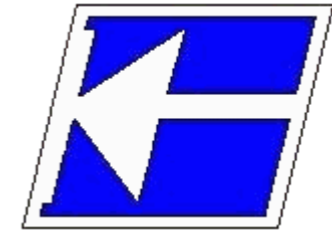


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica de Potência



Projeto de Elementos Magnéticos

Projeto de Indutores

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, setembro de 2014.

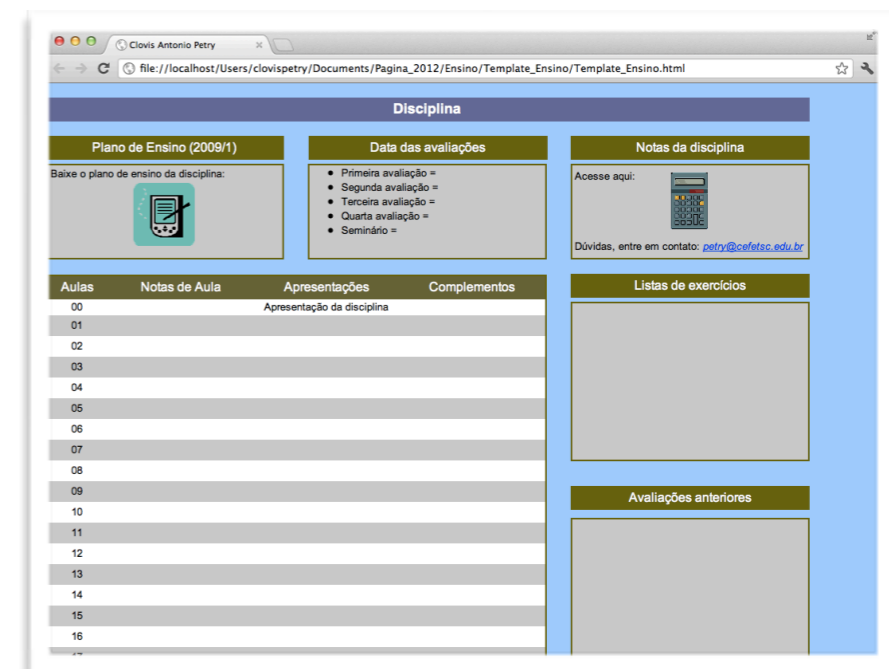
Biografia para Esta Aula

Projeto de indutores em alta frequência:

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



www.ProfessorPetry.com.br



A screenshot of a web browser displaying a course page. The browser address bar shows the file path: file:///localhost/Users/clovispetry/Documents/Pagina_2012/Ensino/Template_Ensino/Template_Ensino.html. The page title is 'Disciplina'. The content is organized into several sections:

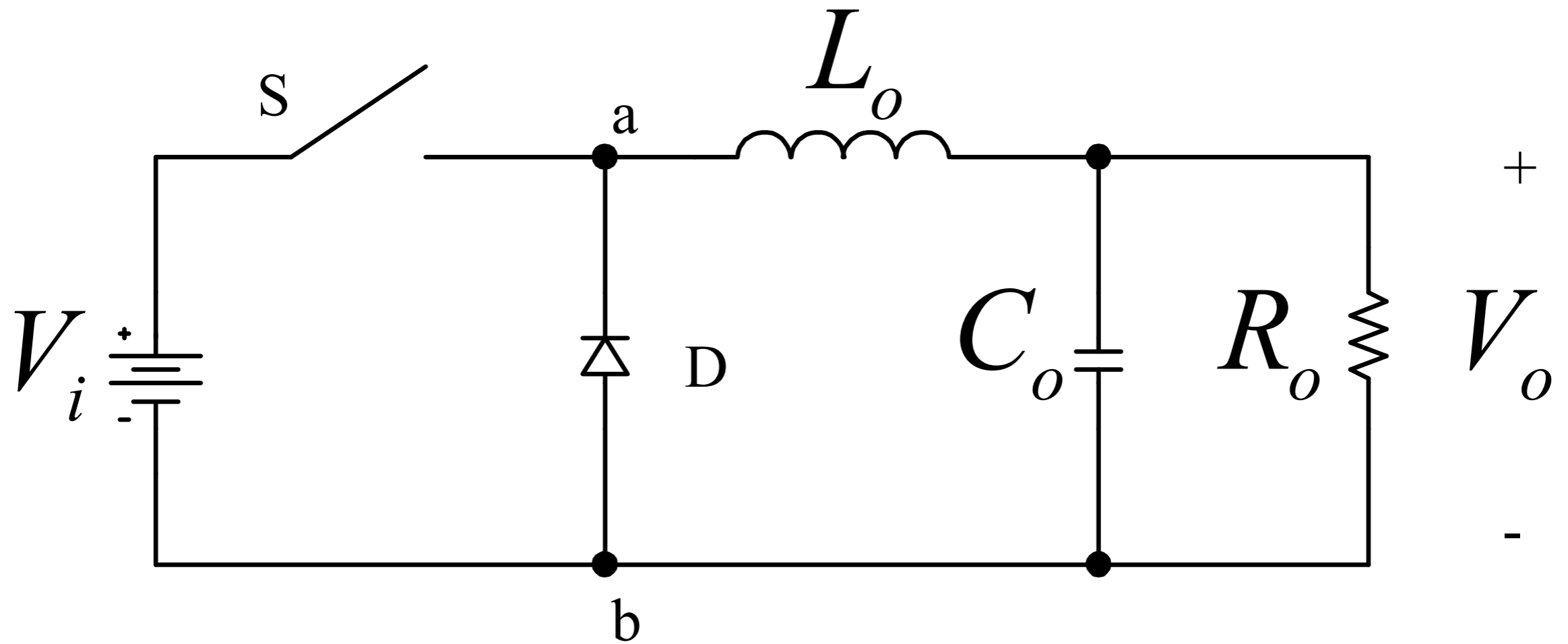
- Plano de Ensino (2009/1)**: Includes a link to download the course plan.
- Data das avaliações**: Lists evaluation dates: Primeira avaliação, Segunda avaliação, Terceira avaliação, Quarta avaliação, and Seminário.
- Notas da disciplina**: Includes a calculator icon and a contact email: petry@cefetsc.edu.br.
- Table of Aulas (Lessons)**: A table with columns for 'Aulas', 'Notas de Aula', 'Apresentações', and 'Complementos'. The first row shows '00 Apresentação da disciplina'.
- Listas de exercícios**: A section for exercise lists.
- Avaliações anteriores**: A section for previous evaluations.

Nesta Aula

Projeto de indutores em alta frequência:

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

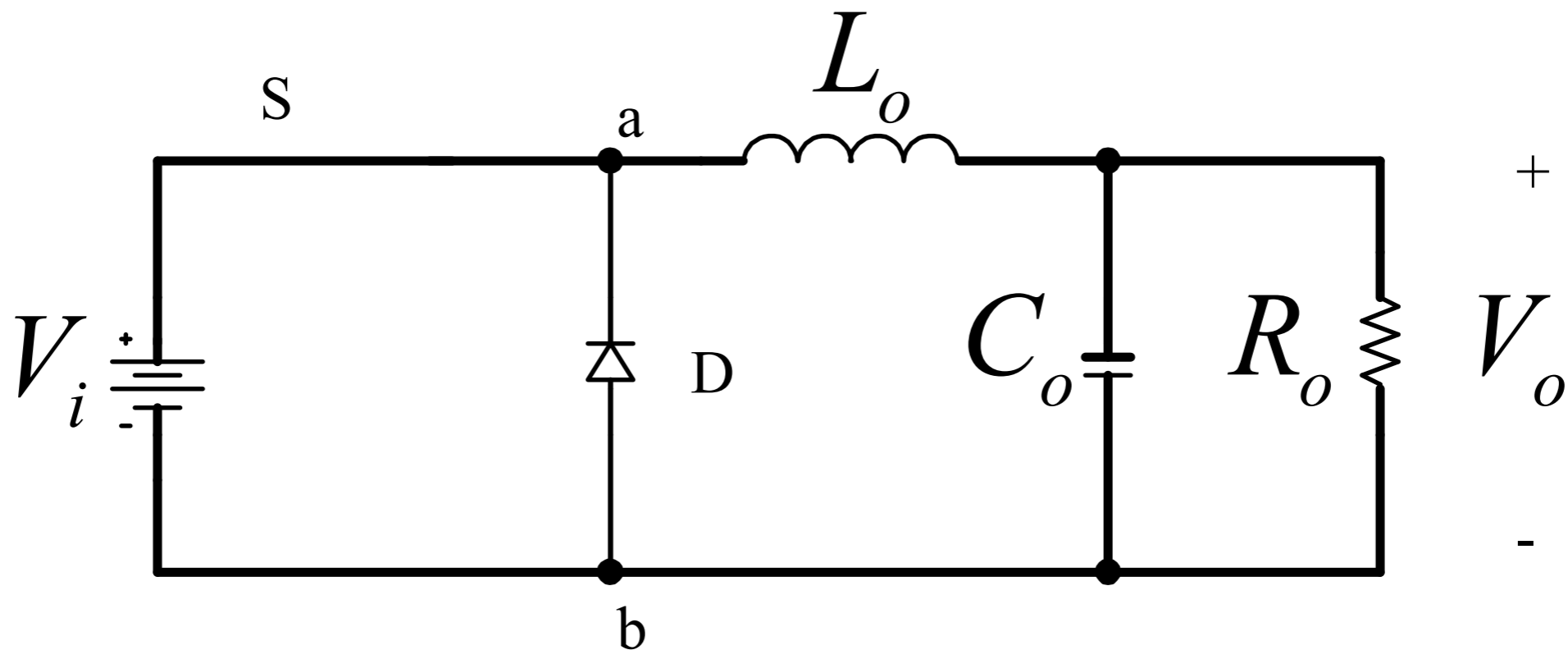
Conversor Buck



Conversor Buck

Primeira etapa de funcionamento:

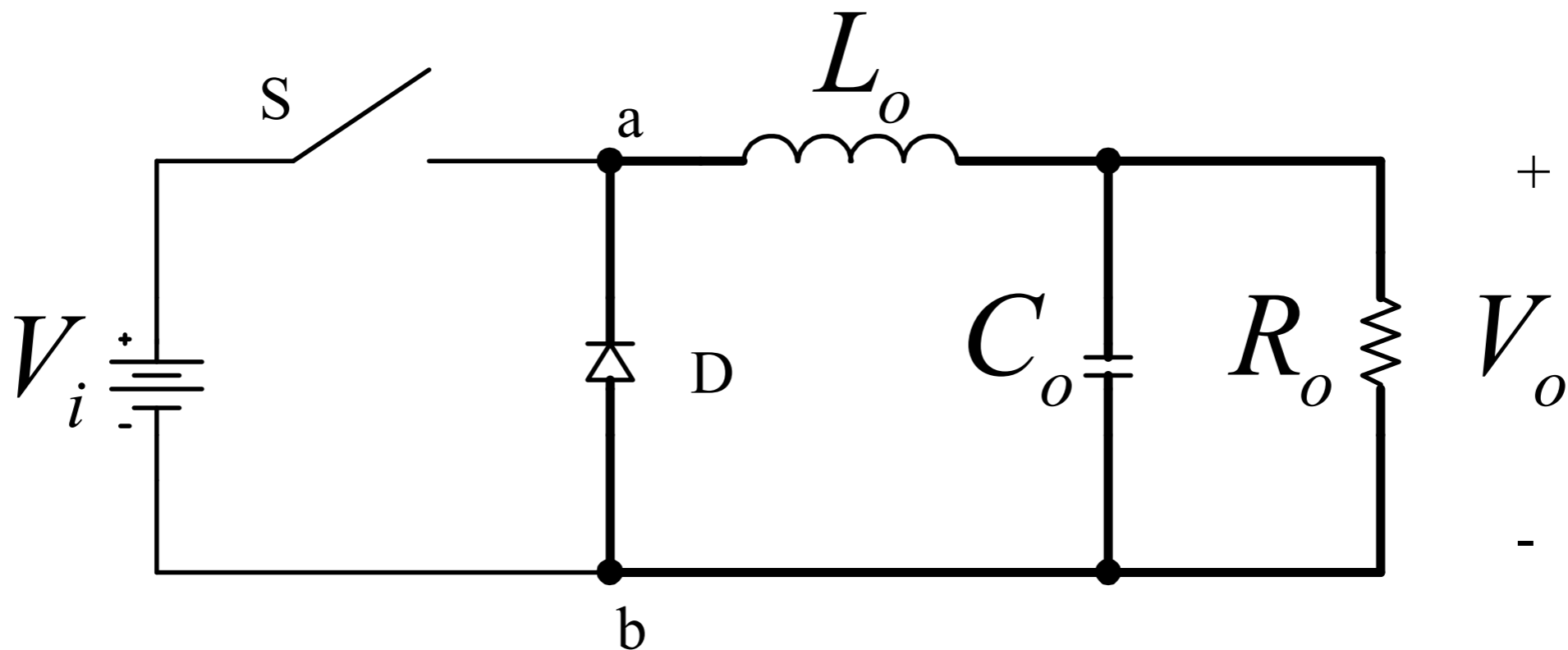
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



Conversor Buck

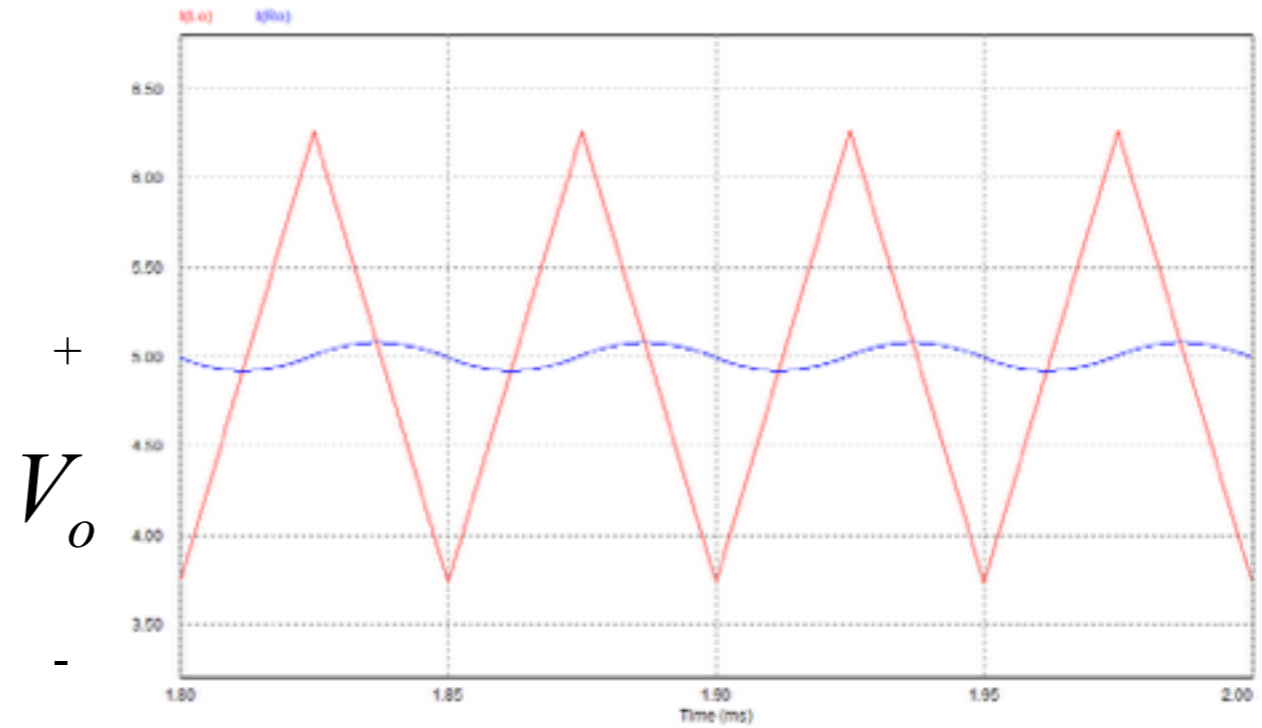
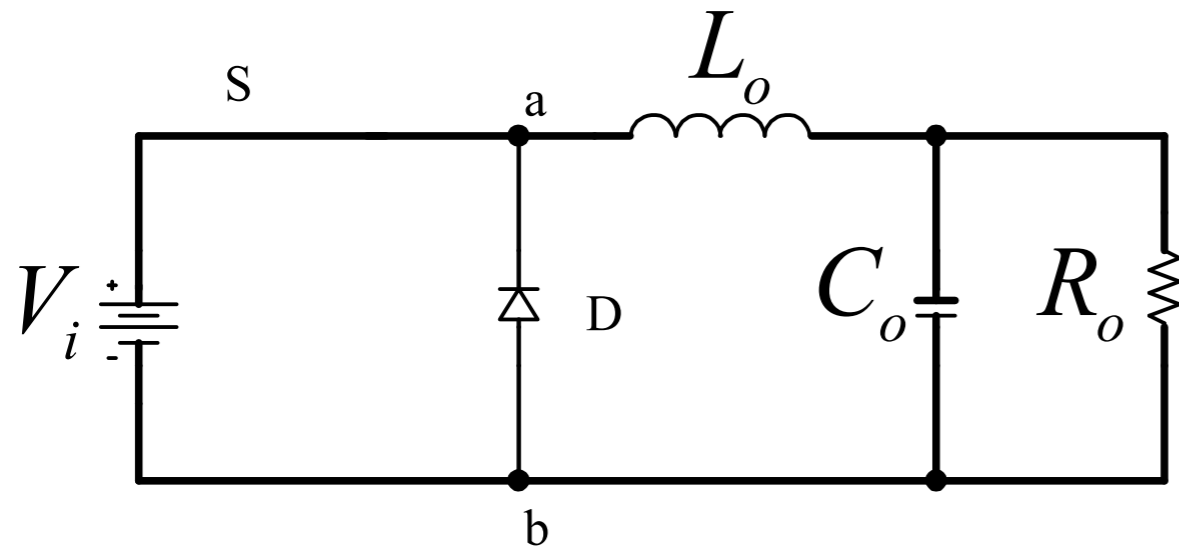
Segunda etapa de funcionamento:

- 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

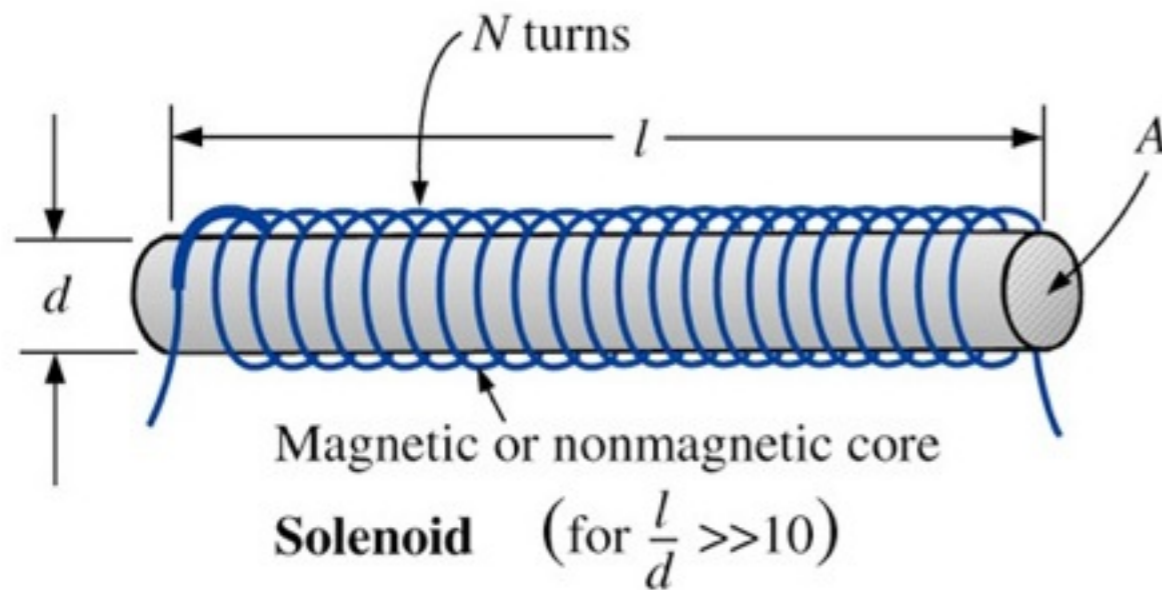
O projeto de um indutor depende:

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

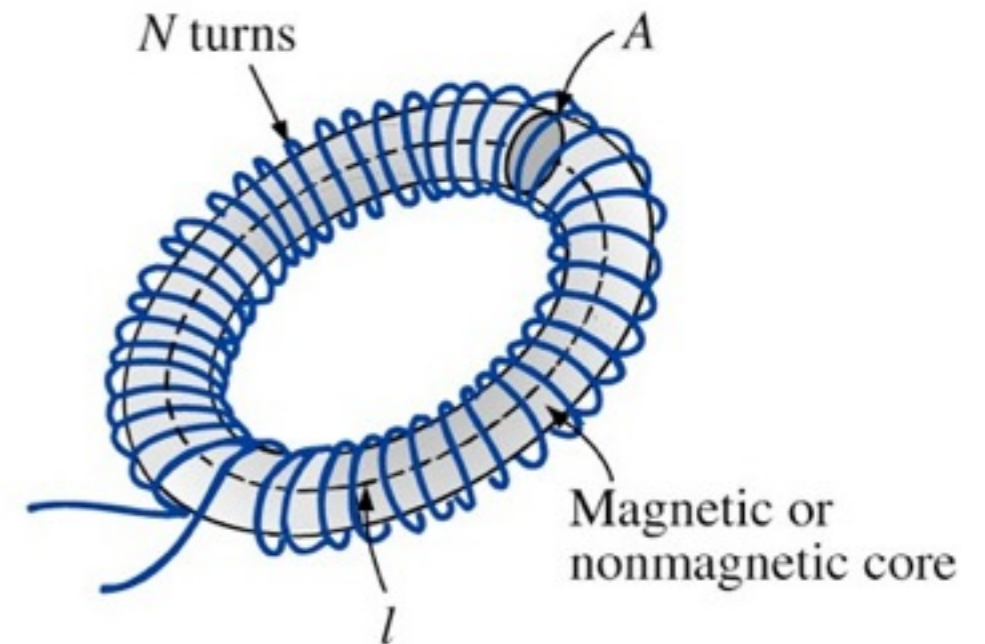
Auto-Indutância

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).

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



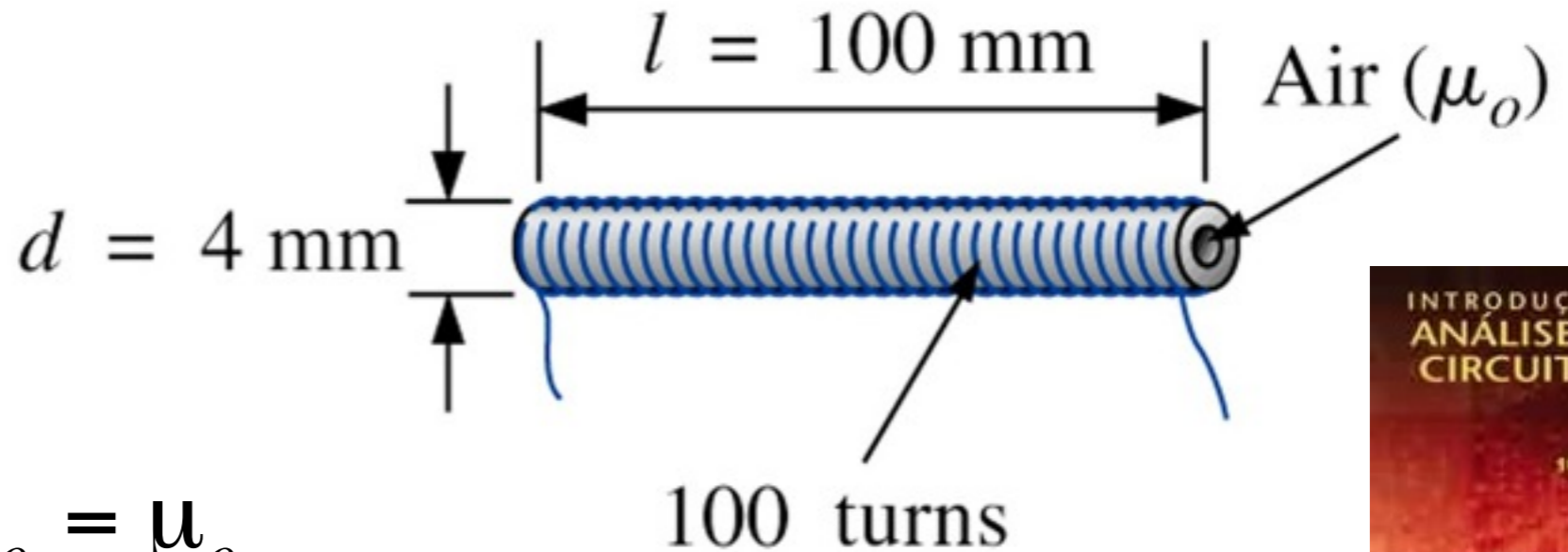
(a)



(b)

Auto-Indutância

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



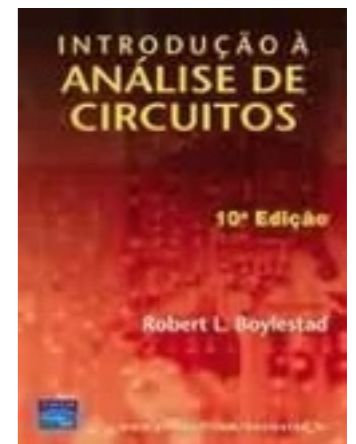
$$\mu_r = 1$$

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

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

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

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



Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobinas longas:

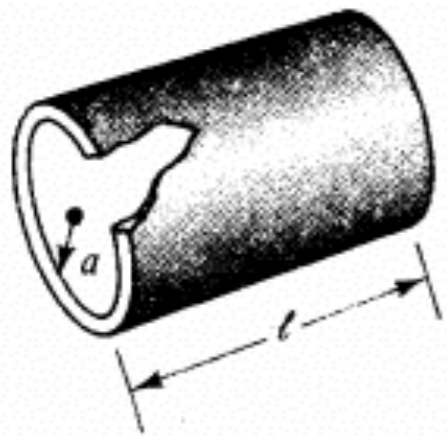
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad \longrightarrow \quad N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

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

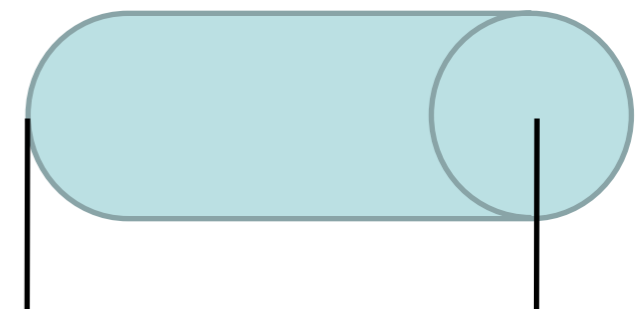
Bobina de camada única com núcleo de ar:



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

Onde:

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



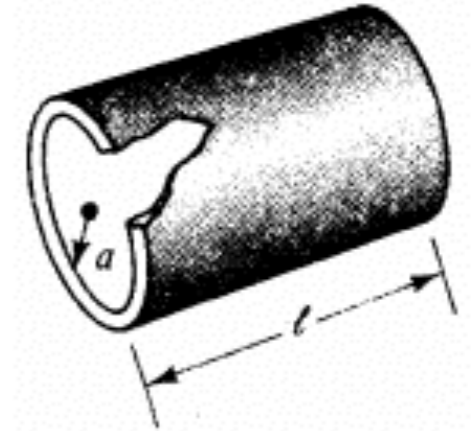
$$l = N \cdot D_{fio}$$

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobina de camada única com núcleo de ar:

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

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

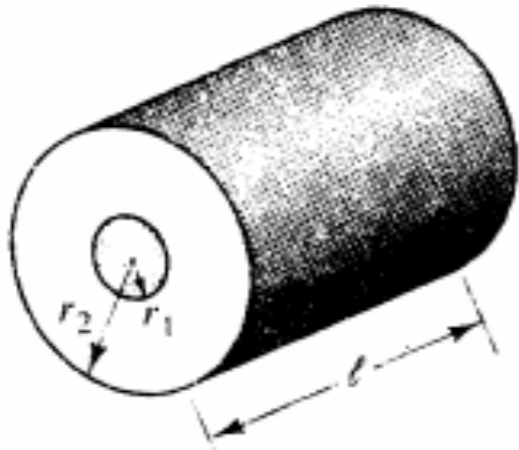


$$39,5 \cdot a^2 \cdot N^2 - 10 \cdot L \cdot D_{fio} \cdot N - 9 \cdot a \cdot L = 0$$

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

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



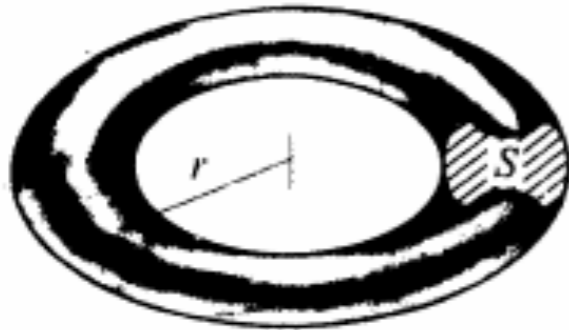
$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6 \cdot r_1 + 9 \cdot l + 10 \cdot (r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

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:



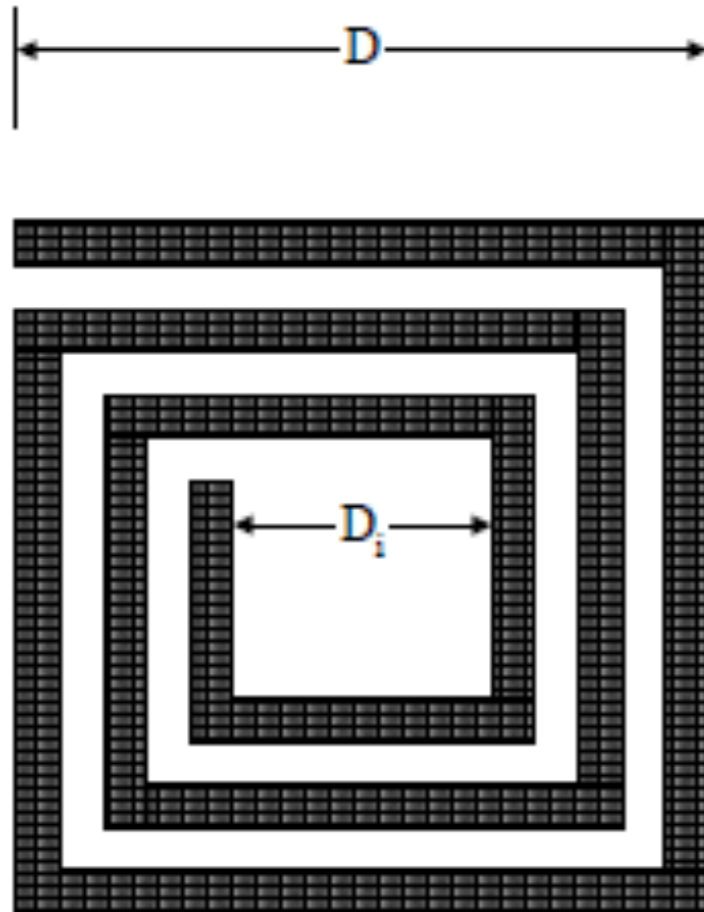
$$N = \sqrt{\frac{2\pi \cdot r \cdot L}{\mu \cdot A}}$$

Onde:

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

Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Indutor planar:



$$se \quad D_i = 0$$

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

De acordo com:

IEEE Std. Inductance Calculation Techniques for Part II: Approximations and Handbook Methods
Final Draft and Working Draft, December 1999, edition 100, <http://www.ieee.org>

Inductance Calculation Techniques — Part II: Approximations and Handbook Methods

Mark 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
d	Coil radial thickness
D	Side length of square coil
d	Wire-to-wire spacing
E	Hexapole coil constant
L	Coil length
P	Perimeter enclosed by coil
r	Coil radius
R	Coil inner radius
s	Side length of generic polygon
w	Coil width
x, y	Mean side length of rectangular coil
μ_0	Magnetic permeability of free space $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$

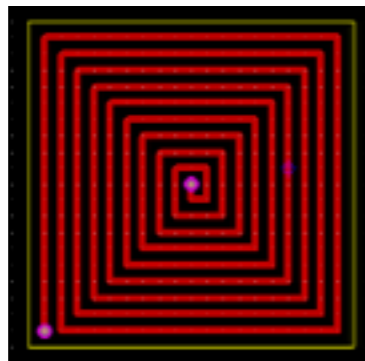
1. INTRODUCTION

In the second part of this two-part series on inductance calculation techniques, approximations techniques and handbook methods are shown for up-close estimates that do not necessarily lead themselves to closed-form solutions. A set of references is also given which is useful for finding the exact value of many different long-layered, flat-layered, and multi-layered calculations for polygons, disk coils, factor-length solenoids and flat planar spirals. In some cases results are given without significant approximations, so the calculations are very complicated and the full calculations may be found in the references given. Many of the other references work on inductance problems in English units, so some direct conversions have been included to SI units with units listed in meters and length values in centimeters.

2. REFERENCE SPURNS

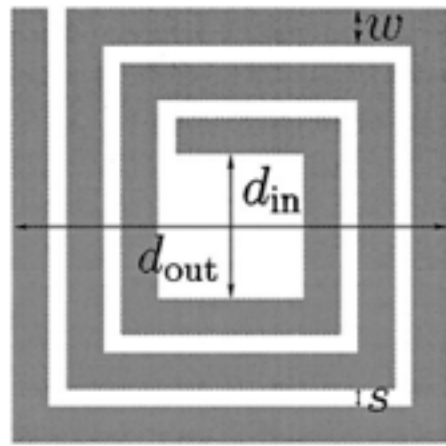
Inductance calculation references are readily cited with Maxwell's seminal work [1], first published in 1873. Maxwell worked on some interesting inductance problems, including finding the mutual inductance between circular coaxial elements [1, pp. 129], and finding the size and shape of a coil which maximizes inductance for a given length of wire [1, pp. 441].

¹ The subject is an independent contributor of 27 Commonwealth Road, Weymouth Massachusetts, USA 01978. Email: marctt@att.net. Fax: (617) 852-1767. Website: <http://members.aol.com/marctt2/induct2.pdf> and in Adjunct Associate Professor of Electrical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, MA 01609.

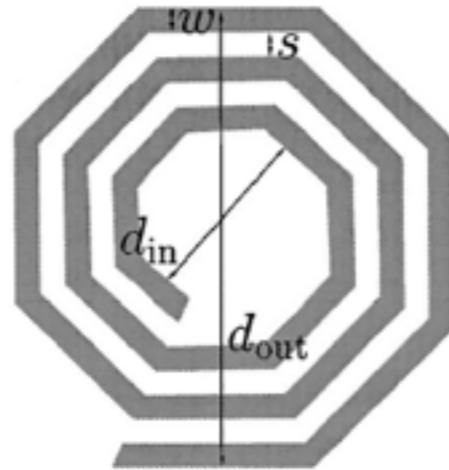


Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

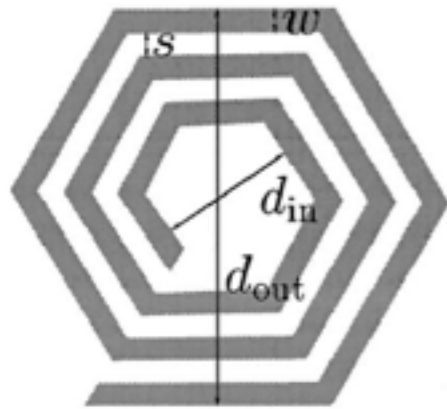
Indutor planar:



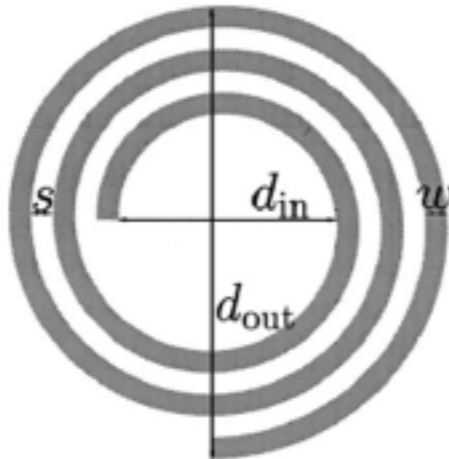
(a)



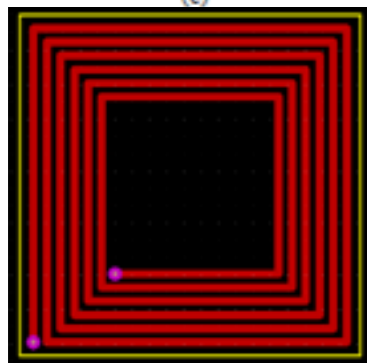
(b)



(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:

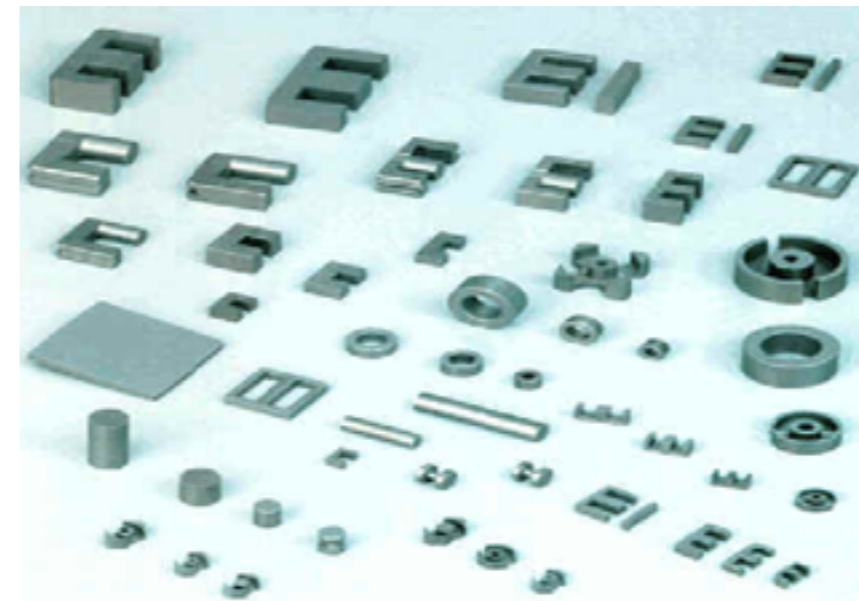


Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

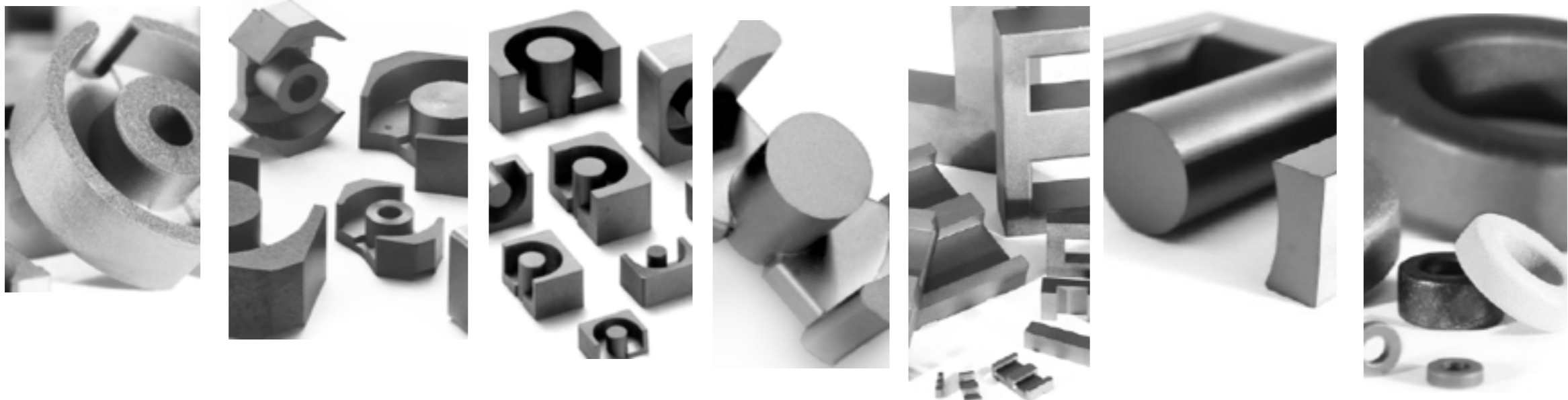
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



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



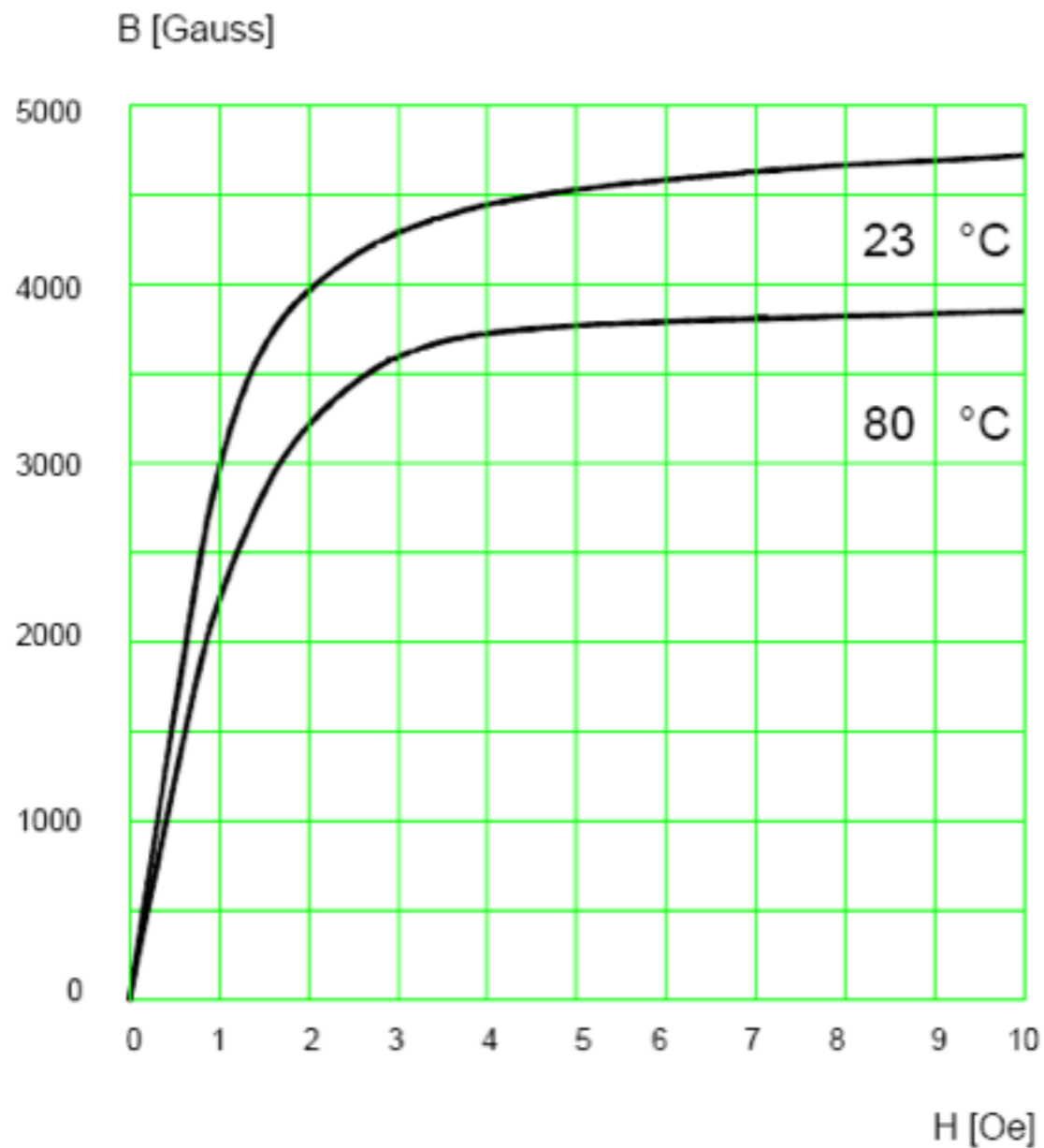
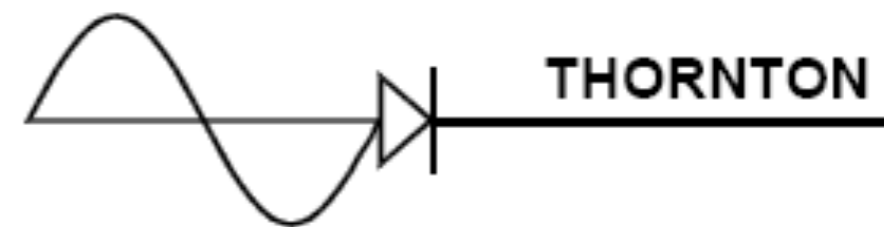
<http://www.thornton.com.br>



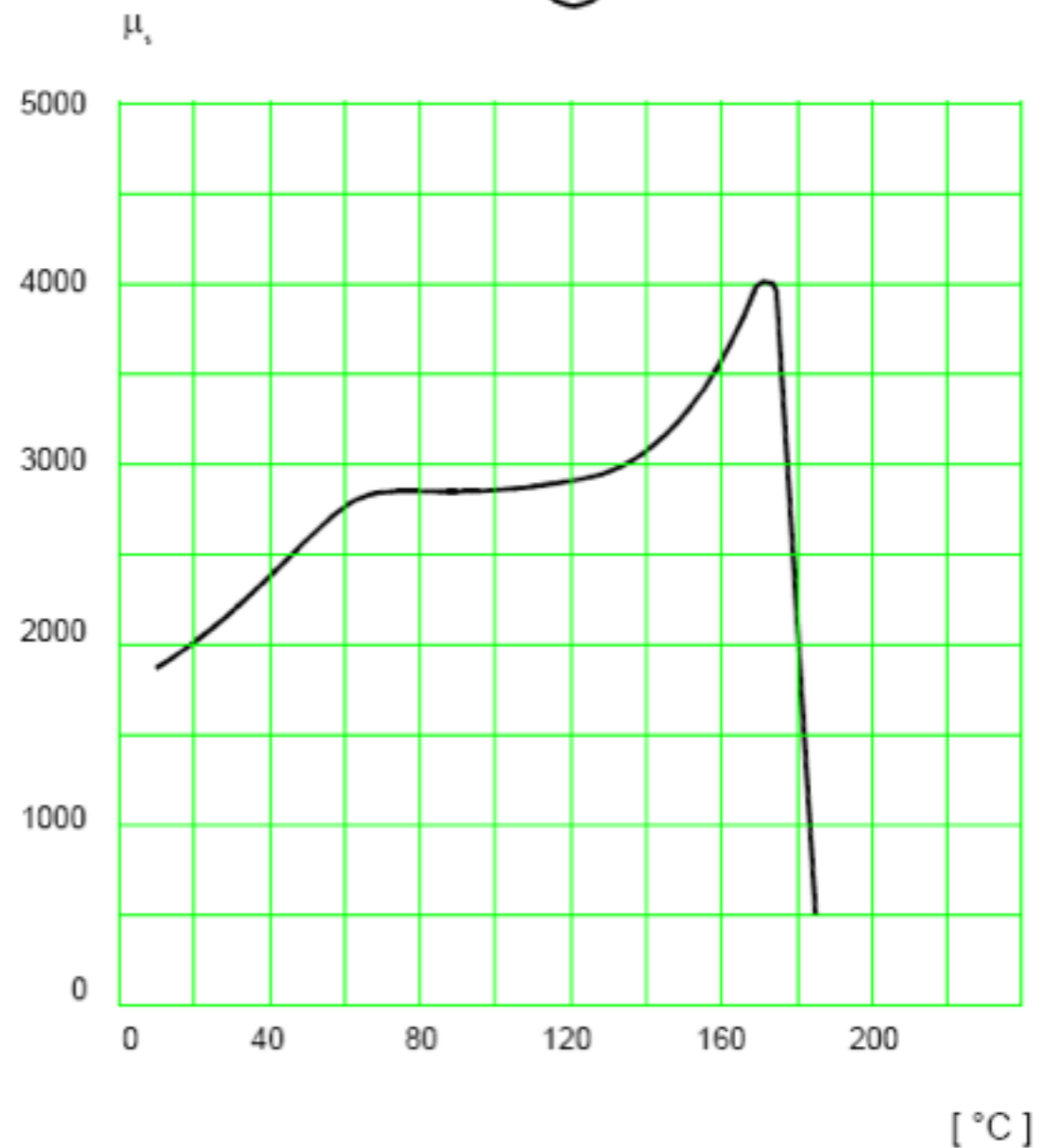
<http://www.mag-inc.com>

Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

Características do núcleo:



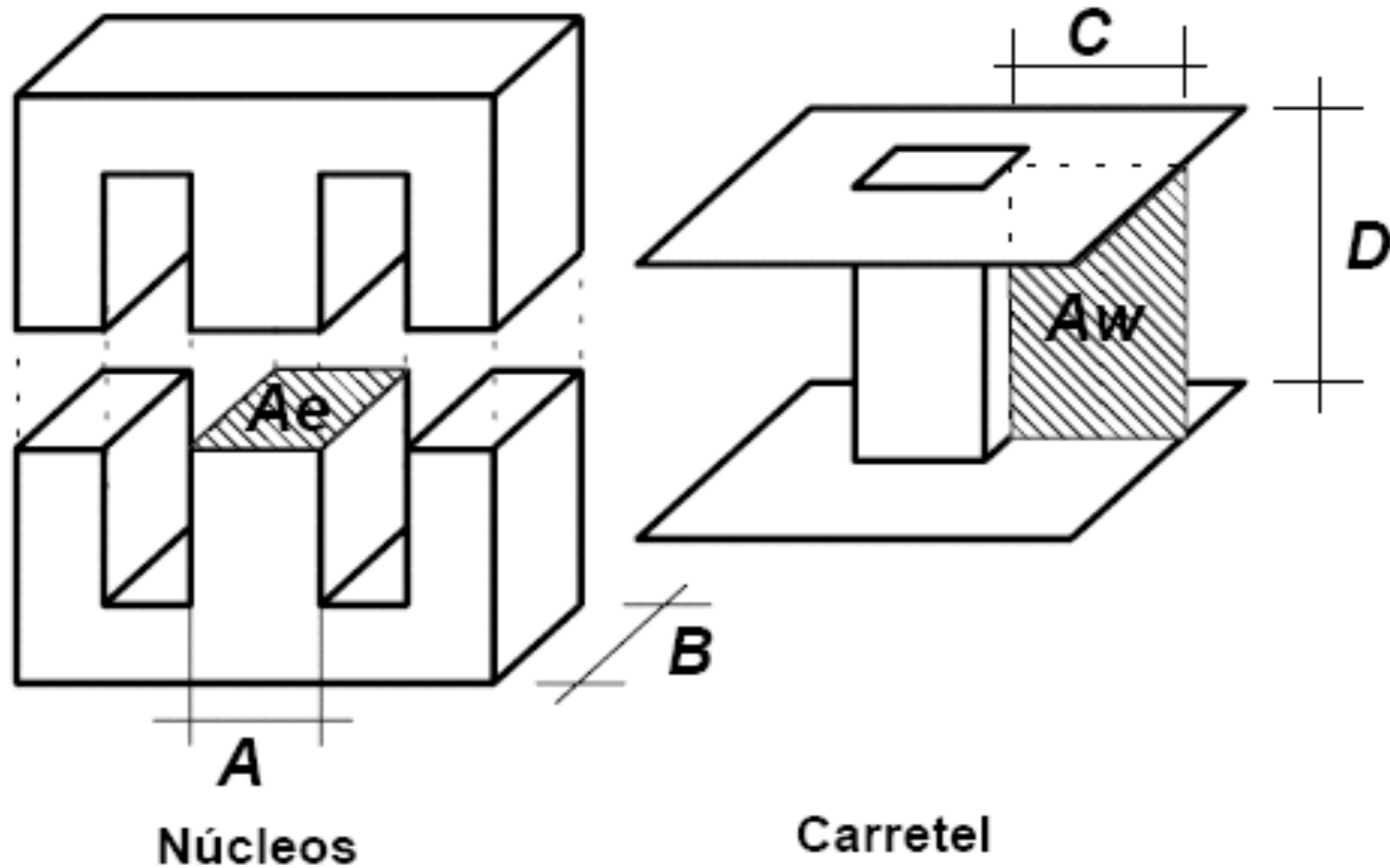
Típico $B \times H$



$\mu_r \times$ 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;

Frequência de operação;

Corrente de pico;

Corrente eficaz;

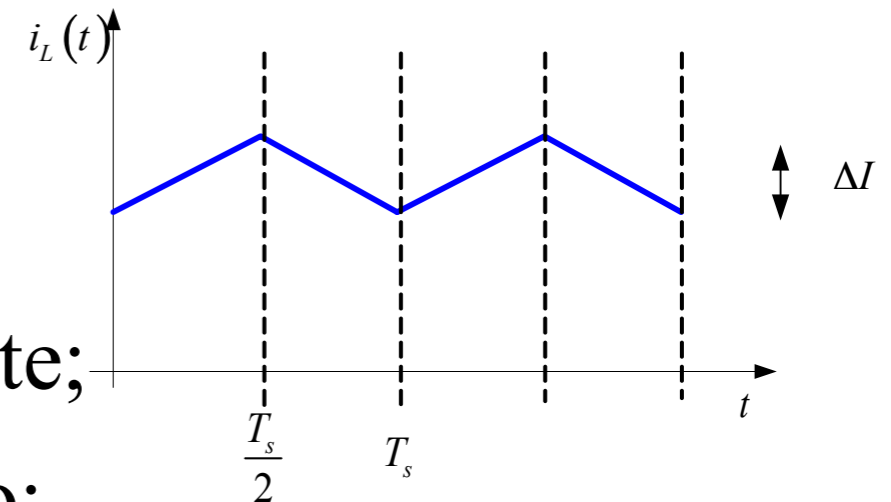
Ondulação de corrente;

Fator de enrolamento;

Densidade de corrente;

Densidade de fluxo máximo;

Permeabilidade no vácuo.



Projeto de Indutores 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:

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

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

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

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

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



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.

