

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica de Potência



Projeto de Elementos Magnéticos

Projeto de Indutores

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, novembro de 2015.

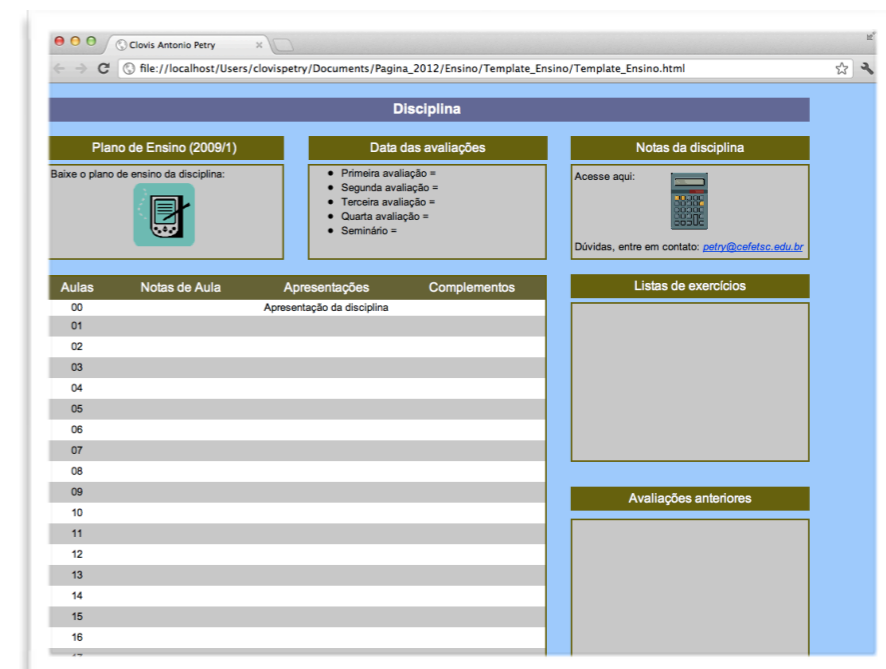
Biografia para Esta Aula

Projeto de indutores em alta frequência:

- Conversor Buck;
- Projeto de indutor com núcleo de ferrite.



www.ProfessorPetry.com.br



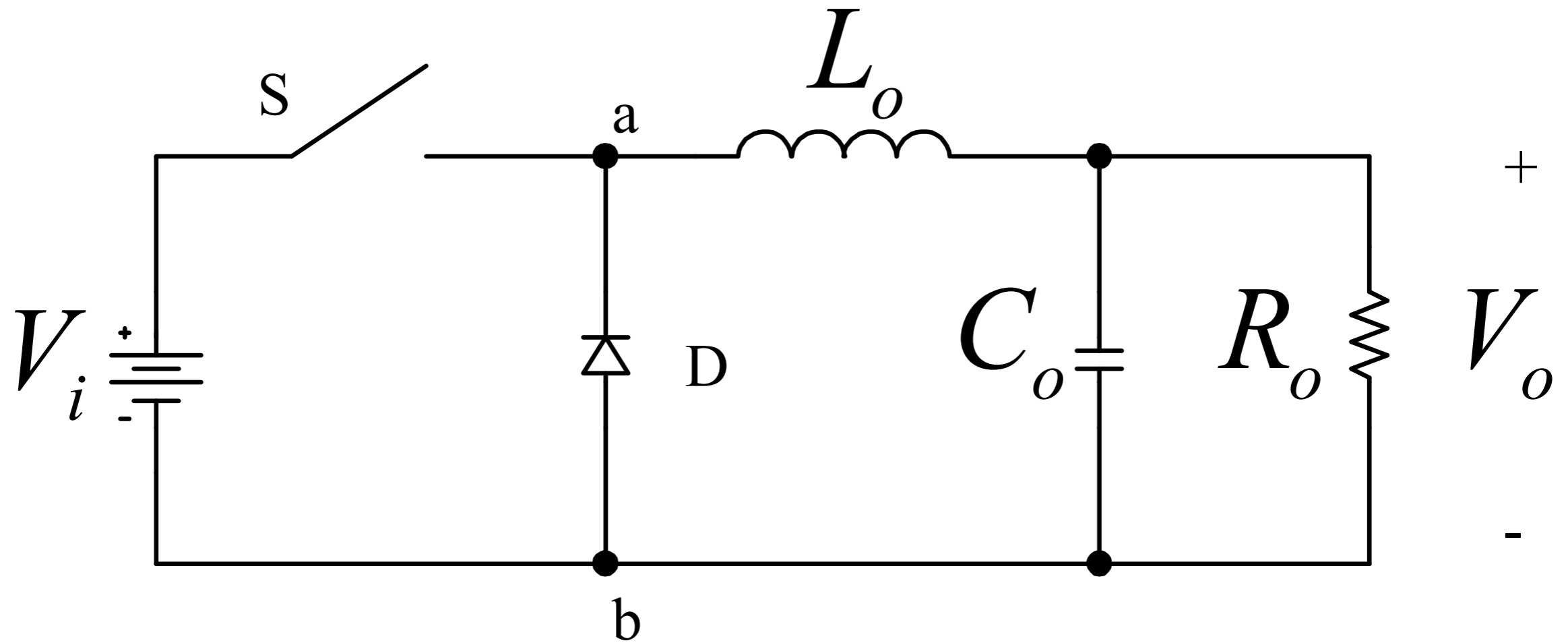
The screenshot shows a web interface for a course page. The browser address bar shows a local file path. The page title is 'Disciplina'. It contains several sections: 'Plano de Ensino (2009/1)' with a download icon; 'Data das avaliações' listing 'Primeira avaliação =', 'Segunda avaliação =', 'Terceira avaliação =', 'Quarta avaliação =', and 'Seminário ='; 'Notas da disciplina' with a calculator icon and contact email 'petry@cefetac.edu.br'; a table with columns 'Aulas', 'Notas de Aula', 'Apresentações', and 'Complementos' showing rows 00 to 16; 'Listas de exercícios'; and 'Avaliações anteriores'.

Nesta Aula

Projeto de indutores em alta frequência:

- Conversor Buck;
- Projeto de indutor com núcleo de ferrite.

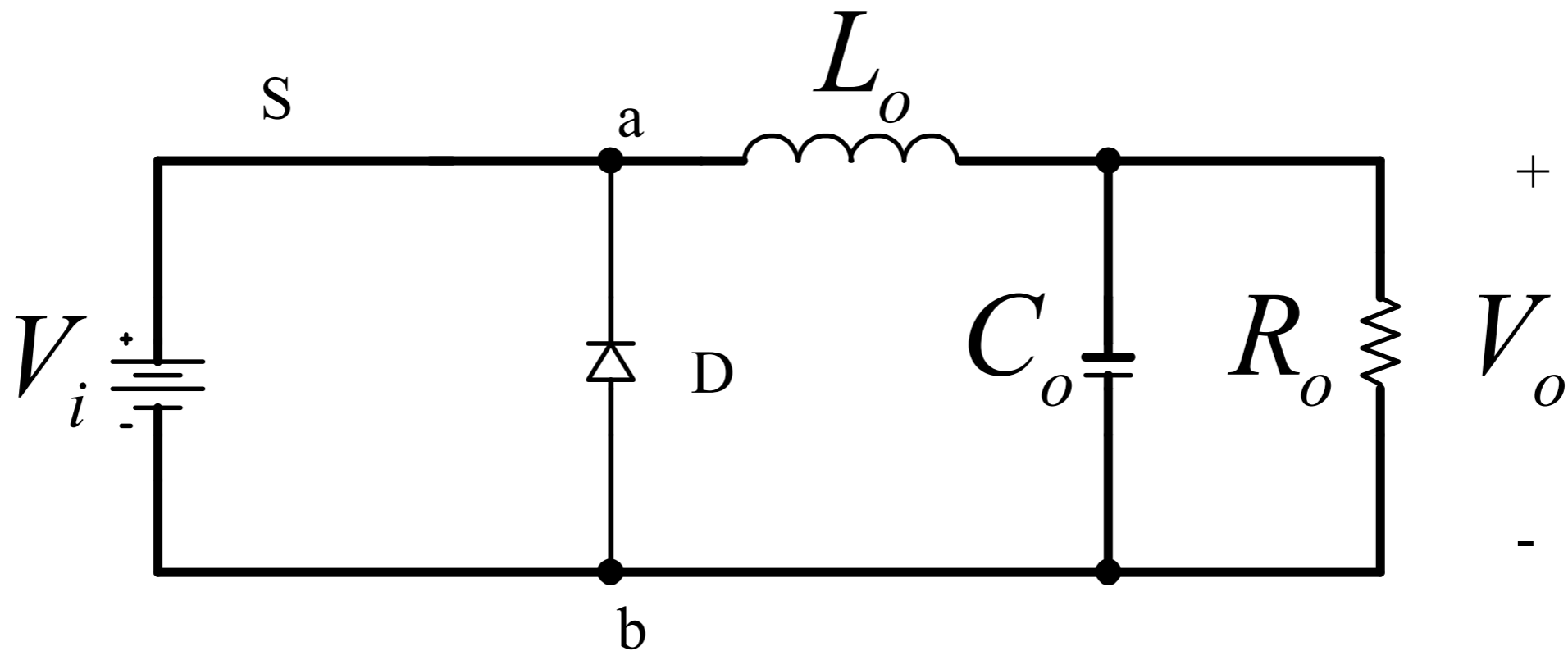
Conversor Buck



Conversor Buck

Primeira etapa de funcionamento:

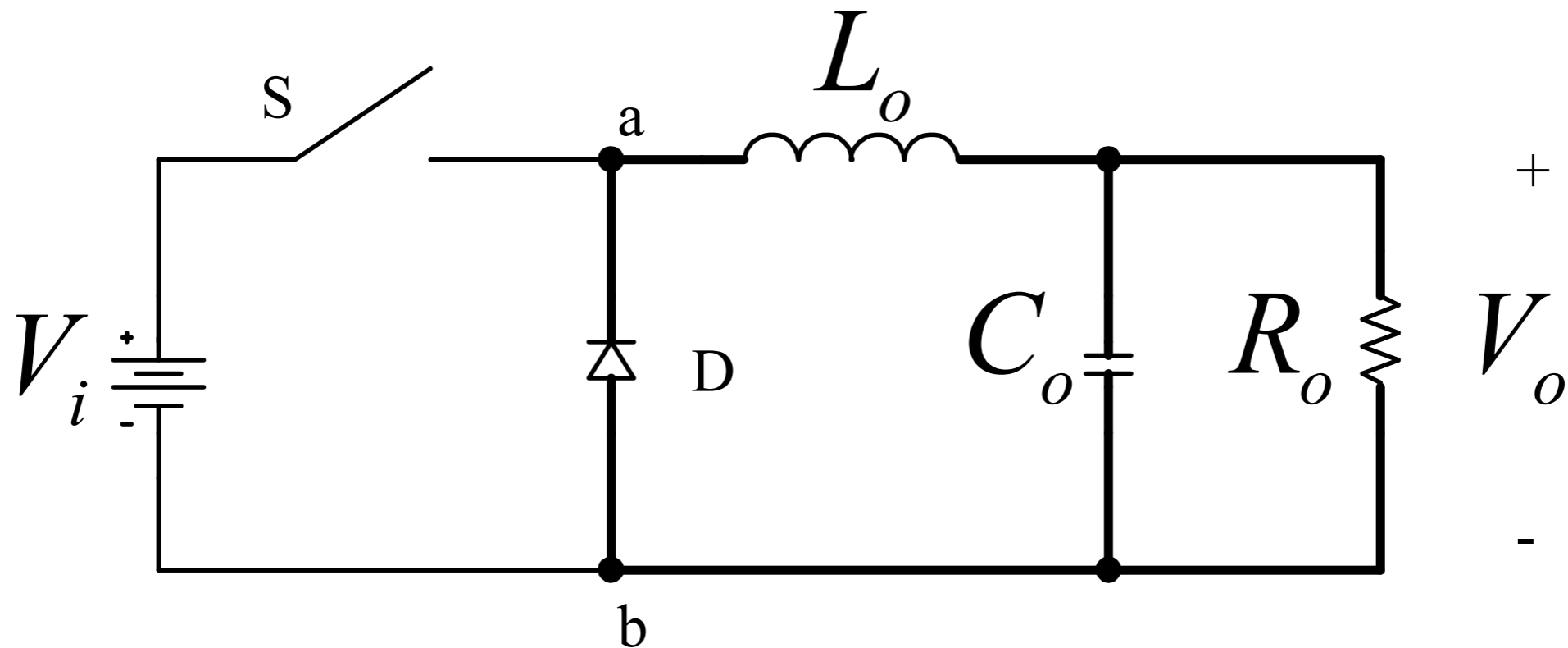
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



Conversor Buck

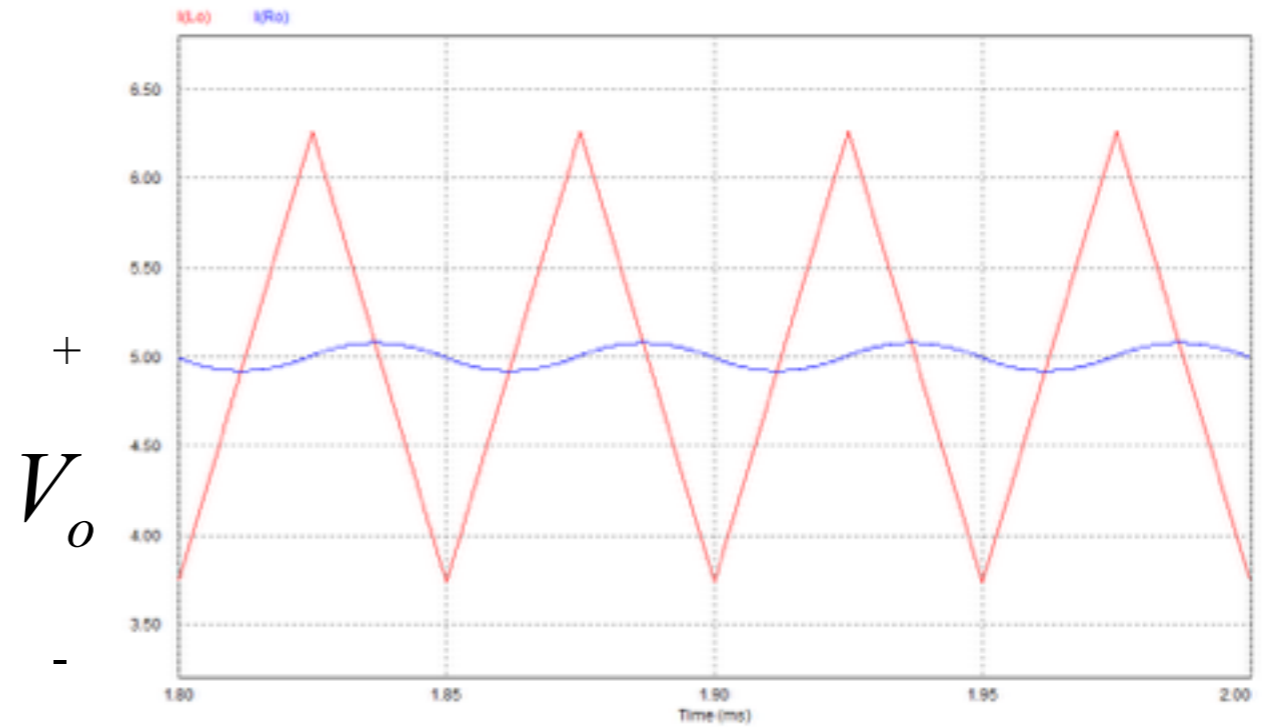
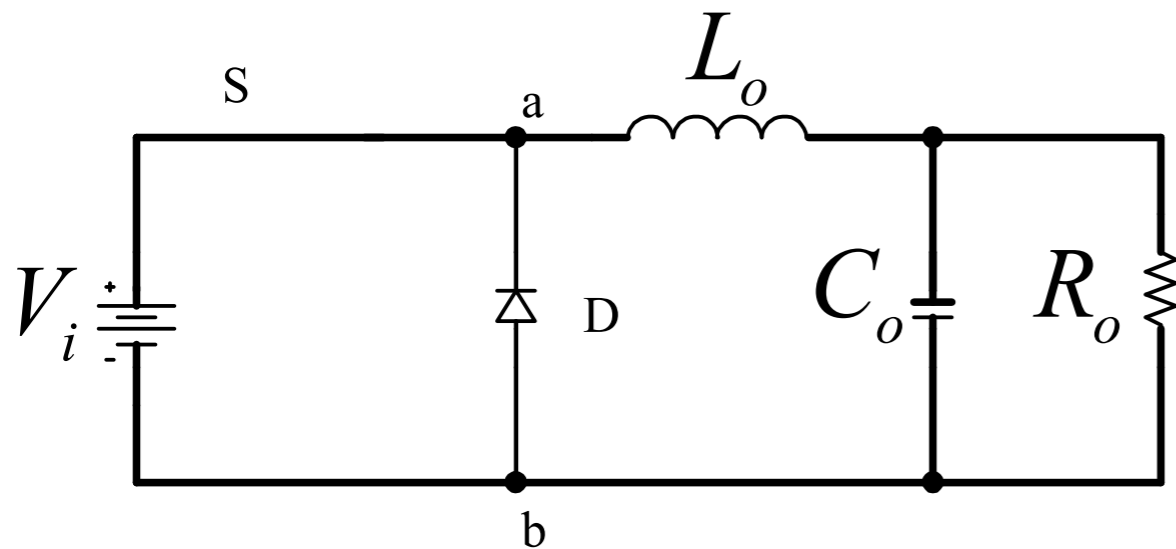
Segunda etapa de funcionamento:

- Interruptor bloqueado;
- Diodo conduzindo;
- Energia armazenada no indutor sendo transferida para saída.



Conversor Buck

Ondulação de corrente em L_o :



$$V_{L_o} = L_o \frac{di_{L_o}}{dt} \approx L_o \frac{\Delta I_{L_o}}{\Delta T}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - V_o) \cdot D \cdot T_s}{L_o}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{V_{L_o} \cdot \Delta T}{L_o}$$

$$\Delta I_{L_o} = \frac{(V_i - D \cdot V_i) \cdot D}{L_o \cdot F_s} = \frac{V_i}{L_o \cdot F_s} D \cdot (1 - D)$$

$$\Delta I_{L_o_max} = \frac{V_i}{4 \cdot L_o \cdot F_s}$$

Projeto de Indutores

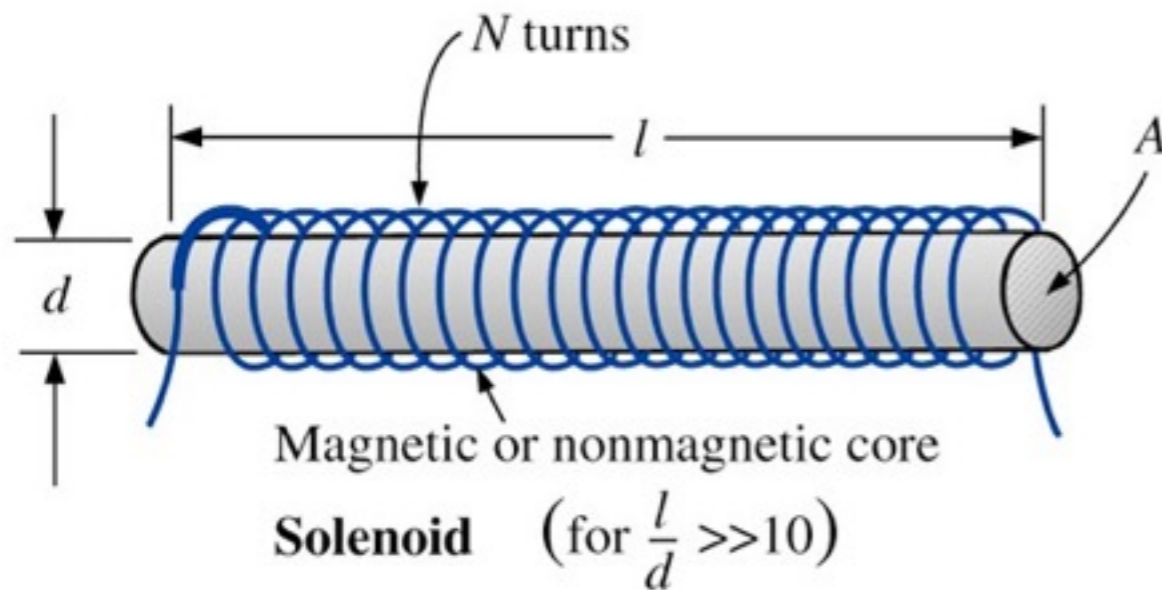
O projeto de um indutor depende:

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

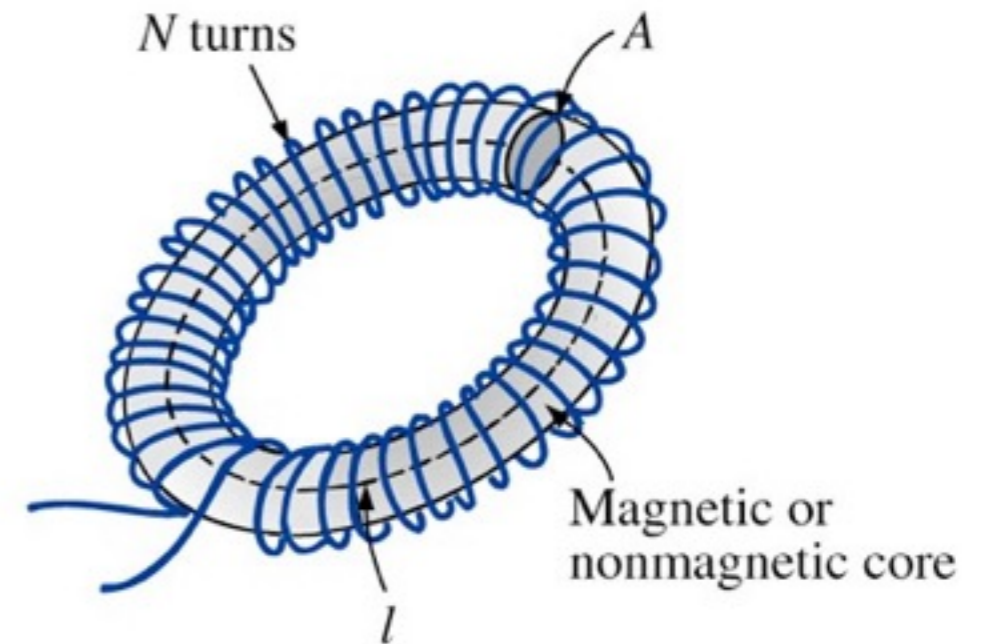
Auto-Indutância

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)

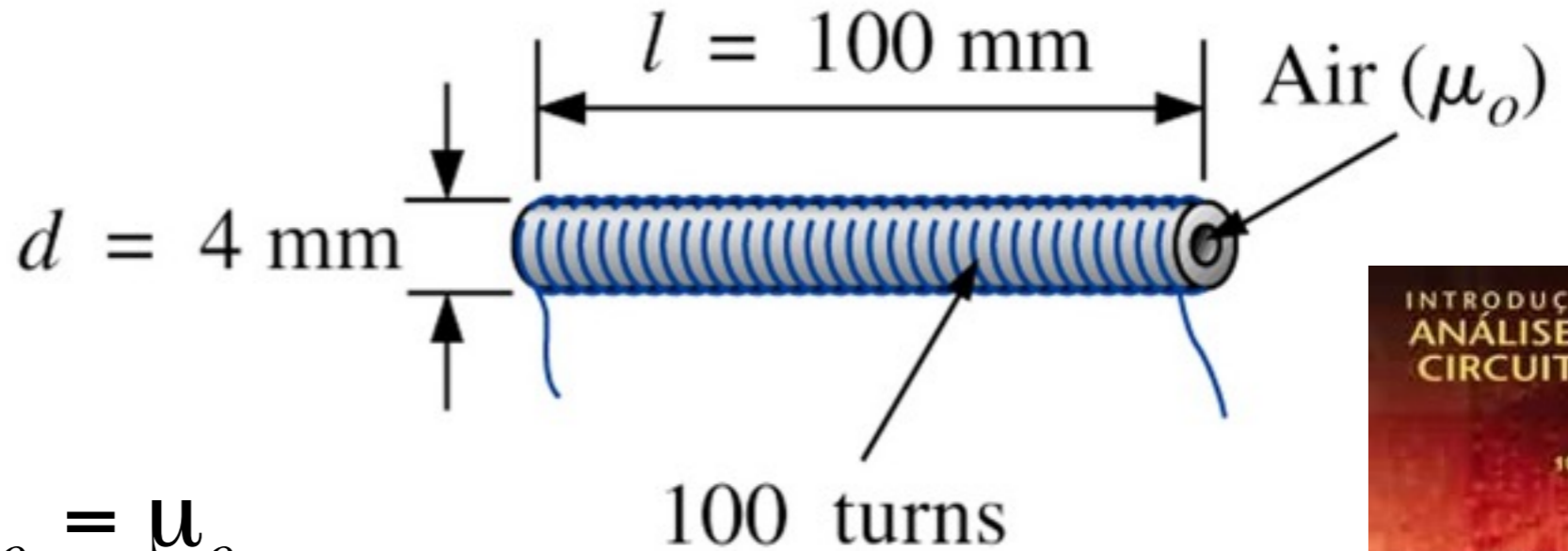


Toroid

(b)

Auto-Indutância

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



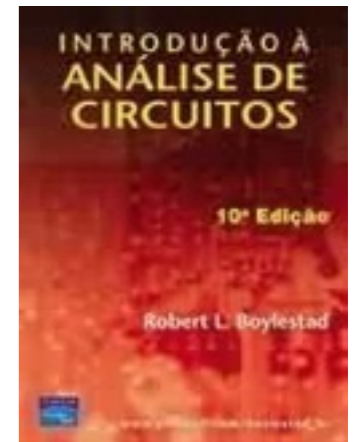
$$\mu_r = 1$$

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 1 \cdot \mu_0 = \mu_0$$

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

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

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



Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobinas longas:

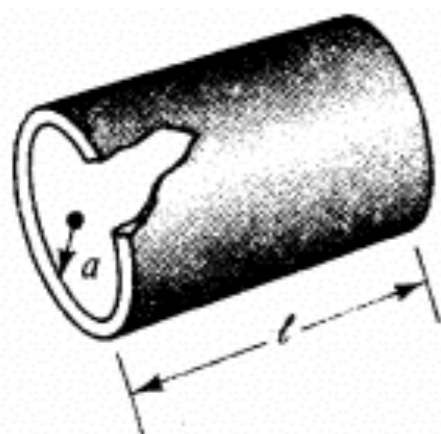
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad \longrightarrow \quad N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

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].

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

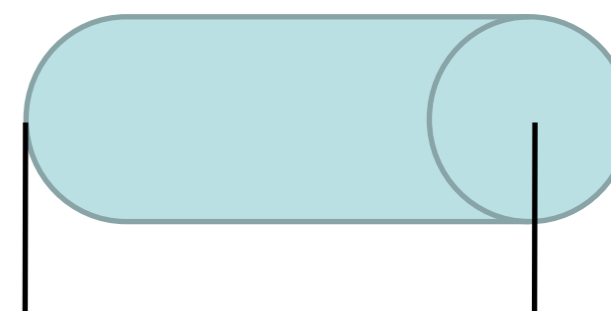
Bobina de camada única com núcleo de ar:



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

Onde:

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



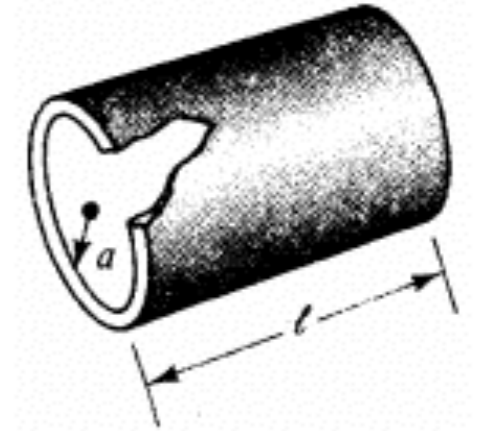
$$l = N \cdot D_{fio}$$

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobina de camada única com núcleo de ar:

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

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

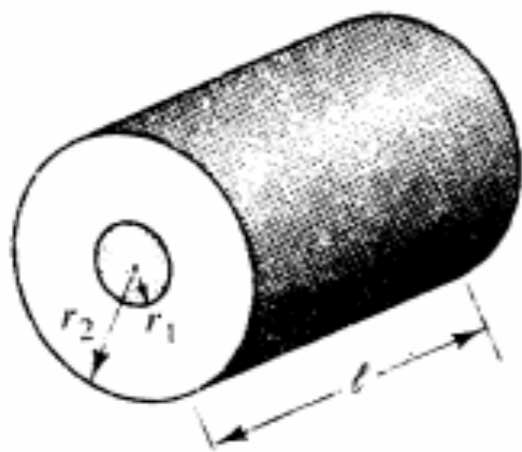


$$39,5 \cdot a^2 \cdot N^2 - 10 \cdot L \cdot D_{fio} \cdot N - 9 \cdot a \cdot L = 0$$

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

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



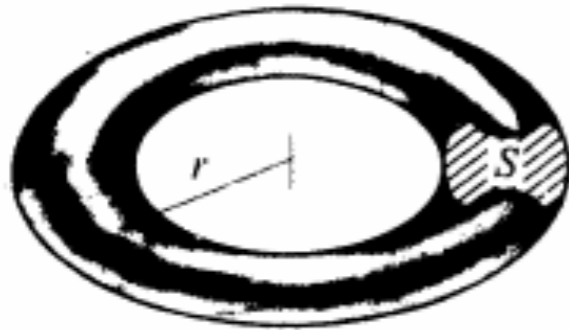
$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6 \cdot r_1 + 9 \cdot l + 10 \cdot (r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

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].

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Núcleos toroidais:



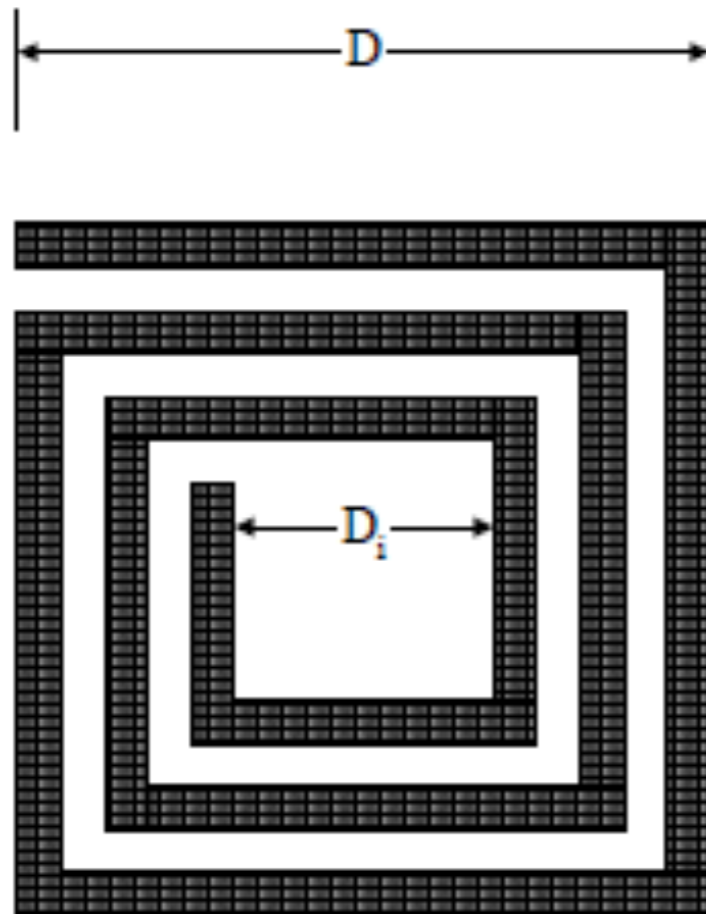
$$N = \sqrt{\frac{2\pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

Onde:

- N - número de espiras da bobina;
- L - indutância [Henry, H];
- A - área do núcleo [m^2];
- μ - permeabilidade do núcleo [$\text{Wb}/\text{A}\cdot\text{m}$];
- r - raio do toroide [m].

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Indutor planar:



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

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

De acordo com:

INDUCTOR Inductance Calculation Techniques -- Part II: Approximations and Handbook Methods
Peer-Comment and Feedback Forum, December 1991, archive: <http://www.marctt2.com>

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

Max T. Thompson, Ph.D.¹

INDEX OF SYMBOLS

A	Area enclosed by coil
a	Coil inner radius
b	Coil outer radius
c	Coil radial thickness
r	Coil radial thickness
D	Side length of square coil
d	Wire-to-wire spacing
Σ	Helipole coil constant
l	Coil length
p	Perimeter enclosed by coil
R, P	Cherry disk coil constant
R	Circular wire radius
s	Side length of generic polygon
w	Trace width
x, y	Mean side length of rectangular coil
μ_0	Magnetic permeability of free space $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

1. INTRODUCTION

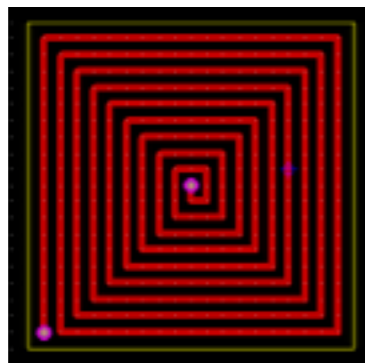
In the second part of this two-part series on inductance calculation techniques, approximations techniques and handbook methods are shown for up-close attention that do not usually lend themselves to closed-form solutions. A set of references is also given which is useful for finding the inductance of many different loop shapes. Included are inductance calculations for polygons, disk coils, finite-length solenoids and flat plate spirals. In some cases results are given without regard for approximations, so the calculations are very complicated and the final calculations may be found in the references given. Many of the other references work on inductance problems in English units, so some design calculations have been converted to SI units with inductance in Henries and length scales in meters.

2. REFERENCE REVIEW

Inductance calculation references are usually cited with Haken's seminal work [1], first published in 1973. Maxwell worked out some interesting inductance problems, including finding the mutual inductance between circular current elements [1, pp. 139], and finding the size and shape of a coil which maximizes inductance for a given length of wire [1, pp. 141].

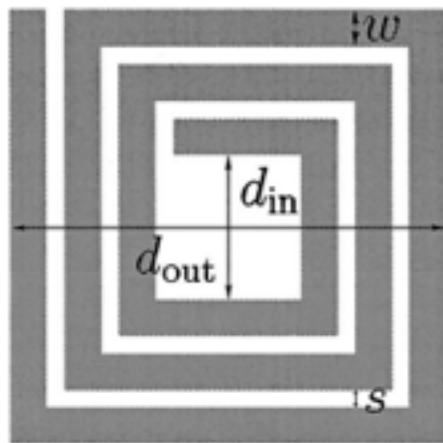
¹The author is an independent member of 22 Commonwealth Road, Wrentham, Massachusetts, USA 01978. E-mail: marctt2@aol.com. Fax: (508) 523-4760. Website: <http://members.aol.com/marctt2> and in Adjunct Associate Professor of Electrical Engineering, Wisconsin Polytechnic Institute, Wisconsin, USA 53400.

© Max T. Thompson, 1999
EIA Tech2000 #12011 12/04/96 Page 1 of 11

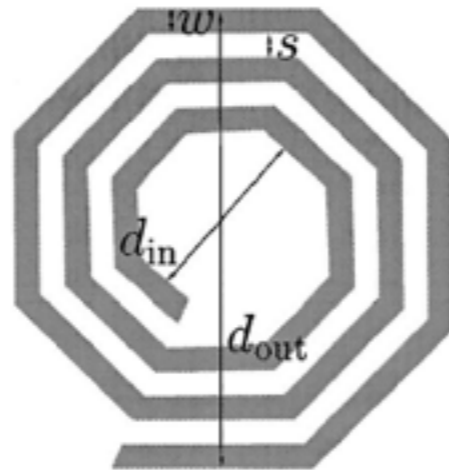


Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

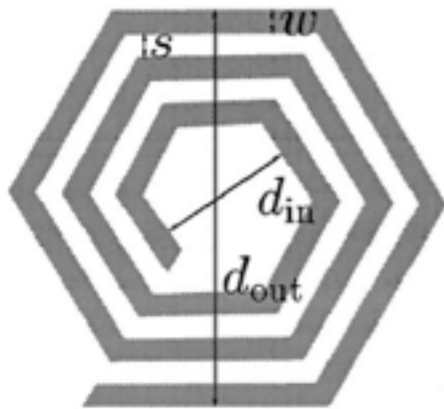
Indutor planar:



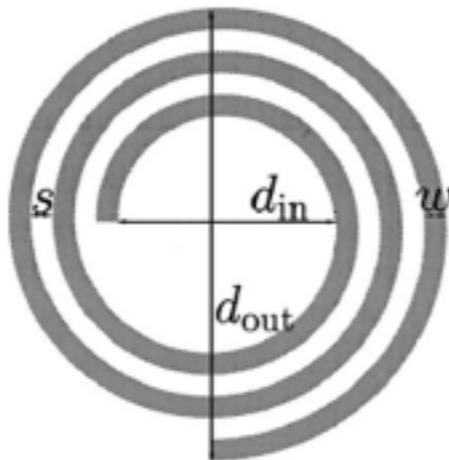
(a)



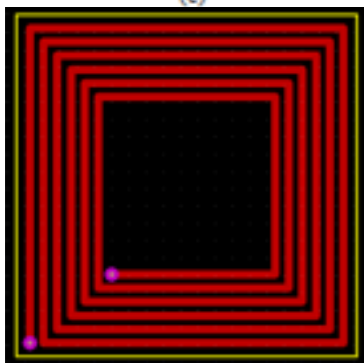
(b)



(c)



(d)



$$L = k_1 \cdot u_o \cdot \frac{n^2 \cdot d_{avg}}{1 + k_2 \cdot \rho} \quad k_1 = 2,34 \quad k_2 = 2,75$$

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

De acordo com:

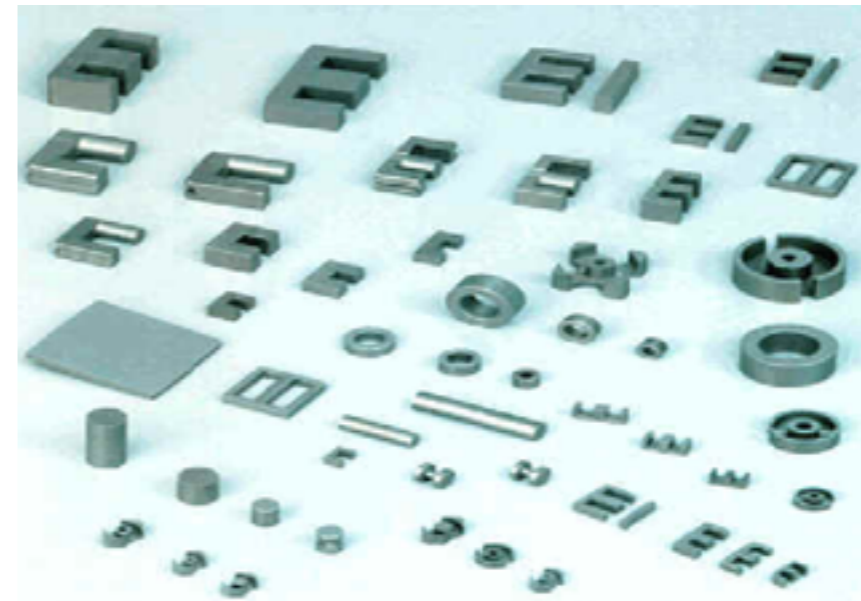


Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

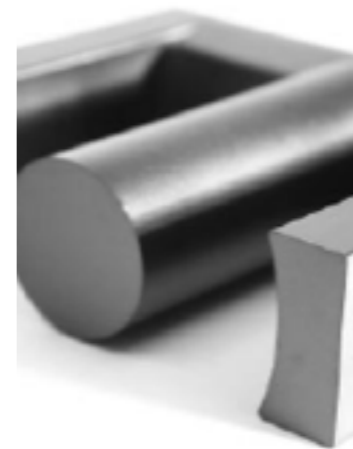
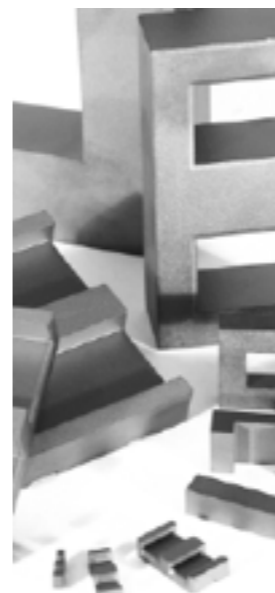
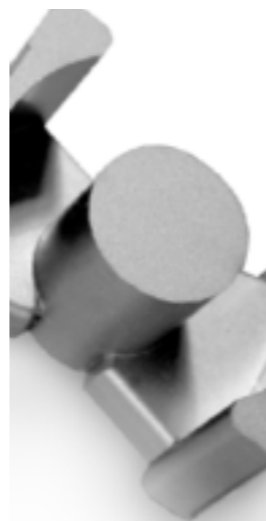
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



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



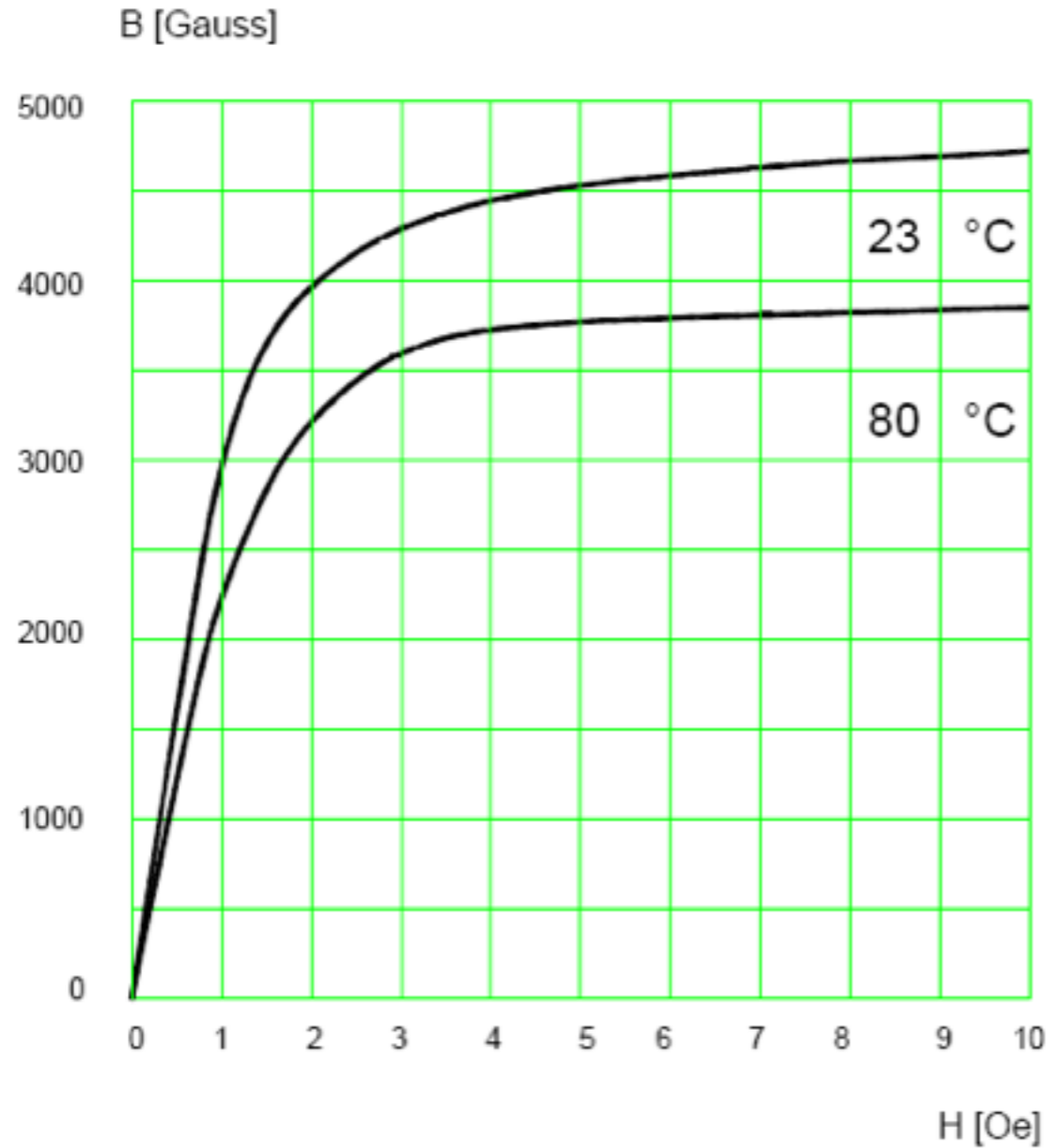
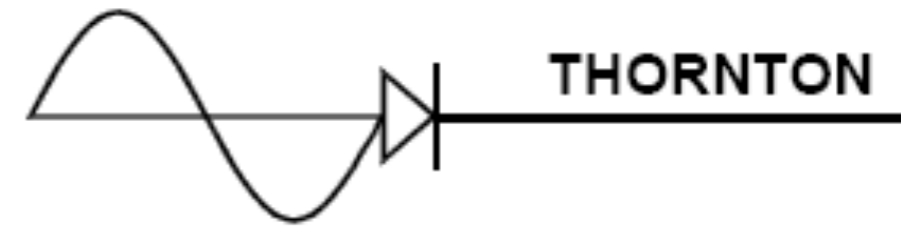
<http://www.thornton.com.br>



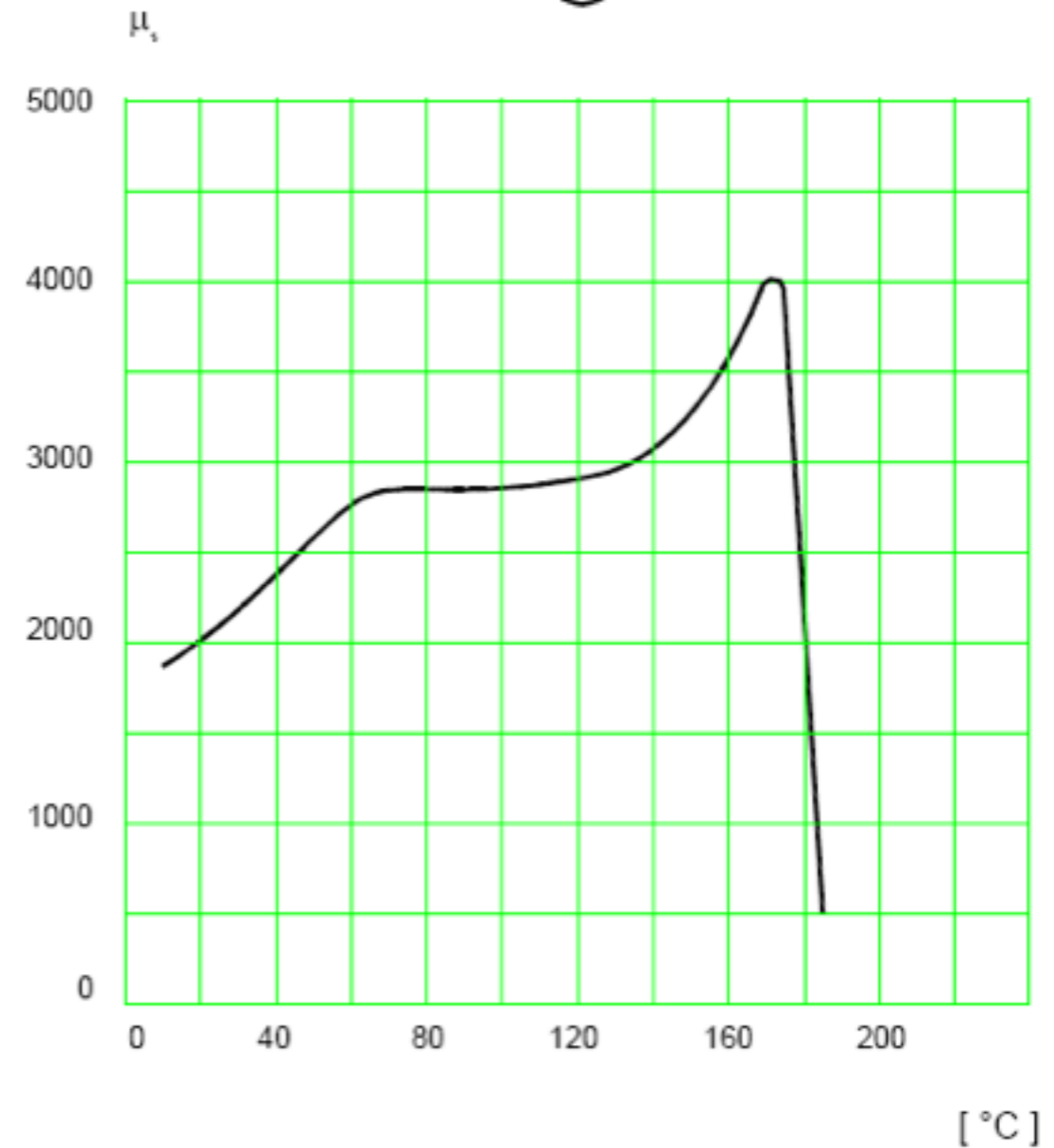
<http://www.mag-inc.com>

Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

Características do núcleo:



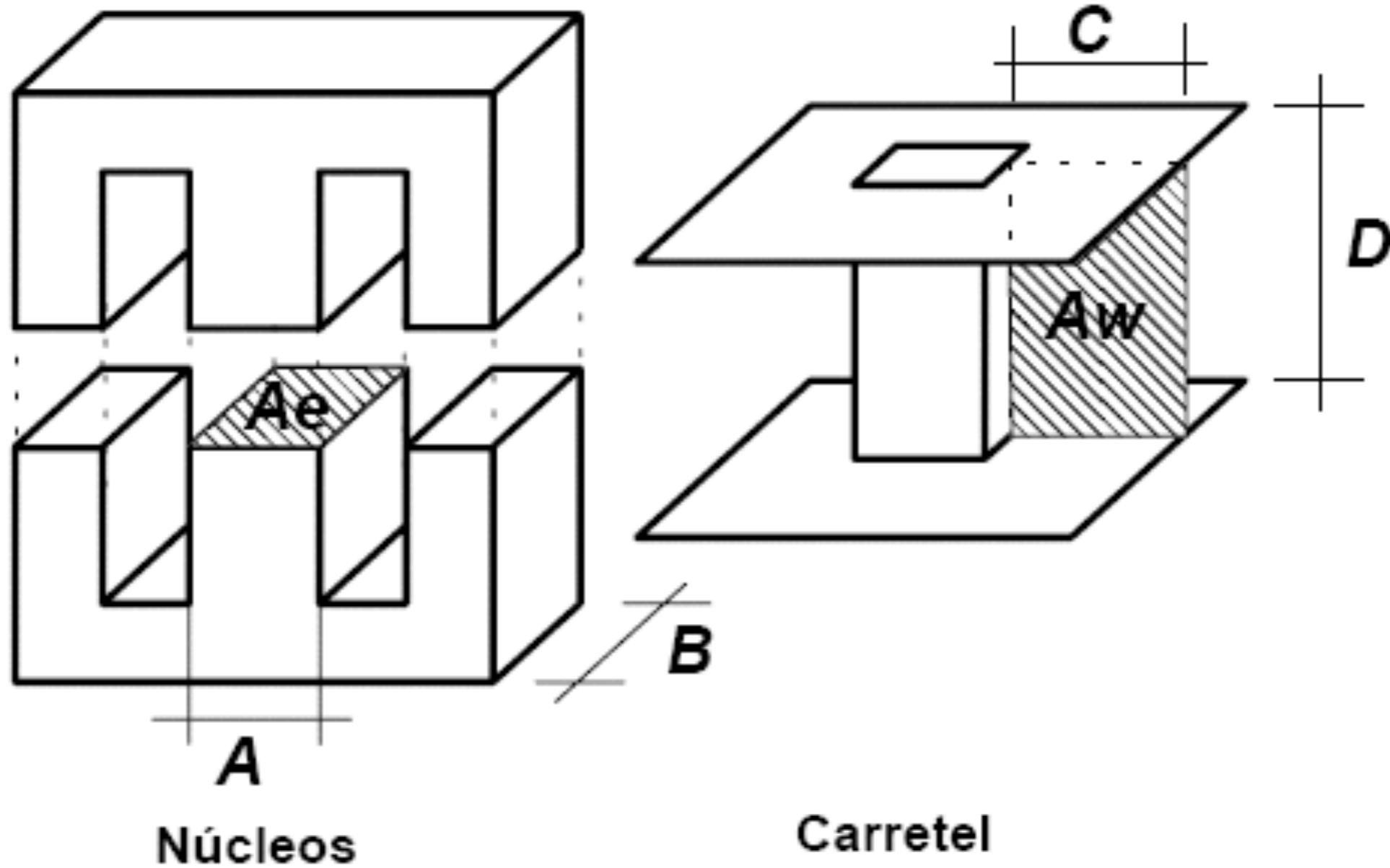
Típico B x H



μ_r x Temperatura

Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

Montagem do núcleo (com entreferro):



Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

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;

Freqüência de operação;

Corrente de pico;

Corrente eficaz;

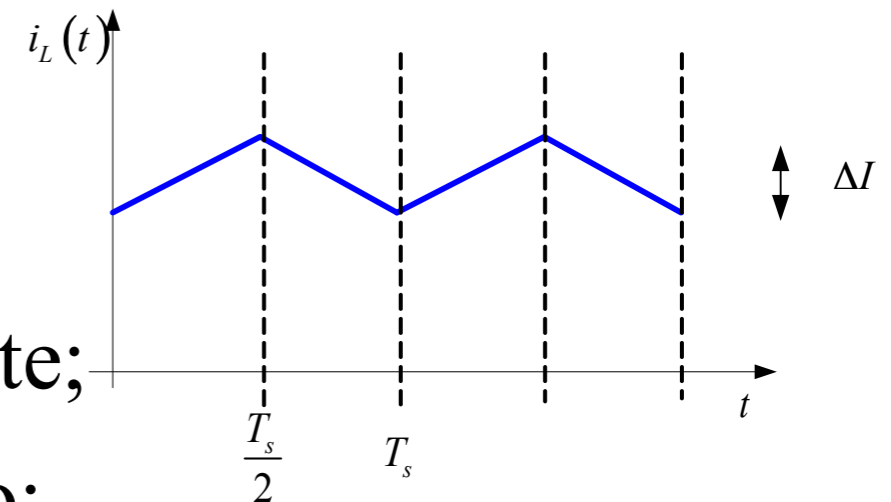
Ondulação de corrente;

Fator de enrolamento;

Densidade de corrente;

Densidade de fluxo máximo;

Permeabilidade no vácuo.



Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

2) Escolha do núcleo:

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

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

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 com Núcleo de Ferrite

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:

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

5) Perdas no núcleo:

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

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

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

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

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



Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

6) Profundidade de penetração:

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

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

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.

$$A_{\text{cu}22} = 0,003255 \text{ cm}^2$$

$$S_{22} = 0,004013 \text{ cm}^2$$

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

Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

7) Escolha da seção dos condutores:

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

$$N_{fios} = \frac{S}{A_{cu22}} = \frac{0,013}{0,003255} = 4 \text{ fios} \rightarrow 5 \text{ fios}$$

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 com Núcleo de Ferrite

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:

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

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

Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

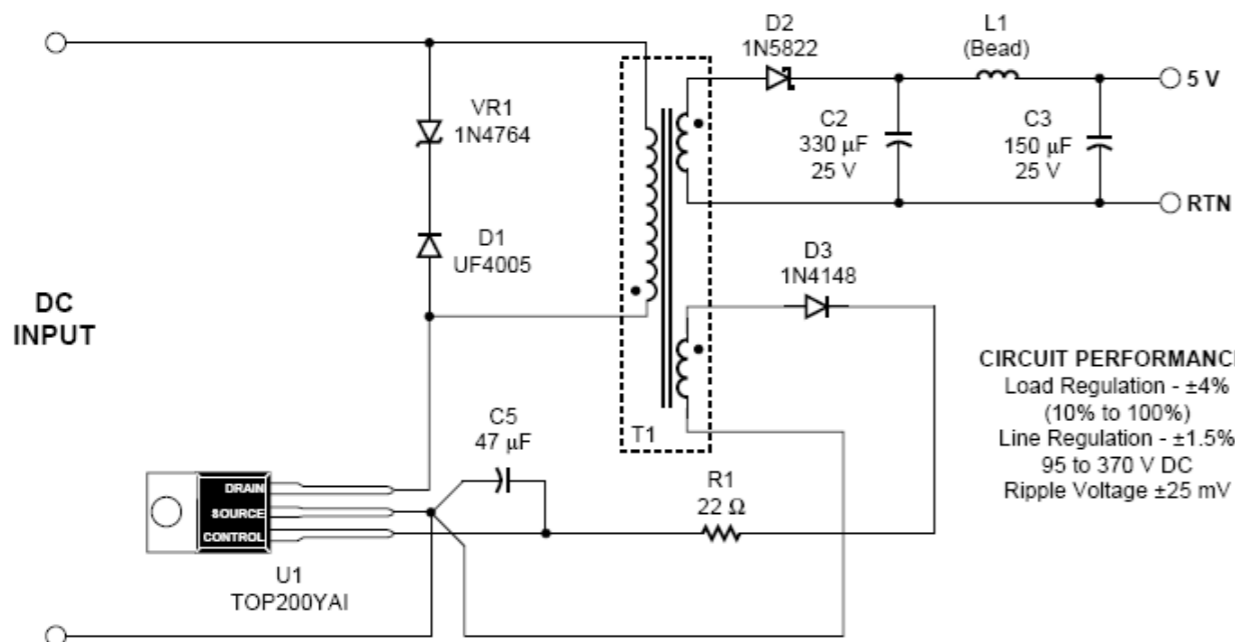
12) Cálculo do fator de ocupação:

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

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

Conversores cc-cc:

- Conversores cc-cc isolados.



CIRCUIT PERFORMANCE:
 Load Regulation - $\pm 4\%$
 (10% to 100%)
 Line Regulation - $\pm 1.5\%$
 95 to 370 V DC
 Ripple Voltage ± 25 mV

