



INSTITUTO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Departamento de Engenharia Elétrica

Centro Tecnológico



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROJETO FÍSICO DE INDUTORES E TRANSFORMADORES

Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

Eng. Carlos Henrique Illa Font, Mestrando

Eng. Ricardo Luiz Alves, Mestrando

MARÇO/2002

Caixa Postal 5119 – CEP 88040-970 – Florianópolis – SC

Tel. : (0xx48) 331-9204 – Fax: (0xx48) 234-5422 – Internet: www.inep.ufsc.br

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	2
2 – NÚCLEOS DE FERRITE DO TIPO E.....	2
3 – PROJETO FÍSICO DE INDUTORES.....	3
3.1 – Escolha do Núcleo Adequado	3
3.2 – Número de Espiras	5
3.3 – Entreferro.....	6
3.4 – Cálculo da Bitola dos Condutores	8
3.5 – Cálculo da Elevação de Temperatura	8
3.5.1 – Perdas no Cobre	9
3.5.2 - Perdas Magnéticas.....	9
3.5.3 – Resistência Térmica do Núcleo.....	9
3.5.4 – Elevação de Temperatura	9
3.6 – Possibilidade de Execução.....	10
4 – PROJETO FÍSICO DE TRANSFORMADORES.....	10
5 – BIBLIOGRAFIA	10

1 – INTRODUÇÃO

O sucesso na construção e no perfeito funcionamento de um conversor CC-CC está intimamente ligado com um projeto adequado dos elementos magnéticos.

O grande problema reside no fato de que transformadores e indutores operando em alta frequência inserem no circuito de potência uma série de elementos parasitas (não-idealidades), tais como: indutância magnetizante, indutância de dispersão, capacitâncias entre enrolamentos, capacitâncias entre espiras, etc.

Tais elementos parasitas se refletem em resultados indesejáveis no funcionamento do conversor. Os resultados mais comumente observáveis são picos de tensão nos semicondutores, altas perdas e emissão de ruídos (interferência eletromagnética conduzida e irradiada).

2 – NÚCLEOS DE FERRITE DO TIPO E

O objetivo do núcleo magnético é fornecer um caminho adequado para o fluxo magnético.

Entre os tipos de material utilizados na construção de núcleos destacam-se o ferrite e as lâminas de ferro-silício. Em operações em baixas frequências as lâminas de ferro-silício são mais adequadas, porém, com o aumento da frequência de operação, as perdas por histerese e conseqüentemente a elevação de temperatura tornam impraticáveis o seu uso. Os núcleos de ferrite são indicados para operação em frequências mais elevadas, porém, apresentam algumas desvantagens em relação às lâminas de ferro silício, tais como baixa densidade de fluxo de saturação (0,3T) e baixa robustez a choques mecânicos.

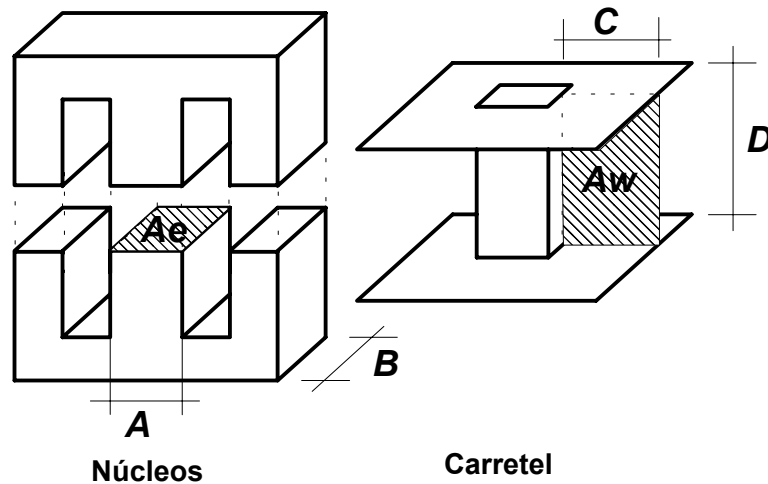


Fig. 1 – Núcleo e carretel do tipo E.

Na Fig. 1 pode ser observado o modelo de um núcleo de ferrite do tipo E-E. A área da seção transversal do núcleo, denominada A_e , e a área da janela, denominada A_w , são fatores importantes no projeto físico de magnéticos.

3 – PROJETO FÍSICO DE INDUTORES

Seja um indutor L percorrido por uma corrente com a forma de onda mostrada na Fig. 2.

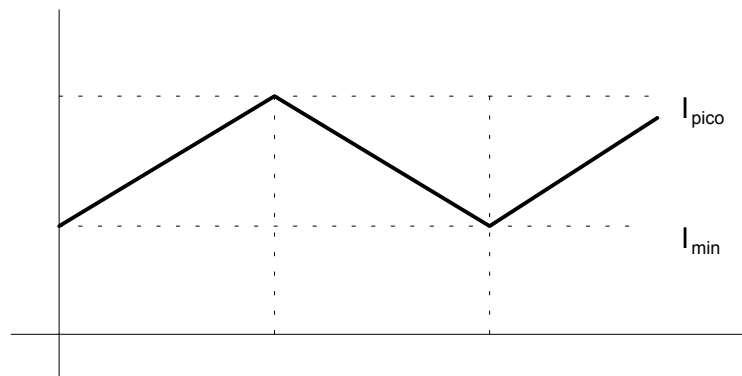


Fig. 2 – Corrente sobre o indutor.

3.1 – Escolha do Núcleo Adequado

O projeto físico do indutor é baseado nas Leis de Ampere e de Faraday:

$$\mathcal{S} = \oint H \cdot dl = H \cdot l = N \cdot i \quad (1)$$

$$v(t) = N \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2)$$

Também são relações importantes a relação volt-ampere no indutor e a relação entre indução magnética e campo magnético.

$$v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3)$$

$$B = \mu_o \cdot H \quad (4)$$

Igualando (2) e (3) tem-se:

$$N \cdot \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \Rightarrow N \cdot \Delta \phi = L \cdot \Delta i \quad (5)$$

Sendo:

$$\Delta \phi = \Delta B \cdot Ae \quad (6)$$

Considerando que, quando a corrente no indutor é máxima (I_{pico}) tem-se o máximo valor de B (B_{max}) e substituindo-se (6) em (5):

$$N \cdot B_{max} \cdot Ae = L \cdot I_{pico} \quad (7)$$

Desta forma:

$$N = \frac{L \cdot I_{pico}}{B_{max} \cdot Ae} \quad (8)$$

A máxima densidade de corrente é dada por:

$$J_{max} = \frac{N \cdot I_{eficaz}}{A_p} \quad (9)$$

Onde:

A_p : área transversal do enrolamento de cobre.

Sendo os fios com uma geometria circular, os enrolamentos ocupam apenas uma determinada área da janela disponível conforme pode ser observado na Fig. 3. Desta forma faz-se necessário definir uma constante k_w denominada “*fator de ocupação do cobre dentro do carretel*”. O valor típico da constante k_w para a construção de indutores é 0,7 (ou seja, a área ocupada pelos enrolamentos é de 70% da janela), porém este valor pode sofrer variações conforme a habilidade da pessoa responsável pela confecção dos enrolamentos e conforme a geometria dos condutores utilizados.

Assim, pode-se definir k_w como:

$$k_w = \frac{A_p}{A_w} \quad (10)$$

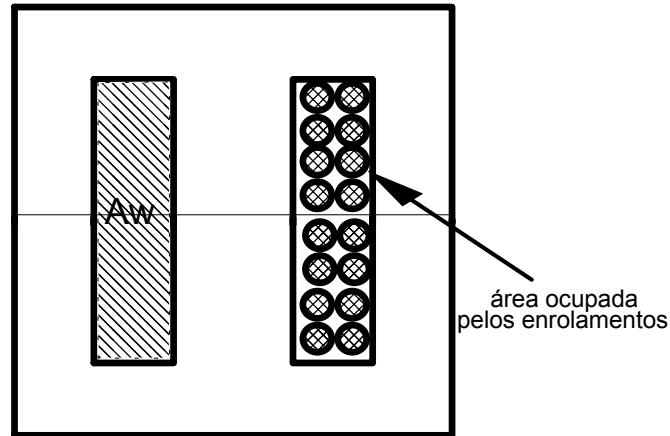


Fig. 3 – Ocupação dos enrolamentos na janela.

Definida a constante k_w , pode-se rescrever a expressão (9) da seguinte forma:

$$N = \frac{J_{\max} \cdot k_w \cdot A_w}{I_{\text{eficaz}}} \quad (11)$$

Igualando (8) e (11):

$$\frac{J_{\max} \cdot k_w \cdot A_w}{I_{\text{eficaz}}} = \frac{L \cdot I_{\text{pico}}}{B_{\max} \cdot A_e} \quad (12)$$

Assim define-se o valor do produto $A_e A_w$ necessário para a construção do indutor:

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{\text{pico}} \cdot I_{\text{eficaz}}}{B_{\max} \cdot J_{\max} \cdot k_w} \cdot 10^4 \quad (13)$$

O fator 10^4 na expressão (13) foi acrescentado para ajuste de unidade (cm^4). Para núcleos de ferrite usuais o valor de B_{\max} fica em torno de $0,3T$ (este valor é devido à curva de magnetização dos material magnético). O valor da densidade de corrente, que indica a capacidade de corrente por unidade de área, depende dos condutores utilizados nos enrolamentos, tipicamente utiliza-se $450\text{A}/\text{cm}^2$. Os fabricantes de núcleos disponibilizam alguns tamanhos e formatos padrões de núcleos e, por este motivo, deve-se selecionar o núcleo com o $A_e A_w$ maior e mais próximo do calculado.

3.2 – Número de Espiras

É obtido diretamente da expressão (8).

$$N = \frac{L \cdot I_{\text{pico}}}{B_{\max} \cdot A_e} \quad (14)$$

3.3 – Entreferro

A indutância depende diretamente do número de espiras e da relutância total do circuito magnético, conforme pode ser verificado na expressão (15).

$$L = \frac{N^2}{R_{total}} \quad (15)$$

Por melhor que seja o material utilizado no núcleo sempre existe uma oposição à passagem de fluxo (relutância), que pode ser calculada pela relação (16):

$$R_{nucleo} = \frac{l_{nucleo}}{\mu_{nucleo} \cdot A_e} \quad (16)$$

Onde:

l_{nucleo} = comprimento do caminho magnético;

μ_{nucleo} = permeabilidade do núcleo.

Caso haja um entreferro aumenta-se a relutância total do circuito magnético, ou seja, existe maior resistência à passagem de fluxo magnético. Considerando um entreferro de ar, a relutância adicionada pode ser expressa por:

$$R_{entreferro} = \frac{l_{entreferro}}{\mu_o \cdot A_e} \quad (17)$$

Onde:

$l_{entreferro}$ = comprimento do entreferro;

μ_o = permeabilidade do ar.

Assim sendo, o entreferro aumenta a relutância total do circuito, diminuindo a indutância.

Os entreferros são utilizados em indutores por duas razões:

- Sem entreferro a indutância é proporcional apenas à permeabilidade do núcleo, que é um parâmetro extremamente dependente da temperatura e do ponto de operação. A adição do entreferro introduz uma relutância muito maior que a relutância do núcleo fazendo com que o valor de L seja praticamente insensível às variações na permeabilidade do núcleo.
- A adição de entreferro permite que o indutor opere com valores maiores de corrente no enrolamento sem que ocorra saturação do núcleo, conforme pode ser observado na Fig. 4.

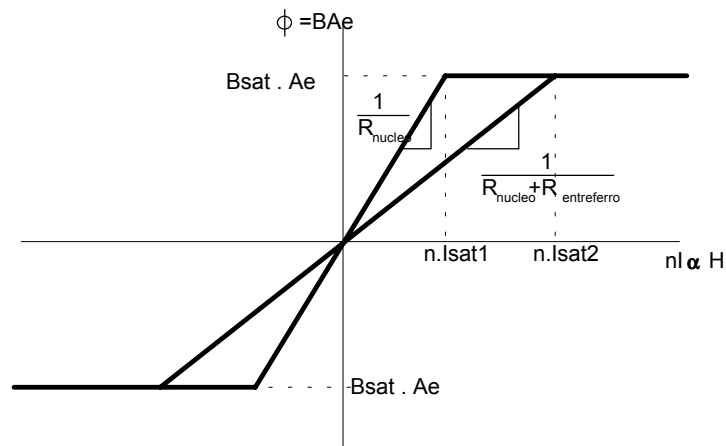


Fig. 4 – Efeito do entreferro na saturação do núcleo.

Considerando a relutância do entreferro muito maior que a relutância do núcleo, a expressão (15) pode ser rescrita como:

$$L = \frac{N^2}{R_{entreferro}} \tag{18}$$

Substituindo (17) em (18) chega-se à:

$$l_{entreferro} = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e}{L} \cdot 10^{-2} \tag{19}$$

Novamente incluiu-se um fator 10^{-2} para ajuste de unidades, tornando o comprimento do entreferro em cm.

O valor calculado é referente ao comprimento total do entreferro, porém, no caso dos núcleos do tipo E-E onde o entreferro normalmente é colocado na pernas laterais, em cada perna lateral deve existir um entreferro com metade do valor calculado, uma vez o fluxo magnético, que circula pelo caminho mostrado na Fig. 5, percorrerá também o entreferro situado na perna central.

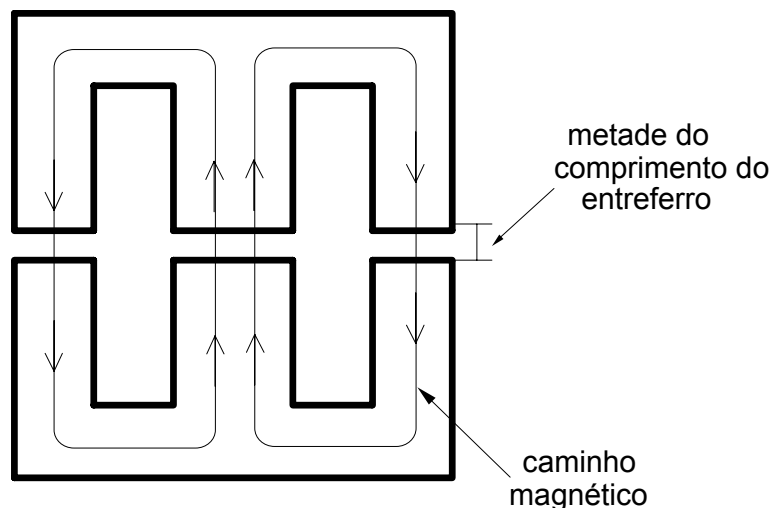


Fig. 5 – Distribuição do entreferro.

3.4 – Cálculo da Bitola dos Condutores

A utilização de condutores em altas frequências deve levar em conta o efeito pelicular (*skin effect*). É sabido que, a medida que a frequência aumenta, a corrente no interior de um condutor tende se distribuir pela periferia, ou seja, existe maior densidade de corrente nas bordas e menor na região central. Esse efeito causa uma redução na área efetiva do condutor. Em outras palavras, o efeito pelicular atua de maneira a limitar a área máxima do condutor a ser empregado.

O valor da profundidade de penetração pode ser obtido através da expressão abaixo:

$$\Delta = \frac{7.5}{\sqrt{f}} \quad (20)$$

Desta forma o condutor utilizado não deve possuir um diâmetro superior ao valor 2Δ .

O cálculo da bitola necessária para conduzir a corrente do enrolamento depende da máxima densidade de corrente admitida no condutor. Conforme pode ser verificado na expressão (21).

$$S_{fio} = \frac{I_{eficaz}}{J_{max}} \quad (21)$$

Geralmente o diâmetro do condutor é superior ao limite fixado pelo efeito pelicular. Assim, é necessário associar condutores em paralelo afim de que se possa conduzir a corrente sem superaquecimento dos fios condutores. O número de condutores pode ser calculado da seguinte maneira:

$$n_{condutores} = \frac{S_{cond}}{S_{skin}} \quad (22)$$

Onde:

S_{skin} = área do condutor cujo o diâmetro máximo é limitado pelo valor 2Δ .

3.5 – Cálculo da Elevação de Temperatura

Devido às não idealidades tem-se perdas no indutor. As perdas totais são compostas de perdas no cobre (efeito Joule) e perdas magnéticas (ou perdas no núcleo). Tais perdas geram aquecimento e conseqüentemente uma determinada elevação de temperatura do indutor acima da temperatura do ambiente ao qual este está submetido.

3.5.1 – Perdas no Cobre

As perdas no cobre dependem diretamente da resistência do enrolamento, que pode ser facilmente calculada com auxílio da expressão (23):

$$R_{cobre} = \frac{\rho_{fio} \cdot l_{espira} \cdot N}{n_{condotores}} \quad (23)$$

Onde:

l_{espira} = comprimento médio de uma espira;

ρ_{fio} = resistividade do fio por cm.

As perdas Joule são:

$$P_{cobre} = R_{cobre} \cdot I_{ef}^2 \quad (24)$$

3.5.2 - Perdas Magnéticas

As perdas magnéticas são devidas basicamente à histerese. A expressão empírica abaixo permite determinar com boa aproximação o valor das perdas no núcleo:

$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_h \cdot f + K_f \cdot f^2) \cdot V_{nucleo} \quad (25)$$

Onde:

K_h = coeficiente de perdas por histerese;

K_f = coeficiente de perdas por correntes parasitas;

V_{nucleo} = volume do núcleo.

Para núcleos da Thornton:

$$K_h = 4 \cdot 10^{-5};$$

$$K_f = 4 \cdot 10^{-10}.$$

3.5.3 – Resistência Térmica do Núcleo

É definida como:

$$Rt_{nucleo} = 23 \cdot (A_e A_w)^{-0,37} \quad (26)$$

3.5.4 – Elevação de Temperatura

É dada por:

$$\Delta T = (P_{cobre} + P_{nucleo}) \cdot Rt_{nucleo} \quad (27)$$

3.6 – Possibilidade de Execução

A última etapa no projeto físico de um indutor é verificar a possibilidade de execução, ou seja, verificar se é possível colocar os enrolamentos na janela do núcleo (A_w).

Para acondicionar o enrolamento calculado anteriormente é necessária uma janela mínima dada por:

$$Aw_{\min} = \frac{N \cdot n_{\text{condutores}} \cdot S_{\text{fito}}}{K_w} \quad (28)$$

A Possibilidade de execução é definida como:

$$Exec = \frac{Aw_{\min}}{Aw_{\text{núcleo}}} < 1 \quad (29)$$

Caso não seja possível construir o enrolamento na janela disponível, deve-se ajustar os parâmetros B_{\max} , J_{\max} , e $n_{\text{condutores}}$ ou ainda escolher outro núcleo.

4 – PROJETO FÍSICO DE TRANSFORMADORES

Partindo das mesmas expressões iniciais usadas no projeto do indutor pode-se facilmente chegar ao dimensionamento físico do transformador, porém, no caso dos transformadores não há a necessidade da utilização de entreferro (com exceção do transformador do conversor Flyback, que na verdade não funciona como transformador, mas sim como indutores acoplados.), pois, idealmente, em um transformador não há armazenamento de energia (toda a energia é instantaneamente transferida do primário para o secundário).

5 – BIBLIOGRAFIA

- [1] BARBI, Ivo. **Projetos de fontes chaveadas**. Florianópolis: Edição do Autor, 2001.
- [2] ERICKSON, Robert W. **Fundamentals of power electronics**. New York: Chapman & Hall, 1997.
- [3] UNITRODE CORPORATION. **Unitrode seminars**. Disponível em: http://focus.ti.com/docs/analog/support/training/seminar.jhtml?templateId=2&navigationId=156&tfsection=Seminar_Materials.
- [4] MAGNETICS INC. **Catálogos e softwares para projeto de magnéticos**. Disponível em: <http://www.mag-inc.com>.