
GUIA DE ESTUDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM -
PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS

PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS

Objetivo de Aprendizagem

Realizar o projeto de indutores para operação em alta frequência.

Objetivos parciais

- Conhecer os princípios do eletromagnetismo;
- Conhecer núcleos para elementos magnéticos;
- Realizar cálculos relacionados com eletromagnetismo;
- Projetar indutores em alta frequência.

Capítulos e aulas relacionadas

Este objetivo de aprendizagem está relacionado ao capítulo 15 da apostila e com a aula 15 disciplina.

Pré-requisitos

Ter estudado e obtido êxito no Objetivo de Aprendizagem 06 – Conversores ca-ca.

Continuidade dos Estudos

O próximo objetivo de aprendizagem será continuar o estudo dos conteúdos transversais, como operação de conversores em malha fechada, dentre outros.

Roteiro para estudos

Os estudos referentes a este objetivo de aprendizagem consistem em:

1. Estudar este documento resumo, realizando as atividades propostas no mesmo;
2. Responder o quiz relacionado a este objetivo de aprendizagem;
3. Caso perceba necessidade, estudar a apresentação deste assunto ou ler os capítulos da apostila da disciplina;
4. Realizar os exercícios deste tópico da matéria;
5. Realizar a avaliação final para progredir ao próximo conteúdo.

Referências

- Material disponibilizado para a disciplina de Eletrônica de Potência I – 2020/1. Departamento Acadêmico de Eletrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.
- Capítulos da apostila de eletrônica de potência, disponível em www.ProfessorPetry.com.br.

Check-list

Caro estudante, verifique se você completou as atividades deste objetivo de aprendizagem e obteve êxito para continuar seus estudos.

Assinale as atividades realizadas:

Estudo do documento resumo:

- Leitura do documento resumo;
- Exercícios do documento resumo;
- Atividade avaliativa do documento resumo.
- Obtive êxito e entendi o conteúdo deste documento;
- Ainda não entendi bem o conteúdo e estudarei o mesmo com mais profundidade.

Estou com dúvidas, irei estudar com mais detalhes este conteúdo:

- Assistir a apresentação relacionada ao conteúdo (apresentação 15);
- Ler os capítulos deste conteúdo na apostila (capítulo 15).

Ainda estou com dúvidas:

- Entrarei em contato com o professor.

Obtive êxito, então seguirei em frente:

- Responder ao quiz deste conteúdo no Moodle;
- Informar ao professor que estou avançando com o conteúdo.

Parabéns, continue estudando com afinco e vamos em frente!!

CONTEÚDO

- OBJETIVO DE APRENDIZAGEM - PROJETO DE ELEMENTOS MAGNÉTICOS

1 Introdução

O conteúdo a ser estudado neste tópico da disciplina está relacionado aos conteúdos transversais do curso, isto é, aqueles conteúdos que são aplicados a todos os grupos de conversores estudados, sejam ca-cc, cc-cc, cc-ca ou ca-ca. Assim, o objetivo aqui será realizar uma revisão das principais grandezas do eletromagnetismo e apresentar a metodologia de projeto de indutores para operação em alta frequência.

1.1 Conteúdo – O que irei estudar

Estudaremos neste tópico:

- Revisão de eletromagnetismo;
- Aspectos do projeto de elementos magnéticos;
- Projeto de indutores para operação em alta frequência.

1.2 Metodologia – O que devo fazer e como fazer

Leia com atenção o conteúdo a seguir. Ao final deste tópico são apresentados exercícios resolvidos. Após são apresentados alguns exercícios propostos.

Ao realizar estas atividades e se sentir confiante para progredir, siga os passos indicados na primeira página deste documento.

Espera-se que após estudar este assunto, você consiga:

- Descrever com suas palavras as principais grandezas do eletromagnetismo;
- Entender os principais aspectos relacionados com o projeto de elementos magnéticos;
- Saber projetar um indutor para operação em alta frequência.

A atividade avaliativa deste objetivo de aprendizagem consistirá em solicitar que o estudante realize o projeto de um indutor para operação em alta frequência, a partir dos dados de projeto apresentados.

Exemplo de atividade avaliativa:

1. Explicar a curva $B \times H$ de um material magnético;
2. Citar aspectos relacionados com o projeto de elementos magnéticos;
3. Dimensionar os elementos de um indutor;
4. Avaliar os resultados do projeto de elementos magnéticos.

2 Eletromagnetismo

2.1 Introdução

O projeto de elementos magnéticos, sejam indutores ou transformadores, para uso em eletrônica de potência, envolve o conhecimento das principais grandezas do eletromagnetismo e das características dos materiais magnéticos.

Assim, neste capítulo será realizada uma breve revisão sobre as principais grandezas do eletromagnetismo e dos principais aspectos relacionados ao projeto de elementos magnéticos.

2.2 Magnetismo Atômico

Os menores elementos magnéticos, do ponto de vista do projeto de indutores e transformadores ou fenômenos mais usuais em eletrônica de potência, são os dipolos magnéticos. Em menor escala, um elétron se apresenta como um dipolo magnético, ou seja, apresenta um polo norte e um polo sul, conforme mostrado na Figura 1.

O próximo nível é o magnetismo atômico, ou seja, a nível de um átomo, que conforme a quantidade de cargas na camada de valência, especialmente, poderá apresentar ou não um momento magnético, isto é, ter um pequeno campo magnético resultante dos dipolos magnéticos de cada elétron que forma o átomo, conforme mostrado na Figura 2.

Finalmente, já a nível de construção de núcleos magnéticos utilizados na implementação de indutores e transformadores se tem os domínios magnéticos, que são pequenas regiões do material, que podem ter orientação preferencial ou não, conforme mostra a Figura 3.

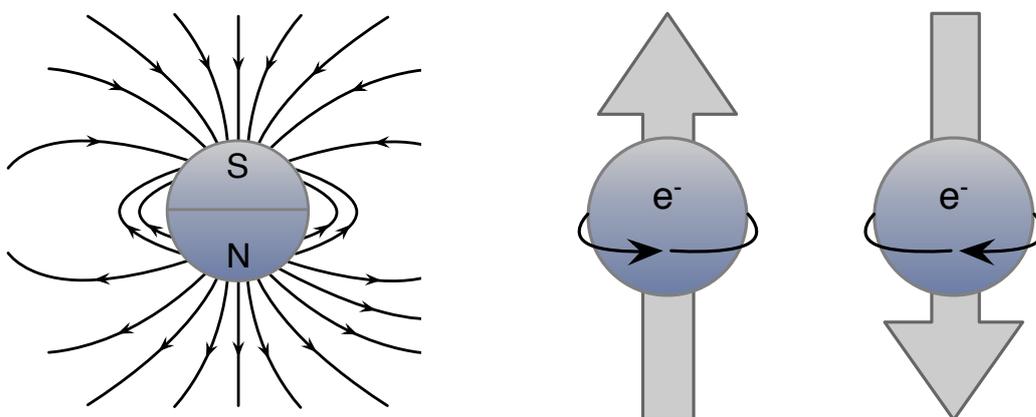


Figura 1 – Dipolos magnéticos.

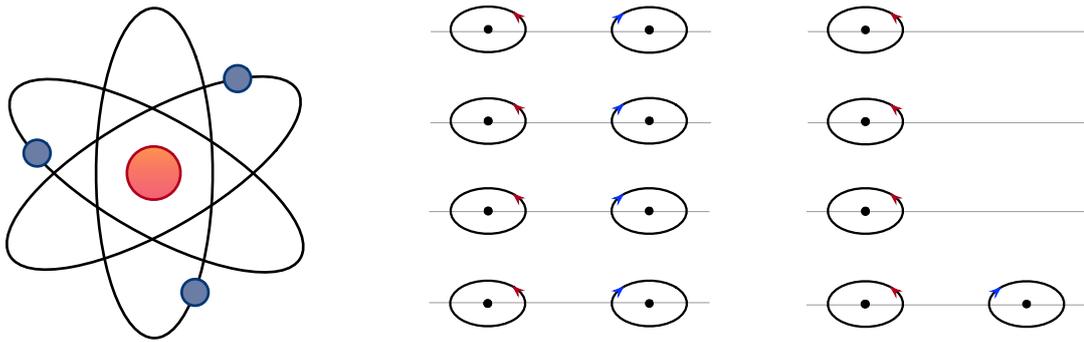


Figura 2 – Magnetismo em um átomo.

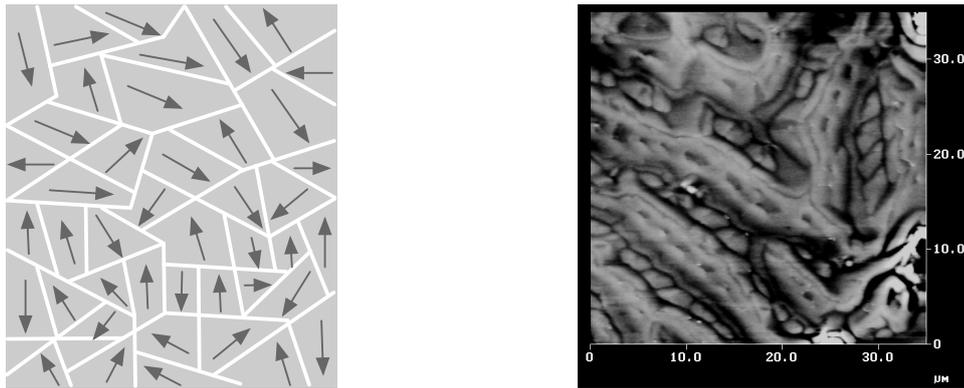


Figura 3 – Domínios magnéticos de um material.

Fonte: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx> e www.geociencias.unam.mx. Acesso em: 28/09/2014.

Os domínios magnéticos são os elementos que constituem o núcleo de um indutor ou transformador, os quais devem ser orientados conforme a direção das linhas de campo magnético, para que em conjunto formem um campo magnético mais intenso ou não. Um ímã é um elemento físico no qual os domínios estão orientados em uma mesma direção, formando assim um campo magnético intenso; por isso se fala que um ímã é um elemento magnetizado. Por outro lado, um material desmagnetizado tem os domínios orientados aleatoriamente, ou seja, sem uma direção preferencial, fazendo com o que o campo magnético resultante seja nulo.

2.3 Campo Magnético

O campo magnético é uma região do espaço onde se tem a presença de fenômenos magnéticos, especificamente linhas de campo, conforme mostrado na Figura 4. O campo pode ser uniforme, conforme as linhas de campo estiverem distribuídas com mesma intensidade e direção, ou não-uniforme, se as linhas de campo estiverem concentradas ou espalhadas, fazendo variar sua intensidade e direção ao longo do espaço.

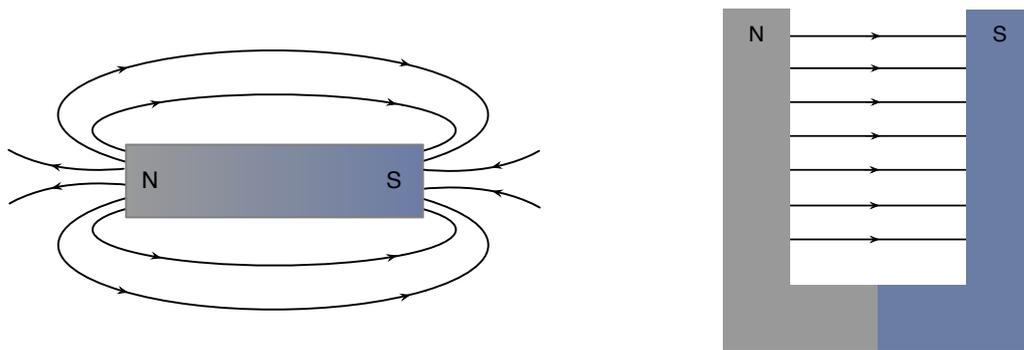


Figura 4 – Campo magnético.

Fonte: (Ramalho, 2006).

Em síntese, o objetivo do núcleo em um elemento magnético é promover a concentração das linhas de campo, fazendo com que as mesmas se limitem ao volume ocupado pelo núcleo.

O campo magnético pode ser originado pela corrente elétrica circulando por um condutor retilíneo, em forma de espira (volta) ou bobina. A diferença é que o campo magnético criado por um pedaço pequeno de condutor, com um delta de comprimento, será pequeno, enquanto que, na medida que se aumentar o comprimento do condutor (somação de vários deltas de comprimento, isto é, somação de pequenos pedaços de comprimento de condutor) se aumentará o campo resultante. Do mesmo modo, se o condutor for enrolado na forma de uma espira (volta), o campo no interior da espira será somado, ou seja, os vetores de campo magnético se somam na parte central da espira, resultando em um campo com maior intensidade e dependente da geometria da espira. Por fim, se for construída uma bobina (ou enrolamento) com diversas espiras, o efeito será novamente de soma, ou seja, o campo resultante será mais intenso conforme se aumentar o número de espiras do indutor construído.

2.4 Densidade de Fluxo Magnético e Fluxo Magnético

A densidade de fluxo (B) é número de linhas de campo por unidade de área. Sua unidade é Tesla [T], onde um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área.

Por sua vez, o fluxo magnético (ϕ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área. Tem como unidade o weber [Wb], sendo que 1 Weber corresponde a 1×10^8 linhas de campo. O fluxo magnético (ϕ) em um área (A) corresponde a densidade de fluxo magnético (B), conforme mostrado na Figura 5.

A densidade de fluxo magnético é obtida por:

$$B = \frac{\phi}{A} \left[T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$

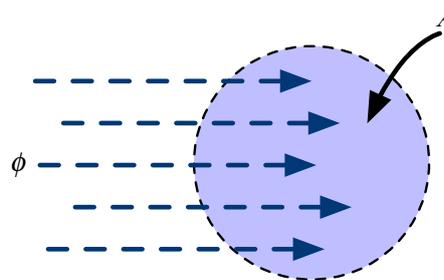


Figura 5 – Fluxo magnético (ϕ) em uma área A.

Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2004).

2.5 Força Magnetizante

A reação do material ao campo magnético é denominada de força magnetizante (H), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético. A Figura 6 mostra diferentes curvas, para diversos diferentes tipos de materiais, onde se observa que a inclinação da curva é altamente dependente do material, significando que se consegue diferentes intensidades de campo magnético (B), para a mesma força magnética (H).

A força magnetizante é calculada por:

$$H \approx (I, N, l) [A / m]$$

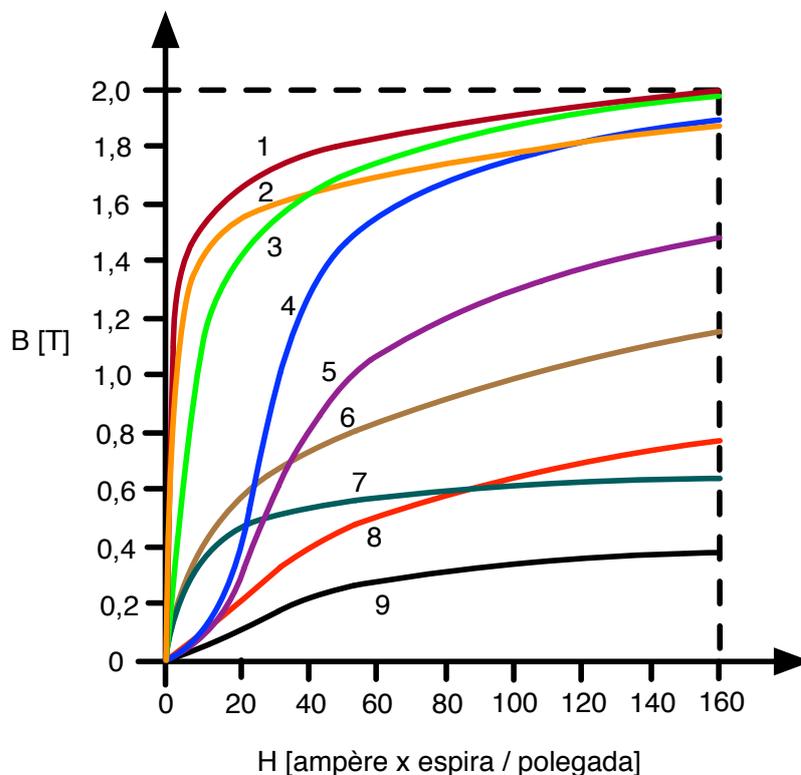


Figura 6 – Curva B x H para diferentes materiais (1 – chapa de aço, 2 – aço silício, 3 – aço fundido, 4 – aço tungstênio, 5 – aço magnético, 6 – ferro fundido, 7 – níquel, 8 – cobalto, 9 – magnetita).

Fonte: Adaptado de (Wikipédia, 2014).

A inclinação da curva pode ser alterada e ajustada usando-se diferentes materiais para construir o núcleo magnético ou então inserindo-se elementos diferentes no caminho magnético, alterando assim a relutância magnética. Deste modo, quando for realizado o projeto do elemento magnético, será calculado o entreferro, que é uma distância entre dois elementos ferromagnéticos (núcleo) onde se coloca material sem propriedades magnéticas, como por exemplo papel, plástico, fenolite, etc.

Ao observar as curvas da Figura 6 nota-se que para forças magnéticas de grande amplitude, a curva de resposta do material muda de inclinação, entrando em uma região onde se aumenta a força (H) e o campo (B) não aumenta mais; neste caso, o material magnético saturou, ou seja, todos os domínios magnéticos foram orientados. Em termos práticos, se for um indutor, por exemplo, se ocorrer a saturação significa dizer que a indutância tenderá a zero, então o indutor não apresentará mais reatância indutiva, mas apenas a resistência ôhmica do fio utilizado para enrolar as espiras do mesmo. Se este indutor estiver sendo utilizado em um conversor cc-cc, então a corrente elétrica irá aumentar, pois nestes conversores, a taxa de crescimento (derivada) da corrente elétrica é dada pela relação entre a tensão sobre indutor pela indutância ($i = V / L$); implicando que se a indutância tende a zero, a corrente tenderá a infinito.

2.6 Permeabilidade Magnética

A relação entre a densidade de campo magnético (B) e a força magnética (H) é denominada de permeabilidade magnética. A classificação dos materiais é realizada conforme sua permeabilidade magnética, ou seja, seu comportamento quando imerso em um campo magnético, concentrando ou não as linhas de campo.

A permeabilidade magnética é dada por:

$$\mu = \frac{B}{H} \left[\frac{Wb}{A / m} \right]$$

Os materiais são classificados em relação a permeabilidade do vácuo, como sendo:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o$$

$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A / m}$$

A permeabilidade dos materiais pode variar muito, como está mostrado na Tabela 1, onde o uso de materiais com maior permeabilidade relativa implica em menor volume e peso, pois se obterá a mesma indutância com um número de espiras muito menor. A grosso modo, comparando ar com ferrite, pode-se estimar que seriam necessárias 2.000 espiras para obter a mesma

indutância caso se utilize como núcleo o ar, ao invés do ferrite. Em contrate, os materiais elaborados a partir das terras raras, tem permeabilidades muito altas, como o permalloy, por exemplo.

Tabela 1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais.

Material	Permeabilidade relativa (μ_r)
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000

O comportamento da curva $B \times H$ de um material é mostrado na Figura 7. Esta curva é conhecida como curva de histerese, pois mostra que a curva de magnetização e desmagnetização do material são diferentes. Isso ocorre porque ao diminuir a corrente elétrica (força magnética H), os domínios devem ficar desorientados, ou seja, orientados de maneira aleatória; no entanto, alguns domínios permanecem orientados, fazendo com que mesmo com corrente zero (força H nula), o campo (B) resultante não seja zero, denotando a presença de magnetismo residual ou remanescente. Assim, a curva $B \times H$ forma um laço, chamado de laço de histerese, e representa a energia necessária para orientar e desorientar os domínios magnéticos.

Em comparação com a curva da Figura 7, o ar tem a curva na forma de reta, sem apresentar o efeito de saturação e de magnetismo residual.

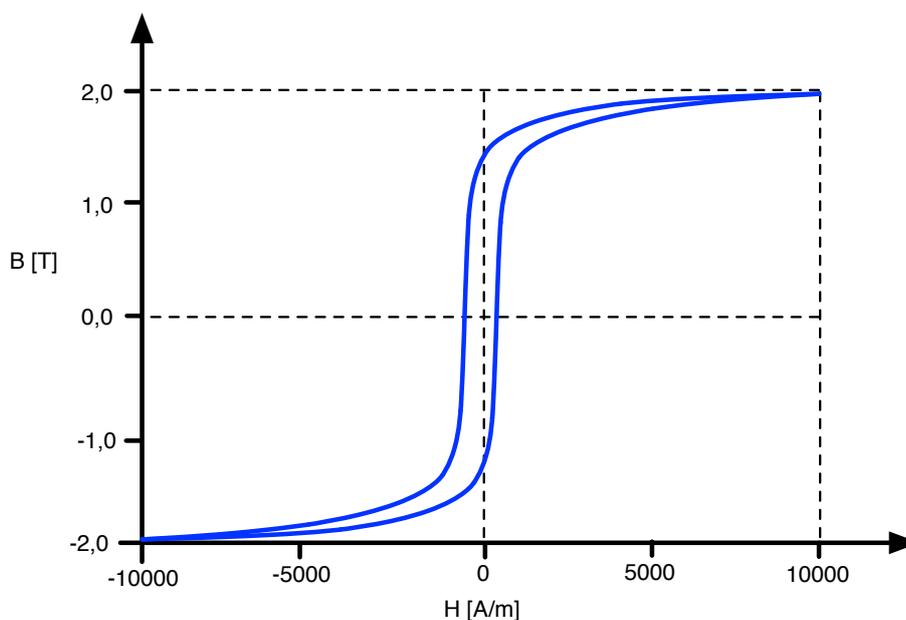


Figura 7 – Curva $B \times H$ (histerese) de um material magnético.

Fonte: Adaptado de (Boylestad, 2004).

A Figura 8 apresenta a curva B x H de materiais magnéticos utilizados para implementação de indutores e transformadores de alta frequência. Nota-se na figura que a curva é alterada pela temperatura do material, devendo-se evitar temperaturas acima de 140 °C, pois a permeabilidade é alterada significativamente e logo acima de 160 °C se tem a temperatura de Curie, onde a permeabilidade tende a zero, ou seja, o material perde suas propriedades magnéticas.

A partir da Figura 8, costuma-se utilizar para projeto a curva para temperatura de 80 °C, colocando-se o ponto de operação na região abaixo de 4 Oe de força magnetizante, para evitar a saturação do elemento magnético.

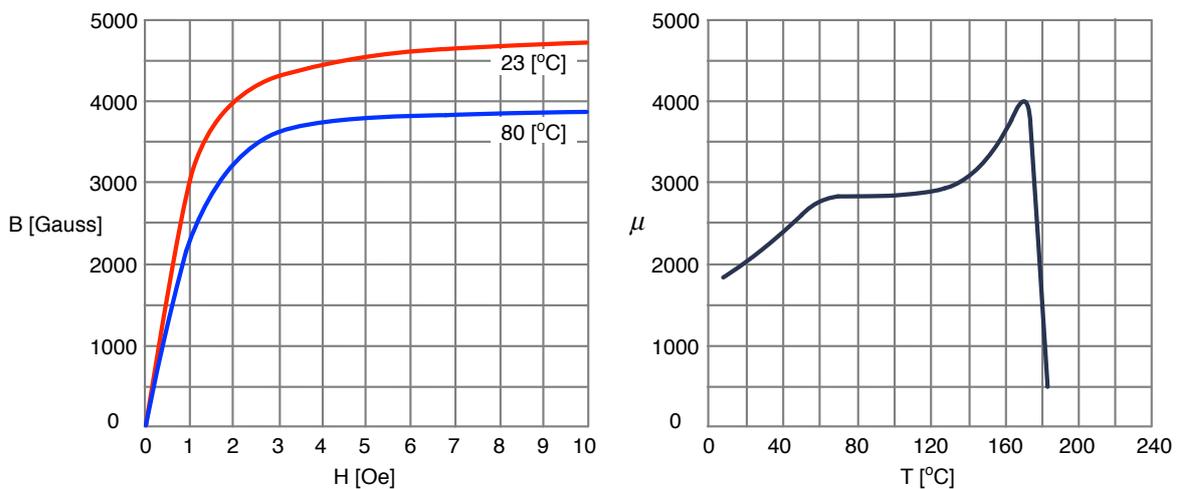


Figura 8 – Curva B x H para ferrites.

Fonte: Adaptado de <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 23/09/2020.

3 Aspectos de Elementos Magnéticos

3.1 Introdução

Alguns aspectos relevantes para o projeto de elementos magnéticos serão abordados aqui, como tipos de núcleos, perdas magnéticas e escolha dos condutores.

3.2 Tipos de Núcleos Magnéticos

Os núcleos magnéticos mais utilizados em eletrônica de potência são ferro sílcio, ferrite e pós-metálicos. A Figura 9 mostra alguns exemplos dos diferentes materiais utilizados como núcleos magnéticos, onde se nota que o núcleo de ferrite é do tipo E, enquanto o núcleo de pós-metálicos é do tipo toroidal.

A escolha do núcleo é realizada em função da frequência de operação do elemento magnético e das perdas no núcleo, pois a medida que a frequência aumenta as perdas aumentam.

Assim, em baixas frequências (da ordem de 60 Hz), se utilizam núcleos de ferro-silício, que possuem alta permeabilidade, mas tem maiores perdas em alta frequência inviabilizando seu uso em conversores cc-cc, por exemplo. Por outro lado, em baixas frequências não é vantajoso usar núcleos de ferrite, pois estes tem permeabilidade menor que os núcleos de ferro-silício. Já em altas frequências se utilizam os núcleos de ferrite e pós-metálicos, que tem permeabilidade menor que o ferro-silício, mas apresentam menores perdas em alta frequência.

Em síntese, os materiais aqui apresentados podem ser utilizados em baixas e altas frequências, no entanto, a escolha do material certo levará a um projeto com menor peso e volume, implicando também em redução de custo e conseqüentemente um produto final mais competitivo.



núcleo de ferro-silício

núcleos de ferrite

núcleos de pós-metálicos

Figura 9 – Tipos de núcleos magnéticos.

Fonte: <http://www.tessin.com.br>; <http://www.thornton.com.br> e <http://www.magmattec.com>.

Acesso em: 22/09/2020.

3.3 Perdas nos Elementos Magnéticos

As perdas em um elemento magnético, por exemplo um indutor ou transformador, serão no núcleo e no enrolamento, sendo conhecidas como perdas no núcleo e perdas no fio.

As perdas no núcleo se devem a energia necessária para orientar os domínios magnéticos durante as fases de magnetização e desmagnetização do núcleo e também devido as correntes parasitas, pois se o núcleo for de material condutor ou semi-condutor, se terá correntes induzidas no mesmo e conseqüentemente circulação de corrente e efeito Joule, provocando também aquecimento no material magnético.

As espiras que constituem o enrolamento (bobinado) do dispositivo magnético (indutor, transformador, motor, relé, etc.) terão resistência ôhmica e dissiparão potência na forma de calor, devido ao efeito Joule que irá ocorrer em função da circulação das cargas elétricas nos condutores.

Assim, em síntese se tem que as perdas em um dispositivo magnético são:

- Perdas no enrolamento – perdas por efeito Joule nos condutores (espiras);

- Perdas no núcleo:
 - Perdas por histerese – perdas para a orientação dos domínios magnéticos;
 - Perdas por correntes parasitas – perdas por efeito Joule pela indução de correntes no próprio núcleo.

3.4 Escolha dos Condutores

A escolha dos condutores para a construção do elemento magnético não é apenas realizada em função da corrente que irá circular pelo mesmo.

O campo magnético produzido nas espiras do elemento magnético origina o efeito de proximidade, que representa a força a qual as cargas elétricas ficam submetidas devido às espiras que estão próximas a esta. Em correntes da ordem de centenas de ampères o efeito de proximidade se torna significativo e deve ser levado em conta.

Por sua vez, o efeito pelicular (*skin*) faz com que a corrente se concentre na periferia do condutor quando se opera em frequências altas. Este efeito restringe a secção do condutor para frequências elevadas. O efeito pelicular restringe a área útil do condutor em relação à frequência de operação. Isso significa que se deve utilizar condutores com secção menor do que a profundidade de penetração da corrente, dada pela expressão a seguir, que especifica o raio máximo que o condutor deverá possuir para que a corrente ocupe toda a sua área útil.

O raio, medida que representa até que parte do condutor a corrente irá penetrar, é dado por:

$$r \approx \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} \text{ [cm]}$$

Assim, o diâmetro do condutor será obtido por:

$$D = 2 \cdot r = 2 \cdot \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{15}{\sqrt{F_s}}$$

Deste modo, a escolha do condutor deve levar em conta inicialmente a frequência de operação e em seguida a corrente que irá fluir pelo elemento. Assim, escolhe o condutor em função da frequência de operação, consultando uma tabela de fios de cobre ou alumínio, e em seguida, define-se, em virtude da corrente que irá circular pelo elemento, a quantidade de fios em paralelo, caso seja necessário.

4 Projeto de Indutores

4.1 Introdução

O projeto de indutores consiste em escolher o núcleo adequado para o elemento magnético, determinar o número de espiras e escolher a área dos condutores a serem utilizados.

Em termos de núcleo, os indutores podem ser com núcleo de ar, ferro-silício, pós-metálicos ou ferrite. Apresentaremos a seguir o procedimento de projeto para indutores com núcleo de ar e de ferrite, neste último para o formato toroidal e EE.

4.2 Indutores com Núcleo de Ar

A indutância de um indutor com núcleo de ar é dada por:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l}$$

Esta expressão é válida quando o comprimento do indutor é em torno de dez vezes superior ao seu diâmetro. Caso isso não aconteça, o erro no valor calculado será significativo.

O número de espiras será:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

O diâmetro e a área de um condutor circular serão:

$$D_{\text{fio}} = 2 \cdot r_{\text{fio}}$$

$$A_{\text{fio}} = \pi \cdot r_{\text{fio}}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{fio}}}{2}\right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{fio}}^2}{4}$$

O comprimento do elemento será dado em função do diâmetro do fio e do número de espiras:

$$l = N \cdot D_{\text{fio}}$$

A área do núcleo será:

$$A_{\text{nucleo}} = \pi \cdot r_{\text{nucleo}}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{nucleo}}}{2}\right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{nucleo}}^2}{4}$$

Assim:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot \left(\pi \cdot \frac{D_{nucleo}^2}{4} \right)}{N \cdot D_{fio}} = \frac{N \cdot \mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2}{D_{fio} \cdot 4}$$

$$N = \frac{L \cdot D_{fio} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2}$$

Deste modo, para uma dada indutância L , frequência e corrente, deve-se escolher inicialmente o condutor (D_{fio}), especificando também o diâmetro do núcleo (D_{nucleo}). A seguir determina-se o número de espiras.

É interessante verificar se o comprimento resultante é bem maior do que a área do núcleo, visando determinar a validade da expressão utilizada para o cálculo da indutância do indutor.

As perdas por efeito Joule são obtidas calculando o comprimento do condutor.

$$l_{fio} = 2\pi \cdot r_{nucleo} \cdot N = 2\pi \cdot \frac{D_{nucleo}}{2} \cdot N = \pi \cdot D_{nucleo} \cdot N \text{ [m]}$$

A resistência será:

$$R_{fio} = \rho \cdot l_{fio} \cdot 100 \text{ [\Omega]}$$

O multiplicador 100 na expressão anterior serve para ajustar a resistividade para metros.

Assim, a potência dissipada no enrolamento será:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 \text{ [W]}$$

4.3 Indutores com Núcleo Toroidal

A Figura 10 mostra o aspecto e dimensões de um núcleo toroidal, que será a base para o projeto do mesmo. O condutor será escolhido conforme foi visto anteriormente, levando-se em conta a frequência de operação e a corrente que irá circular pelo indutor.

O fabricante de núcleos toroidais fornece um fator de relação entre o número de espiras e a indutância, denominado de Al :

$$Al = \frac{L}{N^2} \text{ [nH]}$$

Assim, o número de espiras é calculado em função da indutância desejada:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}}$$

A seguir deve-se verificar se a área interna do núcleo é suficiente para acomodar o número de espiras calculado. As dimensões do núcleo são mostradas na Figura 10.

A área do núcleo será:

$$A_{nucleo} = \pi \cdot r_{nucleo}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{nucleo}}{2} \right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4} [cm^2]$$

A área ocupada pelas espiras será:

$$A_{enrolamento} = A_{fio_isol} \cdot N [cm^2]$$

Portanto, o fator de ocupação, que é a relação entre a área disponível e a área ocupada pelos condutores será:

$$FO = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}}$$

Na prática este fator de ocupação deve ser da ordem de 40%, visto que os condutores são cilíndricos e sua acomodação na parte interna no núcleo não é uniforme.

Pode-se também determinar as perdas por efeito Joule, calculando o comprimento do condutor, com auxílio da Figura 10.

$$l_{fio} = N \cdot [2 \cdot (D - d) + 2 \cdot h] [m]$$

A resistência será:

$$R_{fio} = \rho \cdot l_{fio} \cdot 100 [\Omega]$$

O multiplicador 100 na expressão anterior serve para ajustar a resistividade para metros.

Assim, a potência dissipada no enrolamento será:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 [W]$$

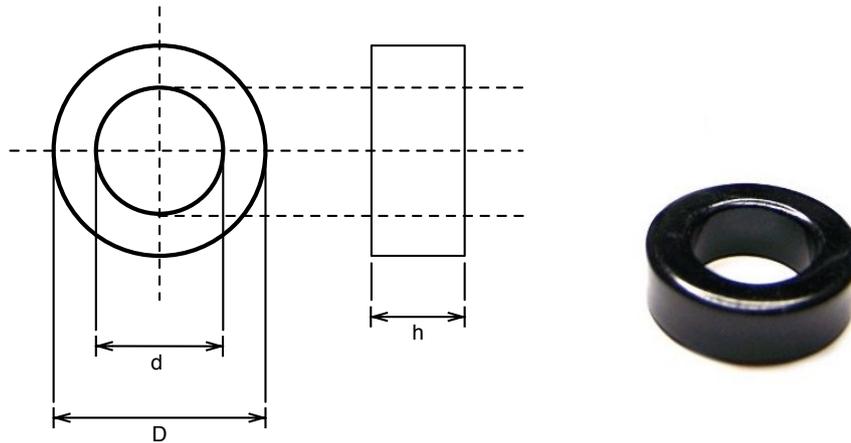


Figura 10 – Dimensões de um núcleo toroidal.

Fonte: <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 29/09/2014.

4.4 Indutores com Núcleo EE

A Figura 11 mostra o formato e dimensões do núcleo e carretel do tipo EE, onde se nota que o carretel é o elemento onde serão acomodadas as espiras do indutor.

O núcleo tem uma área denominada de A_e , ou área da perna central. Já o carretel tem uma área útil (onde ficará alojado o enrolamento) denominada de A_w , ou área da janela.

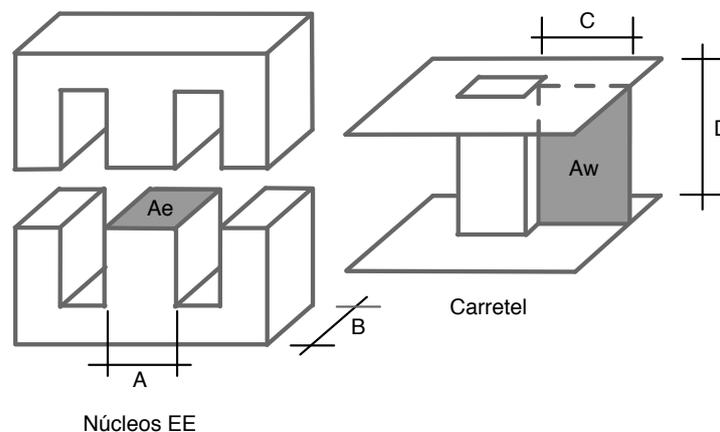


Figura 11 – Núcleo e carretel com formato EE.

Fonte: Adaptado de (Barbi, 2007).

O projeto é iniciado pela especificação de alguns parâmetros que devem ser conhecidos, quais sejam:

- L – indutância do elemento;
- F_s – frequência de operação do indutor;
- $I_{L(pk)}$ – corrente de pico (máxima no indutor);
- $I_{L(ef)}$ – corrente eficaz no indutor;

- ΔI_L – ondulação (*ripple*) de corrente no indutor;
- k – fator de utilização do enrolamento, em geral 70%;
- J – densidade de corrente para os condutores, em geral 450 A/cm²;
- B – densidade de fluxo máximo, que depende do núcleo escolhido. Para o núcleo do fabricante Thornton, com as curvas mostradas na Figura 8, usa-se o valor de 0,35 T, conforme mostrado na Figura 12;
- $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb} / \text{A} / \text{m}$ – permeabilidade do vácuo.

Inicialmente determina-se o produto de áreas para o núcleo, que permitirá a sua escolha:

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot I_{L(ef)} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} \left[\text{cm}^4 \right]$$

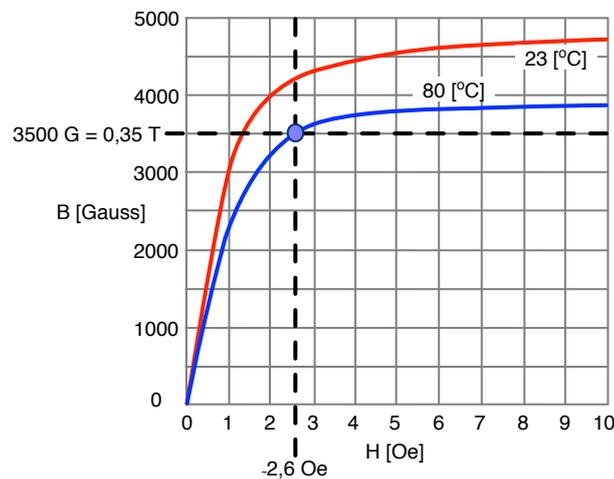


Figura 12 – Ponto de operação na curva $B \times H$ de ferrites.

Fonte: Adaptado de <http://www.thornton.com.br>. Acesso em: 23/09/2020.

O núcleo pode ser escolhido no sítio do fabricante ou pela Tabela 2, que apresenta alguns núcleos do tipo EE do fabricante Thornton.

Tabela 2 – Alguns núcleos EE do fabricante Thornton.

Núcleo	A_e [cm ²]	A_w [cm ²]	l_e [cm]	l_t [cm]	V_e [cm ³]	$A_e A_w$ [cm ²]
E-20	0,31	0,26	4,28	3,8	1,34	0,08
E-30/7	0,60	0,80	6,7	5,6	4,00	0,48
E-30/14	1,20	0,85	6,7	6,7	8,00	1,02
E-42/15	1,81	1,57	9,7	8,7	17,10	2,84
E-42/20	2,40	1,57	9,7	10,5	23,30	3,77
E-55	3,54	2,50	1,2	11,6	42,50	8,85

Fonte: (Barbi, 2007).

A seguir calcula-se o número de espiras do indutor:

$$N = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot 10^4}{B \cdot A_e}$$

O entreferro será dado por:

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

A variação de densidade de fluxo, causada pela variação (*ripple*) na corrente será:

$$\Delta B = B \frac{\Delta I_L}{I_{L(pk)}}$$

As perdas no núcleo podem ser determinadas, considerando os fatores empíricos:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2.4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e$$

Em seguida escolhe-se o condutor, levando em conta a profundidade de penetração, dependente da frequência de operação.

A resistência dos condutores do enrolamento será determinada pela expressão a seguir, onde N_{fios} é o número de fios em paralelo para atender ao critério da corrente de condução.

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho}{N_{fios}} \cdot l_t$$

Assim, as perdas no fio serão:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 [W]$$

A perda total no indutor será:

$$P = P_{nucleo} + P_{fio}$$

Pode-se então calcular a elevação de temperatura do elemento magnético:

$$R_{ter} = 23 \cdot (AeAw)^{-0.37} [^{\circ}C/W]$$

$$\Delta T = R_{ter} \cdot P [^{\circ}C]$$

Finalmente pode-se determinar o fator de ocupação e verificar se é possível construir o indutor projetado.

A área ocupada pelas espiras será:

$$A_{\text{enrolamento}} = A_{\text{fio_isol}} \cdot N_{\text{fios}} \cdot N \left[\text{cm}^2 \right]$$

Portanto, o fator de ocupação será:

$$FO = \frac{A_{\text{enrolamento}}}{A_{\text{nucleo}}}$$

Na prática este fator de ocupação deve ser da ordem de 70% ou menos, para que seja possível construir o elemento magnético.

5 Exercícios

Exercícios Resolvidos

ER 01. Comente sobre as perdas nos elementos magnéticos.

As perdas nos elementos magnéticos ocorrem no núcleo e nos condutores. No núcleo se tem as perdas por correntes parasitas e por histerese, enquanto nos condutores se tem as perdas por efeito Joule.

ER 02. Como deve ser determinada a área dos condutores de um elemento magnético.

A área da seção transversal dos condutores é definida, inicialmente calculando o diâmetro máximo do condutor, em função da frequência de operação, levando em conta o efeito pelicular (*skin*). A seguir, em virtude da corrente elétrica que irá circular pelo elemento se determina a quantidade de fios em paralelo, se for o caso.

ER 03. Projete um indutor com núcleo de ar para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:

- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento.

Inicialmente deve-se determinar o diâmetro do condutor máximo em virtude da frequência de operação, que será:

$$D_{\text{fio(max)}} = \frac{15}{\sqrt{F_s}} = \frac{15}{\sqrt{50k}} = 0,067 \text{ cm}$$

Consultando uma tabela de fios de cobre se verifica que o fio poderá ser o 22 AWG ou mais fino.

Escolhendo então o fio 22 AWG, se tem:

- $D_{\text{fio}} = 0,064 \text{ cm}$ – diâmetro do fio;
- $A_{\text{fio}} = 0,003255 \text{ cm}^2$ – área do fio;
- $D_{\text{fio(isolado)}} = 0,071 \text{ cm}$ – diâmetro do fio isolado;
- $A_{\text{fio(isolado)}} = 0,004013 \text{ cm}^2$ – área do fio isolado;
- $\rho@20 \text{ }^\circ\text{C} = 0,000530 \text{ } \Omega/\text{cm}$ – resistividade do fio em $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- $I@450 \text{ A/cm}^2 = 1,465 \text{ A}$ – densidade de corrente.

Nota-se que a corrente que o condutor 22 AWG suporta é de 1,465 A, enquanto o projeto especifica uma corrente de 3 A. Assim, serão necessários condutores em paralelo para suportar a corrente de projeto. O número de fios em paralelo será:

$$N_{\text{fios}} = \frac{I_{\text{proj}}}{I_{\text{fio(escolhido)}}} = \frac{3}{1,465} = 2,05 \cong 2 \text{ fios}$$

Escolhendo um diâmetro para o núcleo com 1 cm, que é a espessura de uma caneta ou lápis, aproximadamente, pode-se determinar o número de espiras:

$$N = \frac{L \cdot D_{\text{fio}} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{\text{núcleo}}^2} = \frac{1\text{m} \cdot 2 \cdot 0,064\text{cm} \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (1\text{cm})^2} \cong 12969 \text{ espiras}$$

O diâmetro do fio foi multiplicado por 2, visto se usarem dois fios em paralelo.

Note que este número de espiras é muito elevado, tornando impraticável construir o indutor com estas características. Se o diâmetro do núcleo for aumentado para 10 cm, então o número de espiras será de 129,69, ou seja, em torno de 130 espiras, o que tornaria o projeto factível, mas ocupando uma área significativa.

ER 04. Projete um indutor com núcleo de ferrite toroidal para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:

- Núcleo a ser usado;
- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento;
- Fator de ocupação.

Os dados do projeto são semelhantes ao exercício resolvido 03, alterando-se o tipo de núcleo, a

título de comparação. Assim, o fio escolhido e número de fios em paralelo será o mesmo.

Consultando um catálogo de núcleos toroidais, do fabricante Thornton, por exemplo, se pode escolher entre diversos diâmetros de núcleos. Iniciando o projeto pela escolha do núcleo modelo NT-10/5/6,5-2400-IP12 que tem um Al de 2400 nH; o número de espiras será:

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} = \sqrt{\frac{1m}{2400n}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{2400 \cdot 10^{-9}}} = 20,4 \cong 21 \text{ espiras}$$

A área deste núcleo é:

$$A_{nucleo} = \frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (10mm)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1cm)^2}{4} = 0,785cm^2$$

Já a área ocupada pelas espiras será:

$$A_{enrolamento} = N_{fios} \cdot A_{fio(isolado)} \cdot N = 2 \cdot 0,003255 \cdot 21 = 0,137cm^2$$

Assim, o fator de ocupação será:

$$F_o = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}} = \frac{0,137}{0,785} = 0,174 = 17,4\%$$

Conclui-se que o núcleo escolhido foi grande demais, ou seja, pode-se escolher um núcleo com menor diâmetro, pois se está ocupando apenas 17,4% de sua área disponível. A rigor, deve-se refazer o projeto com um novo núcleo, que permita obter um fator de ocupação da ordem de 40%.

ER 05. Projete um indutor com núcleo de ferrite tipo EE para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:

- Núcleo a ser usado;
- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento;
- Perdas no indutor;
- Fator de ocupação.

Os dados do projeto são semelhantes ao exercício resolvido 03, alterando-se o tipo de núcleo, a título de comparação. Assim, o fio escolhido e número de fios em paralelo será o mesmo.

Inicialmente se calcula o produto de áreas do núcleo:

$$AeAw = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot I_{L(ef)} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} = \frac{1m \cdot 3 \cdot 3 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,35 \cdot 450} = 0,816cm^4$$

A corrente de pico foi considerada igual a eficaz, visto não ter sido fornecida nos dados do projeto. O fator de utilização (k) foi utilizado como 70%. A densidade de fluxo máximo de 0,35, conforme a Figura 8. A densidade de corrente foi de 450 A/cm².

A partir do valor obtido para o produto de áreas do núcleo, consultando a Tabela 2, pode-se escolher o núcleo modelo E-30/14, que tem os seguintes dados:

- $A_e = 1,20 \text{ cm}^2$ – área da perna central do núcleo;
- $A_w = 0,85 \text{ cm}^2$ – área da perna central do núcleo;
- $l_e = 6,7 \text{ cm}$ – comprimento da espira;
- $l_t = 1,20 \text{ cm}^2$ – comprimento médio da espira;
- $V_e = 8,00 \text{ cm}^3$ – volume do núcleo;
- $A_e A_w = 1,02 \text{ cm}^4$ – produto de áreas do núcleo.

A seguir pode-se calcular o número de espiras:

$$N = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{1 \text{ m} \cdot 3 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 71,43 \cong 72 \text{ espiras}$$

A variação da densidade de fluxo, considerando uma ondulação de corrente de 20%, será:

$$\Delta B = B \cdot \frac{\Delta I_L}{I_{L(pk)}} = 0,35 \cdot \frac{0,2 \cdot 3}{3} = 0,07 \text{ T}$$

Assim, as perdas no núcleo serão:

$$K_H = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$K_E = 4 \cdot 10^{-10}$$

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e = 0,07^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 50k + 4 \cdot 10^{-10} \cdot (50k)^2) \cdot 8 = 0,0406 \text{ W}$$

A resistência dos condutores do enrolamento será:

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho}{N_{fios}} \cdot l_t = 72 \cdot \frac{0,000530}{2} \cdot 1,20 = 0,023 \Omega$$

As perdas nos condutores serão:

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{L(ef)}^2 = 0,023 \cdot 3^2 = 0,21 \text{ W}$$

As perdas totais no indutor serão:

$$P = P_{nucleo} + P_{fio} = 0,0406 + 0,21 = 0,25 \text{ W}$$

Pode-se determinar a elevação de temperatura por:

$$R_{ter} = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (1,02)^{-0,37} = 22,83 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$\Delta T = R_{ter} \cdot P = 22,83 \cdot 0,25 = 5,72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nota-se que a elevação de temperatura é pequena, não afetando o funcionamento adequado do elemento magnético.

Por fim, vamos determinar a área ocupada pelos condutores e o fator de ocupação:

$$A_{enrolamento} = N_{fios} \cdot A_{fio(isolado)} \cdot N = 2 \cdot 0,003255 \cdot 21 = 0,137 \text{ cm}^2$$

$$F_o = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}} = \frac{0,137}{0,85} = 0,161 = 16,1\%$$

Exercícios Propostos

EP 01. Explique o que é saturação de um elemento magnético.

EP 02. Comente sobre a curva de histerese de um núcleo e sua influência nas perdas do mesmo.

EP 03. Projete um indutor com núcleo de ar para operar com frequência de 10 kHz, corrente eficaz de 1 A e que tenha indutância de 100 μH .

EP 04. Projete um indutor com núcleo de ferrite e formato toroidal para operar com frequência de 10 kHz, corrente eficaz de 1 A e que tenha indutância de 100 μH .

EP 05. Projete um indutor com núcleo de ferrite e formato EE para operar com frequência de 10 kHz, corrente eficaz de 1 A e que tenha indutância de 100 μH .

6 Atividade Avaliativa

6.1 Introdução – O que preciso saber

Ao final deste objetivo de aprendizagem são apresentadas cinco questões, que devem ser respondidas sem consultar o material. Se você conseguir responder as questões e conferir as respostas com o gabarito abaixo, parabéns, você concluiu com êxito este tópico. Caso tenha errado alguma questão, revise o conteúdo relacionado com a mesma e refaça a questão, procurando se concentrar mais desta vez, para acertar a mesma e fixar bem o conteúdo.

AA 01. O que são domínios magnéticos?

AA 02. Cite as perdas nos elementos magnéticos.

AA 03. Considerando núcleos magnéticos de ferro-silício e ferrite, qual deles é utilizado em baixas frequências e qual deles em altas frequências?

AA 04. Um indutor com núcleo de ar foi projetado, obtendo-se um número de 500 espiras. Se neste elemento for usado um núcleo de ferrite, qual será, a grosso modo, o novo número de espiras?

AA 05. Explique o que é o efeito pelicular e como o mesmo afeta o projeto de elementos magnéticos.

AA 01. Domínios magnéticos são pequenas regiões de material do núcleo magnético, que se orientam ou desorientam conforme o campo magnético no qual estão imersos.

AA 02. As perdas nos elementos magnéticos ocorrem nos condutores do enrolamento e no núcleo. No enrolamento se tem as perdas por efeito Joule nos fios; já no núcleo se tem as perdas por correntes parasitas e as perdas por histérese.

AA 03. Os núcleos de ferro-silício são usados em baixa frequência, enquanto que os núcleos de ferrite são empregados em altas frequências.

AA 04. A permeabilidade do ferrite é em torno de 2000 vezes maior que a do ar; então o novo número de espiras seria de $500 / 2000 = 0,25$ espiras; isto é, se precisaria de $\frac{1}{4}$ de espira apenas.

AA 05. O efeito pelicular ou *skin* faz com que as cargas elétricas se concentrem nas bordas/superfície do material na medida que a frequência da corrente elétrica aumenta. Assim, a escolha dos condutores do enrolamento dos elementos magnéticos deve levar em conta o efeito pelicular, ou seja, a frequência de operação.