Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica de Potência

INSTITUTO FEDERAL SANTA CATARINA

Projeto de Indutores para Alta Frequência

Prof· Clóvis Antônio Petry·

Florianópolis, maio de 2012.

Bibliografia para esta aula

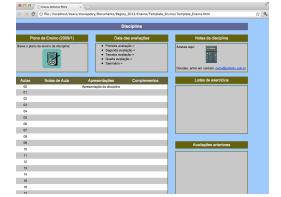


Capítulo 9: Choppers DC:

1. Projeto de indutores em alta frequência.







Nesta aula



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

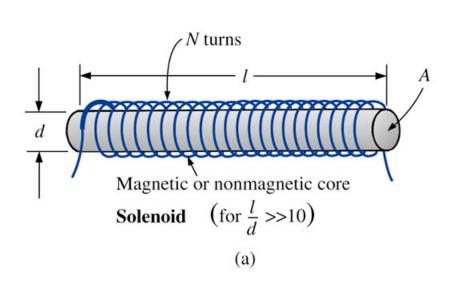
- 1. Auto-indutância;
- 2. Projeto de indutores com núcleo de ar;
- 3. Projeto de indutores com núcleo de ferrite.

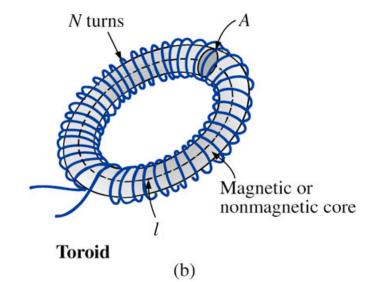
Auto-Indutância



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).

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





Auto-Indutância



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

$$\mu_r = 1 \qquad d = 4 \text{ mm}$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_o = 1 \cdot \mu_o = \mu_o \qquad 100 \text{ turns}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot \left(4 \cdot 10^{-3}\right)^2}{4} \qquad L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{4}$$

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

Projeto de indutores



O projeto de um indutor depende:

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



Bobinas longas:

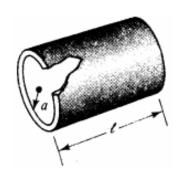
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \qquad \longrightarrow \qquad N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

Onde:

- N número de espiras da bobina;
- L indutância [Henry, H];
- A área do núcleo [m²];
- *I* 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:

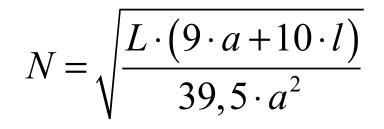
- N número de espiras da bobina;
- L indutância [micro Henry, μΗ];
- a raio do núcleo [m];
- *I* comprimento da bobina [m].



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



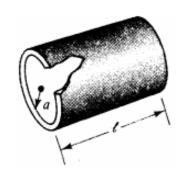
Bobina de camada única com núcleo de ar:



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

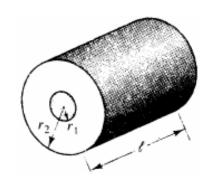


$$N = \frac{10 \cdot L \cdot D_{fio} \pm \sqrt{\left(-10 \cdot L \cdot D_{fio}\right)^{2} - 4 \cdot \left(39, 5 \cdot a^{2}\right) \cdot \left(-9 \cdot a \cdot L\right)}}{2 \cdot \left(39, 5 \cdot a^{2}\right)}$$





Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



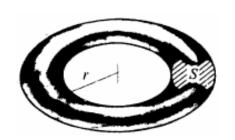
$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6 \cdot r_1 + 9 \cdot l + 10 \cdot (r_2 - r_1))}{31, 6 \cdot r_1^2}}$$

Onde:

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



Núcleos toroidais:



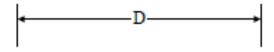
$$N = \sqrt{\frac{2\pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

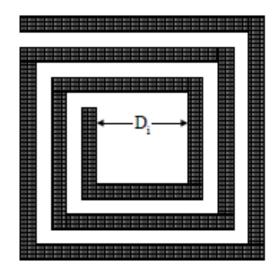
Onde:

- 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].



Indutor planar:







Se
$$D_i = 0$$

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

De acordo com:

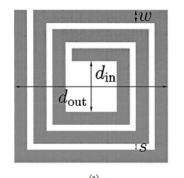
pproximations and Handbook Methods

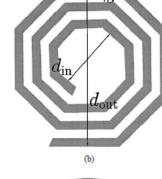
inductance calculation references necessarily start with Maxwell's seminal w t published in 1873. Maxwell worked out some interesting inductance probi

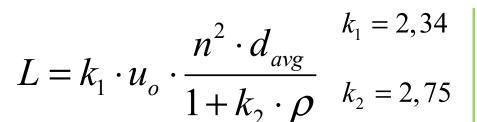
© Marc T. Thompson, 1999 file: Induct2 doc 4/26/01 12:16 PM



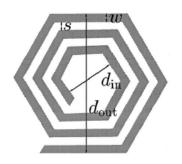
Indutor planar:

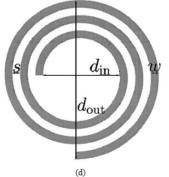






$$d_{avg} = \frac{d_{out} + d_{in}}{2} \qquad \rho = \frac{d_{out} - d_{in}}{d_{out} + d_{in}}$$





De acordo com:

Simple Accurate Expressions for Planar Spiral Inductances

Alexan-Wil proses covered non-single and excessor frequency and an electronic region and excessor frequency of an electronic region and excessor of the excess

crai perceit, "nore accurate" capressions are not reany needs in practice.

Index Term:— CMOS analog integrated circuits, inductor integrated circuit design, integrated circuit modeling.

In STORM CONTROL AND STORM OF STORM OF

Manuacity received November 5, 1998; revised July 12, 1999. This wor was superated by EBM.

The authors are with the Electrical Engineering Department, Stanford University, Stanford, CA 94303 USA (in-mail: moleculpraint: stanford edu). Publisher Team Identifier 5 0018-2000/9900227-X. we made wholey. Fig. $|\langle h_0 \rangle|^2$ do shown the layest for space, we will be sufficient to employ option alone, as indistinct it complainly updated by the same form in the reason with $h_0 > h_0 > h_0$. The same form in the reason with $h_0 > h_0 > h_0$ and the same $h_0 > h_0 > h_0 > h_0$ and the same $h_0 > h_0 > h_0 > h_0$. The same $h_0 > h_0 > h_0 > h_0$ and the same $h_0 > h_0 > h_0 > h_0$ and the same $h_0 > h_0 > h_0$ and

provider nutries and expectives in this model have simple includy matrices approxime, but the informact works believe pages he to compare agreement. The compared matrice by solving the informact can be compared matrice by solving and positionally within a provident control of the compared of the solving and the compared of the solving of the compared of the compared of the compared of the along of the informact of the compared of the along of the informact of the compared o

The Geoschere melded either entitive recovery and the entitle of the control of the control of the control of the dependence of the control of the control of the control of the A fine of the current are can use a simple approximation of the control of the control of the control of the data indicates, expiral entire to 20° or area, which is presented as possible of the control of the control of the presentation of the control of the con

in using that symbols and specialized expressions was evaluated in two ways: with field solver simulations and also with measurement data. For immatrious, we used ASTIC, a simplified field solver gazerd for the design of inflators and transformers [12]. We used a ratio range of inflators, with δ_{tot} raying from 100–480 /m, L varying from 0.5–100

(c)

http://smirc·stanford·edu/papers/JSSC990CT-mohan·pdf

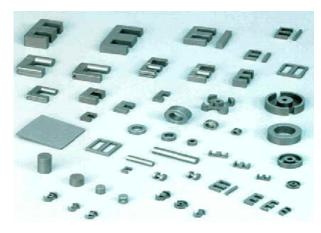
Projeto de indutores de alta frequência com núcleo



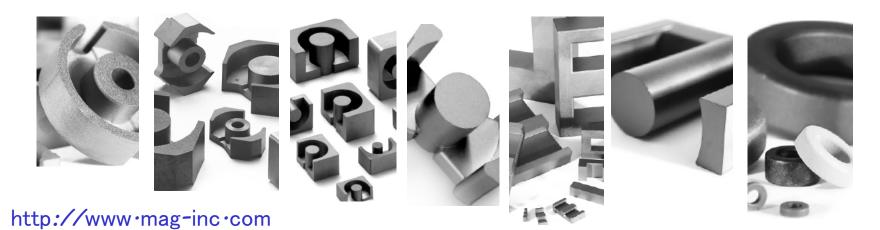
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



http://www·magmattec·com·br

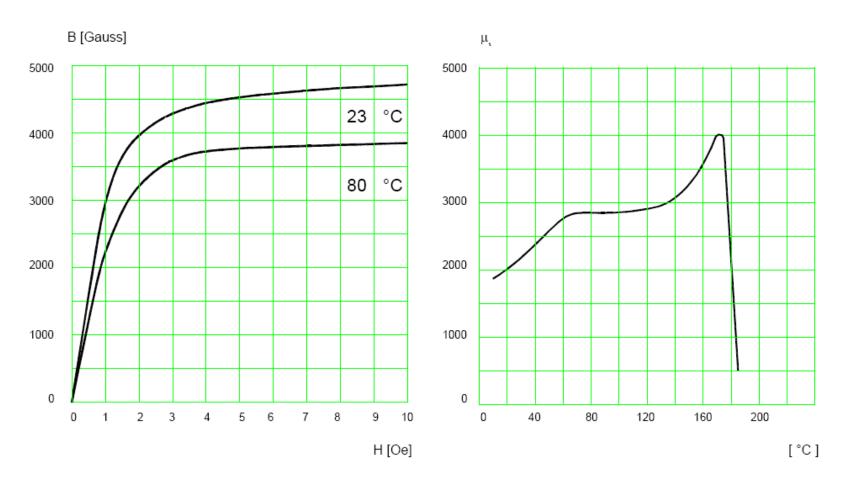


http://www·thornton·com·br





Características do núcleo:

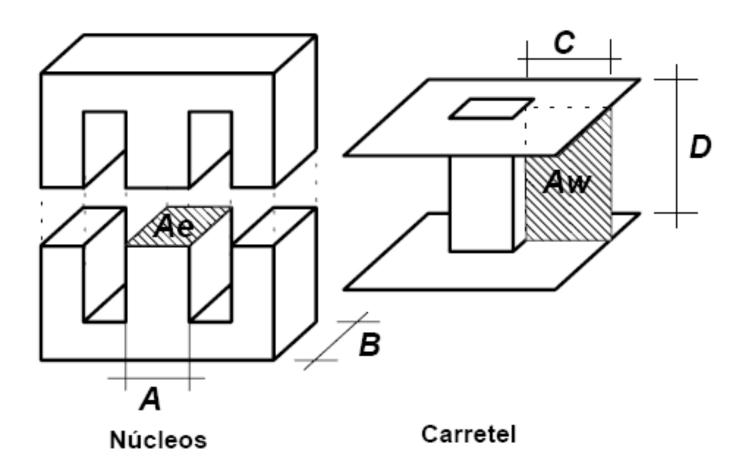


Típico B x H

μι x Temperatura



Montagem do núcleo (com entreferro):





1) Dados de entrada:

$$L_{o} = 100 \, \mu H$$

Indutância do indutor;

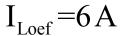
$$F_{\rm s} = 20 \, kHz$$

Frequência de operação;

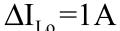
 $i_L(t)$

$$I_{Lop} = 10 A$$

Corrente de pico;



Corrente eficaz;



Ondulação de corrente;



Fator de enrolamento;



Densidade de corrente;

$$B=0,35T$$

Densidade de fluxo máximo;

$$\mu_{0} = 4\pi \cdot 10^{-7} Wb / A / m$$

Permeabilidade no vácuo.



2) Escolha do núcleo:

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

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

| Núcleo | A _e (cm ²) | A _w (cm ²) | l _e (cm) | l _t (cm) | v _e (cm ³) | A_eA_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:

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



5) Perdas no núcleo:

$$K_{II} = 4 \cdot 10^{-5}$$

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



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

$$P_{nucleo} = 0.035^{2.4} \cdot \left(4 \cdot 10^{-5} \cdot 20000 + 4 \cdot 10^{-10} \cdot 20000^{2}\right) \cdot 8$$

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



6) Profundidade de penetração:

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

$$Dfio_{max} = 2 \cdot \Delta = 2 \cdot 0,053 = 0,106 cm$$

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.

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

$$\rho_{22} = 0.000530 \Omega / cm$$



7) Escolha da seção dos condutores:

$$S = \frac{I_{Loef}}{J} = \frac{6}{450} = 0.013 \, cm^2$$
 Maior que a área do fio 22 AWG.

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

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:

$$Rt = 23 \cdot (AeAw)^{-0.37} = 23 \cdot (1.02)^{-0.37} = 22.832 \, {}^{o}C/W$$

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



12) Cálculo do fator de ocupação:

$$Aw_{neces} = \frac{N \cdot N_{fios} \cdot S_{22}}{0.7} = \frac{24 \cdot 5 \cdot 0,004013}{0.7} = 0,688 cm^2$$

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



Próxima aula



Capítulo 9: Choppers DC:

1. Projeto de conversores cc-cc não-isolados.

