas no núcleo. As bobinas frequentemente são opcionais.

Figura 4 – Elemento magnético planar construído com condutores estampados.

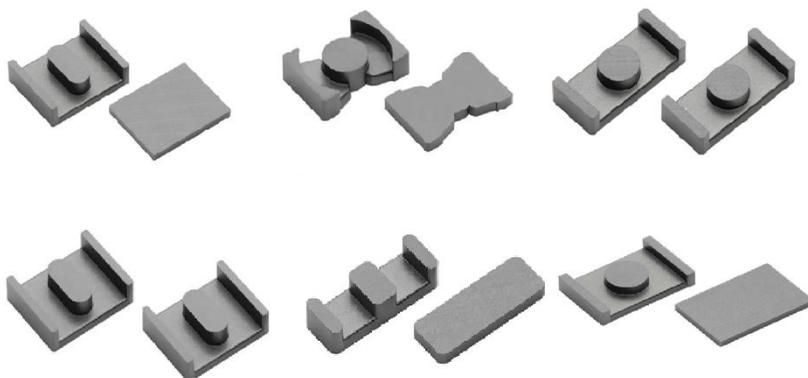


Fonte: adaptado de PAYTON PLANAR MAGNETICS, 2013.

2.2 PARÂMETROS DO NÚCLEO

Os núcleos planares, quando comparados aos convencionais, apresentam um perfil mais baixo. Esses núcleos podem ser encontrados comercialmente em diversas geometrias, sendo algumas delas exemplificadas na Figura 5.

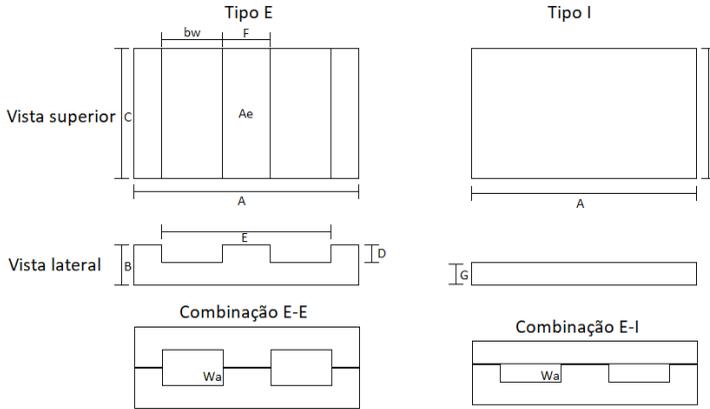
Figura 5 – Exemplos de geometrias de núcleos planares.



Fonte: adaptado de TDK, 2017.

Esse trabalho aborda apenas a utilização de núcleos de ferrite do tipo E-E e E-I (também chamada de E-PLT em núcleos planares), que apresentam uma geometria mais simples e, na maioria dos casos, um custo menor em relação a outras geometrias. Os núcleos E-E e E-I podem apresentar alguns problemas de compatibilidade eletromagnética devido ao fato de o enrolamento não estar totalmente dentro do núcleo (EBERT, 2008). Pode-se citar dois desses problemas que podem ser encontrados: níveis de emissão radiada e/ou conduzida elevados e problemas de imunidade. No primeiro caso, o elemento magnético emite elevado ruído eletromagnético, podendo interferir no funcionamento de outros equipamentos. No segundo caso, o elemento magnético pode sofrer interferência de ruído eletromagnético externo e apresentar um funcionamento incorreto. Outras geometrias podem ser utilizadas para reduzir esses problemas, porém tendo um maior custo e uma maior complexidade de projeto. A Figura 6 mostra a ilustração de núcleos E-E e E-I com os seus principais parâmetros destacados. Na sequência, está a explicação detalhada de cada um dos parâmetros.

Figura 6 – Parâmetros dos núcleos planares tipo E e tipo I.



Fonte: Autor

Os parâmetros mostrados na Figura 6 geralmente são fornecidos pelo fabricante do núcleo, porém, se necessário, podem ser medidos ou calculados de forma manual.

O parâmetro A_e representa a área da seção transversal da coluna central do núcleo e pode ser obtido por (2.1).

$$A_e = FC \quad (2.1)$$

O parâmetro W_a refere-se à área da janela do núcleo. As equações (2.2) e (2.3) mostram o cálculo de W_a para uma combinação de núcleos E-I e E-E, respectivamente.

$$W_a = \frac{D(E-F)}{2} \quad (2.2)$$

$$W_a = D(E - F) \quad (2.3)$$

O parâmetro l_e é o caminho geométrico médio do núcleo. Esse parâmetro representa o caminho médio do fluxo magnético no núcleo. É importante ressaltar que esse parâmetro leva em consideração somente os aspectos geométricos do núcleo, não considerando fatores que também interferem no caminho real do fluxo, como a frequência de operação e o material do núcleo. Uma aproximação para a obtenção de l_e é apresentada por (2.4).

$$l_e = (E - F) + 4(D + \pi(B - D)) \quad (2.4)$$

O comprimento médio de uma espira MLT (do inglês *mean length turn*) pode ser obtido através de (2.5).

$$MLT = 2(E + C) \quad (2.5)$$

Outros parâmetros do núcleo com elevada importância são a sua massa $m_{\text{núcleo}}$ e o seu volume $V_{\text{núcleo}}$.

É importante lembrar que, para outros tipos de núcleos, o cálculo dos parâmetros citados anteriormente é feito de forma diferente, dependendo da geometria existente.

2.3 CONSTRUÇÃO DAS TRILHAS DA PCI

Após a seleção do núcleo, é feita a escolha dos condutores que formarão os enrolamentos. No caso do projeto da placa de circuito impresso, é interessante a utilização de placas com valores padronizados de espessura de cobre, tanto pela disponibilidade de material quanto pelo custo. Tipicamente, esses valores são de 35 μm ou 70 μm , para placas até duas camadas. O material da placa também deve ser levado em consideração no projeto, sendo bastante comum a utilização de fenolite ou fibra de vidro em placas comerciais.

A largura das trilhas w_t deve ser calculada de acordo com (2.6), onde b_w é a largura disponível do enrolamento no núcleo, N_i é o número de espiras e s é o espaçamento entre as espiras.

$$w_t = \frac{b_w - (N_i + 1)s}{N_i} \quad (2.6)$$

Os valores b_w e s , no entanto, devem respeitar uma faixa de valores condizentes com a densidade de corrente e com a tecnologia de fabricação utilizada. Os valores mínimos de largura para determinada corrente e de isolamento entre camadas para determinada tensão entre condutores é definida por norma. Dependendo da aplicação, uma norma diferente é utilizada, podendo citar como exemplo a norma IEC 950 (FERROXCUBE, 1997). A Tabela 1 mostra valores típicos para produção de PCIs de um fabricante nacional (CIRCUIBRAS,

2018;MICROPRESS, 2018), com capacidade de fabricação de PCIs de até dez camadas.

Tabela 1 – Valores típicos para produção de PCIs

| Parâmetros | Valores |
|---|--|
| Espessura de cobre | ½ Oz (35µm) 1 Oz (35µm) 2 Oz (70µm) 3 Oz (105µm) |
| Largura mínima de trilha e espaçamento mínimo entre trilhas | 0,10 mm para espessura de ½Oz 0,15 mm para espessura de 1Oz 0,20 mm para espessura de 2Oz 0,25 mm para espessura de 3Oz |
| Espaçamento mínimo entre trilhas e bordas da PCI | 0,30 mm para camada externa 0,50 mm para camada interna |
| Espessura total da PCI | 0,5 mm 1,0 mm 1,6 mm 3,2 mm |
| Menor furo | 0,20 mm 0,30 mm |
| Espessura típica laminado base | 0,8 mm 1,0 mm 2,0 mm |
| Espessura típica isolante | 0,120 mm 0,220 mm 0,320 mm |
| Número de camadas | 2 até 10 |

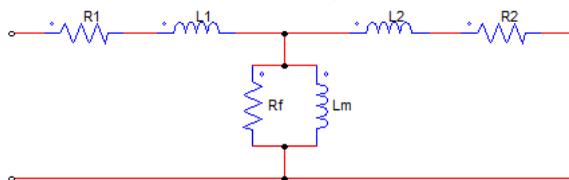
Fonte: adaptado de CIRCUIBRAS, 2018 e MICROPRESS, 2018.

2.4 INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO

Em um transformador ideal, as linhas de fluxo magnético estão completamente acopladas entre os enrolamentos. Entretanto, na prática sempre haverá um fluxo disperso (linhas de fluxo não acopladas), por menor que seja. Uma forma de modelar isso é através da indutância de dispersão, que é representada como um parâmetro concentrado em série com cada enrolamento. O número de indutâncias de dispersão depende do número de enrolamentos do transformador.

Para uma melhor compreensão, apresenta-se na Figura 7 o modelo do circuito elétrico de um transformador com os parâmetros referenciados ao primário, onde seus elementos estão definidos na Tabela 2.

Figura 7 – Modelo do circuito elétrico de um transformador com os parâmetros referenciados ao primário.



Fonte: Autor.

Tabela 2 – Definição dos elementos do modelo do transformador com os parâmetros referenciados ao primário.

| Elemento | Definição |
|-----------------|--|
| R_1 | Resistência do enrolamento primário |
| L_1 | Indutância de dispersão do enrolamento primário |
| R_f | Resistência representativa das perdas no ferro |
| L_m | Indutância de magnetização |
| L_2 | Indutância de dispersão do enrolamento secundário referenciado ao primário |
| R_2 | Resistência do enrolamento secundário referenciado ao primário |

Fonte: Autor.

O valor das indutâncias de dispersão é diretamente relacionado com os aspectos construtivos do transformador. Os modelos planares apresentam valores mais baixos em relação aos transformadores convencionais (EBERT, 2008). Além disso, devido a alguns processos manuais de fabricação, os transformadores convencionais fabricados em escala frequentemente apresentam discrepância de valores de indutância de dispersão dentro do mesmo lote de fabricação.

Valores baixos de indutância de dispersão são altamente desejáveis, especialmente para circuitos chaveados, devido a alguns fatores, sendo o principal deles o fato de que as indutâncias de dispersão são diretamente relacionadas ao surgimento de picos de tensão, o que pode danificar os demais componentes do circuito ou o sistema como um todo.

Em PCIs multicamadas, podem ser utilizadas técnicas de intercalar camadas condutoras ou diferentes disposições de enrolamentos para se reduzir o valor das indutâncias de dispersão. Entretanto, essas técnicas podem causar variações indesejadas nas capacitâncias parasitas, sendo necessários alguns cuidados especiais em sua aplicação.

2.5 CAPACITÂNCIAS PARASITAS

As capacitâncias parasitas surgem quando há dois condutores com diferentes níveis de tensão separados a uma certa distância por um material isolante (dielétrico). A partir disso, se forma um campo elétrico entre os condutores.

Tratando-se de elementos magnéticos planares, as capacitâncias parasitas podem ocorrer entre espiras, no caso do indutor ou do transformador, ou ainda entre enrolamentos, no caso do transformador. Nesse caso, o material de construção da PCI é bastante importante, pois materiais com diferentes constantes dielétricas podem alterar os valores das capacitâncias.

Os efeitos das capacitâncias parasitas em um circuito podem se manifestar de diversas formas, fazendo com que o circuito projetado não funcione como o esperado, podendo essas capacitâncias contribuir para a propagação de ruído até mesmo por circuitos isolados.

2.6 PERDAS NO NÚCLEO E NOS ENROLAMENTOS

Em elementos magnéticos reais sempre haverá perdas, que geralmente se traduzem em uma dissipação de calor. Deve-se buscar uma minimização das perdas totais para evitar sobreaquecimento do material magnético e para reduzir o consumo de energia. As perdas nos elementos magnéticos podem se dar no núcleo e/ou nos enrolamentos.

As perdas no núcleo podem ocorrer de duas maneiras principais: as perdas por histerese e as perdas por correntes de *Foucault*. Também existe um outro tipo de perda, chamada de perda anômala, geralmente de menor intensidade que as demais e por isso, negligenciada. As perdas magnéticas estão relacionadas diretamente à característica do material e à sua condição de operação, sendo influenciadas principalmente pela frequência de operação e pela indução magnética. É importante lembrar que, com uma temperatura alta no núcleo, o valor de indução magnética diminui (EBERT, 2008). Isso pode inviabilizar o projeto do elemento em caso de sobretensão.

As perdas nos enrolamentos estão relacionadas à resistência elétrica, podendo ser calculadas através do quadrado da corrente eficaz multiplicado pela resistência CC. A resistência CC do enrolamento pode ser calculada através de (2.7).

$$R_{CC} = \frac{\rho MLTN}{h_w w t} \quad (2.7)$$

Entretanto, uma parcela das perdas ocorre devido à resistência CA, cujas contribuições ocorrem majoritariamente devido aos efeitos pelicular e de proximidade, apresentados nos Itens 2.7 e 2.8, respectivamente.

2.7 EFEITO PELICULAR

O efeito pelicular consiste em uma distribuição não uniforme de uma corrente alternada que circula por um condutor. Isso ocorre porque a corrente induz um campo magnético internamente no condutor que por sua vez faz com que a corrente tenda a se concentrar nas extremidades externas do mesmo, ou seja, na superfície. Esse efeito pode ser medido através da profundidade de penetração δ , que pode ser calculada através de (2.8), onde ρ é a resistividade do material condutor, μ_r é a permeabilidade magnética relativa do material, μ_0 é a permeabilidade do ar e f é a frequência da corrente.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_r \mu_0 f}} \quad (2.8)$$

Para que o efeito pelicular possa ser desprezado, é necessário que o diâmetro do condutor seja menor ou igual ao dobro da profundidade de penetração. Com isso também é possível calcular para até qual frequência determinada espessura de condutor apresenta efeito pelicular desprezível. Devido ao fato de as trilhas de PCI padronizadas apresentarem baixa espessura (35-70 μm), apenas em frequências na faixa de megahertz o efeito pelicular se tornaria presente. Isso faz com que elementos magnéticos planares tenham como uma de suas vantagens o efeito pelicular extremamente reduzido. No entanto, elementos magnéticos projetados para circuitos de radiofrequência devem levar o efeito pelicular em consideração.

É importante notar que os condutores dos elementos planares não são cilíndricos. Isso faz com que, em alguns casos específicos com

trilhas largas, o efeito pelicular se faça presente. Para reduzi-lo, uma solução eficiente é a substituição de uma trilha larga por trilhas mais estreitas em paralelo.

2.8 EFEITO DE PROXIMIDADE

O efeito de proximidade é bastante similar ao efeito pelicular. A diferença está no campo magnético que induz as correntes que tendem a se concentrar na superfície do condutor. Esse campo agora é gerado pelas correntes dos condutores próximos, por isso o nome de efeito de proximidade.

2.9 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Para conclusão dessa fundamentação teórica sobre elementos magnéticos planares é bastante interessante listar quais aspectos são vantajosos em relação aos elementos convencionais e quais são desvantajosos.

Pode se citar como vantagens:

- O baixo perfil dos núcleos.
- Alta densidade de potência.
- Indutância de dispersão reduzida.
- Efeito pelicular geralmente negligenciável.
- Boa repetibilidade de produção/capacidade de fabricação em larga escala.
- Boa operação em frequências mais elevadas.
- Boa dissipação de calor

No entanto, os EMPs apresentam algumas desvantagens, listadas a seguir:

- Inviabilidade de aplicação para potências mais elevadas.
- Baixo fator de utilização da janela do núcleo.
- Maiores capacitâncias parasitas
- Ocupação de área maior

Essa lista das vantagens e desvantagens é bastante útil para o projetista poder escolher entre qual tecnologia, planar ou convencional, será mais benéfica para a aplicação do projeto.

3 METODOLOGIA DE PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES

Existem na literatura diversas metodologias de projetos de elementos magnéticos planares. Neste trabalho, optou-se por utilizar a metodologia proposta por (EBERT,2008). Esta metodologia utiliza um banco de dados com os parâmetros de núcleos planares e algumas curvas características dos núcleos necessárias para o projeto. Apesar de o banco de dados limitar o projeto a no máximo dois enrolamentos, o procedimento apresenta boa confiabilidade por se tratar de uma metodologia de projeto otimizada. O banco de dados com os parâmetros dos núcleos planares é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Banco de dados com parâmetros dos núcleos planares

| Núcleos | A_e | V_{núcleo} | l_e | b_w | D |
|----------------|----------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------|
| E-I 22 | 78,5 mm ² | 2040 mm ³ | 26,1 mm | 5,9 mm | 3,2 mm |
| E-I 38 | 194 mm ² | 8460 mm ³ | 43,7 mm | 11,3 mm | 4,5 mm |
| E-I 64 | 519 mm ² | 35500 mm ³ | 69,7 mm | 21,8 mm | 5,1 mm |

Fonte: adaptado de EBERT, 2008.

Os núcleos apresentados na Tabela 3 são compostos do material 3F3 (Ferroxcube), possuindo permeabilidade relativa μ_r igual a 2749 e indução magnética de saturação B_s igual a 0,35 T.

A Tabela 4 mostra as especificações e limitações da PCI utilizada no projeto.

Tabela 4 – Especificações e limitações da PCI utilizada para o projeto

| Dado | Significado | Valor |
|--------------|------------------------------|--------------|
| h_w | Espessura da camada de cobre | 70 μ m |
| s | Espaçamento entre trilhas | 0,3 mm |
| cd | <i>Creepage</i> distance | 1 mm |
| W_{tmin} | Largura mínima de trilha | 0,25 mm |
| h_{pci} | Espessura total da PCI | 1,6 mm |
| n_{face} | Número de faces da PCI | 2 |
| Σh_i | Somatório dos isolamentos | 0,5 mm |

Fonte: adaptado de EBERT, 2008.

A metodologia de EBERT entrega curvas para a execução dos projetos com os núcleos do banco de dados, que se encontram no Anexo

A. É interessante citar que esses gráficos foram criados visando a minimização das perdas.

A seguir é apresentada a metodologia para os dois casos de interesse: indutores e transformadores.

3.1 METODOLOGIA DE PROJETO DE INDUTORES PLANARES

O primeiro passo para o projeto do indutor planar é a pré-seleção de um dos núcleos disponíveis, geralmente buscando utilizar os menores. O núcleo pré-selecionado deve ser substituído apenas em caso de incapacidade do núcleo de suportar os requisitos de projeto definidos.

Partindo disso, deve ser feito o cálculo do número máximo de camadas condutoras n_{max} através da Equação (3.1). É importante destacar que é possível empilhar as PCIs.

$$n_{max} = \frac{D - \Sigma h_i}{h_{pci}} n_{face} \quad (3.1)$$

Após isso, é calculado o número máximo de espiras por camada N_{max} pela Equação (3.2). Tanto n_{max} quanto N_{max} devem ser arredondados para baixo.

$$N_{max} = \frac{b_w - cd - s}{w_{tmin} + s} \quad (3.2)$$

E a Equação (3.3) apresenta o número total de espiras N_t , que se pode conseguir com este núcleo e esta PCI.

$$N_t = n_{max} N_{max} \quad (3.3)$$

A Equação 3.4 apresenta o valor da indutância L em relação a tensão V_L , a variação de corrente ΔI_L e a frequência f .

$$L = \frac{V_L}{\Delta I_L f} \quad (3.4)$$

A Equação (3.5) apresenta o valor da indutância L em função dos parâmetros do núcleo escolhido. Além disso, N é o número de espiras e l_g é o tamanho do entreferro total, que será fixado inicialmente em 60 μm .

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A_e}{l_g + \frac{l_e}{\mu_r}} \quad (3.5)$$

Relacionando (3.4) e (3.5) é obtida a Equação (3.6), que traz como resultado o número de espiras ideal para o indutor desejado.

$$N = \sqrt{\frac{V_L}{\Delta I_L f \mu_0 A_e} \left(l_g + \frac{l_e}{\mu_r} \right)} \quad (3.6)$$

A partir do valor de N, é necessário fazer a verificação se o núcleo escolhido comporta esse número de espiras. Em caso positivo, pode-se partir para a próxima etapa do projeto. Em caso negativo, é necessária a substituição por um núcleo maior e recalculando o número de espiras para esse novo núcleo com a Equação (3.6). Isso deve se repetir até que o núcleo seja compatível com o valor de N calculado.

A próxima etapa é o cálculo da indução magnética B através da Equação (3.7), onde V_{pL} é a tensão de pico no indutor e K_v é o fator de forma de onda.

$$B = \frac{V_{pL}}{N A_e f K_v} \quad (3.7)$$

A Tabela 5 apresenta valores de K_v para algumas formas de onda.

Tabela 5 – Valores do fator de forma de onda.

| Forma de onda | K_v |
|----------------------|-------|
| Senoidal | 4,44 |
| Quadrada simétrica | 4 |
| Quadrada assimétrica | 2 |

Fonte: EBERT, 2018.

Com o valor de B obtido, deve-se consultar o gráfico adequado (ver Anexo A) para obtenção, no gráfico do núcleo utilizado, do valor da densidade de corrente J. Com esse valor pode se dimensionar a largura da trilha w_t , através da relação corrente pela área. Novamente, é verificado se essa largura de trilha é comportada pelo núcleo. Caso seja necessário, o tamanho do entreferro deve ser ajustado para obtenção da indutância desejada.

3.2 METODOLOGIA DE PROJETO DE TRANSFORMADORES PLANARES

Similarmente ao que ocorre no projeto do indutor, o projeto do transformador planar tem início com a pré-seleção do núcleo.

Novamente, é necessário calcular o número máximo de camadas condutoras n_{\max} através de (3.1), o número máximo de espiras por camada N_{\max} por (3.2) e o número total de espiras N_t por (3.3).

Para as próximas etapas, é importante destacar algumas considerações iniciais. Primeiramente, o enrolamento secundário é fixado como sendo o de menor tensão, apenas como referência. Além disso, será fixado inicialmente o número de espiras do enrolamento secundário em um. O número de espiras será ajustado em uma próxima etapa do projeto, quando for necessário. Após isso, será utilizado o valor desejado da corrente eficaz no secundário I_{2ef} para ser calculada a densidade de corrente J , escolhendo um valor inicial de largura de trilha, que será corrigido depois. Com isso, é possível encontrar o valor da indução B no gráfico do núcleo disponível no Anexo A.

A partir disso é possível utilizar (3.8) para calcular tensão de pico do enrolamento secundário V_{2p} .

$$V_{2p} = BN_t A_e f K_v \quad (3.8)$$

A partir desse ponto, existem três situações possíveis. A primeira situação ocorre quando V_{2p} é igual ao valor especificado no projeto. Essa situação é a ideal e, neste caso, passa-se para a próxima etapa do projeto. No caso de um valor de V_{2p} menor que o especificado, devem ser feitos os seguintes ajustes para correção, na seguinte prioridade: primeiramente aumentar o número de espiras por camada, depois aumentar o número de camadas e, em último caso, deve-se substituir o núcleo pré-selecionado por um maior. O terceiro e último caso ocorre quando V_{2p} ultrapassa o valor especificado. Para corrigir isso é necessário alterar a indução B para o V_{2p} desejado na equação. A partir disso, encontra-se J e, conseqüentemente, a largura da trilha do enrolamento secundário.

Com a relação de transformação especificada (V_1/V_2) calcula-se o número de espiras do primário. Para o cálculo da largura de trilha do primário utiliza-se o mesmo valor de J calculado no secundário. Por fim, é feita a verificação se o núcleo comporta o número de espiras.

4 EXEMPLOS DE PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS PLANARES

4.1 PROJETO DE UM INDUTOR PLANAR

O objetivo dessa etapa é efetuar o projeto de um indutor planar utilizando a metodologia apresentada no Item 3.1.

Deseja-se projetar um indutor que opere de acordo com as especificações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações de projeto do indutor planar

| Especificação | Valor |
|------------------------|---------|
| Tensão | 32 V |
| Corrente eficaz | 3 A |
| Variação de corrente | 3 A |
| Frequência | 100 kHz |
| Fator de forma de onda | 4 |

Fonte: Autor.

A pré-seleção inicial do núcleo foi a do núcleo E-I 38.

Isso faz com que o número máximo de camadas condutoras n_{\max} seja igual a 5, o número máximo de espiras N_{\max} seja igual a 18 e o número total de espiras igual a 90.

Através de (3.4), obteve-se um valor de indutância de 107 μH .

Utilizando (3.6) descobre-se que o número de espiras deverá ser de 5,76, que é arredondado para 6.

Como 6 é menor que o número máximo de espiras, passa-se para a próxima etapa, sem necessidade de utilizar um núcleo maior.

Na sequência é feito o cálculo de B pela Equação (3.7) que resulta em um valor de 0,071 T.

Observando a Figura 11 no Anexo A, tem-se uma densidade de corrente J de aproximadamente 34 A/mm², que implica em uma trilha com largura igual a 1,26 mm, calculado através da relação entre corrente e área.

É feita a verificação se o núcleo comporta 6 espiras para a largura 1,26 mm. O número máximo de espiras por camadas com essa largura é de 6,41 que é maior que 6. Portanto, é possível utilizar uma única camada de PCI.

Por fim, é feito o cálculo do ajuste do entreferro, que resulta em $l_g=66 \mu\text{m}$.

Os valores obtidos de projeto estão organizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores obtidos de projeto do indutor planar

| Especificação | Valor |
|-------------------|------------------|
| Número de espiras | 6 |
| Largura da trilha | 1,26 mm |
| Entreferro total | 66 μm |

Fonte: Autor.

4.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DO INDUTOR PLANAR

Para a implementação do *layout* da placa de circuito impresso utilizou-se o *software* KiCad, que é gratuito. O KiCad é um *software* com diversos módulos, cada qual com sua função. O módulo principal é responsável pelo gerenciamento do projeto. Existem ainda módulos para desenho de esquemáticos, *footprints* de componentes eletrônicos, *layout* de PCIs e visualizador de arquivos *gerber* (utilizados na fabricação das placas). O resultado da placa de circuito impresso é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Placa de circuito impresso projetada para o indutor planar.



Fonte: Autor.

4.3 PROJETO DE UM TRANSFORMADOR PLANAR

O objetivo dessa etapa é efetuar o projeto de um transformador planar utilizando a metodologia apresentada no Item 3.2.

A Tabela 8 apresenta os valores especificados para o projeto do transformador.

Tabela 8 – Especificações de projeto do transformador planar

| Especificação | Valor |
|-------------------------------|---------|
| Tensão eficaz no primário | 24 V |
| Tensão eficaz no secundário | 12 V |
| Corrente eficaz no primário | 0,5 A |
| Corrente eficaz no secundário | 1 A |
| Frequência | 100 kHz |
| Fator de forma de onda | 4 |

Fonte: Autor.

O núcleo pré-selecionado foi o E-I 22.

Com (3.1) e (3.2) chega-se em um número máximo de camadas condutoras de 3 e um número máximo de espiras por camada de 8. Com isso, o número total de espiras é de 24.

Como I_{2ef} é 1 A, obtém-se uma densidade de corrente 14,28 A/mm² utilizando uma largura de trilha de 1 mm. Consultando o gráfico presente no Anexo A, tem-se que B é igual a 0,26 T

Partindo de (3.8) com 1 espira no secundário, obtém-se um valor de 8,164 V para V_{2p} , que é menor que o projetado.

Aumenta-se o número de espiras no secundário para 2 e encontra-se V_{2p} igual a 16,32 V. Esse valor é maior que o projetado, então ajusta-se B para que se obtenha V_{2p} igual a 12 V. Esse valor de B é igual a 0,191 T, que resulta em uma densidade de corrente de 31 A/mm² fazendo com que a largura de trilha do secundário seja igual a 0,46 mm.

O número de espiras no primário é 4 devido a relação de transformação 2.

Utilizando a densidade de corrente de 31 A/mm², obtém-se uma largura de trilha de 0,23 mm para o enrolamento primário.

Os valores obtidos de projeto estão organizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores obtidos de projeto do transformador planar.

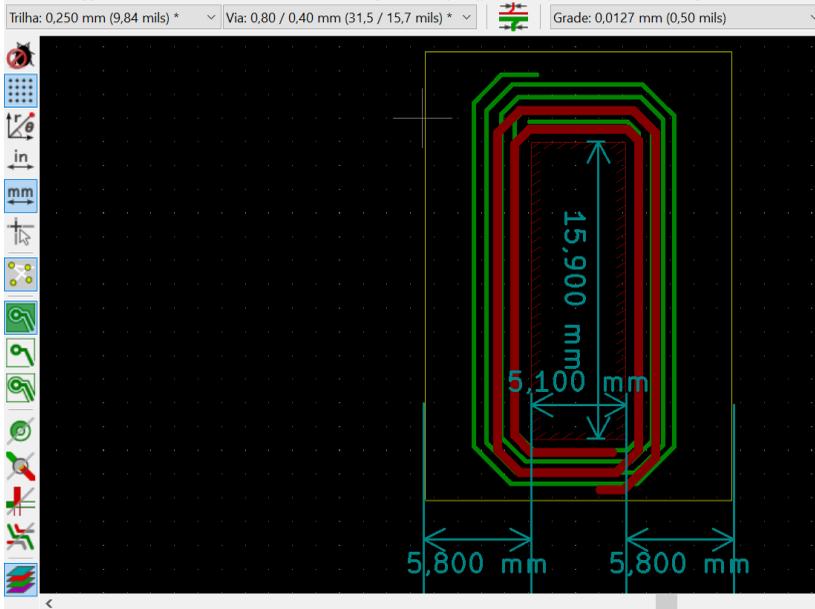
| Especificação | Valor |
|---------------------------------|---------|
| Número de espiras do primário | 4 |
| Largura de trilha do primário | 0,23 mm |
| Número de espiras do secundário | 2 |
| Largura de trilha do secundário | 0,46 mm |

Fonte: Autor.

4.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO DO TRANSFORMADOR PLANAR

Novamente foi utilizado o KiCAD para implementar a placa de circuito impresso do transformador, resultando no *layout* da Figura 9.

Figura 9 – Placa de circuito impresso projetada para o indutor planar.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados o conceito e as características dos elementos magnéticos planares. Foram mostradas as formas de construção com placas de circuito impresso e com condutores estampados. Os aspectos construtivos foram detalhados de modo a se compreender suas principais características e implicações. Essa tecnologia, ainda pouco explorada, pode apresentar grandes vantagens para diversas aplicações, dentre as quais destacam-se a maior densidade de potência, a menor indutância de dispersão, o menor efeito pelicular, a alta repetibilidade e a melhor operação em frequências elevadas. Entretanto, é necessário um certo cuidado no projeto desses elementos para que efeitos parasitas não comprometam o seu funcionamento. É importante lembrar que os elementos magnéticos planares, especialmente os construídos com placas de circuito impresso, tem aplicação limitada em faixas de potência mais elevadas.

Foi mostrado um método de projeto já comprovado para elementos planares. Esse método parte de um banco de dados com os núcleos de ferrite disponíveis e gráficos com as características do material operando com minimização de perdas para determinadas frequências de operação. O método escolhido foi utilizado para projetar um indutor e um transformador e se obteve o *layout* das placas de circuito impresso que serão combinadas com os núcleos escolhidos.

Essa área ainda apresenta bastante espaço para melhorias e estudos, pois ainda há relativamente pouco material sobre o assunto. A seguir estão listadas algumas sugestões de trabalhos futuros que podem contribuir de alguma forma para o estudo de elementos planares.

- Realização de um estudo com outros formatos de núcleos planares e suas características.
- Construção de protótipos para validação da metodologia utilizada.
- Utilizar o método dos elementos finitos para realização de simulações, de modo a comprovar seu funcionamento e reduzir os efeitos parasitas.
- Estudo de transformadores planares com mais de dois enrolamentos utilizando placas de circuito impresso multicamadas.
- Comparação de elementos magnéticos planares com convencionais sob o ponto de vista da compatibilidade eletromagnética.

- Realização de um projeto de elemento magnético planar construído com condutores estampados.

REFERÊNCIAS

CIRCUIBRAS, "Capabilidade de fabricação", 2018.

FERROXCUBE COMPONENTS INC. Design of planar power transformers. Application Note. 1997.

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

ERICKSON, R. W. e MAKSIMOVIC, D., Fundamentals of Power Electronics, Springer Science & Business Media, 2007.

MICROPRESS – Circuitos Impressos LTDA, "Capacidade Técnica Padrão / Requisitos para Layout e Especificação de PCI," 2018.

PAYTON PLANAR MAGNETICS, 2013. Disponível em http://www.paytongroup.com/About_Paytons_Planar_Transformer. Acesso em 11/jul/2018.

PHILIPS MAGNETICS PRODUCTS. 25 Watt DC/DC converter using integrated Planar Magnetics. Disponível em <http://ferroxcube.home.pl/appl/info/planconv.pdf>. Acesso em 11/jul/2019

PHILIPS MAGNETICS PRODUCTS. Planar E Cores. Applications Note. 1997.

SOUZA, N. O. Estudo, projeto e implementação de elementos magnéticos com construção planar para aplicação em conversor CC-CC Flyback. Dissertação. Udesc, Joinville, 2018.

TDK, Ferrite cores for switching power supplies – Planar series, 2017. Disponível em https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite_mz_sw_planar_en.pdf. Acesso em 11/jul/2019.

VEGNER, I. G. Projeto e aplicação de indutores planares em conversores eletrônicos. Trabalho de Conclusão de Curso. UFSM, Santa Maria, 2017.

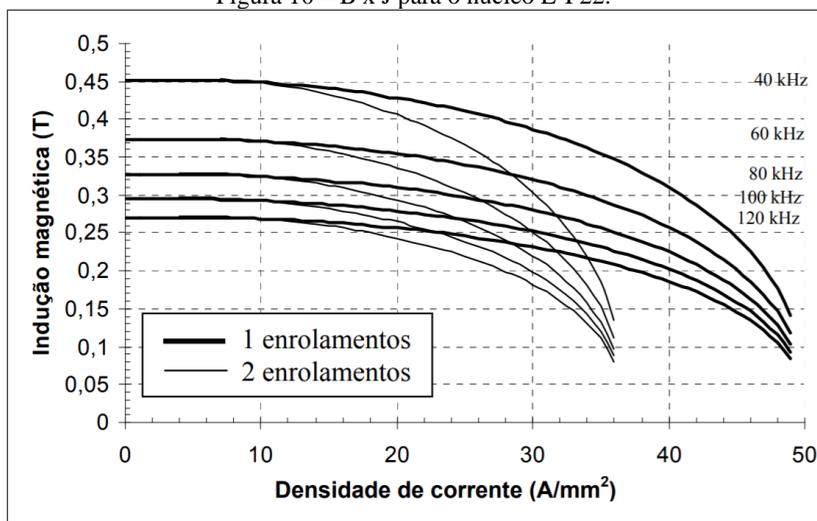
WANG, S. Modeling and Design of Planar Integrated Magnetic Component. Thesis (Master of Science) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2003.

XIAO, S. Planar Magnetics Design for low-voltage dc-dc converters. Thesis (Master of Science) – University of Central Florida, Florida, 2004.

ANEXO A – Gráficos B x J para projeto de indutores e transformadores

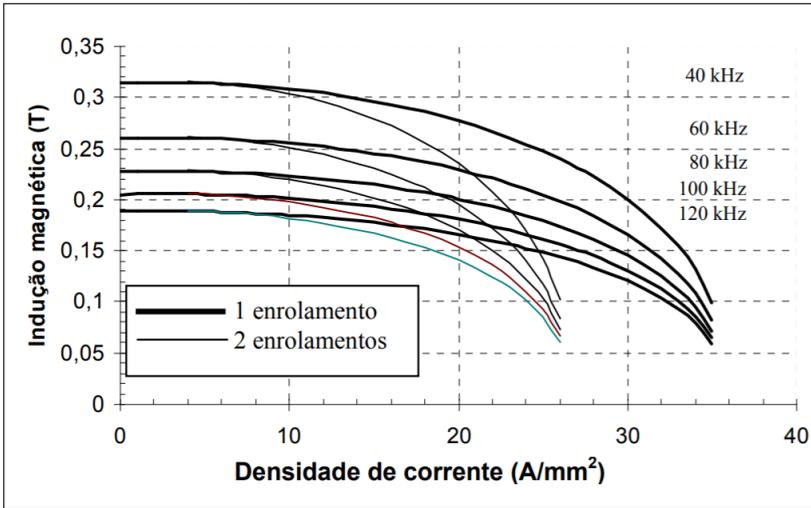
O presente anexo traz os gráficos B x J utilizados na metodologia de projeto apresentada no Capítulo 3. Deve se utilizar as curvas de um enrolamento para os indutores e de dois enrolamentos para os transformadores. A Figura 10 apresenta o gráfico B x J para o núcleo E-I 22. A Figura 11 mostra B x J para o núcleo E-I 38. Finalmente, a Figura 12 traz B x J para o núcleo E-I 64.

Figura 10 – B x J para o núcleo E-I 22.



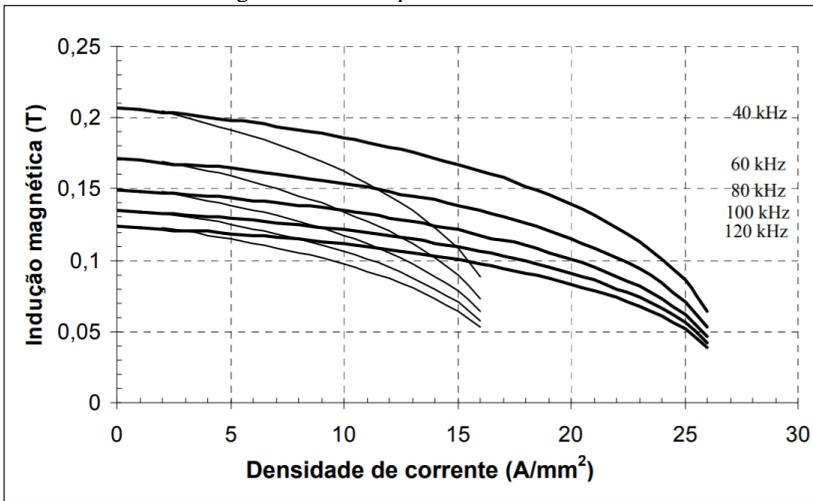
Fonte: EBERT, 2008.

Figura 11 – B x J para o núcleo E-I 38.



Fonte: EBERT, 2008.

Figura 12 – B x J para o núcleo E-I 64



Fonte: EBERT, 2008.