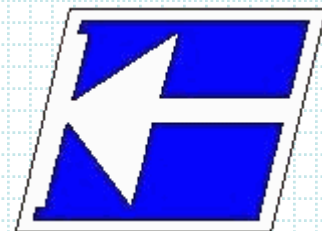


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Eletrônica de Potência



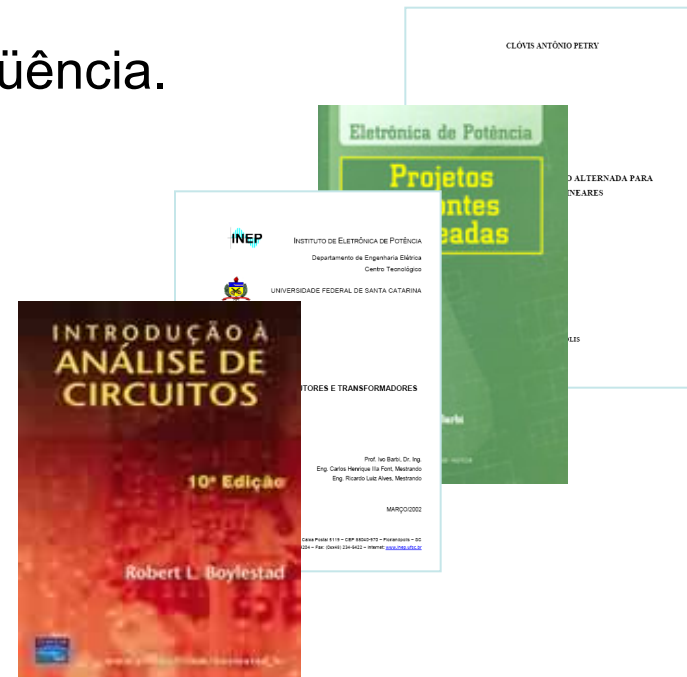
Projeto de Indutores para Alta Frequência

Prof. Clóvis Antônio Petry.

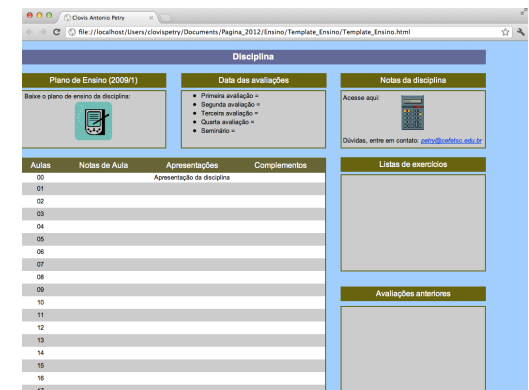
Florianópolis, novembro de 2012.

Capítulo 9: Choppers DC:

1. Projeto de indutores em alta frequência.



www.ProfessorPetry.com.br

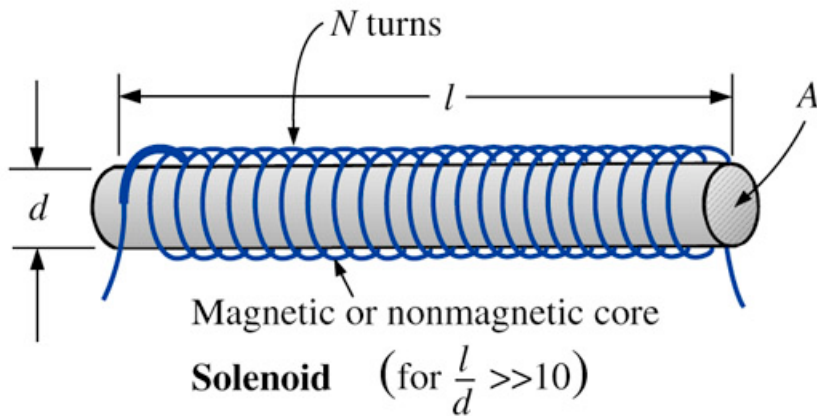


Conversores CC-CC – Projeto de indutores em alta frequência:

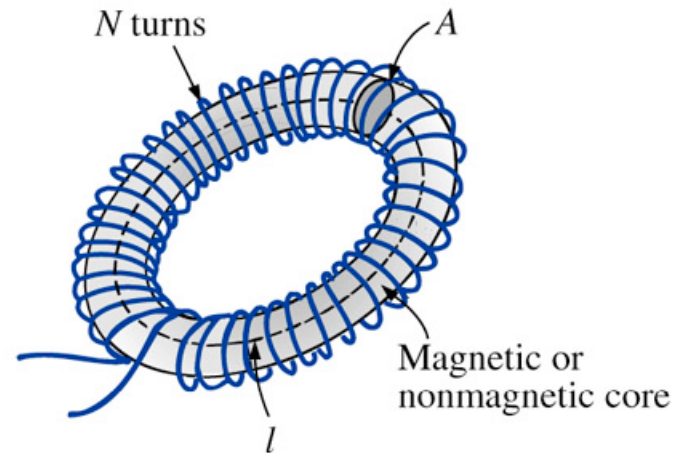
1. Auto-indutância;
2. Projeto de indutores com núcleo de ar;
3. Projeto de indutores com núcleo de ferrite.

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).

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



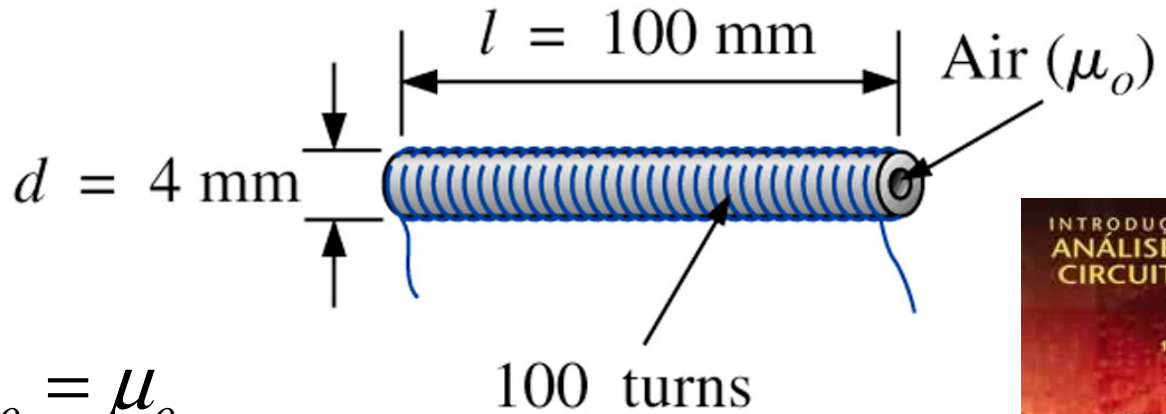
(a)



Toroid

(b)

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



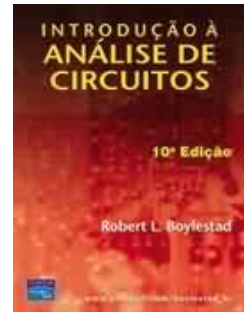
$$\mu_r = 1$$

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

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

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

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



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....

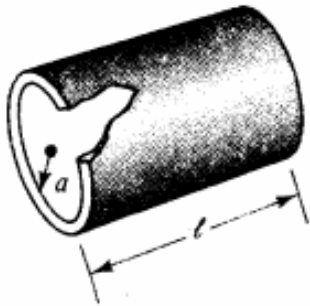
Bobinas longas:

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

Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [Henry, H];
- A – área do núcleo [m²];
- l – comprimento da bobina [m];
- μ – permeabilidade do núcleo [Wb/A·m].

Bobina de camada única com núcleo de ar:



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

Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [micro Henry, μH];
- a – raio do núcleo [m];
- l – comprimento da bobina [m].

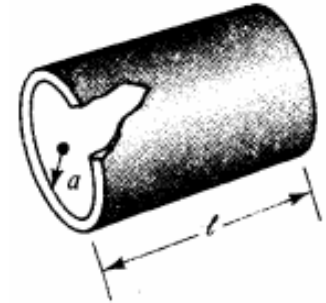


$$l = N \cdot D_{fio}$$

Bobina de camada única com núcleo de ar:

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

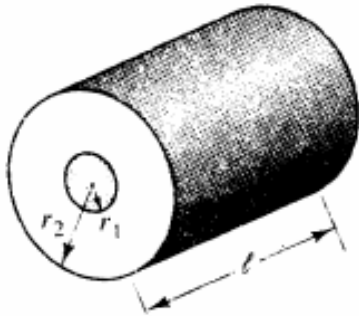
$$l = N \cdot D_{fio}$$



$$39,5 \cdot a^2 \cdot N^2 - 10 \cdot L \cdot D_{fio} \cdot N - 9 \cdot a \cdot L = 0$$

$$N = \frac{10 \cdot L \cdot D_{fio} \pm \sqrt{(-10 \cdot L \cdot D_{fio})^2 - 4 \cdot (39,5 \cdot a^2) \cdot (-9 \cdot a \cdot L)}}{2 \cdot (39,5 \cdot a^2)}$$

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:

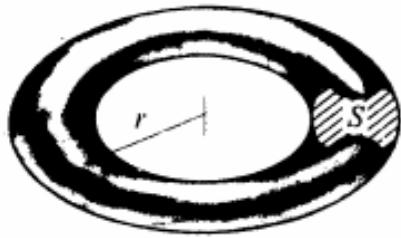


$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6 \cdot r_1 + 9 \cdot l + 10 \cdot (r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [micro Henry, μH];
- l – comprimento da bobina [m];
- r1 – raio interno [m];
- r2 – raio externo [m].

Núcleos toroidais:



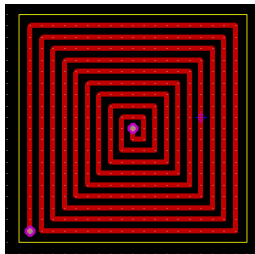
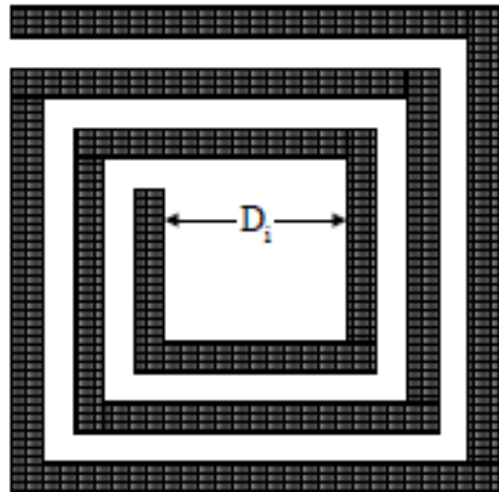
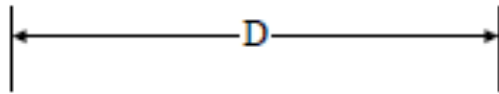
$$N = \sqrt{\frac{2\pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

Onde:

- N – número de espiras da bobina;
- L – indutância [Henry, H];
- A – área do núcleo [m²];
- μ – permeabilidade do núcleo [Wb/A·m];
- r – raio do toroide [m].

Projeto de indutores com núcleo de ar

Indutor planar:



$$\text{Se } D_i = 0$$

$$L \approx 8,5 \cdot 10^{-10} \cdot D \cdot N^3$$

De acordo com:

THOMPSON: Inductance Calculation Techniques -- Part II: Approximations and Handbook Methods

Power Control and Design, October 1995, volume 4, pp. 100-104

Inductance Calculation Techniques --
Part II: Approximations and Handbook Methods

Marc T. Thompson, Ph.D.¹

INDEX OF SYMBOLS

<i>A</i>	Area enclosed by coil
<i>a</i>	Coil mean radius
<i>b</i>	Coil axial thickness
<i>c</i>	Coil radial thickness
<i>D</i>	Side length of square coil
<i>d</i>	Wire-to-wire spacing
<i>E</i>	Nagelski coil constant
<i>l</i>	Coil length
<i>p</i>	Perimeter enclosed by coil
<i>P, F</i>	Grover disk coil constant
<i>R</i>	Circular wire radius
<i>s</i>	Side length of generic polygon
<i>w</i>	Trace width
<i>x, y</i>	Mean side lengths of rectangular coil
μ_0	Magnetic permeability of free space $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

1. INTRODUCTION

In the second part of this two-part series on inductance calculation techniques, approximation techniques and handbook methods are shown for air-core structures that do not easily lend themselves to closed-form solutions. A set of references is also given which is useful for finding the inductance of many different loop shapes. Included are inductance calculations for polygons, disk coils, finite-length solenoids and flat planar spirals. In some cases results are given without significant explanation, in the calculations are very complicated and the full calculations may be found in the references given. Many of the older references work out inductance problems in English units, to ease design these results have been converted to SI units with inductance in Henries and length scales in meters.

2. REFERENCE REVIEW

Inductance calculation references necessarily start with Maxwell's seminal work [1], first published in 1873. Maxwell worked out some interesting inductance problems, including finding the mutual inductance between circular coaxial filaments [1, pp. 339], and finding the size and shape of a coil which maximizes inductance for a given length of wire [1, pp. 345].

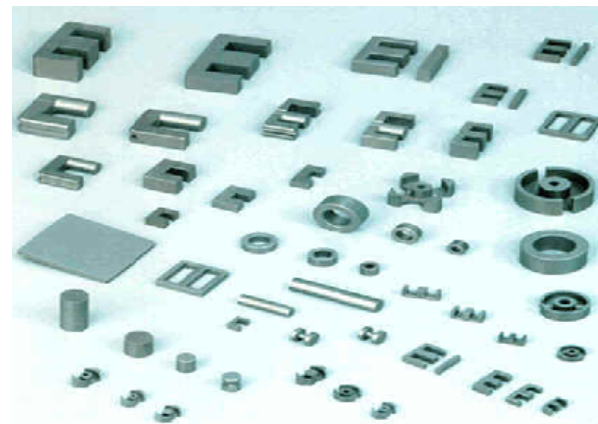
¹ The author is an independent consultant at 27 Commonwealth Road, Westover Massachusetts, USA 02172. Business phone: (617) 923-1207. Fax: (617) 923-6762. Website: <http://members.aol.com/marctt2/induct2.pdf>. Email: marctt@aol.com and is Adjunct Associate Professor of Electrical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609.

Projeto de indutores de alta frequência com núcleo

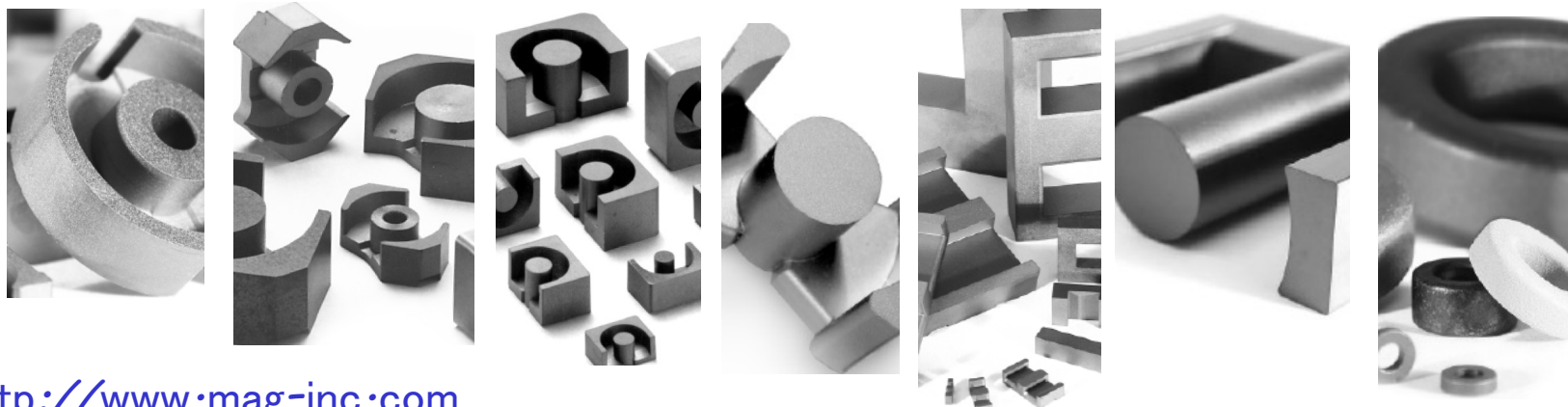
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



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



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



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

Projeto de indutores de alta frequência com núcleo

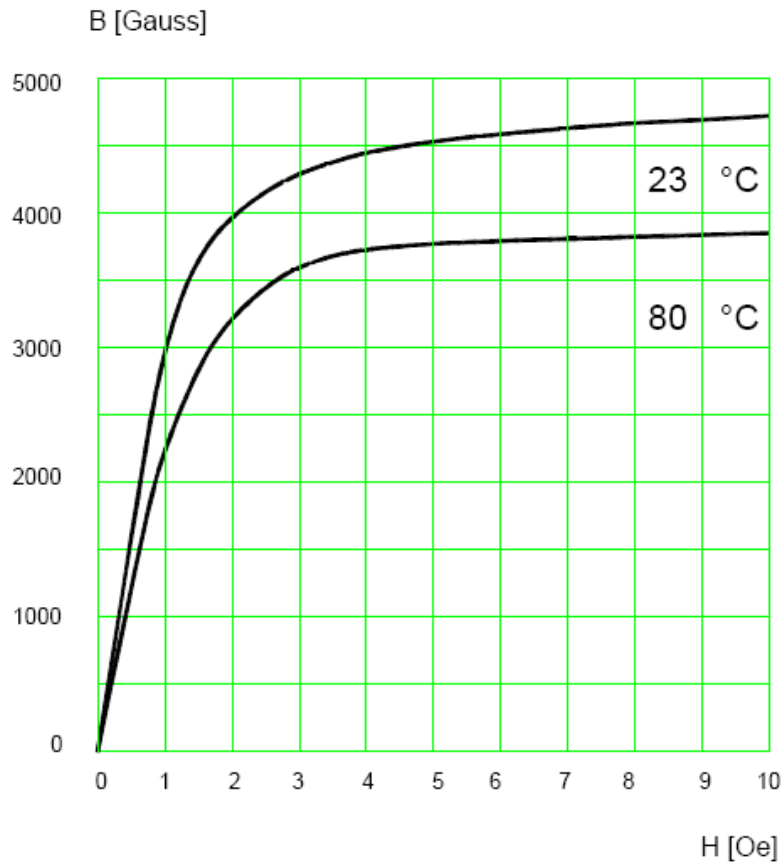
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
$\cong 1$	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

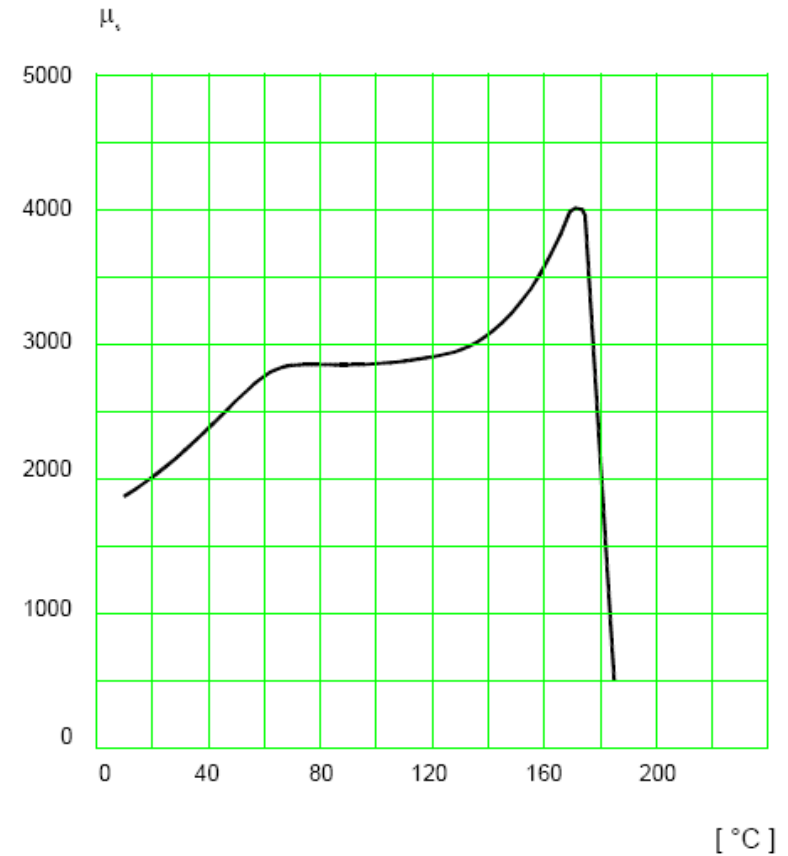
Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^6
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Características do núcleo:

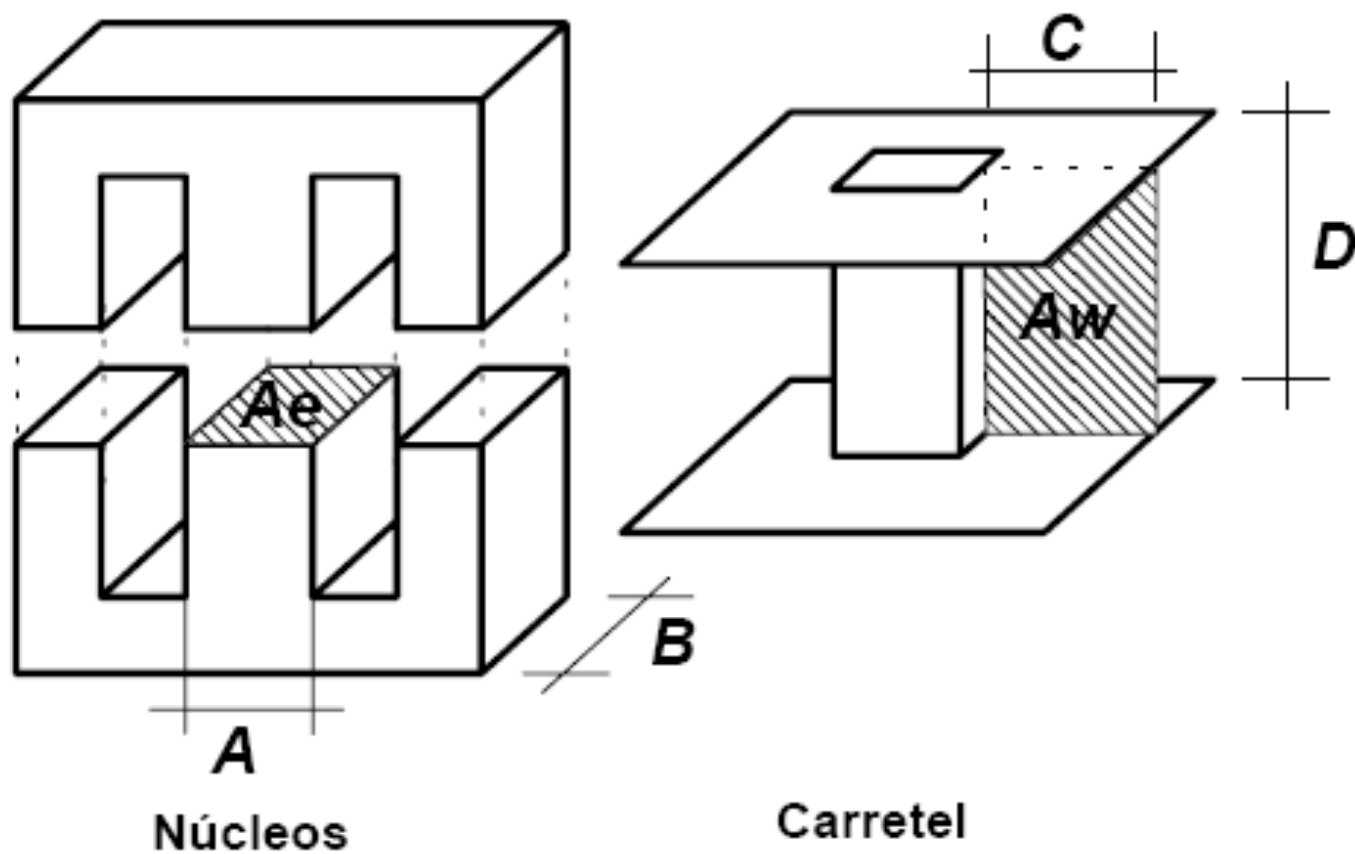


Típico $B \times H$



$\mu_r \times$ Temperatura

Montagem do núcleo (com entreferro):



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

1) Dados de entrada:

$$L_o = 100 \mu H$$

Indutância do indutor;

$$F_s = 20 kHz$$

Frequência de operação;

$$I_{Lop} = 10 A$$

Corrente de pico;

$$I_{Loef} = 6 A$$

Corrente eficaz;

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

Ondulação de corrente;

$$k = 0,7$$

Fator de enrolamento;

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

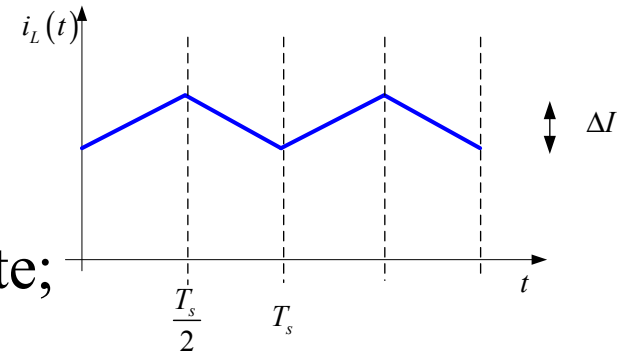
Densidade de corrente;

$$B = 0,35 T$$

Densidade de fluxo máximo;

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

Permeabilidade no vácuo.



Projeto de indutores com núcleo de ferrite

2) Escolha do núcleo:

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

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

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



3) Cálculo do número de espiras:

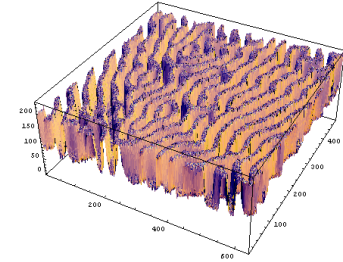
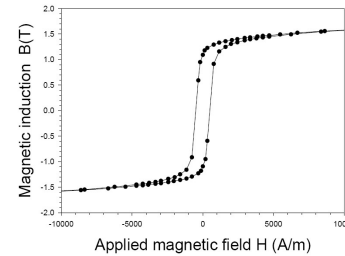
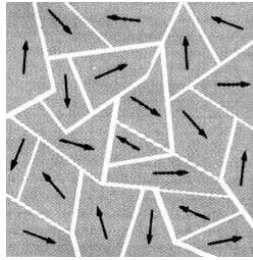
$$N = \frac{L_o \cdot I_{Lop} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 24 \text{ espiras}$$

4) Cálculo do entreferro:

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

Projeto de indutores com núcleo de ferrite

Perdas no núcleo:



Correntes parasitas:

- Induzidas no núcleo, devido ao mesmo ser, normalmente, de material ferromagnético.

Perdas por histerese:

- Trabalho realizado pelo campo (H) para obter o fluxo (B);

- Expressa a dificuldade que o campo (H) terá para orientar os domínios de um material ferromagnético.

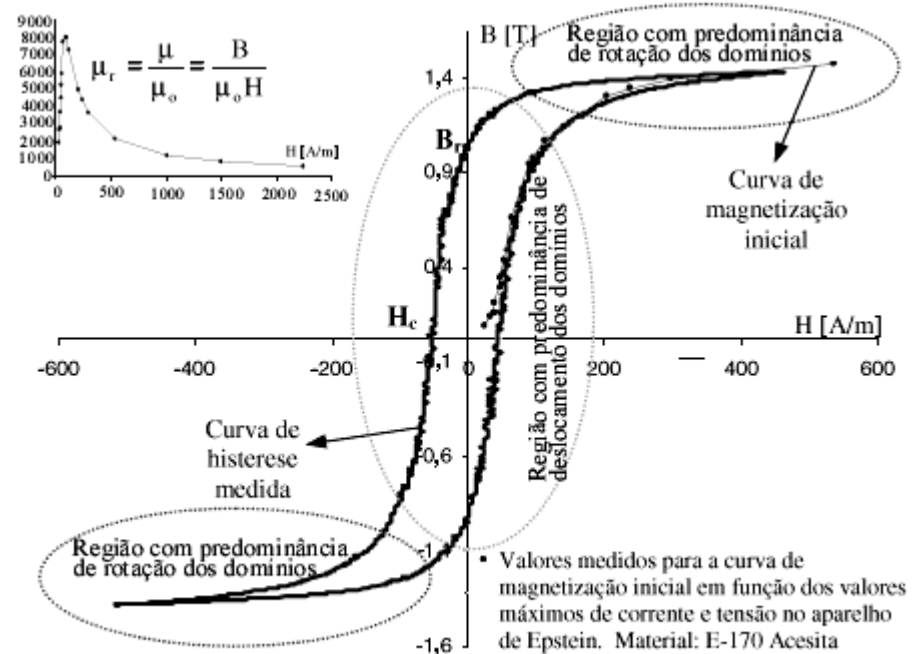


Figura 1: Curva representativa da histerese medida à 1Hz.

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 com núcleo de ferrite

Perdas no condutor:

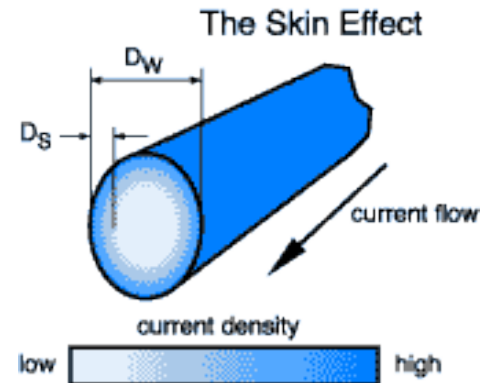
Efeito de proximidade:

- Relaciona um aumento na resistência em função dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

Efeito pelicular (efeito skin):

- Restringe a secção do condutor para frequências elevadas.
- Em altas frequências, a tensão oposta induzida se concentra no centro do condutor, resultando em uma corrente maior próxima à superfície do condutor e uma rápida redução próxima do centro.

Profundidade de penetração $\longrightarrow \Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f_s}} [cm]$



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.

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

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

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:

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

9) Perdas no cobre:

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

10) Perdas totais:

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

11) Elevação de temperatura:

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

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

12) Cálculo do fator de ocupação:

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

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

