

Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
CST em Sistemas Eletrônicos



Projeto de Indutores
Projeto Integrador I

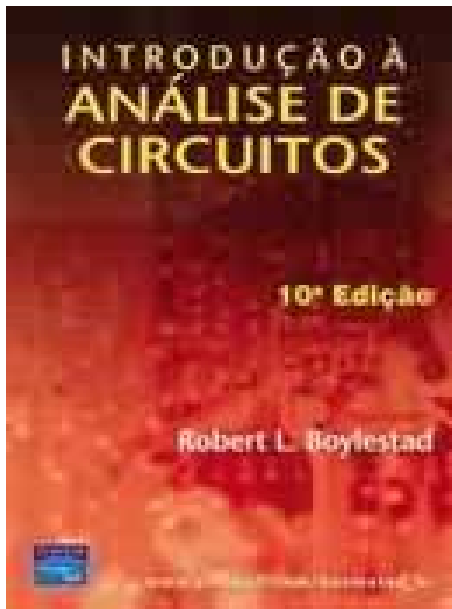
Prof. Clóvis Antônio Petry.

Florianópolis, junho de 2008.

Bibliografia para esta aula

Indutores

1. Projeto de indutores de alta frequência.



Projeto de indutores

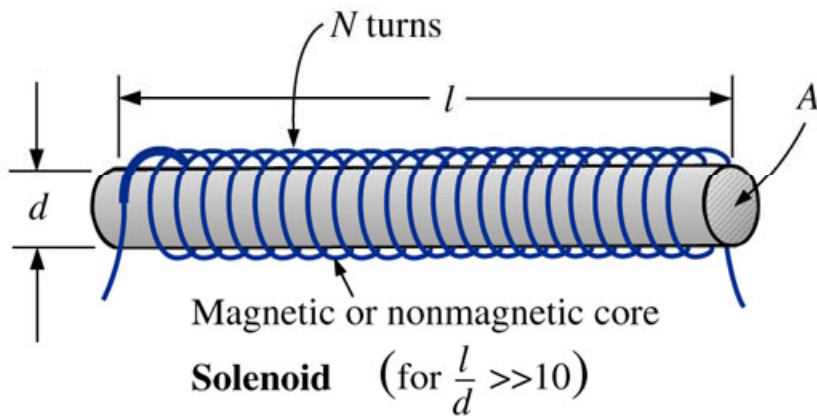
O projeto de um indutor depende:

- Da frequência de operação;
- Da corrente no mesmo;
- Do regime de trabalho;
- Do material utilizado para o núcleo;
- Entre outros....

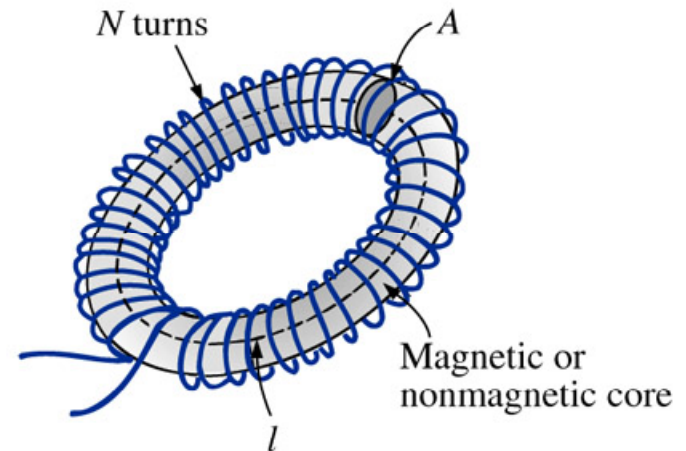
Auto-Indutância

A propriedade de uma bobina de se opor a qualquer variação de corrente é medida pela sua auto-indutância (L). A unidade de medida é o Henry (H).

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



(a)

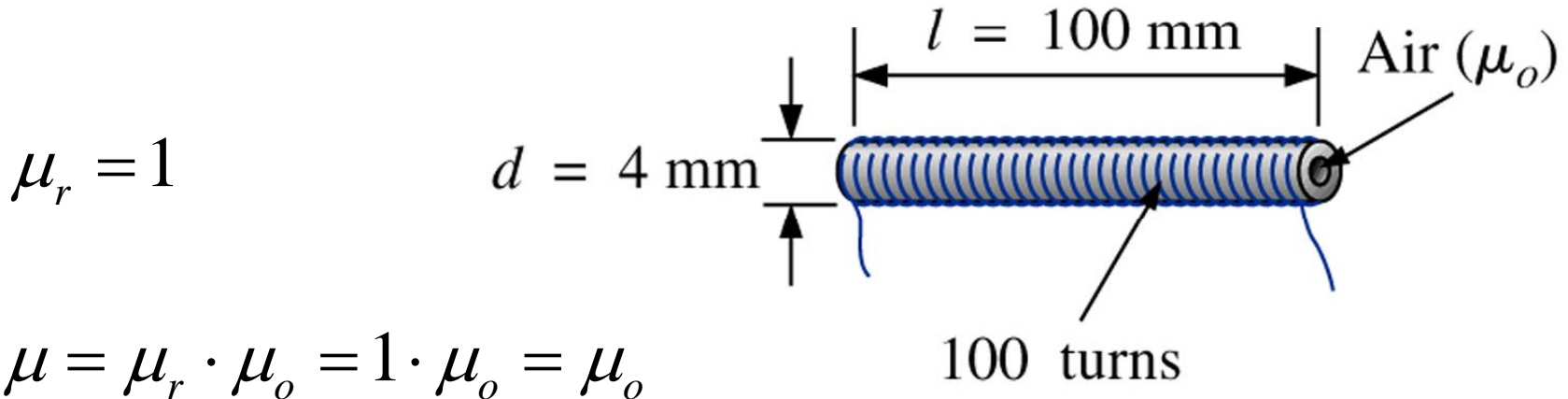


Toroid

(b)

Auto-Indutância

Exemplo 12.1: Determine a indutância da bobina de núcleo de ar da figura abaixo:



$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o = 1 \cdot \mu_o = \mu_o$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

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

$$A = 12,57 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad L = \frac{100^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 12,57 \cdot 10^{-6}}{0,1} = 1,58 \mu\text{H}$$

Projeto de indutores com núcleo de ar

Bobinas longas:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{\ell} \longrightarrow \boxed{N = \sqrt{\frac{L \cdot \ell}{\mu \cdot A}}}$$

N - número de espiras da bobina indutora

L - Indutância da bobina indutora, [Henry, H];

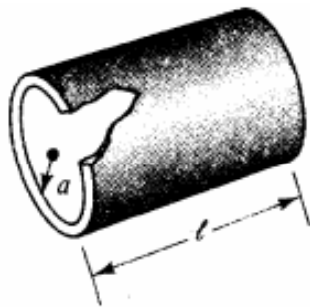
A - área das espiras da bobina (área do núcleo), [metro quadrado, m²];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina, [metro, m];

μ - permeabilidade magnética do meio no núcleo da bobina [Henry por metro, H/m];

Projeto de indutores com núcleo de ar

Bobina de camada única com núcleo de ar:



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (9 \cdot a + 10 \cdot \ell)}{39,5 \cdot a^2}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

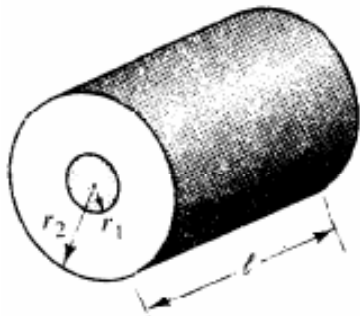
L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry, μH];

ℓ - comprimento longitudinal da bobina [metro, m];

a - raio do núcleo (raio das espiras), [metro, m]

Projeto de indutores com núcleo de ar

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6r_1 + 9l + 10(r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Micro Henry, μH];

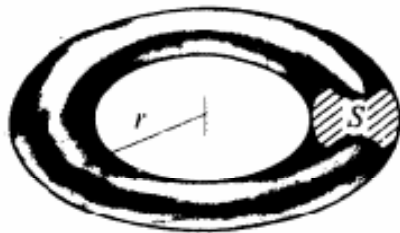
l - comprimento longitudinal da bobina, [metro, m];

r_1 - raio interno da bobina (raio das espiras interiores), [metro, m];

r_2 - raio externo da bobina (raio das espiras exteriores), [metro, m].

Projeto de indutores com núcleo toroidal

Núcleos toroidais:



$$N = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

N - número de espiras da bobina indutora;

L - indutância desejada para o indutor, [Henry, H];

r - raio médio do toroide¹⁴, [metro, m];

μ - permeabilidade magnética do material do núcleo, [Henry por metro, H/m];

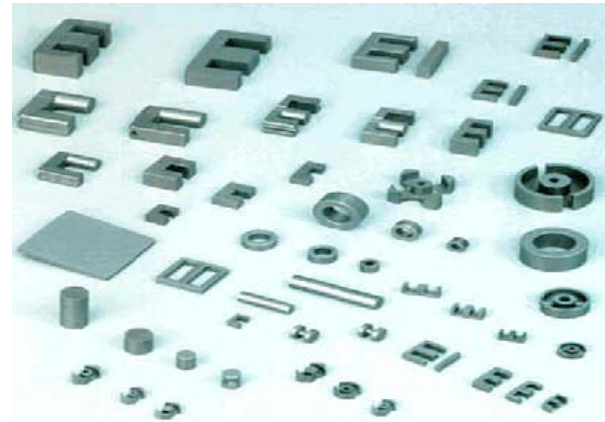
A - área da seção transversal do núcleo toroide (área das espiras da bobina), [metro quadrado, m²]

Projeto de indutores

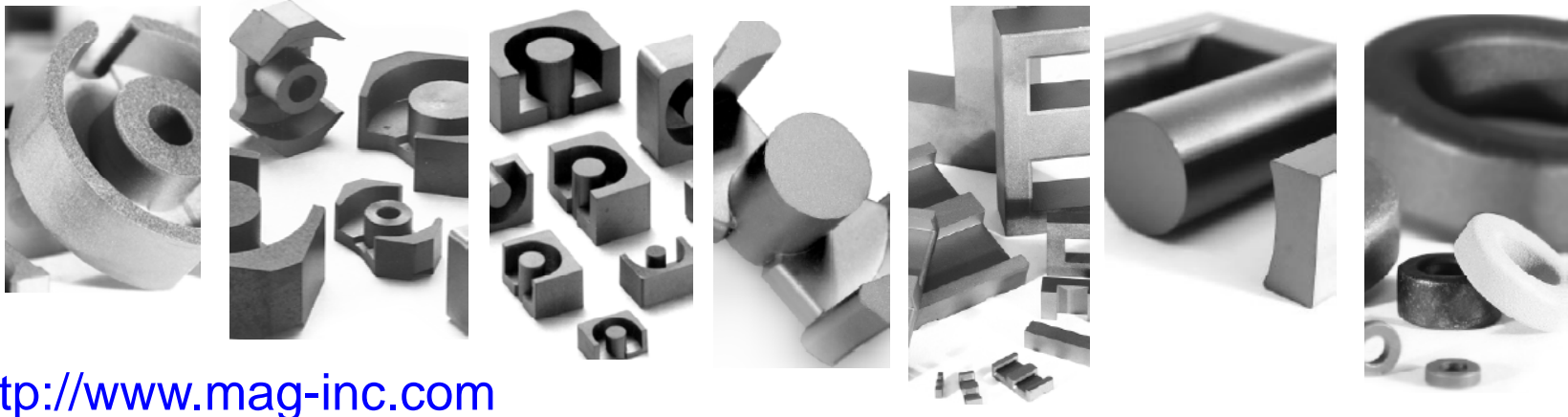
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



<http://www.magmattec.com.br>



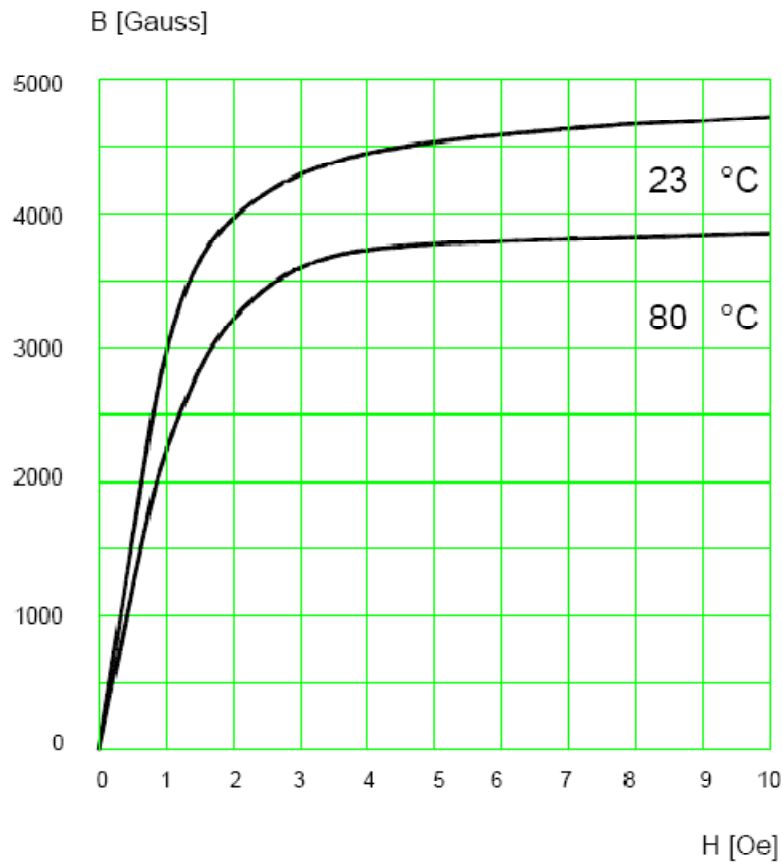
<http://www.thornton.com.br>



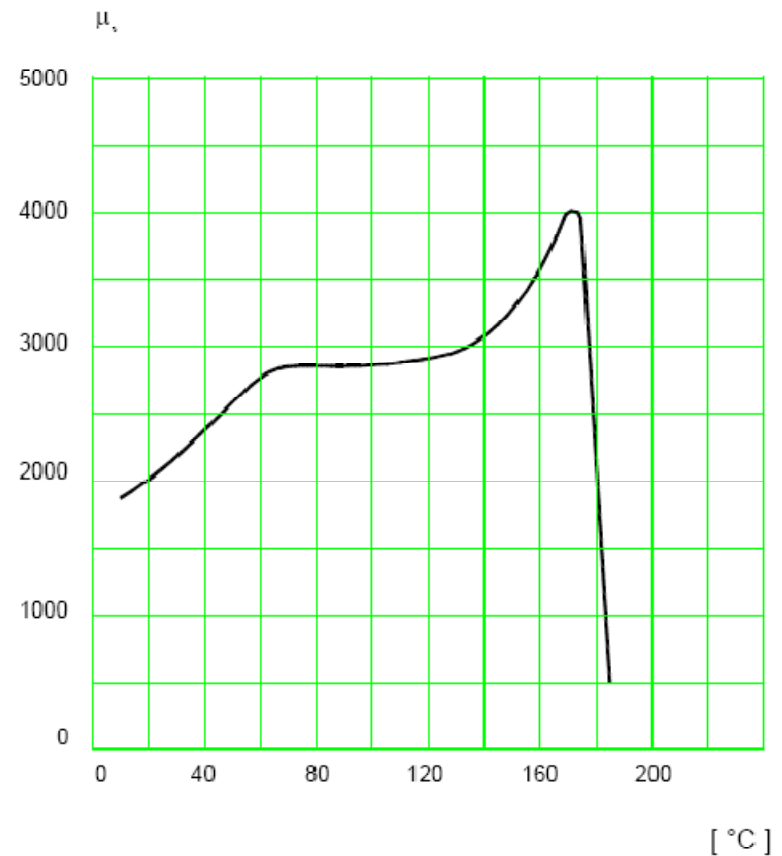
<http://www.mag-inc.com>

Projeto de indutores

Características do núcleo:



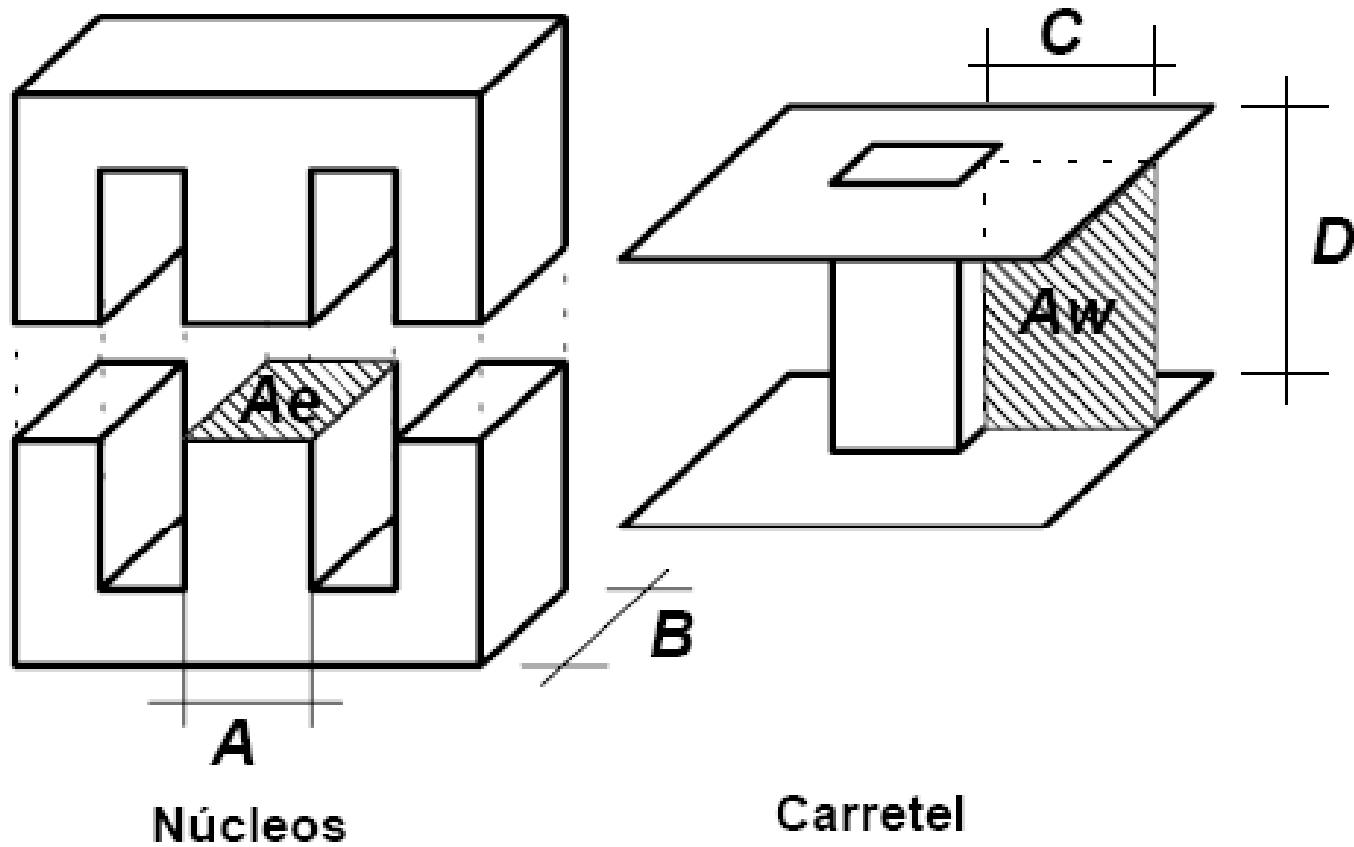
Típico $B \times H$



$\mu \times$ Temperatura

Projeto de indutores

Montagem do núcleo (com entreferro):



Projeto de indutores

1) Dados de entrada:

$$L_o = 100 \mu H$$

$$F_s = 20 kHz$$

$$I_{Lop} = 10 A$$

$$I_{Loef} = 6 A$$

$$\Delta I_{Lo} = 1 A$$

$$k = 0,7$$

$$J = 450 A/cm^2$$

$$B = 0,35 T$$

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

Indutância do indutor;

Frequência de operação;

Corrente de pico;

Corrente eficaz;

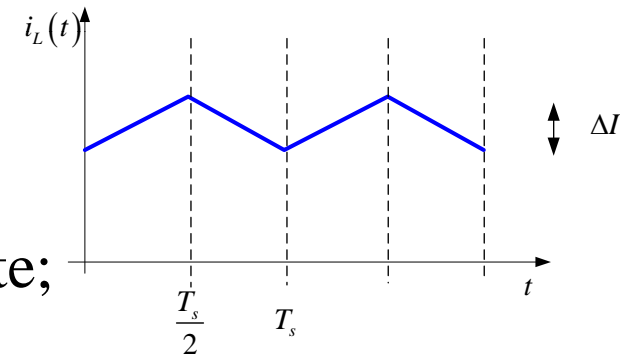
Ondulação de corrente;

Fator de enrolamento;

Densidade de corrente;

Densidade de fluxo máximo;

Permeabilidade no vácuo.



Projeto de indutores

2) Escolha do núcleo:

$$\Delta B = B \frac{\Delta I_{Lo}}{I_{Lop}} = 0,35 \frac{1}{10} = 0,035 T$$

$$A_e A_w = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot I_{Loef} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 6 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,35 \cdot 450} = 0,544 \text{ cm}^4$$

Núcleo	A _e (cm ²)	A _w (cm ²)	l _e (cm)	l _t (cm)	v _e (cm ³)	A _e A _w (cm ⁴)
E-20	0,312	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



Projeto de indutores

3) Cálculo do número de espiras:

$$N = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 24 \text{ espiras}$$

4) Cálculo do entreferro:

$$lg = \frac{N^2 \cdot \mu_o \cdot A_e \cdot 10^{-2}}{L_o} = \frac{24^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,20 \cdot 10^{-2}}{100 \cdot 10^{-6}} = 0,087 \text{ cm}$$

Projeto de indutores

5) Perdas no núcleo:

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

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



$$P_{nucleo} = \Delta B^{2,4} \cdot (K_H \cdot F_s + K_E \cdot F_s^2) \cdot V_e$$

$$P_{nucleo} = 0,035^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 20000^2) \cdot 8$$

$$P_{nucleo} = 2,46 mW$$

Projeto de indutores

6) Profundidade de penetração:

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{7,5}{\sqrt{20000}} = 0,053 \text{ cm}$$

$$D_{\text{fio}_{max}} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot 0,053 = 0,106 \text{ cm}$$

Não poderá ser utilizado condutor com diâmetro maior que 0,106 cm. Portanto, podem ser utilizados condutores mais finos que o fio 18 AWG. Escolheu-se o condutor 22 AWG.

$$A_{cu22} = 0,003255 \text{ cm}^2 \quad S_{22} = 0,004013 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{22} = 0,000530 \Omega / \text{cm}$$

Projeto de indutores

7) Escolha da seção dos condutores:

$$S = \frac{I_{Loef}}{J} = \frac{6}{450} = 0,013 \text{ cm}^2 \quad \text{Maior que a área do fio 22 AWG.}$$

$$N_{fios} = \frac{S}{A_{cu22}} = \frac{0,013}{0,003255} = 5 \text{ fios}$$

8) Cálculo da resistência do fio:

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho_{22}}{N_{fios}} \cdot lt = 24 \cdot \frac{0,000530}{5} \cdot 6,7 = 0,017 \Omega$$

Projeto de indutores

9) Perdas no cobre:

$$P_{cobre} = R_{fio} \cdot I_{Loef}^2 = 0,017 \cdot 6^2 = 0,614W$$

10) Perdas totais:

$$P_{totalis} = P_{nucleo} + P_{cobre} = 2,46m + 0,614 = 0,616W$$

11) Elevação de temperatura:

$$Rt = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37} = 23 \cdot (1,02)^{-0,37} = 22,832 \text{ } ^\circ C / W$$

$$\Delta T = Rt \cdot P_{total} = 22,832 \cdot 0,616 = 14,066 \text{ } ^\circ$$

Projeto de indutores

12) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{N \cdot N_{fios} \cdot S_{22}}{0,7} = \frac{24 \cdot 5 \cdot 0,004013}{0,7} = 0,688 cm^2$$

$$K_{ocup} = \frac{Aw_{neces}}{Aw} = \frac{0,688}{0,85} = 0,809$$



Projeto de indutores

Exercício de aplicação:

Projetar um indutor de alta frequência com as seguintes especificações.

Usando Mathcad

$$L_o = 500 \mu H$$

Indutância do indutor;

$$F_s = 100 kHz$$

Frequência de operação;

$$I_{Lop} = 2 A$$

Corrente de pico;

$$I_{Loef} = 1,8 A$$

Corrente eficaz;

$$\Delta I_{Lo} = 0,5 A$$

Ondulação de corrente;

$$k = 0,7$$

Fator de enrolamento;

$$J = 450 A/cm^2$$

Densidade de corrente;

$$B = 0,35 T$$

Densidade de fluxo máximo.