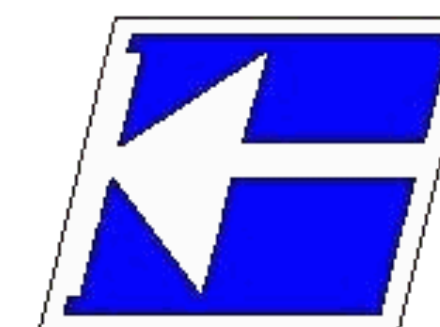




Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina  
Departamento Acadêmico de Eletrônica  
Eletrônica de Potência



# Projeto de Elementos Magnéticos

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, setembro de 2020.

# Curso Básico de Eletrônica de Potência

O material do curso está disponível em:

1. Moodle para os alunos matriculados na disciplina.
2. Página do professor.
3. Canal no youtube do professor.



<https://moodle.ifsc.edu.br>



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



<https://www.youtube.com>

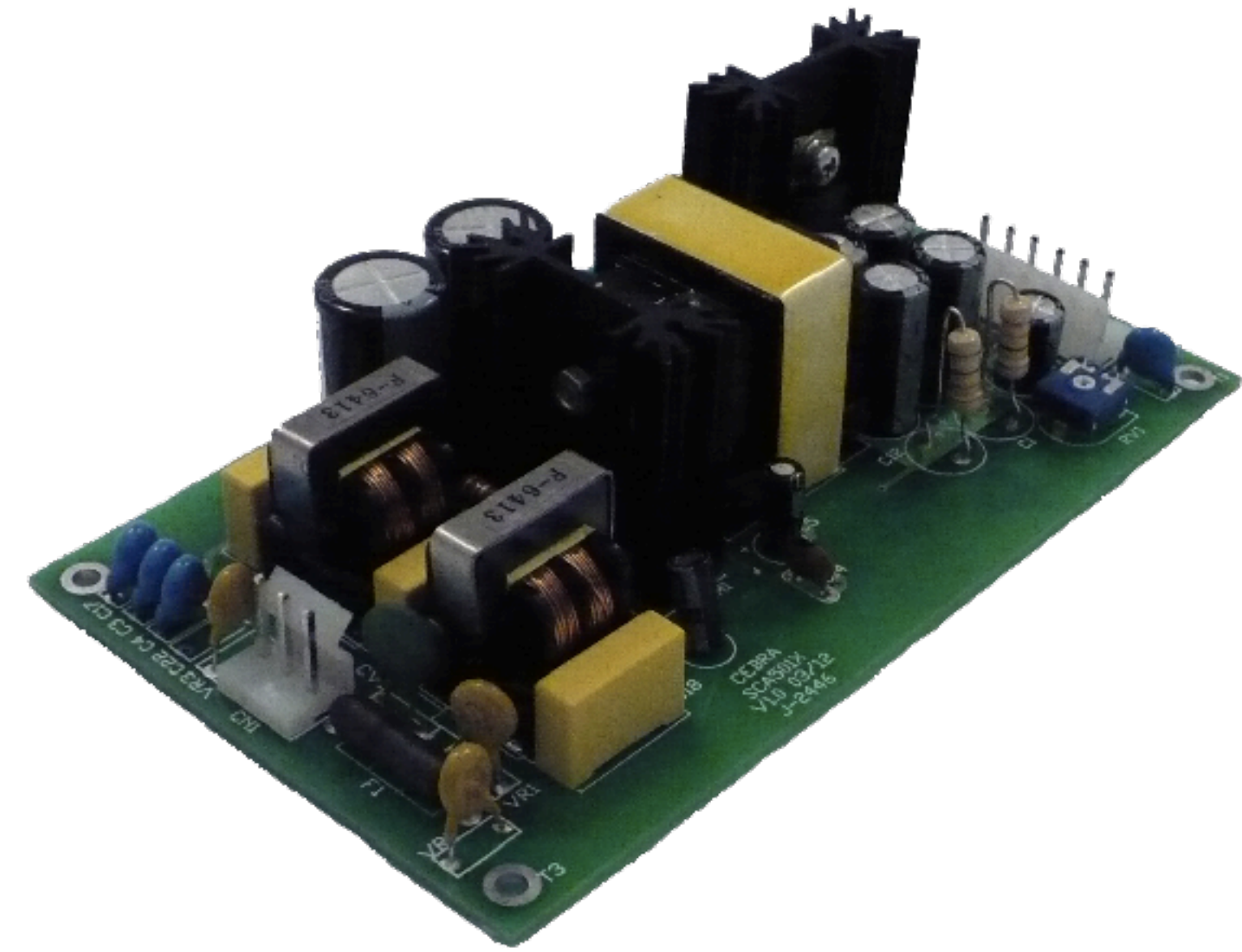
# Agenda

Esta aula está organizada em:

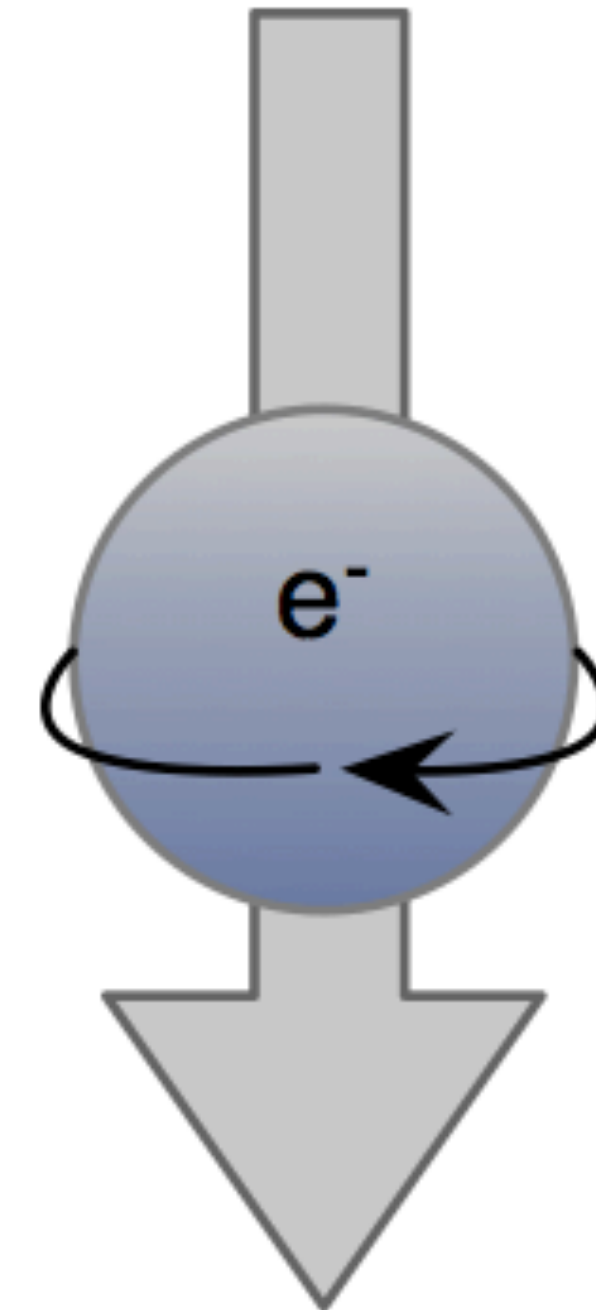
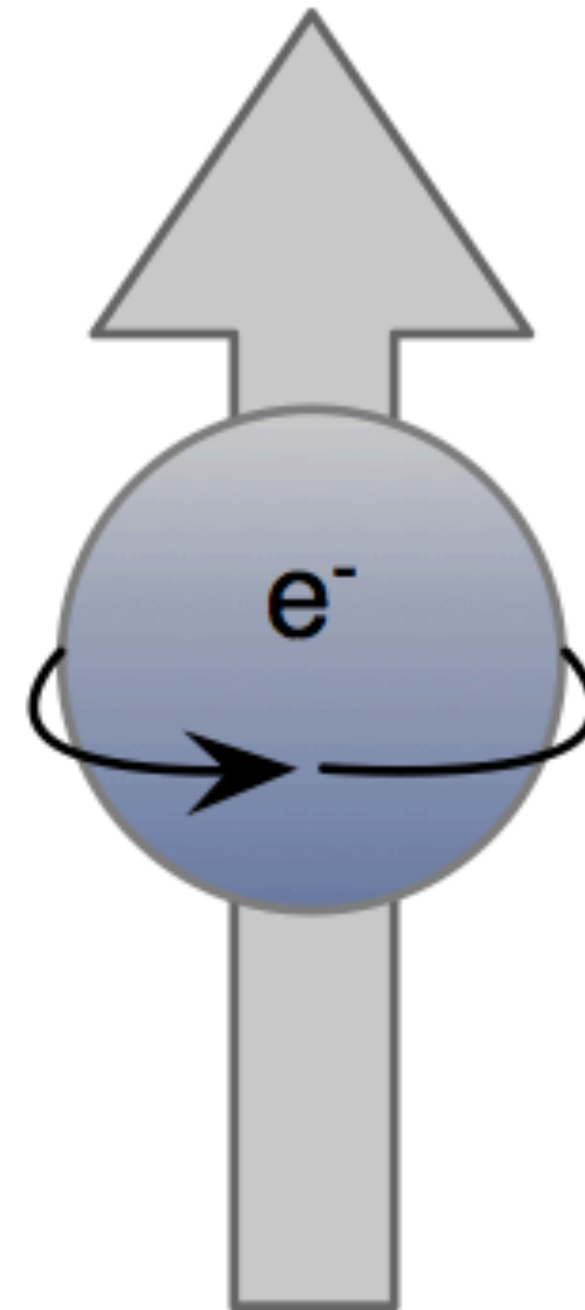
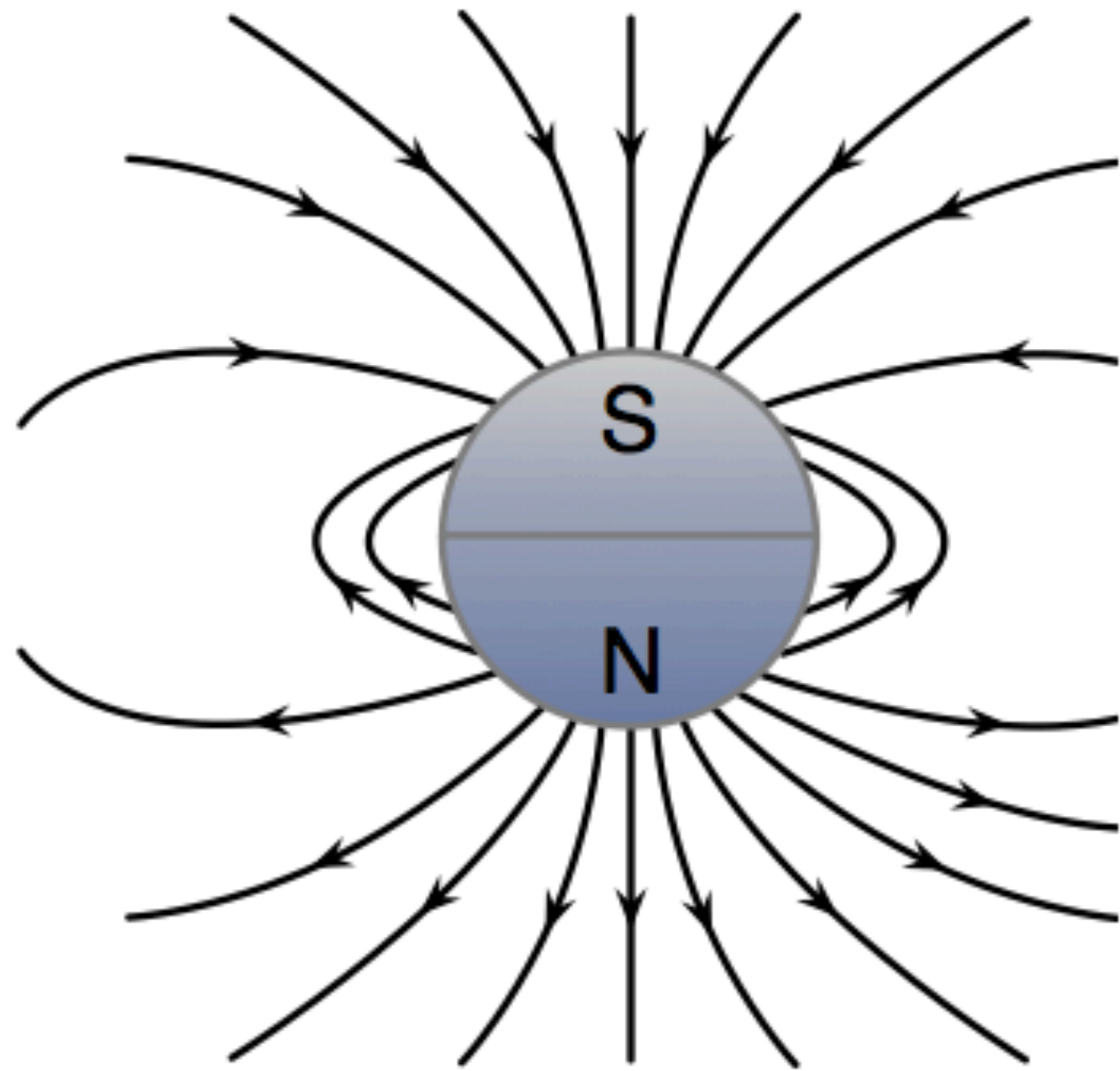
1. Eletromagnetismo:
  - Introdução;
  - Principais grandezas.
2. Aspectos de elementos magnéticos:
  - Tipos de núcleos;
  - Perdas nos elementos magnéticos;
  - Escolha dos condutores.
3. Projeto de indutores:
  - Indutores com núcleo de ar;
  - Indutores com núcleo toroidal;
  - Indutores com núcleo EE.



Os elementos magnéticos estão presentes na maioria dos circuitos de eletrônica de potência.

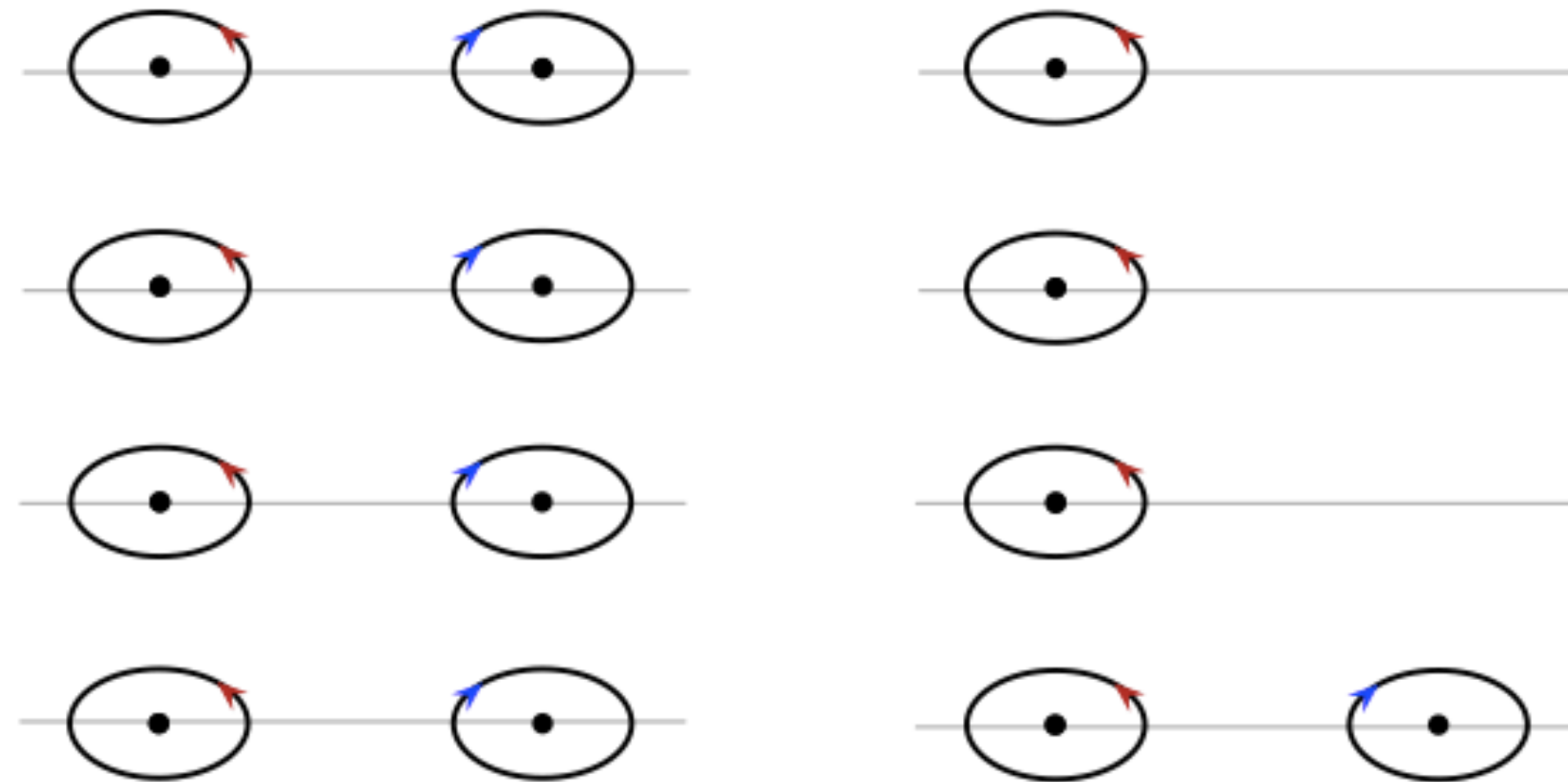
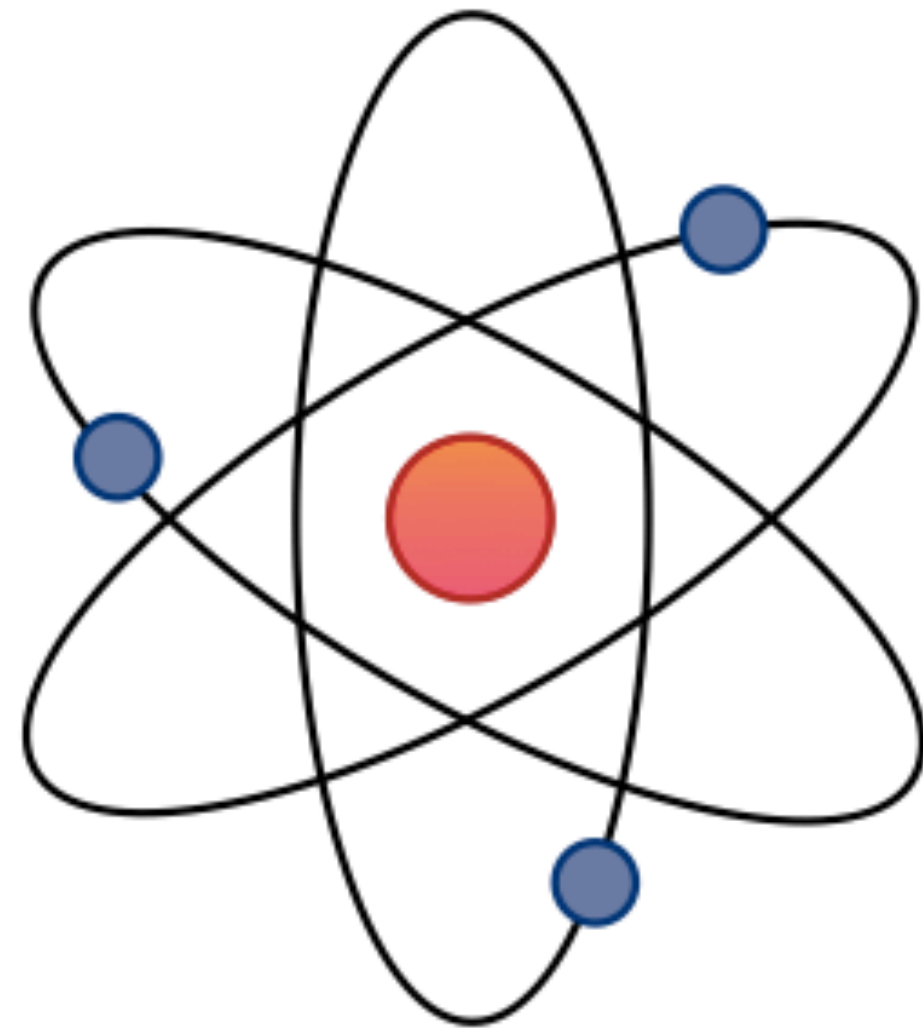


## Dipolos magnéticos



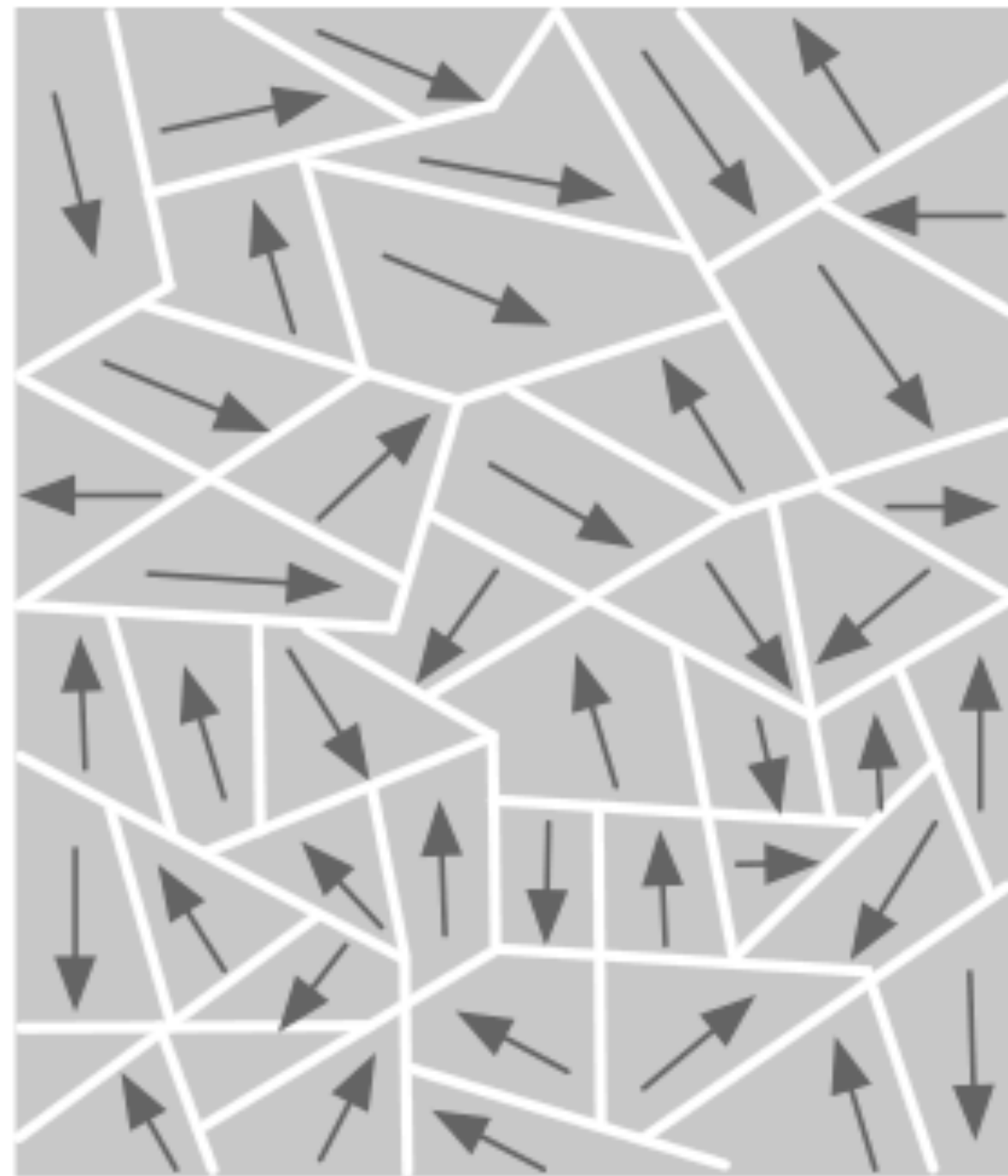
# Magnetismo atômico

## Magnetismo atômico



# Magnetismo atômico

## Domínios magnéticos



Domínios magnéticos

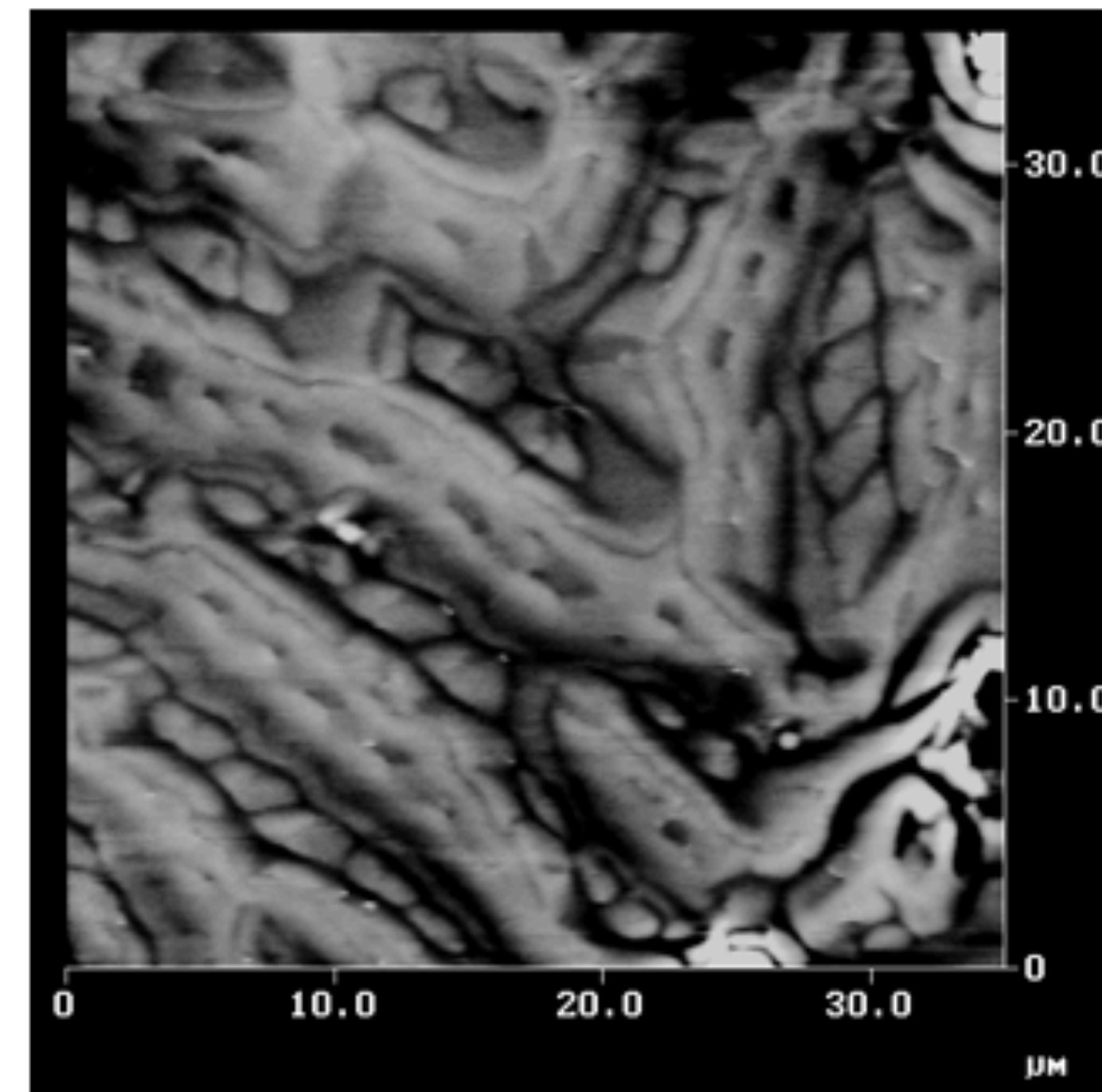
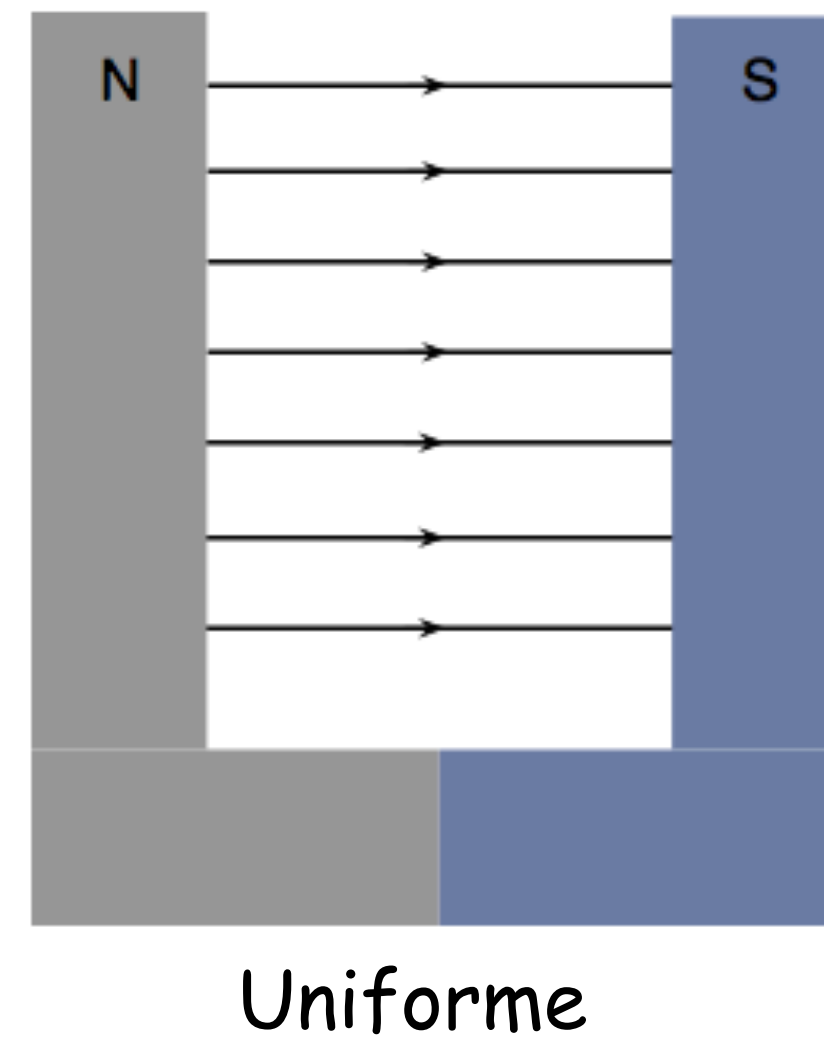
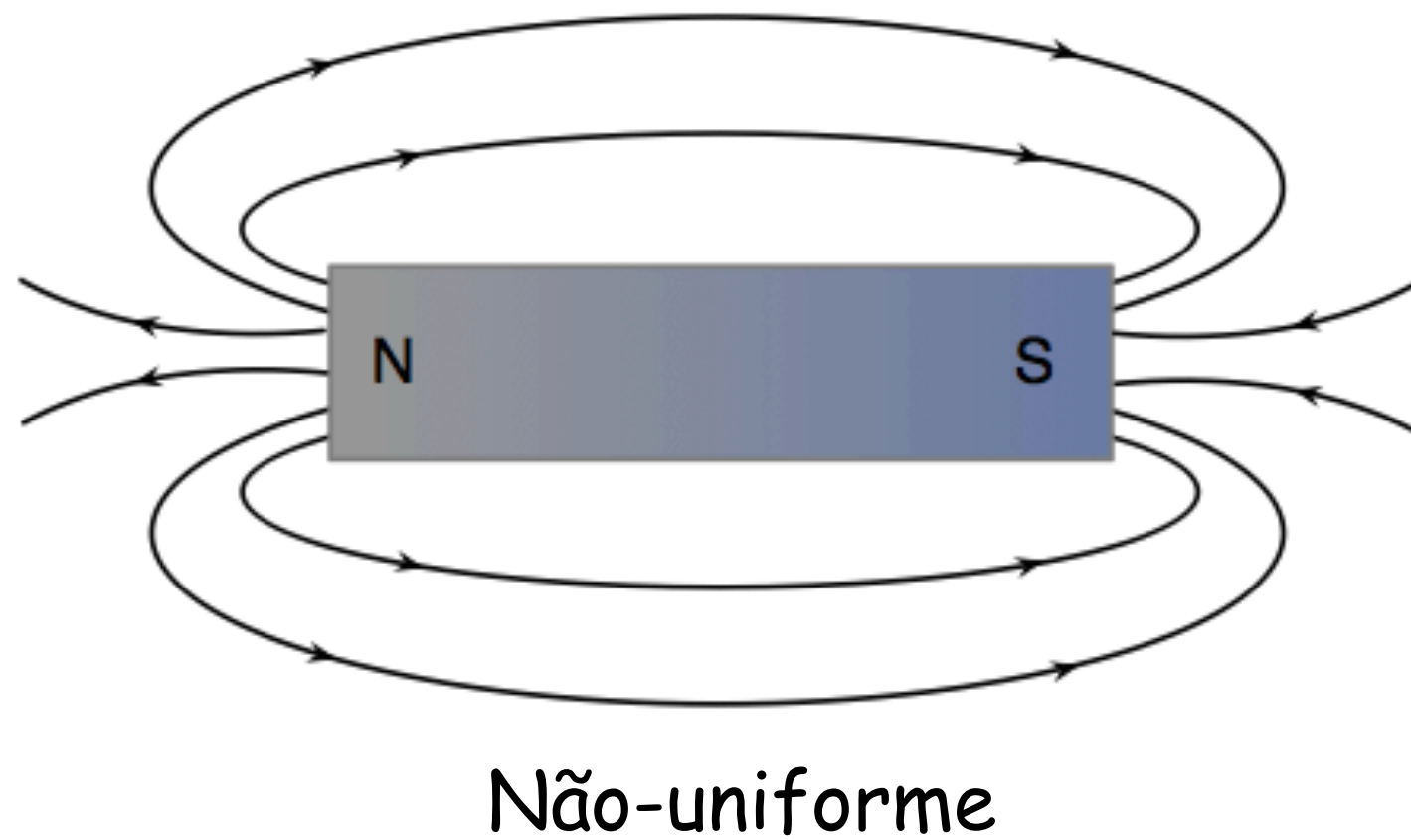


Imagem do material magnético

# Grandezas eletromagnéticas

## Campo magnético:

- O campo magnético é uma região do espaço onde se tem a presença de fenômenos magnéticos, especificamente linhas de campo;
- Originado em um condutor retilíneo, espira ou enrolamento (bobina).



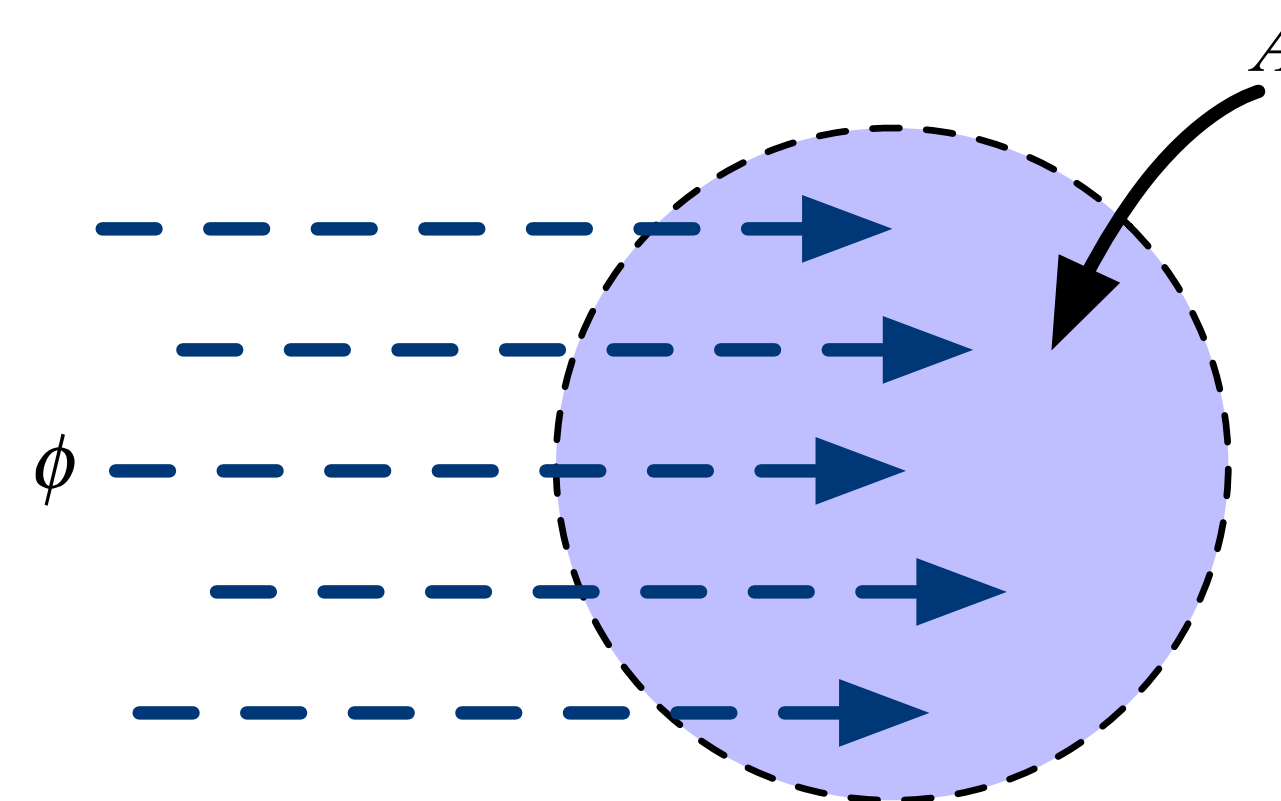


# Grandezas eletromagnéticas

## Densidade de fluxo magnético e fluxo magnético:

- Densidade de fluxo ( $B$ ) é número de linhas de campo por unidade de área. Sua unidade é Tesla [T], onde um Tesla é igual a 1 Weber por metro quadrado de área;
- Fluxo magnético ( $\phi$ ) é o conjunto de todas as linhas de campo que atingem perpendicularmente uma área. Tem como unidade o Weber [Wb], sendo que 1 Weber corresponde a  $1 \times 10^8$  linhas de campo.

$$B = \frac{\phi}{A} \left[ T = \frac{Wb}{m^2} \right]$$



Fluxo magnético em uma área A

# Grandezas eletromagnéticas

## Força magnetizante:

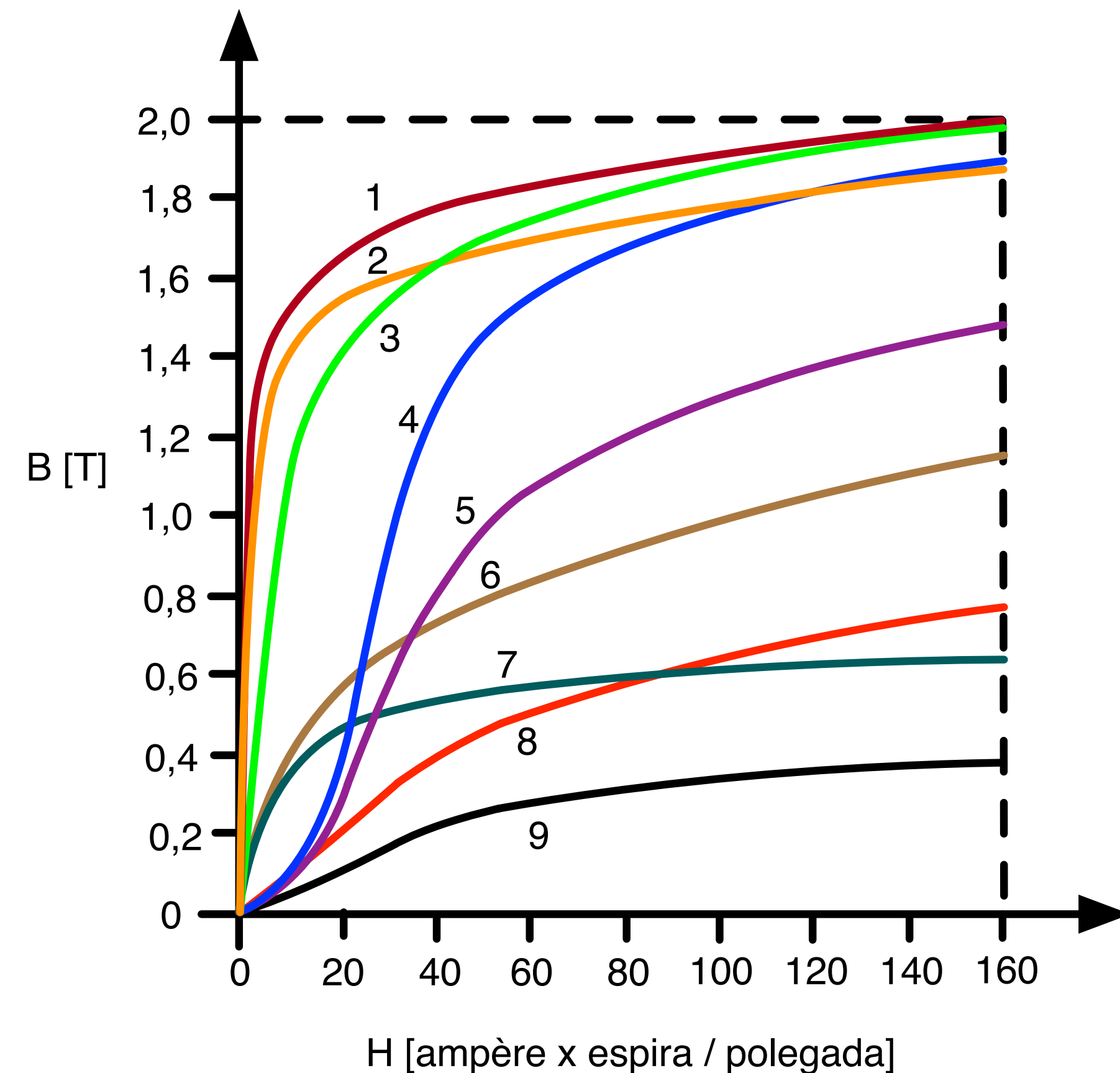
- A reação do material ao campo magnético é denominada de força magnetizante ( $H$ ), sendo dependente da corrente elétrica, do número de espiras e da geometria do elemento magnético.

- Curva  $B \times H$  para diferentes materiais:

- 1 - chapa de aço;
- 2 - aço silício;
- 3 - aço fundido;
- 4 - aço tungstênio;
- 5 - aço magnético;
- 6 - ferro fundido;
- 7 - níquel;
- 8 - cobalto;
- 9 - magnetita.



$$H \cong (I, N, l) [A / m]$$



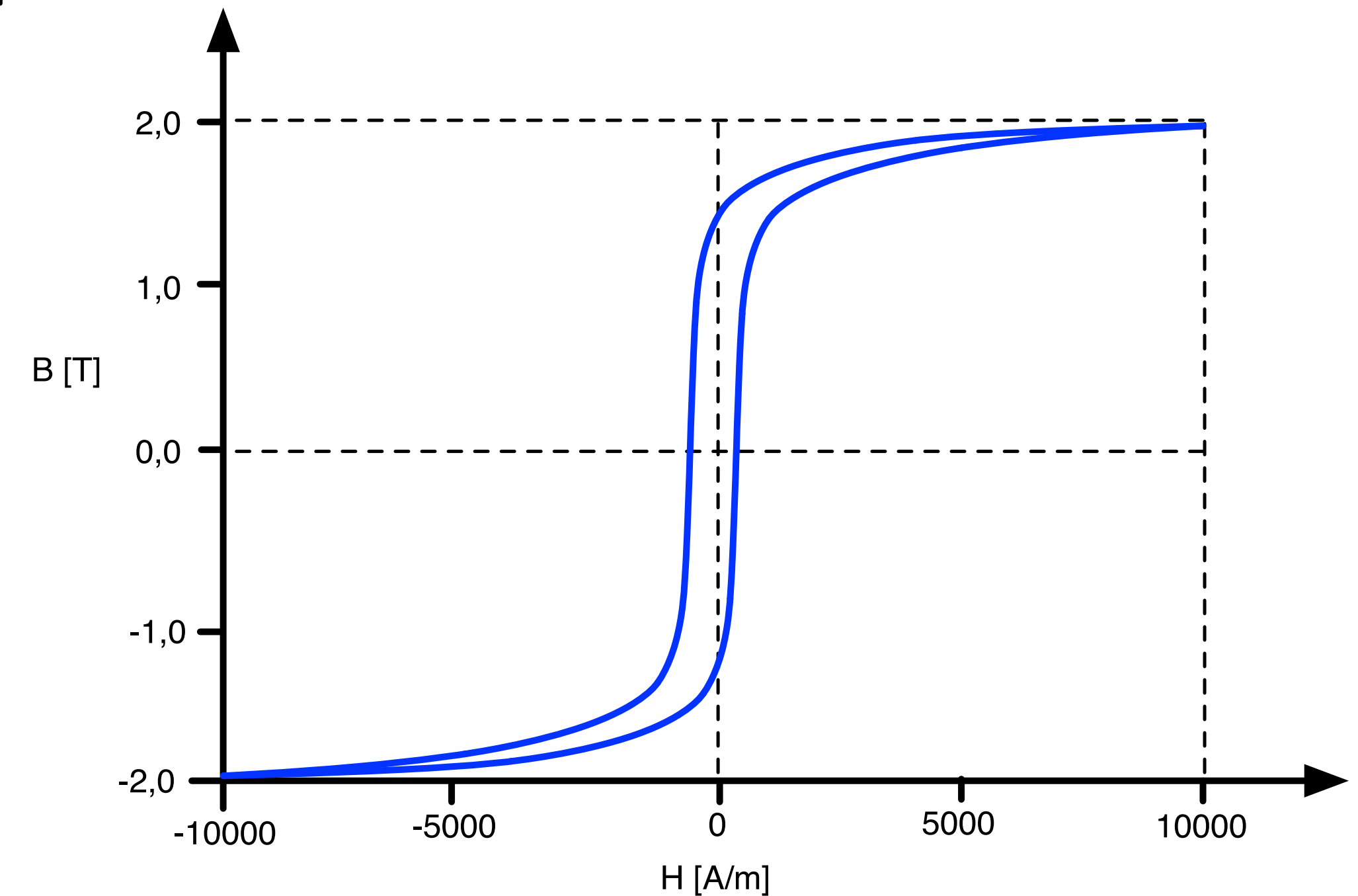
# Grandezas eletromagnéticas

## Permeabilidade magnética:

- A relação entre a densidade de campo magnético (B) e a força magnética (H) é denominada de permeabilidade magnética.
- A classificação dos materiais é realizada conforme sua permeabilidade magnética, ou seja, seu comportamento quando imerso em um campo magnético, concentrando ou não as linhas de campo.

$$\mu = \frac{B}{H} \left[ \frac{Wb}{A/m} \right] \quad \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Wb}{A/m}$$

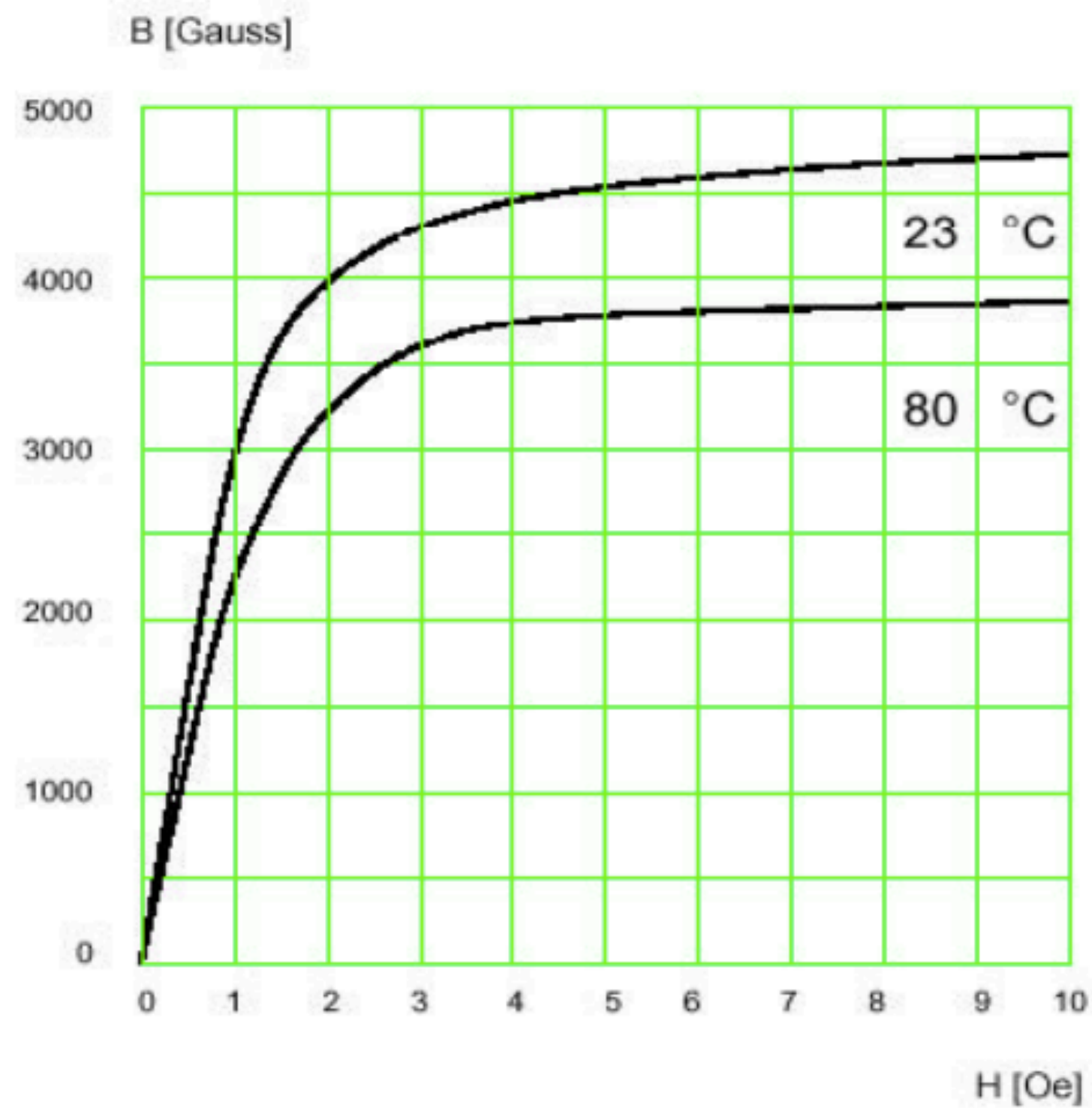
Material	Permeabilidade relativa ( $\mu_r$ )
Ar	1
Papel, plástico, fenolite	1
Ferrite	2.000
Ferro comercial	9.000
Ferro silício	55.000
Permalloy	1.000.000
Super permalloy	10.000.000



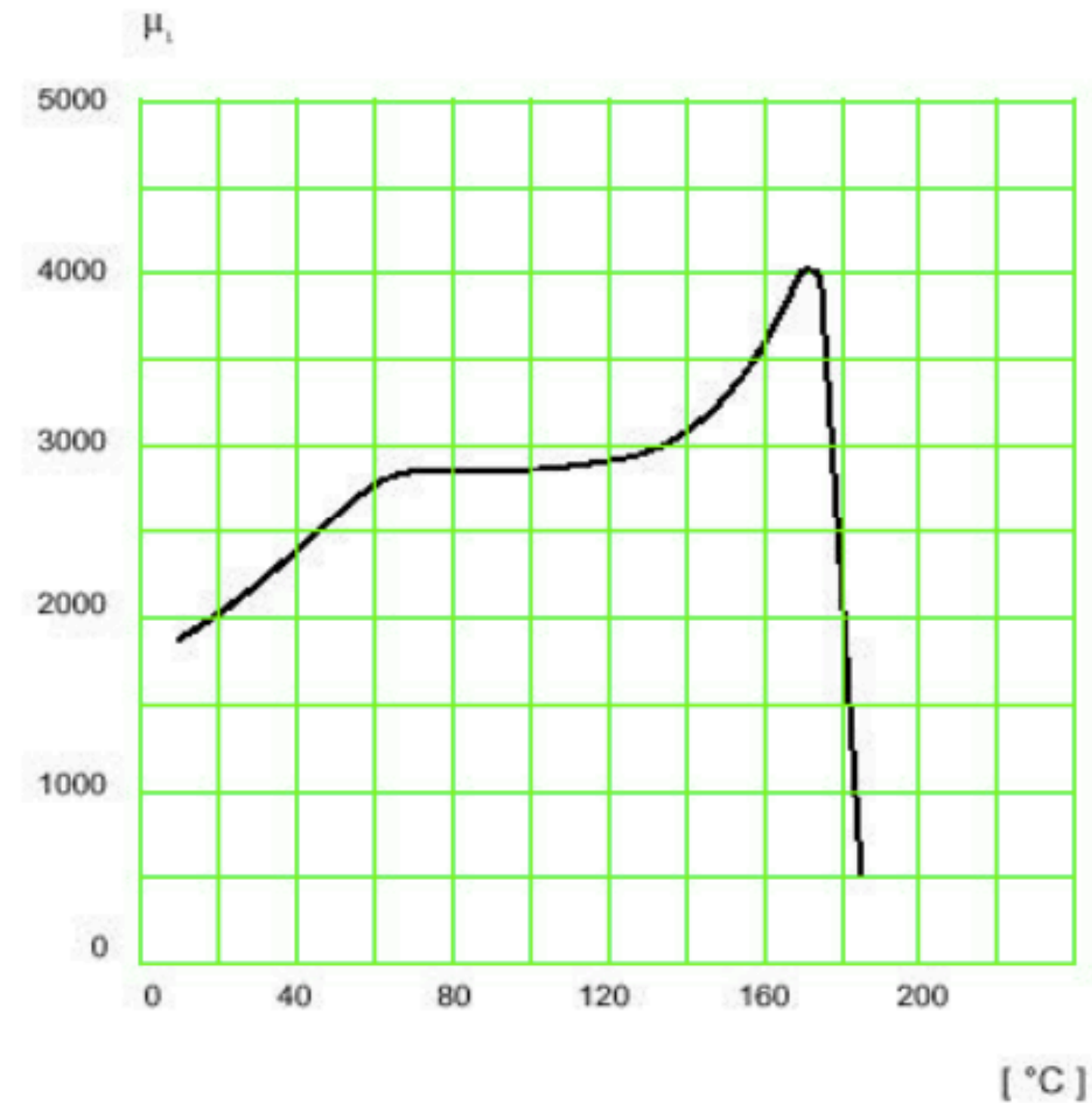
Curva B x H (histerese)

# Grandezas eletromagnéticas

Curva B x H:



Típico B x H

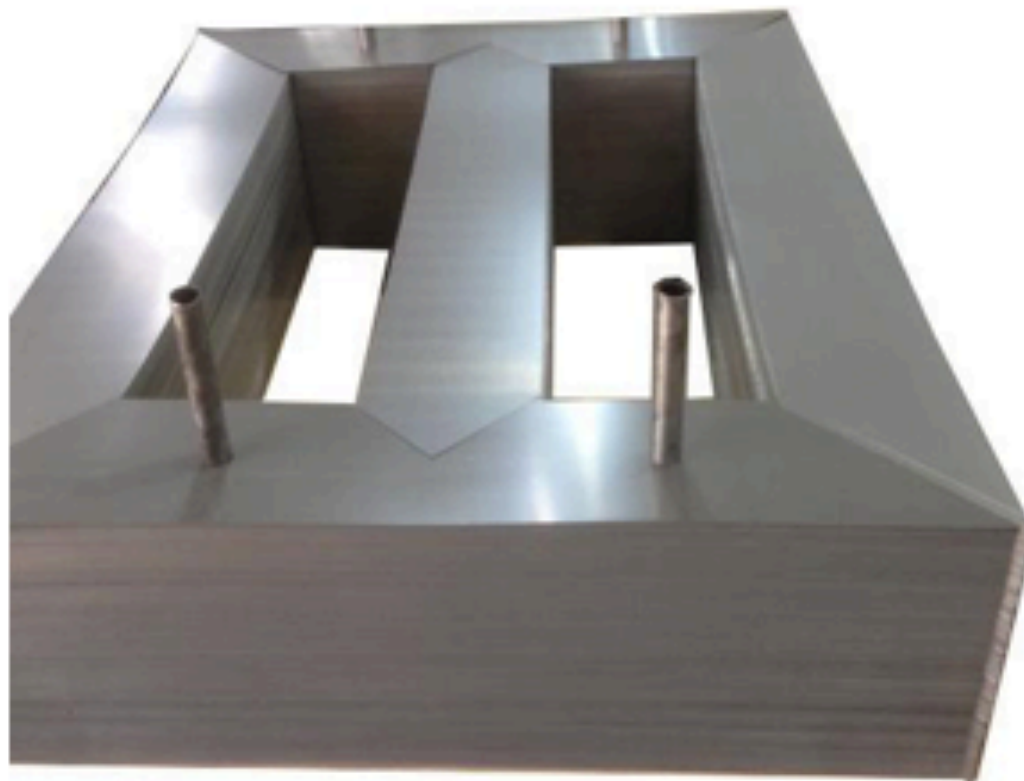


$\mu_i$  x Temperatura

Curva B x H para ferrites do fabricante Thornton (<https://thornton.com.br/>)

# Aspectos de elementos magnéticos

Tipos de núcleos:



*núcleo de ferro-silício*

<https://www.tessin.com.br>



*núcleos de ferrite*

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



*núcleos de pós-metálicos*

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

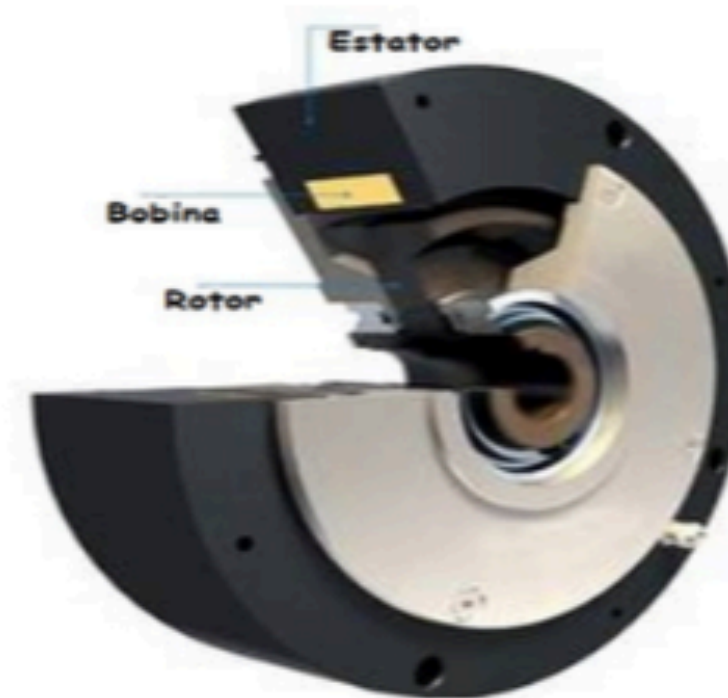
# Aspectos de elementos magnéticos

## Perdas nos elementos magnéticos:

- Perdas no enrolamento - perdas por efeito Joule nos condutores (espiras);
- Perdas no núcleo:
  - Perdas por histerese - perdas para a orientação dos domínios magnéticos;
  - Perdas por correntes parasitas - perdas por efeito Joule pela indução de correntes no próprio núcleo.



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



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



<http://loja.fischer.com.br>

## Aspectos de elementos magnéticos

### Escolha dos condutores:

- Frequência de operação;
- Corrente elétrica.

AWG	$D_{\text{fio}}$ Diâmetro Cobre [cm]	$A_{\text{fio}}$ Área Cobre [cm <sup>2</sup> ]	$D_{\text{fio isol}}$ Diâmetro Isolamento [cm]	$A_{\text{fio isol}}$ Área Isolamento [cm <sup>2</sup> ]	$\rho$ @20 °C [Ω/cm]	$\rho$ @100 °C [Ω/cm]	$I$ @450 A/cm <sup>2</sup> [A]
10	0,259	0,052620	0,273	0,058572	0,000033	0,000044	23,679
11	0,231	0,041729	0,244	0,046738	0,000041	0,000055	18,778
12	0,205	0,033092	0,218	0,037309	0,000052	0,000070	14,892
13	0,183	0,026243	0,195	0,029793	0,000066	0,000080	11,809
14	0,163	0,020811	0,174	0,023800	0,000083	0,000111	9,365
15	0,145	0,016504	0,156	0,019021	0,000104	0,000140	7,427
16	0,129	0,013088	0,139	0,015207	0,000132	0,000176	5,890
17	0,115	0,010379	0,124	0,012164	0,000166	0,000222	4,671
18	0,102	0,008231	0,111	0,009735	0,000209	0,000280	3,704
19	0,091	0,006527	0,100	0,007794	0,000264	0,000353	2,937
20	0,081	0,005176	0,089	0,006244	0,000333	0,000445	2,329
21	0,072	0,004105	0,080	0,005004	0,000420	0,000561	1,847
22	0,064	0,003255	0,071	0,004013	0,000530	0,000708	1,465
23	0,057	0,002582	0,064	0,003221	0,000668	0,000892	1,162
24	0,051	0,002047	0,057	0,002586	0,000842	0,001125	0,921
25	0,045	0,001624	0,051	0,002078	0,001062	0,001419	0,731
26	0,040	0,001287	0,046	0,001671	0,001339	0,001789	0,579
27	0,036	0,001021	0,041	0,001344	0,001689	0,002256	0,459
28	0,032	0,000810	0,037	0,001083	0,002129	0,002845	0,364
29	0,029	0,000642	0,033	0,000872	0,002685	0,003587	0,289
30	0,025	0,000509	0,030	0,000704	0,003386	0,004523	0,229

$$r \approx \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} [cm]$$

$$D = 2 \cdot r = 2 \cdot \frac{7,5}{\sqrt{F_s}} = \frac{15}{\sqrt{F_s}}$$

# Projeto de indutores

## Indutores com núcleo de ar:

- Não saturam;
- Interessante para baixas indutâncias;
- Ocupam maior volume.

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

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

$$D_{fio} = 2 \cdot r_{fio}$$

$$A_{fio} = \pi \cdot r_{fio}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{fio}}{2}\right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{fio}^2}{4}$$

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

$$l_{fio} = 2\pi \cdot r_{nucleo} \cdot N = 2\pi \cdot \frac{D_{nucleo}}{2} \cdot N = \pi \cdot D_{nucleo} \cdot N [m]$$

$$A_{nucleo} = \pi \cdot r_{nucleo}^2 = \pi \cdot \left(\frac{D_{nucleo}}{2}\right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4}$$

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} = L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4}\right)}{N \cdot D_{fio}} = \frac{N \cdot \mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2}{4 \cdot D_{fio}}$$

$$N = \frac{L \cdot 4 \cdot D_{fio}}{\mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2}$$

$$R_{fio} = \rho \cdot l_{fio} \cdot 100 [\Omega]$$

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{(ef)}^2 [W]$$



## Indutores com núcleo toroidal:

- Ocupam menos volume;
- Mais difíceis de enrolar;
- Não permitem ajuste de entreferro.

$$Al = \frac{L}{N^2} [nH]$$

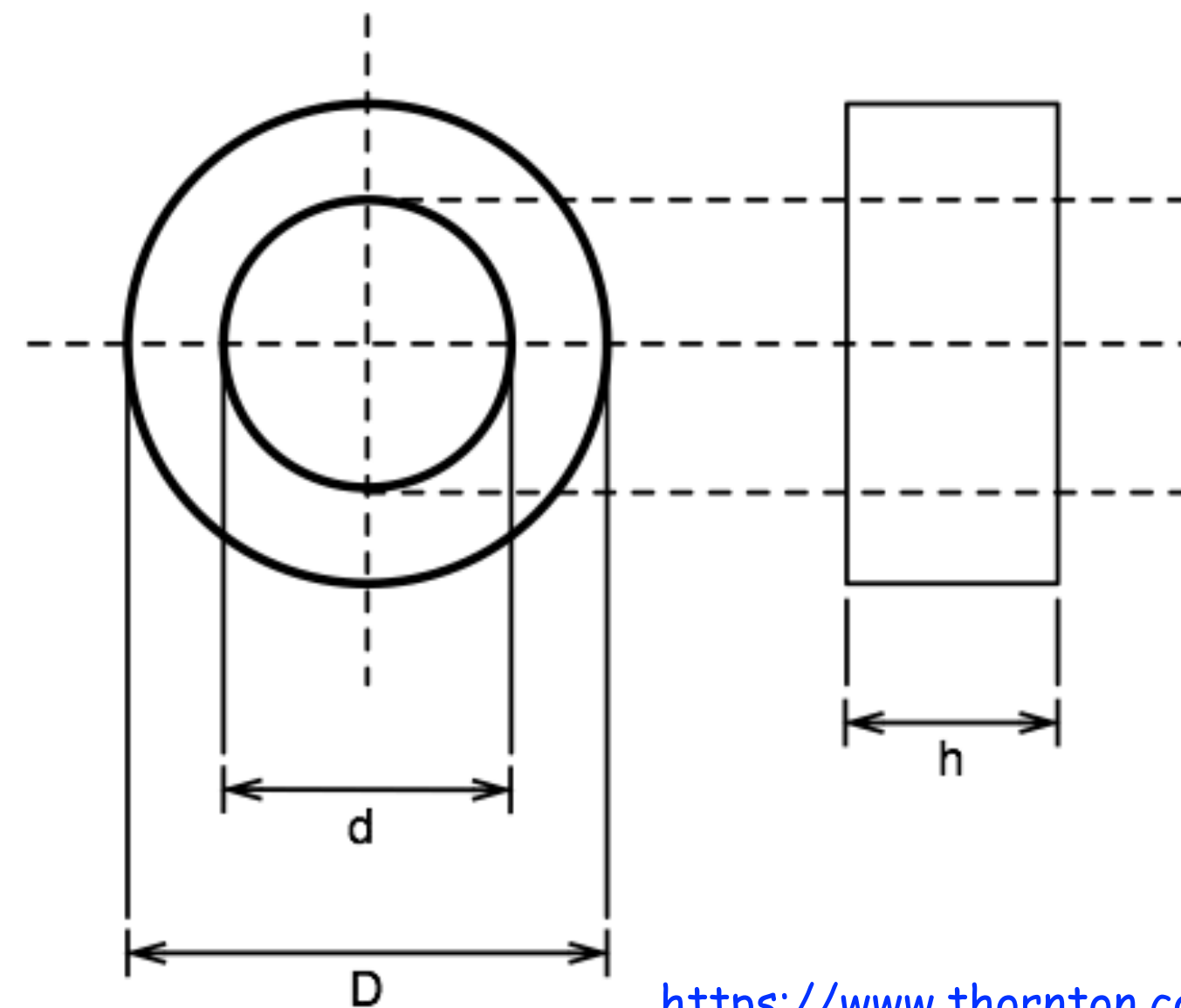
$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}}$$

$$A_{nucleo} = \pi \cdot r_{nucleo}^2 = \pi \cdot \left( \frac{D_{nucleo}}{2} \right)^2 = \frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4} [cm^2]$$

$$A_{enrolamento} = A_{fio\_isol} \cdot N [cm^2]$$

$$FO = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}}$$

$$l_{fio} = N \cdot [2 \cdot (D - d) + 2 \cdot h] [m]$$



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



# Projeto de indutores

## Indutores com núcleo EE:

- Muito utilizados em fontes chaveadas;
- Permitem ajuste de entreferro.

$$AeAw = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot I_{L(ef)} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J}$$

$$N = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot 10^4}{B \cdot A_e}$$

$$\Delta B = B \cdot \frac{\Delta I_L}{I_{L(pk)}}$$

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

$$D_{fio(max)} = \frac{15}{\sqrt{F_s}}$$

$$N_{fios} = \frac{I_{proj}}{I_{fio(escolhido)}}$$

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho}{N_{fios}} \cdot l_t$$

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{L(ef)}^2$$

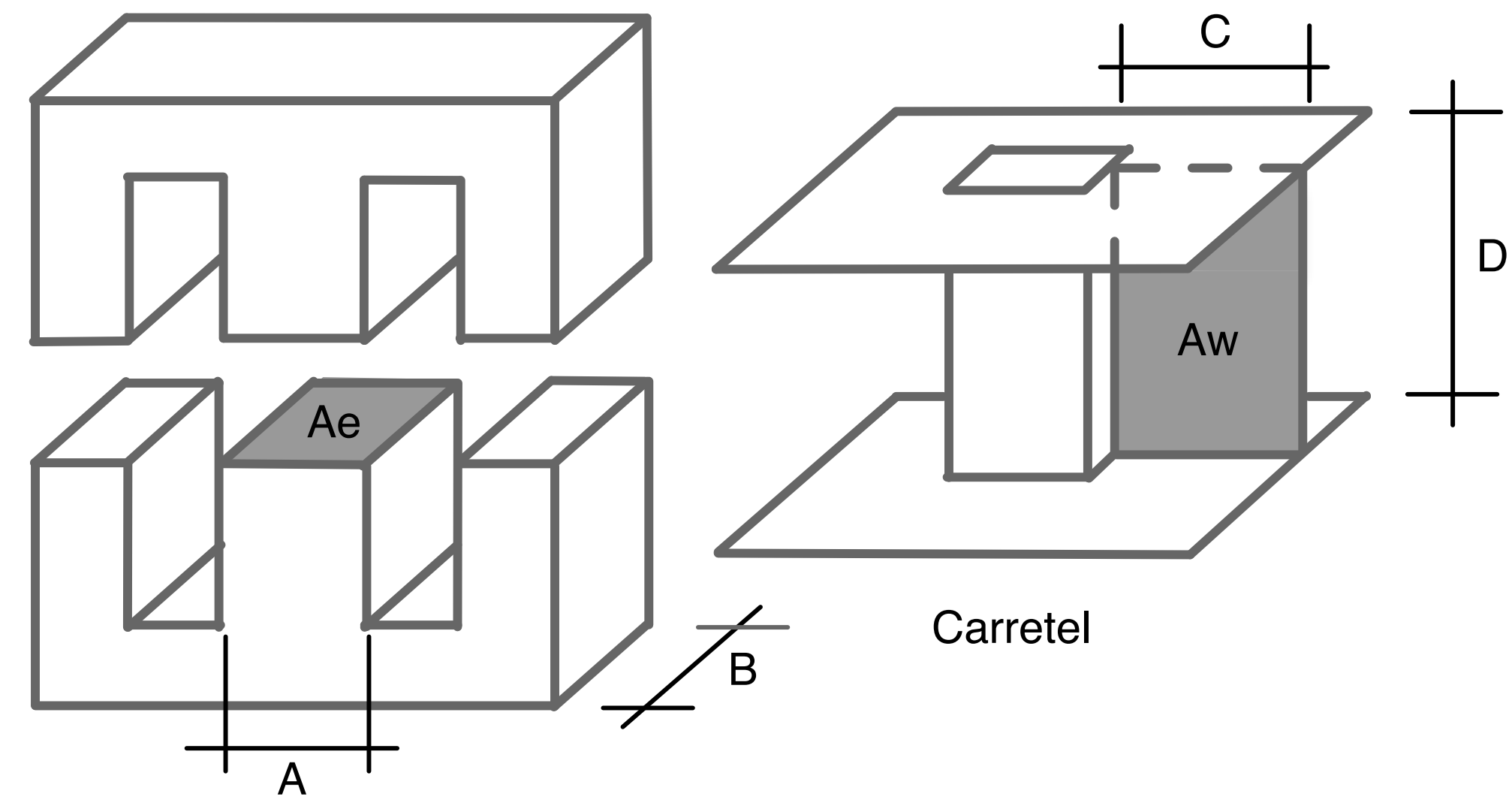
$$P = P_{nucleo} + P_{fio}$$

$$R_{ter} = 23 \cdot (AeAw)^{-0,37}$$

$$\Delta T = R_{ter} \cdot P$$

$$A_{enrolamento} = N_{fios} \cdot A_{fio(isolado)} \cdot N$$

$$FO = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}}$$



Núcleos EE

# Projeto de indutores

## Exemplo de projeto de indutor com núcleo de ar:

- Projete um indutor com núcleo de ar para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH.

Determine:

- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento.

$$D_{fio(max)} = \frac{15}{\sqrt{F_s}} = \frac{15}{\sqrt{50k}} = 0,067 \text{ cm} \quad \rightarrow \quad \text{Fio 22 AWG}$$

- $D_{fio} = 0,064 \text{ cm}$  – diâmetro do fio;
- $A_{fio} = 0,003255 \text{ cm}^2$  – área do fio;
- $D_{fio(isolado)} = 0,071 \text{ cm}$  – diâmetro do fio isolado;
- $A_{fio(isolado)} = 0,004013 \text{ cm}^2$  – área do fio isolado;
- $\rho@20 \text{ }^\circ\text{C} = 0,000530 \text{ } \Omega/\text{cm}$  – resistividade do fio em 20 °C;
- $I@450 \text{ A/cm}^2 = 1,465 \text{ A}$  – densidade de corrente.

$$N_{fios} = \frac{I_{proj}}{I_{fio(escolhido)}} = \frac{3}{1,465} = 2,05 \cong 2 \text{ fios}$$

$$N = \frac{L \cdot D_{fio} \cdot 4}{\mu \cdot \pi \cdot D_{nucleo}^2} = \frac{1m \cdot 2 \cdot 0,064 \text{ cm} \cdot 4}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (1 \text{ cm})^2} \cong 12969 \text{ espiras}$$



Aumentar diâmetro para 10 cm:

- Número de espiras = 130
- Cuidar a relação  $I \gg D$ .

# Projeto de indutores

## Exemplo de projeto de indutor com núcleo toroidal:

- Projete um indutor com núcleo toroidal para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH.

Determine:

- Núcleo a ser usado;
- Número de espiras;
- Condutor do enrolamento;
- Fator de ocupação.

Mesmo fio do exemplo anterior (22 AWG.)

$$N = \sqrt{\frac{L}{Al}} = \sqrt{\frac{1m}{2400n}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{2400 \cdot 10^{-9}}} = 20,4 \cong 21 \text{ espiras}$$

$$A_{nucleo} = \frac{\pi \cdot D_{nucleo}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (10mm)^2}{4} = \frac{\pi \cdot (1cm)^2}{4} = 0,785 cm^2$$

$$A_{enrolamento} = A_{fio(isolado)} \cdot N = 2 \cdot 0,003255 \cdot 21 = 0,137 cm^2$$

$$F_o = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}} = \frac{0,137}{0,785} = 0,174 = 17,4\%$$



NT-10/5/6,5-2400-IP12

# Projeto de indutores

## Exemplo de projeto de indutor com núcleo EE:

- Projete um indutor com núcleo de ferrite EE para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:
  - Núcleo a ser usado;
  - Número de espiras;
  - Condutor do enrolamento;
  - Perdas no indutor;
  - Fator de ocupação.

Mesmo fio do exemplo anterior (22 AWG.)

$$A_e A_w = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot I_{L(ef)} \cdot 10^4}{k \cdot B \cdot J} = \frac{1m \cdot 3 \cdot 3 \cdot 10^4}{0,7 \cdot 0,35 \cdot 450} = 0,816 \text{ cm}^4$$

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	0,31	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

<https://ivobarbi.com.br>



E-30/14

# Projeto de indutores

## Exemplo de projeto de indutor com núcleo EE:

- Projete um indutor com núcleo de ferrite EE para operar com frequência de 50 kHz, corrente eficaz de 3 A e que tenha indutância de 1 mH. Determine:
  - Núcleo a ser usado;
  - Número de espiras;
  - Condutor do enrolamento;
  - Perdas no indutor;
  - Fator de ocupação.

$$N = \frac{L \cdot I_{L(pk)} \cdot 10^4}{B \cdot A_e} = \frac{1m \cdot 3 \cdot 10^4}{0,35 \cdot 1,20} = 71,43 \cong 72 \text{ espiras}$$

$$\Delta B = B \cdot \frac{\Delta I_L}{I_{L(pk)}} = 0,35 \cdot \frac{0,2 \cdot 3}{3} = 0,07T$$

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

$$P_{nucleo} = 0,07^{2,4} \cdot (4 \cdot 10^{-5} \cdot 50k + 4 \cdot 10^{-10} \cdot (50k)^2) \cdot 8 = 0,0406W$$

$$R_{fio} = N \cdot \frac{\rho}{N_{fios}} \cdot l_t = 72 \cdot \frac{0,000530}{2} \cdot 1,20 = 0,023\Omega$$

$$P_{fio} = R_{fio} \cdot I_{L(ef)}^2 = 0,023 \cdot 3^2 = 0,21W$$

$$P = P_{nucleo} + P_{fio} = 0,0406 + 0,21 = 0,25W$$

$$A_{enrolamento} = N_{fios} \cdot A_{fio(isolado)} \cdot N = 2 \cdot 0,003255 \cdot 21 = 0,137cm^2$$

$$Fo = \frac{A_{enrolamento}}{A_{nucleo}} = \frac{0,137}{0,85} = 0,161 = 16,1\%$$



## Operação em malha fechada

