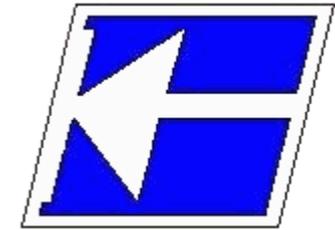


Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Departamento Acadêmico de Eletrônica

Eletrônica de Potência



# **Projeto de Elementos Magnéticos**

## **Projeto de Indutores**

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, abril de 2020.

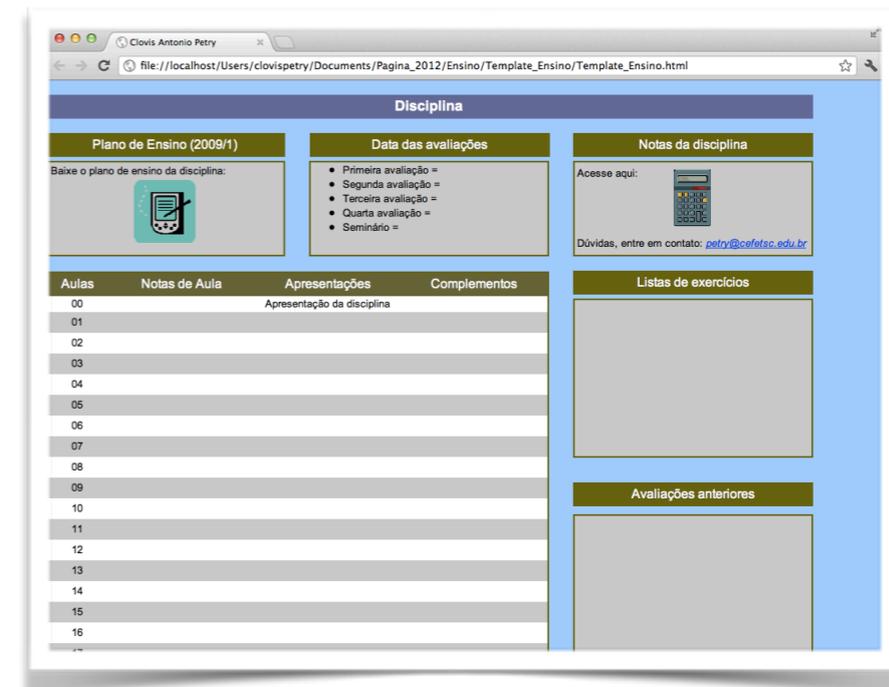
# Biografia para Esta Aula

## Projeto de indutores em alta frequência:

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



[www.ProfessorPetry.com.br](http://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:

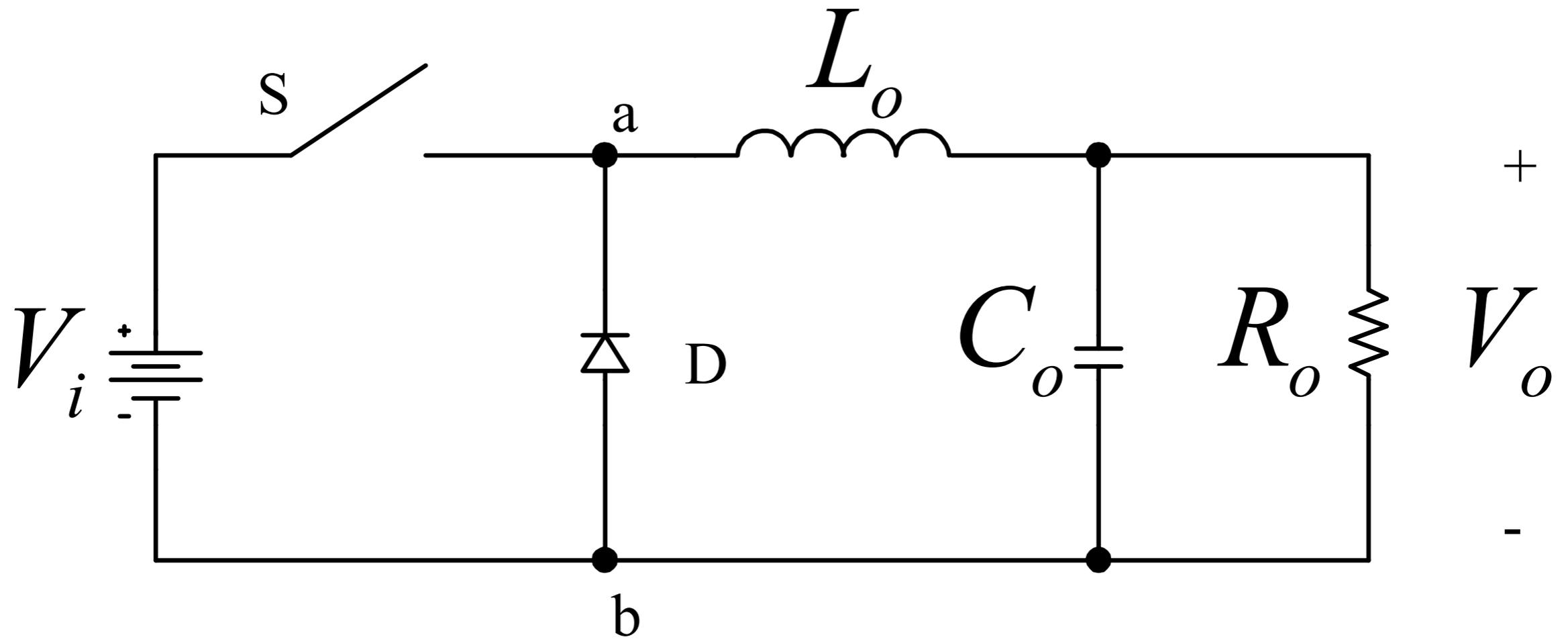
- Plano de Ensino (2009/1)**: Includes a link to download the course plan.
- Data das avaliações**: Lists evaluation dates: Primeira avaliação, Segunda avaliação, Terceira avaliação, Quarta avaliação, and Seminário.
- Notas da disciplina**: Includes a link to access grades and contact information: petry@cefetsc.edu.br.
- Table with 4 columns**: A table with columns '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.

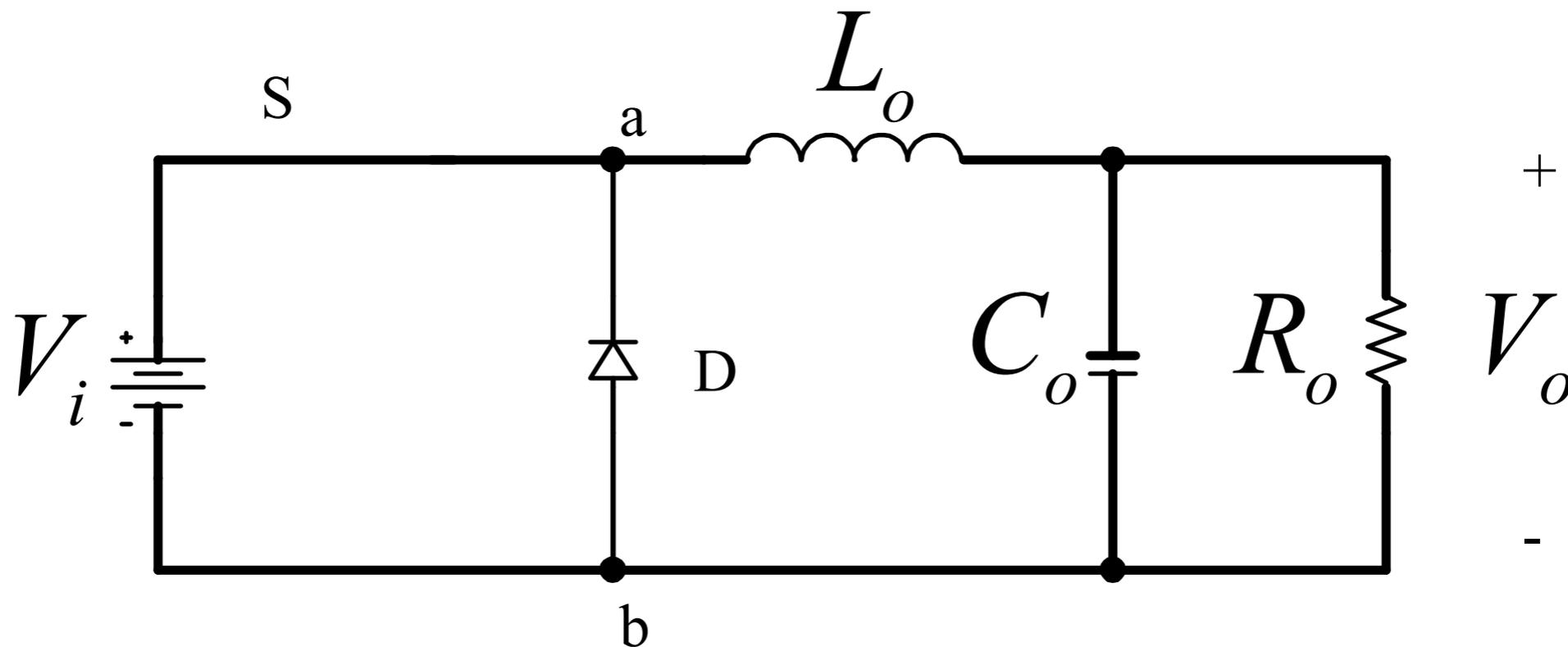
# Conversor Buck



# Conversor Buck

Primeira etapa de funcionamento:

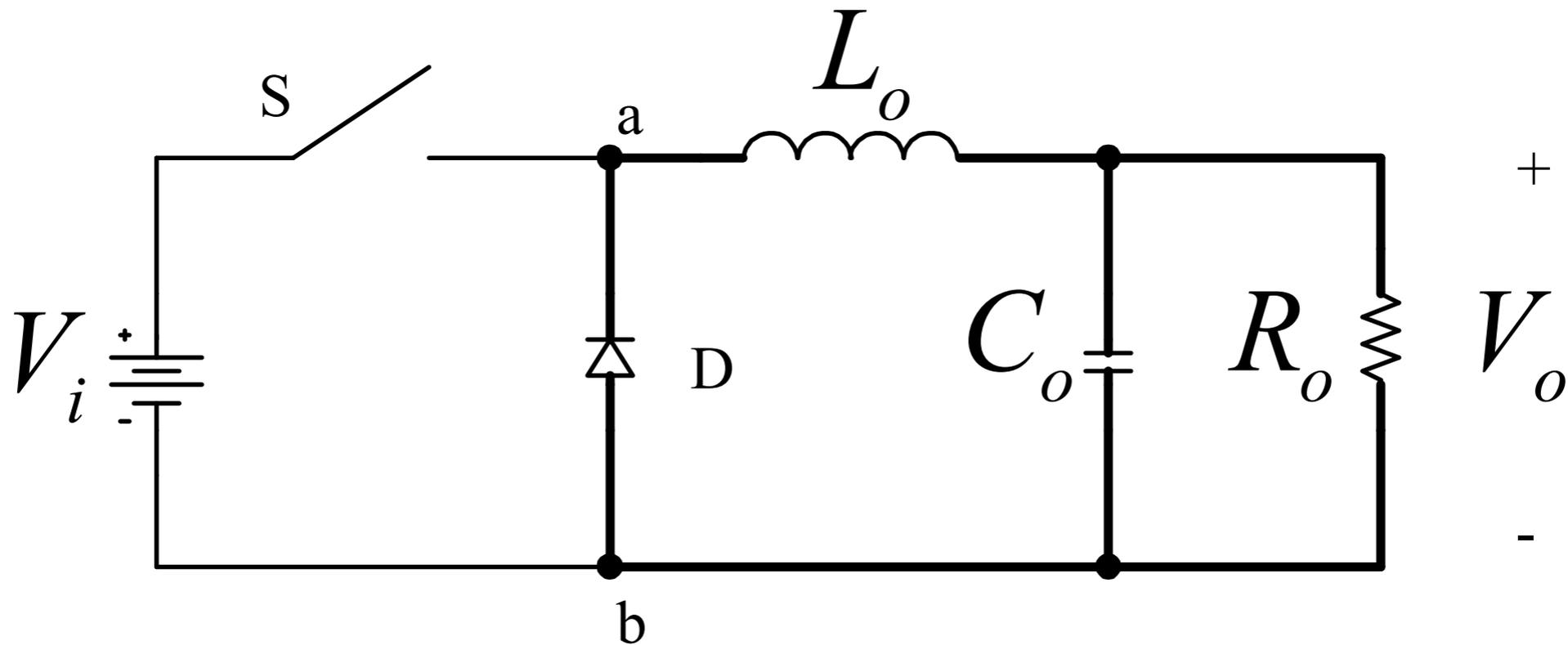
- Interruptor conduzindo;
- Diodo bloqueado;
- Energia sendo armazenada no indutor.



# Conversor Buck

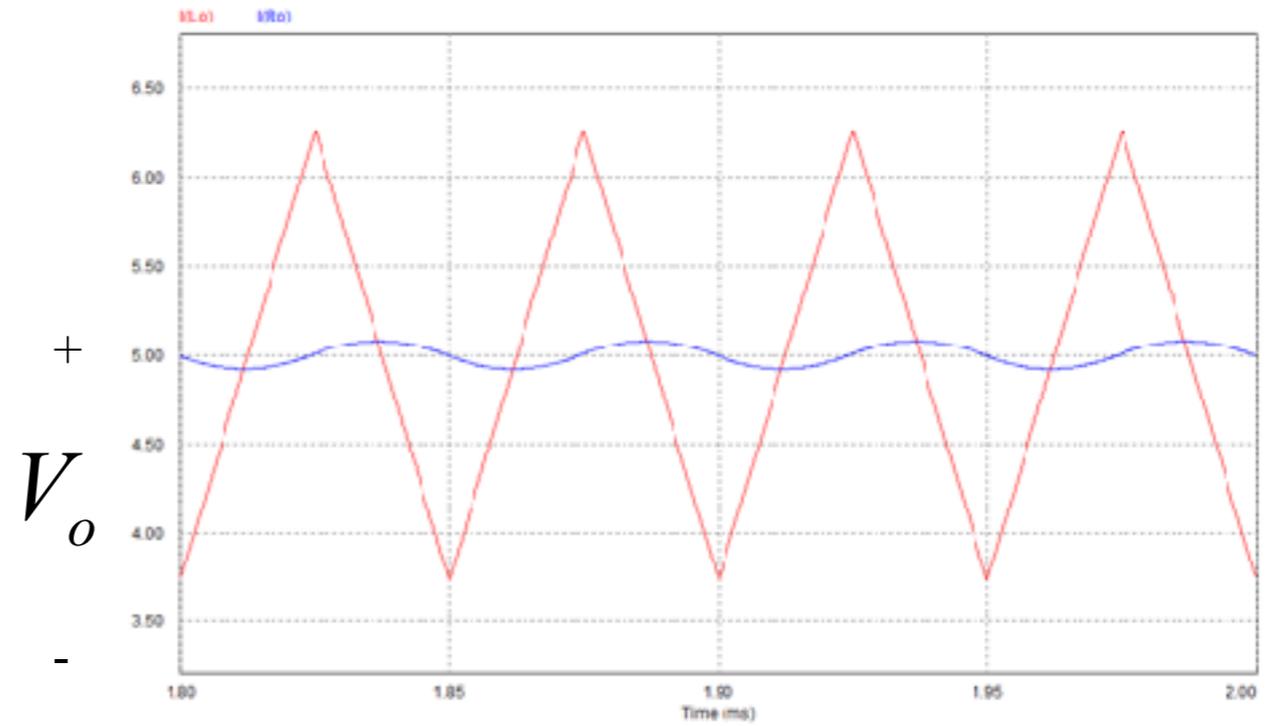
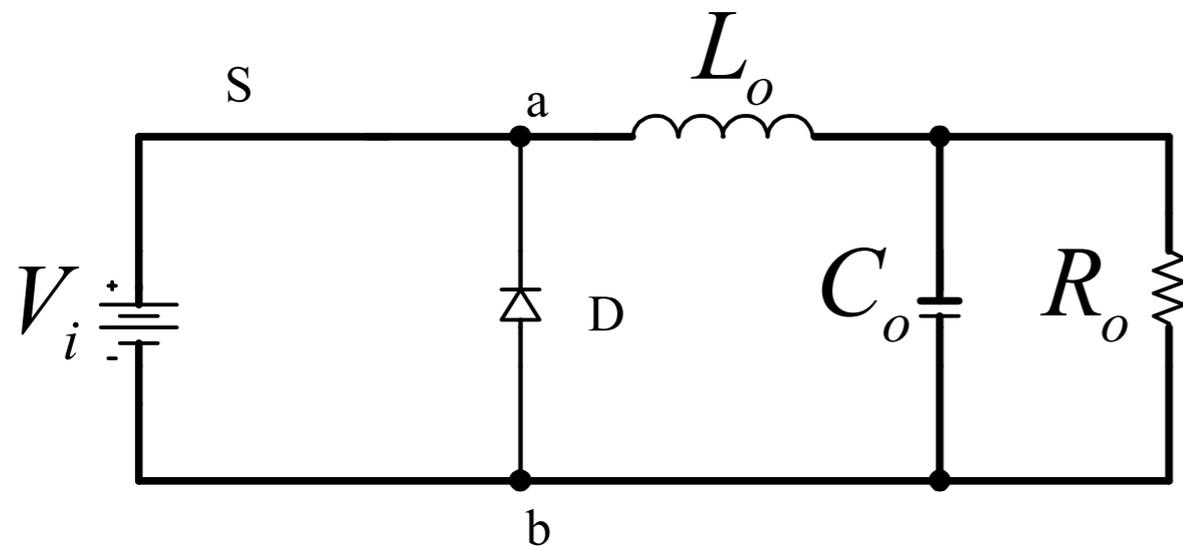
Segunda etapa de funcionamento:

- 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

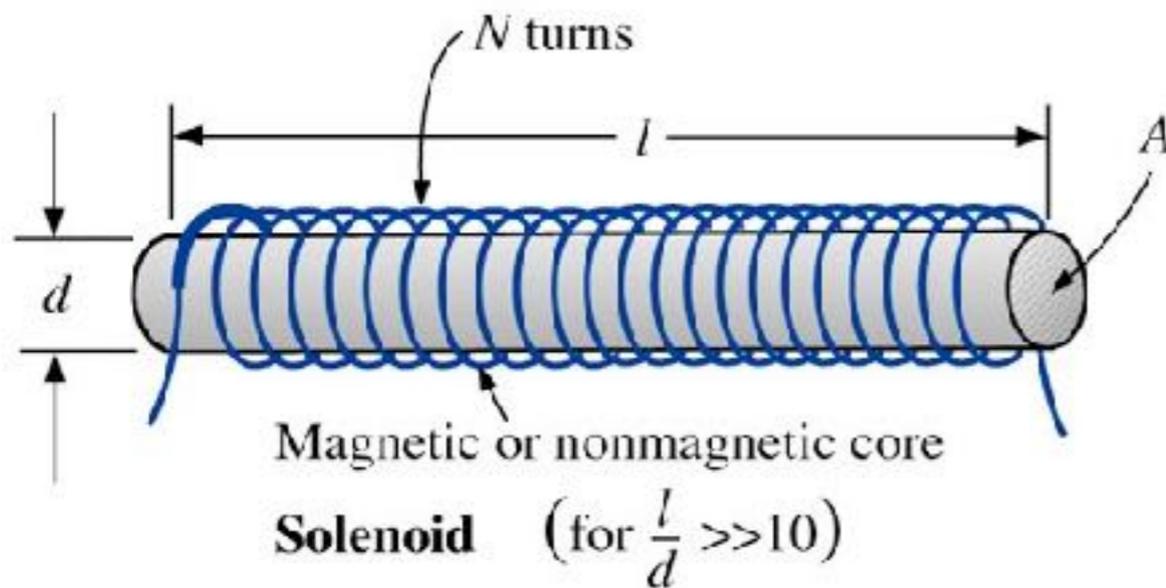
**O projeto de um indutor depende:**

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

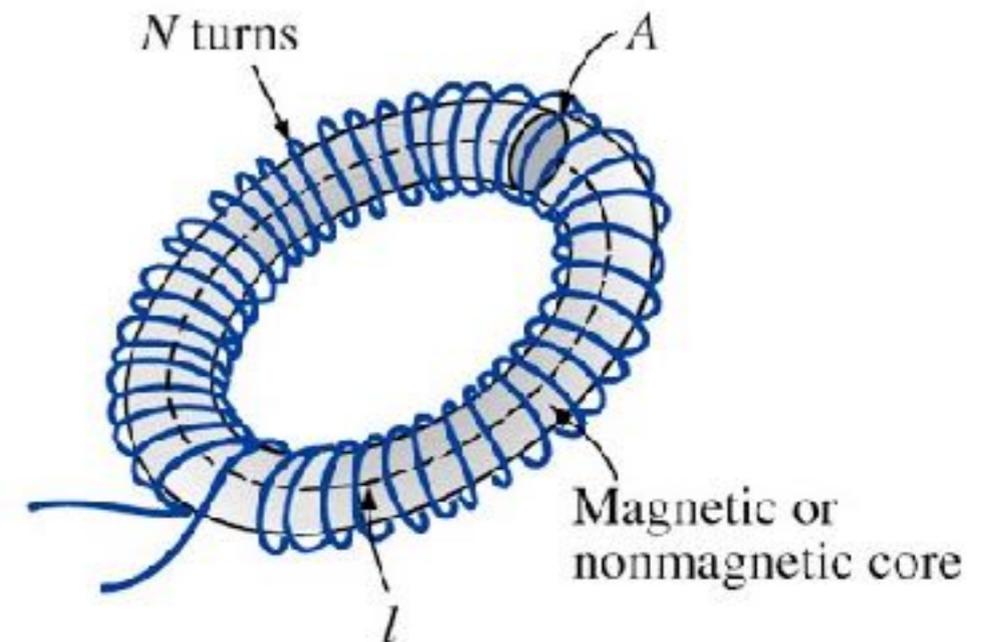
# Auto-Indutância

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).

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



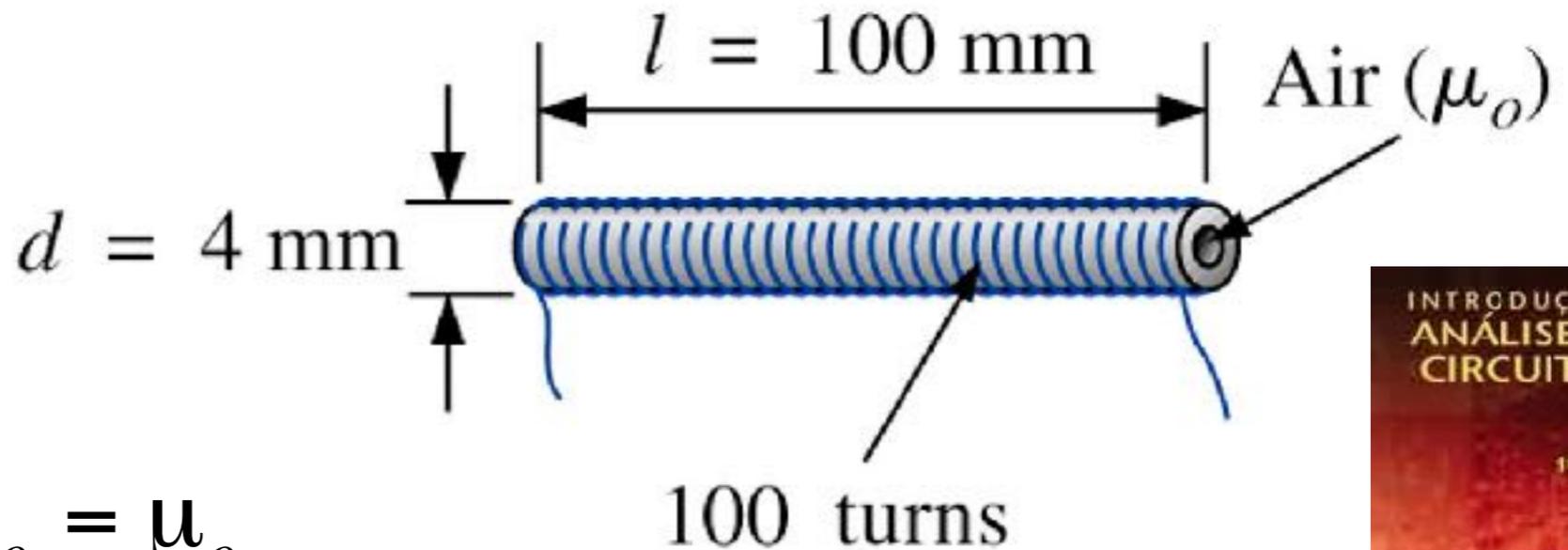
(a)



(b)

# Auto-Indutância

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



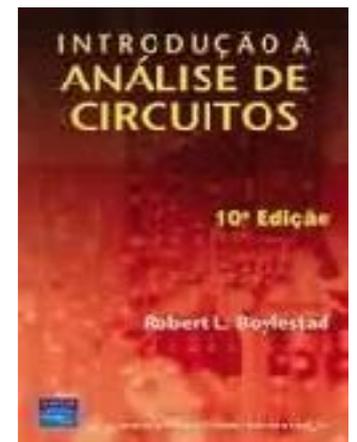
$$\mu_r = 1$$

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

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

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

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



# Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobinas longas:

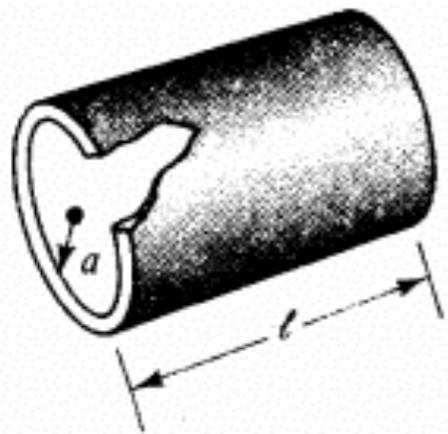
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad \longrightarrow \quad N = \sqrt{\frac{L \cdot l}{\mu \cdot A}}$$

Onde:

- N - número de espiras da bobina;
- L - indutância [Henry, H];
- A - área do núcleo [m<sup>2</sup>];
- l - comprimento da bobina [m];
- $\mu$  - 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,  $\mu\text{H}$ ];
- a - raio do núcleo [m];
- l - comprimento da bobina [m].



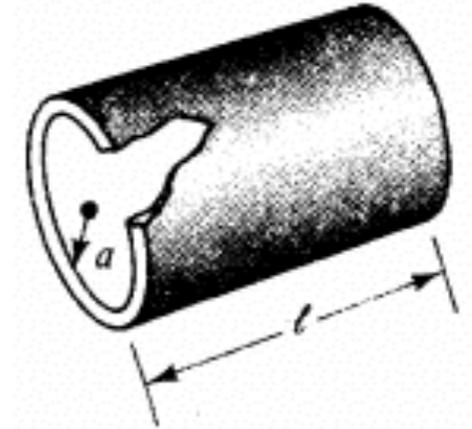
$$l = N \cdot D_{fio}$$

# Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobina de camada única com núcleo de ar:

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

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

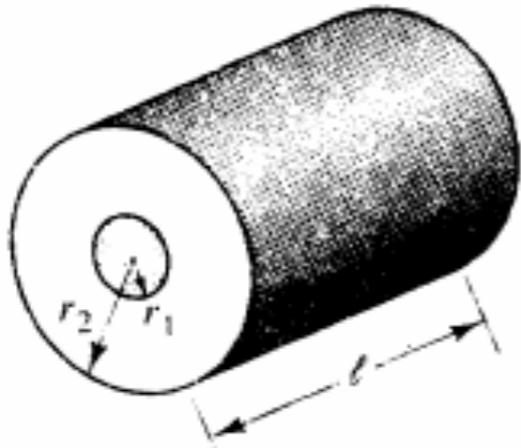


$$39,5 \cdot a^2 \cdot N^2 - 10 \cdot L \cdot D_{fio} \cdot N - 9 \cdot a \cdot L = 0$$

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

# Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Bobina de diversas camadas com núcleo de ar:



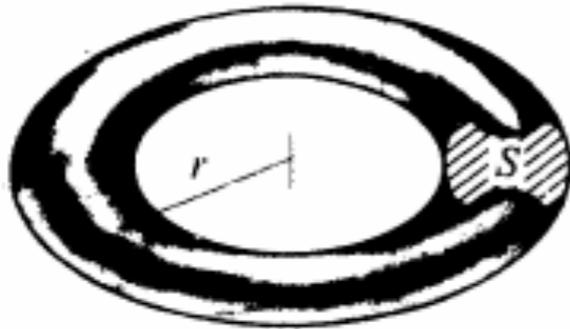
$$N = \sqrt{\frac{L \cdot (6 \cdot r_1 + 9 \cdot l + 10 \cdot (r_2 - r_1))}{31,6 \cdot r_1^2}}$$

Onde:

- N - número de espiras da bobina;
- L - indutância [micro Henry,  $\mu\text{H}$ ];
- l - comprimento da bobina [m];
- r1 - raio interno [m];
- r2 - raio externo [m].

# Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

Núcleos toroidais:



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

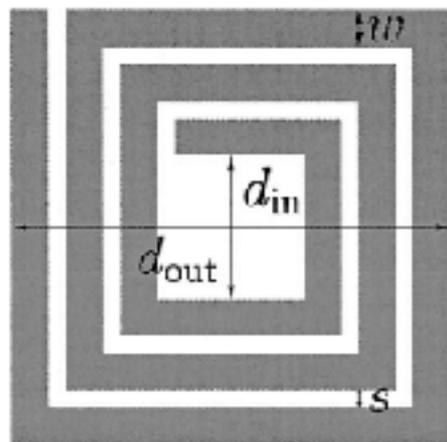
Onde:

- N - número de espiras da bobina;
- L - indutância [Henry, H];
- A - área do núcleo [m<sup>2</sup>];
- $\mu$  - permeabilidade do núcleo [Wb/A·m];
- r - raio do toroide [m].

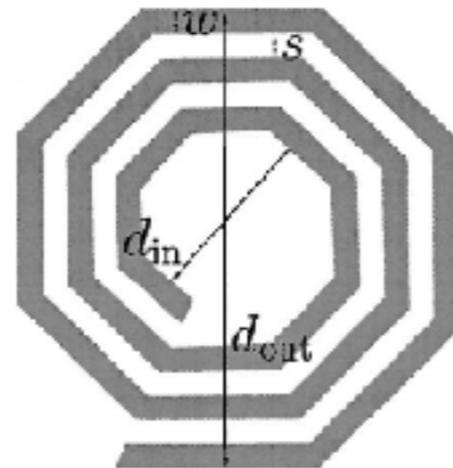


# Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

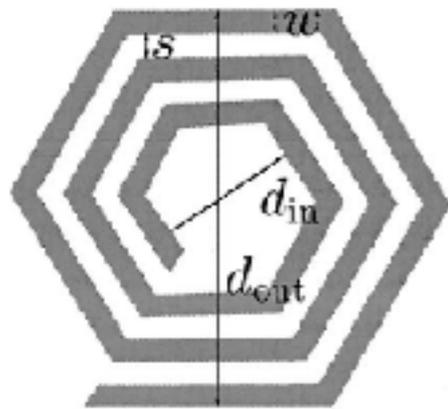
Indutor planar:



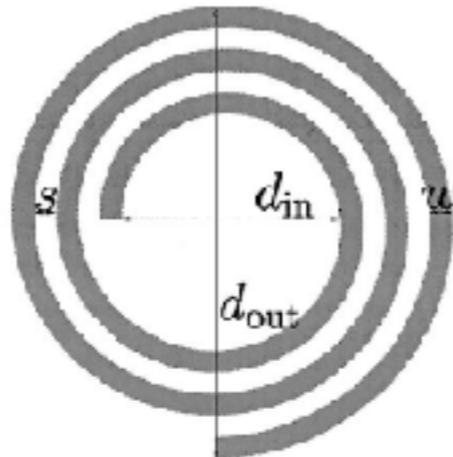
(a)



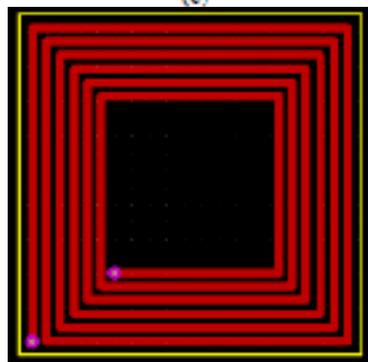
(b)



(c)



(d)



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

$$k_2 = 2,75$$

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

De acordo com:

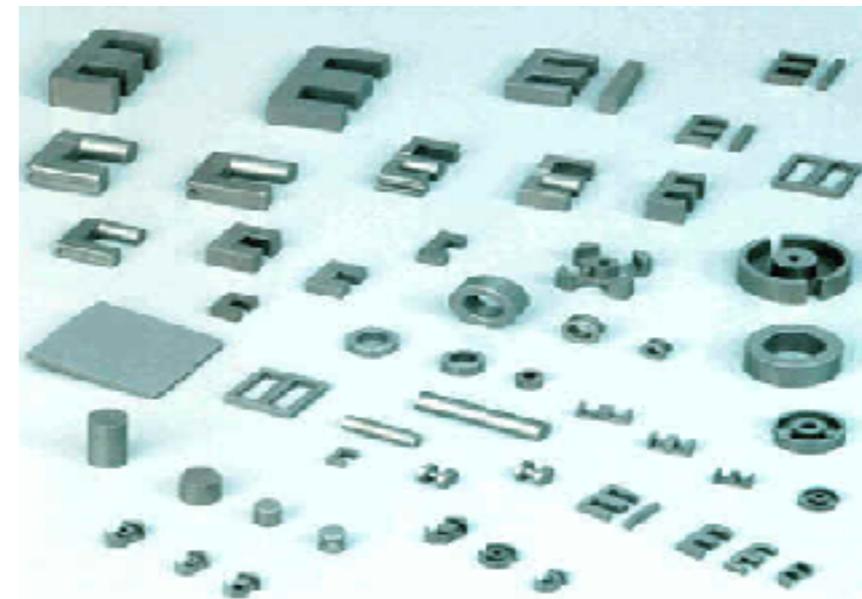


# Projeto de Indutores com Núcleo de Ar

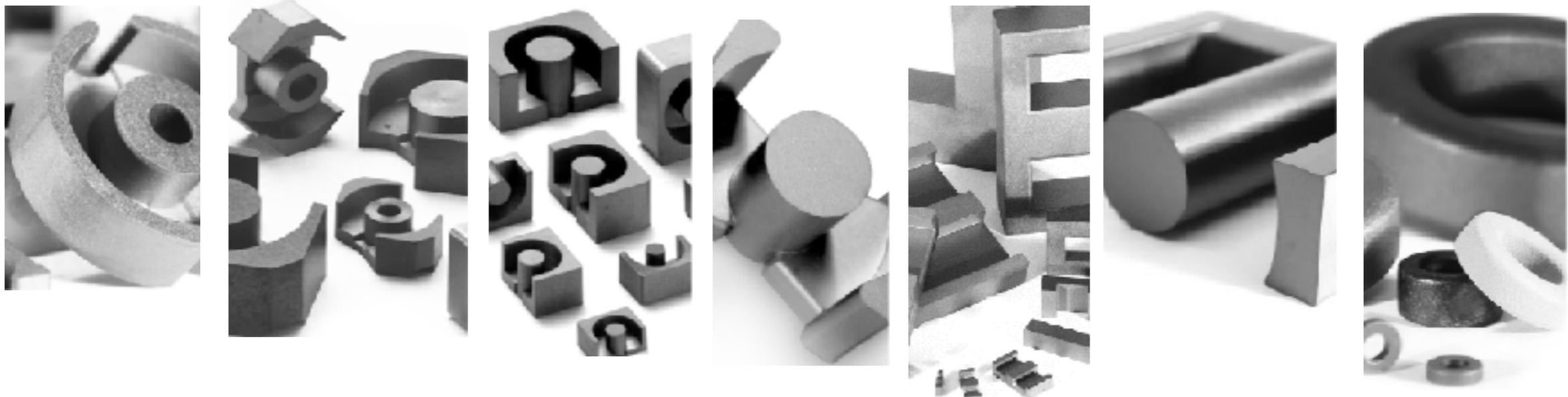
Núcleos usados na implementação de indutores de HF:



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



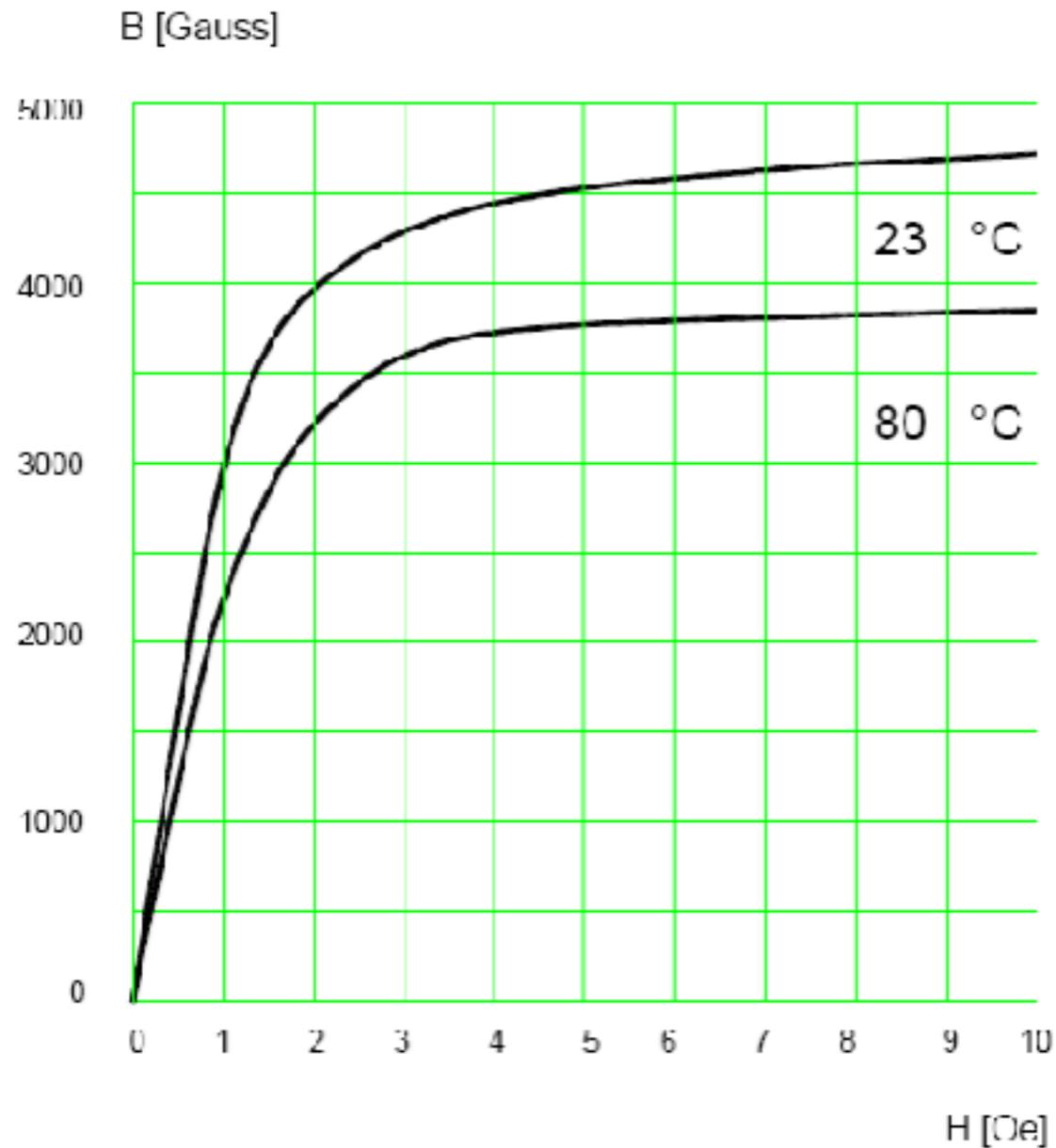
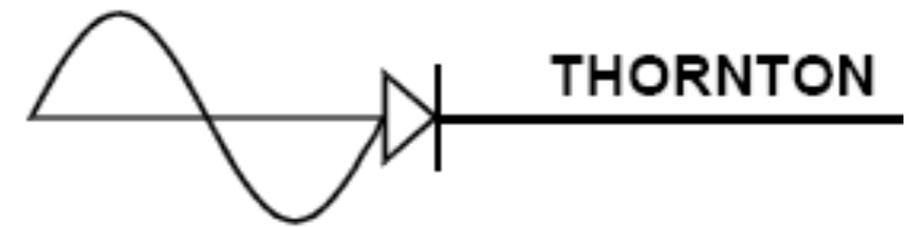
<http://www.thornton.com.br>



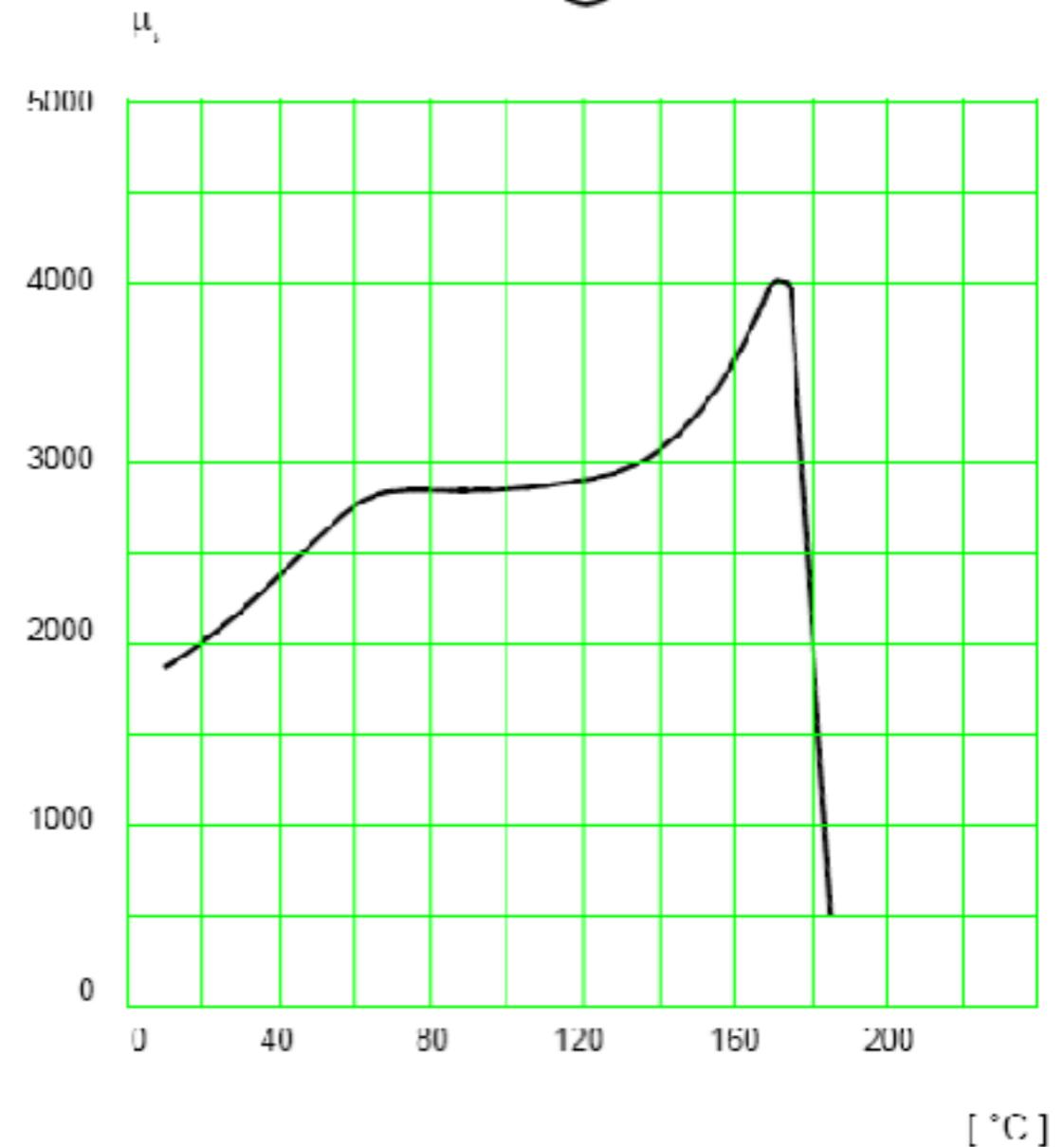
<http://www.mag-inc.com>

# Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

Características do núcleo:



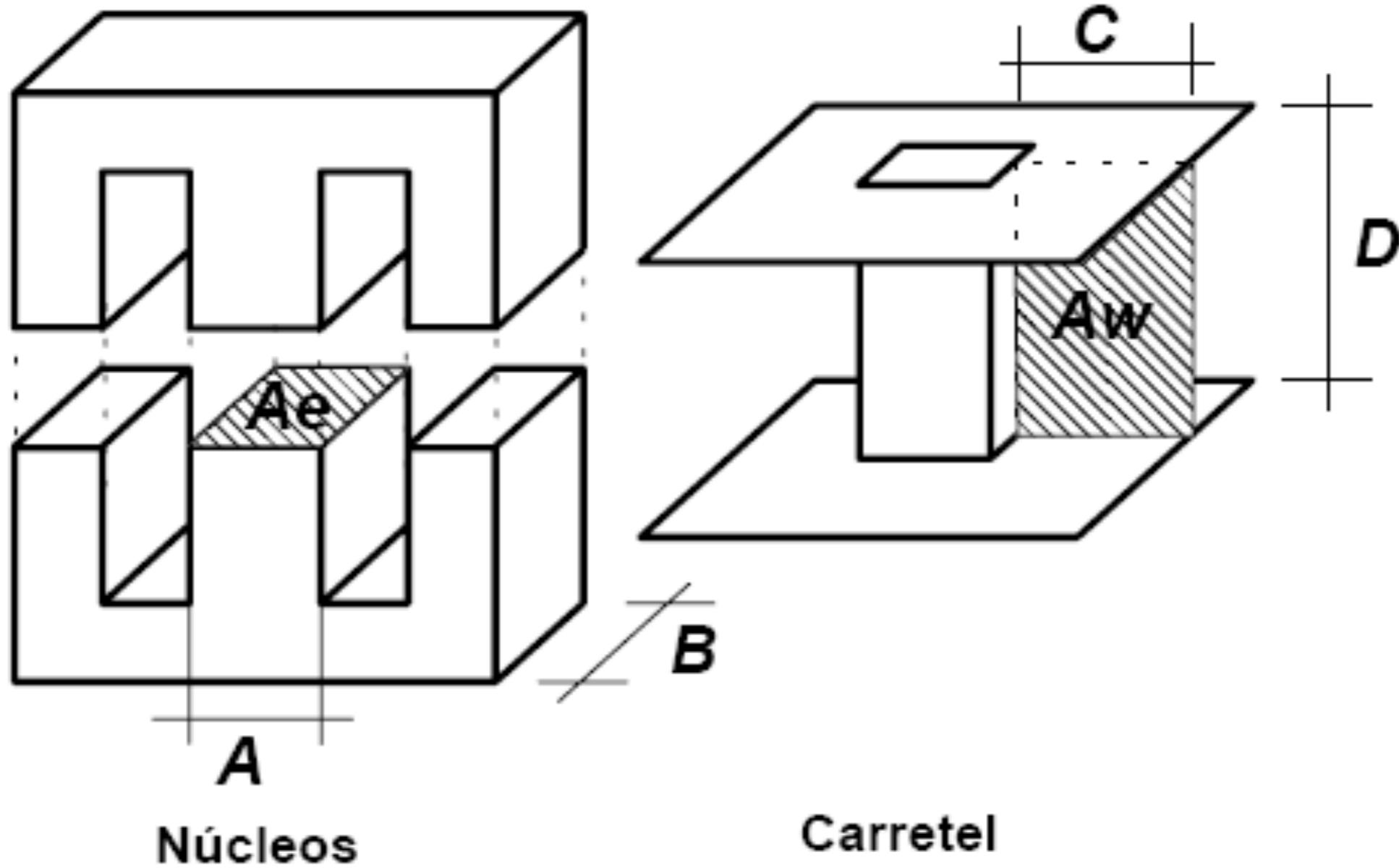
Típico  $B \times H$



$\mu_i \times$  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;

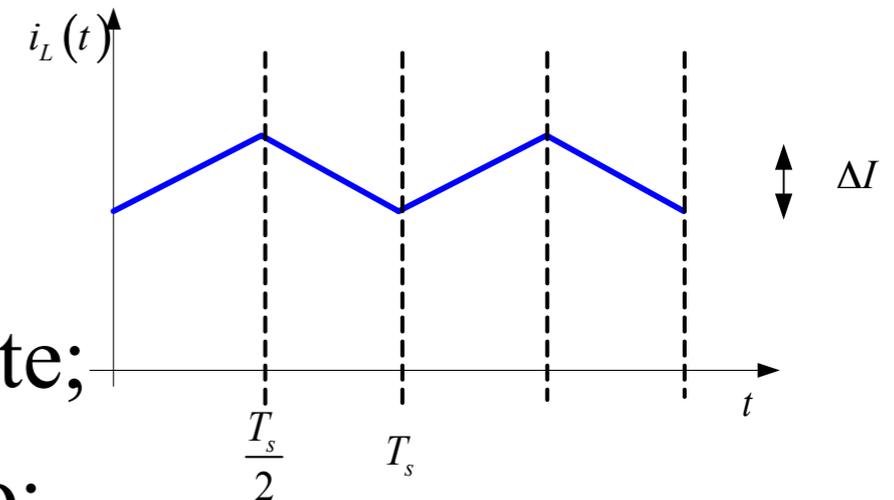
Ondulação de corrente;

Fator de enrolamento;

Densidade de corrente;

Densidade de fluxo máximo;

Permeabilidade no vácuo.



# Projeto de Indutores com Núcleo de Ferrite

## 2) Escolha do núcleo:

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

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

Núcleo	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )	$A_w$ (cm <sup>2</sup> )	$l_e$ (cm)	$l_t$ (cm)	$v_e$ (cm <sup>3</sup> )	$A_e A_w$ (cm <sup>4</sup> )
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:

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

## 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.

