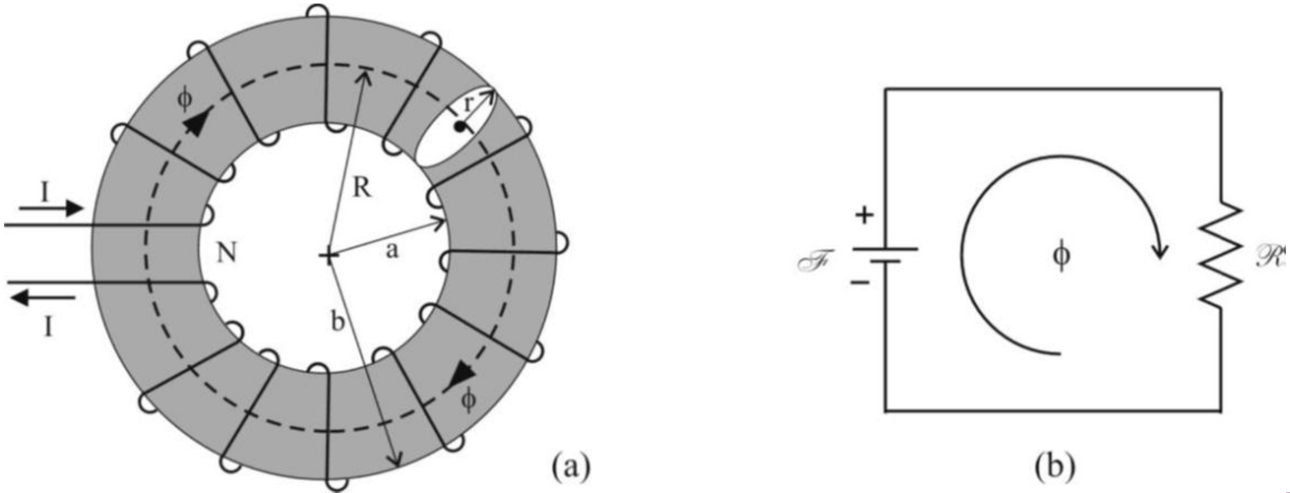
Conversão de Energia I

Capitulo 2 – Circuito Magnético

1. Introdução

- Nos dispositivos eletromecânicos – geradores, motores, contactores, relés, etc. – a utilização de enrolamentos e núcleos objetiva o estabelecimento de fluxos magnéticos como meio de acoplamento na transformação de energia elétrica em mecânica, ou vice-versa;

- A função do núcleo é "canalizar" as linhas de indução do campo magnético geradas pelos enrolamentos;
- Analogamente aos circuitos elétricos, os enrolamentos seriam como fontes, os fluxos magnéticos equivaleriam a correntes e os núcleos fariam o papel de condutores.



(a) (b)

- Os campos magnéicos sob condições variaáveis no tempo são os mesmos que sob condições estáticas nos mesmos níveis elétricos;
- Do ponto de vista prático significa que podemos resolver todos os problemas de circuito magnético sob condições estáticas e depois introduzir a variação no tempo. Caso contrário necessitariamos das equaçoes de Maxwell, tornando a tarefa extremamente dificil.

2. Lei de Ampere

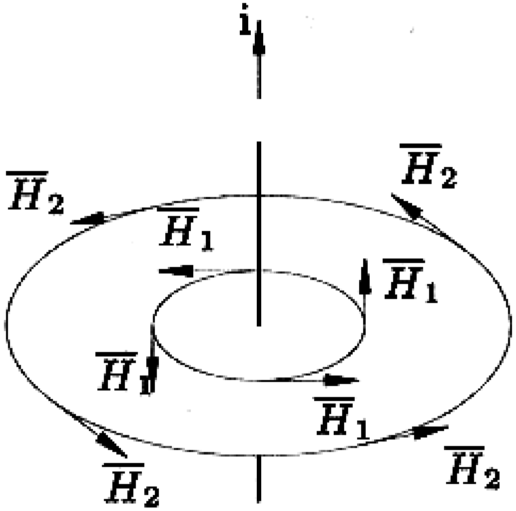
- A lei básica que determina a relação entre corrente elétrica e campo magnético é a lei de Ampére.

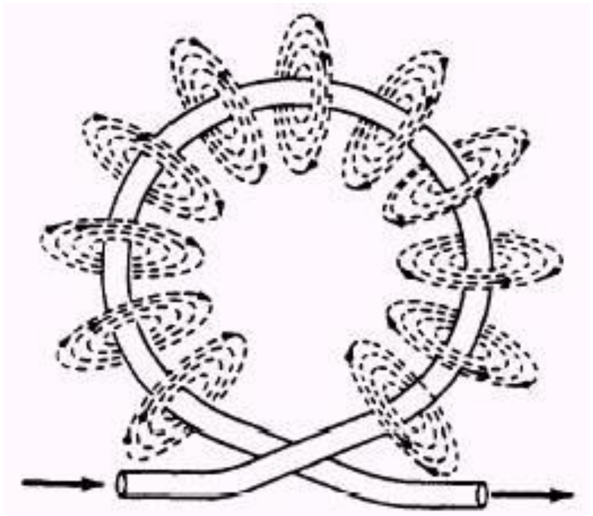
$$\int_S J da = \oint H dl = \mathcal{F}$$

- A equação afirma que a integral de linha fechada da intensidade do campo magnético em uma trajetória fechada é igual às correntes envolvidas que produzem as linhas de campo.

- Pela lei de Ampère para determinação do campo em um ponto da trajetória escolhida, distante perpendicularmente R_1 do condutor, resulta em:

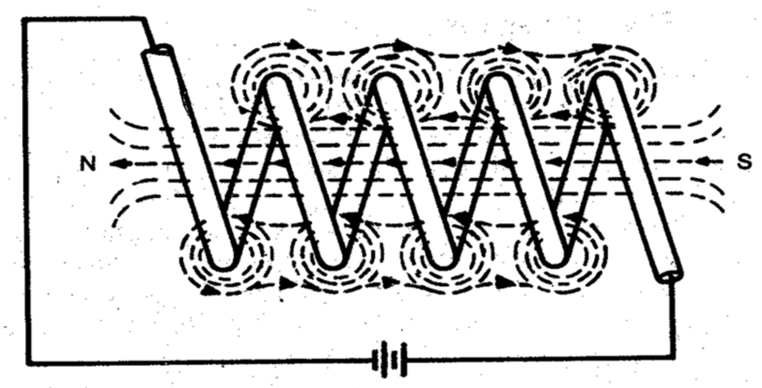
$$H_1 . 2 . \pi . R_1 = i \rightarrow \; H_1 = \frac{i}{2 . \pi . R_1}$$





- A corrente que circula pelo condutor multiplicado pelo número de espiras do enrolamento definem a força magnetomotriz [Fmm] que é análoga à tensão ou força eletromotriz do circuito elétrico.

$$\mathrm{Fmm} = \mathrm{N}.\,i$$

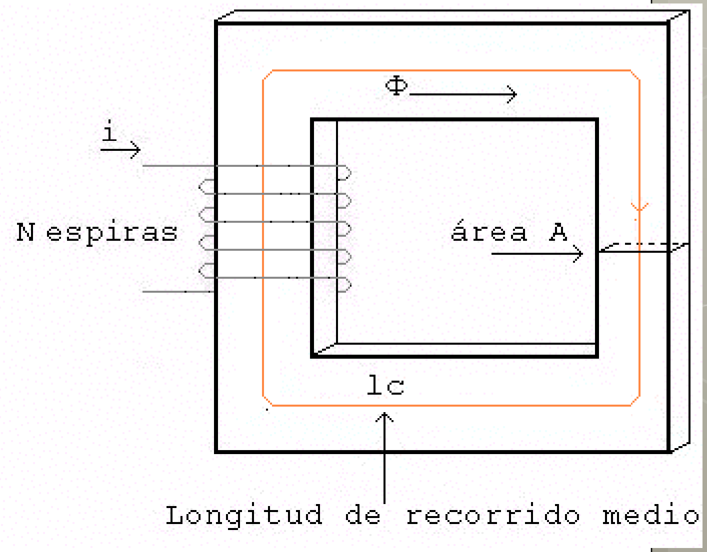


- A força magnetomotriz é o produto da corrente nas espiras pelo número de espiras que envolve o material magnético.
- Essa corrente produz uma intensidade de campo magnético que multiplicado pelo comprimento médio do circuito magnético também fornece a Fmm

$$Fmm = \oint_C \bar{H}.d\bar{l} = Ni = H.l_c$$

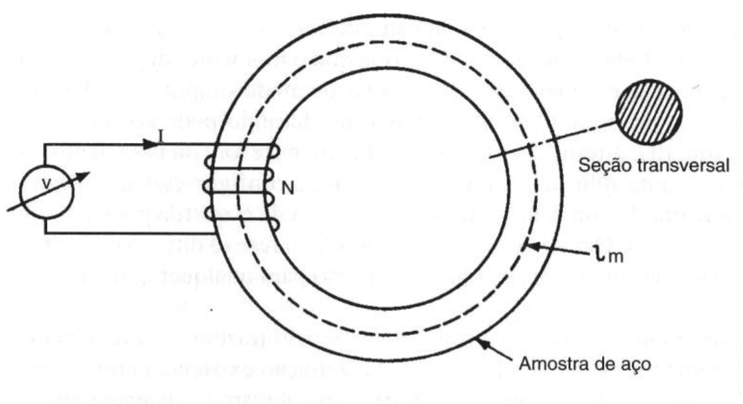
Onde:

l_C = comprimento médio do circuito magnético [m].



Exercício 1:

A bobina de um núcleo magnético toroidal de comprimento médio igual a 29 cm tem 100 espiras. Determine o campo magnético no núcleo quando a corrente contínua é 0,0166 A. Supor que o campo seja uniforme. (Resp. 5,72 A/m)



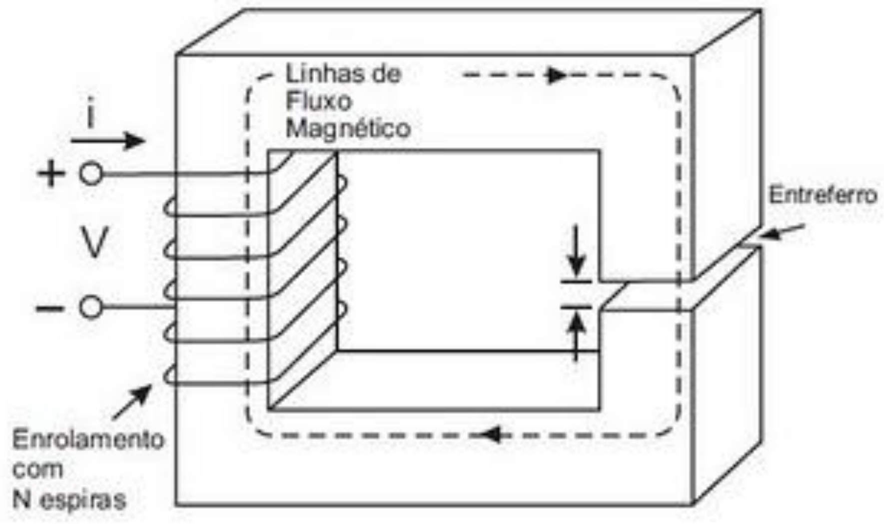
- Sabendo que

$$\mathrm{H} = \frac{B}{\mu}$$

Então,

$$\mathcal{F}mm = Hl = \frac{B}{\mu} l$$

- Quando os circuitos magnéticos são analisados para determinar o fluxo e a indução magnética nos principais caminhos magnéticos através do núcleo, o campo magnético fora pode ser desprezado;
- Todavia, em trafos e máquinas rotativas os campos de dispersão são importantes na determinação dos acoplamentos magnéticos entre os enrolamentos.



Para estes casos:

$$Ni = H_n l_n + H_g l_g$$

Agora, como:

$$\emptyset = \int B.ds$$

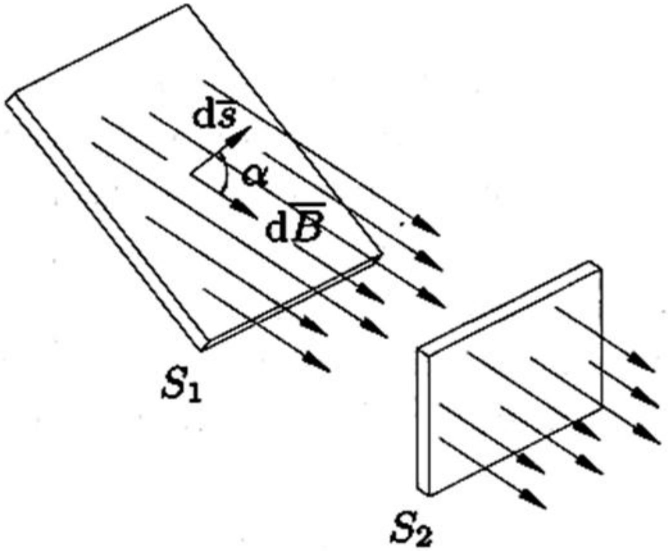
Onde:

B = densidade de fluxo [Wb/m^2];

Φ = fluxo magnético [Wb];

S = superfície plana na qual passa o fluxo ou corrente [m^2];

,



Com a densidade de fluxo constante temos:

$$\emptyset = B.S.cos\alpha$$

A densidade de fluxo em núcleo com seção constante, tende a ser uniforme, assim:

$$\emptyset = B.A$$

Dai,

$$Ni = \frac{B_n}{\mu_n} l_n + \frac{B_g}{\mu_0} l_g$$

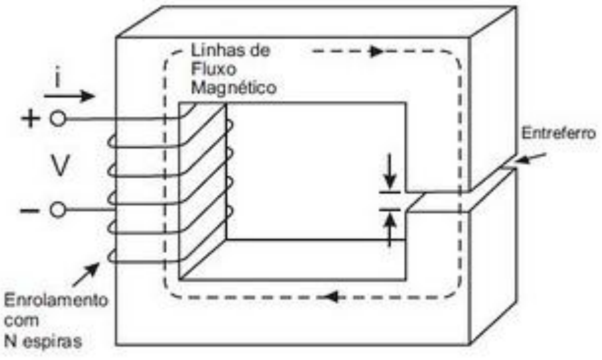
Ou

$$Ni = \frac{\emptyset l_n}{A_n \mu_n} + \frac{\emptyset l_g}{A_g \mu_0}$$

Exercício 2:

Um circuito magnético como mostrado abaixo tem dimensões A_n=9cm²; A_g=9cm²; g=0,05 cm; l_n=30 cm e N=500 espiras. Supor o valor μr=5000 para o ferro e $\mu_0 = 4\pi \times 10{-}7$ N/A². Calcular:

a) A corrente i para Bn=1 webber/m2;
b) O fluxo ϕ;
c) Fluxo concatenado $\lambda = N\ \phi$.



Exercício 3:

O circuito magnético abaixo tem dois caminhos magnéticos. Calcule o fluxo e a indução magnética em cada perna do núcleo. Supor que a permeabilidade do ferro é tão alta que a fmm do enrolamento é totalmente consumida nos entreferros.

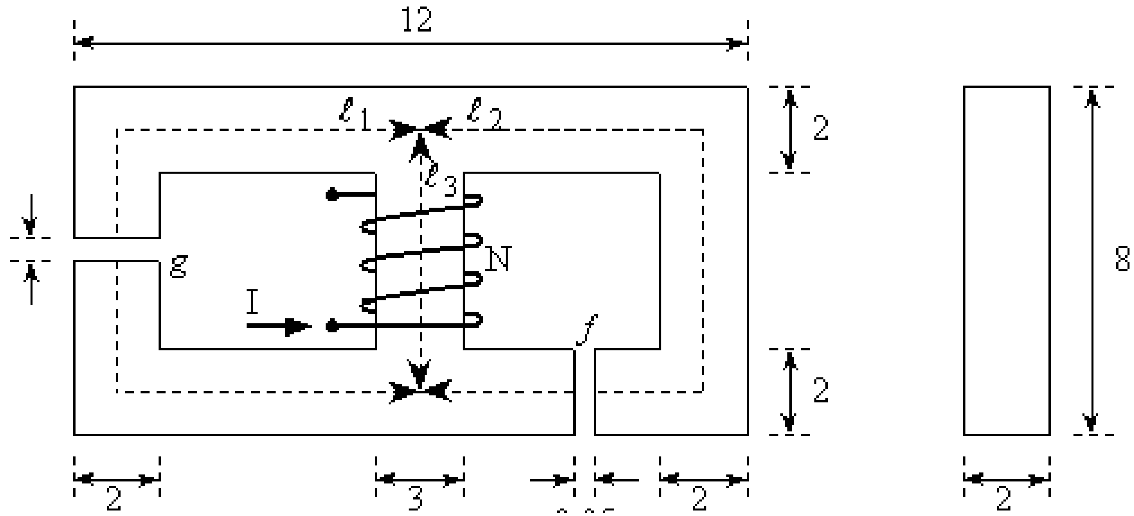
Considerar:

g_1 = 0,05 cm

g_2 = 0,03 cm

N = 1000

i = 0,2 A



3. A Lei de Faraday

- Sabemos que cargas estáticas geram campos elétricos, enquanto cargas em movimento, i.e. correntes, geram campos magnéticos;
- Uma segunda maneira de gerar (induzir) campos elétricos: variando o fluxo magnético. Este resultado é formulado pela Lei de Faraday, que sintetiza uma série de observações em que ocorre indução do campo elétrico.

- Faraday observou que correntes variáveis em um circuito geram uma corrente em um circuito próximo;
- Com o conceito de campo magnético, ficou claro que a corrente variável do circuito produz um campo magnético variável, que, por sua vez, gera uma corrente elétrica no segundo circuito;
- Similarmente, movimento de um ımã em um circuito gera neste uma corrente;

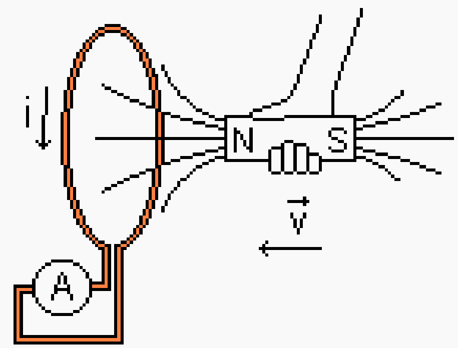


Fig.1

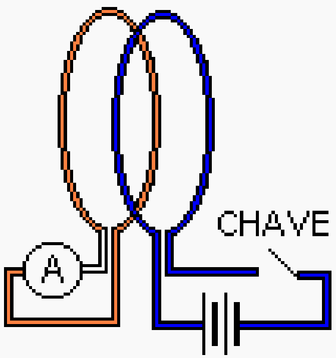
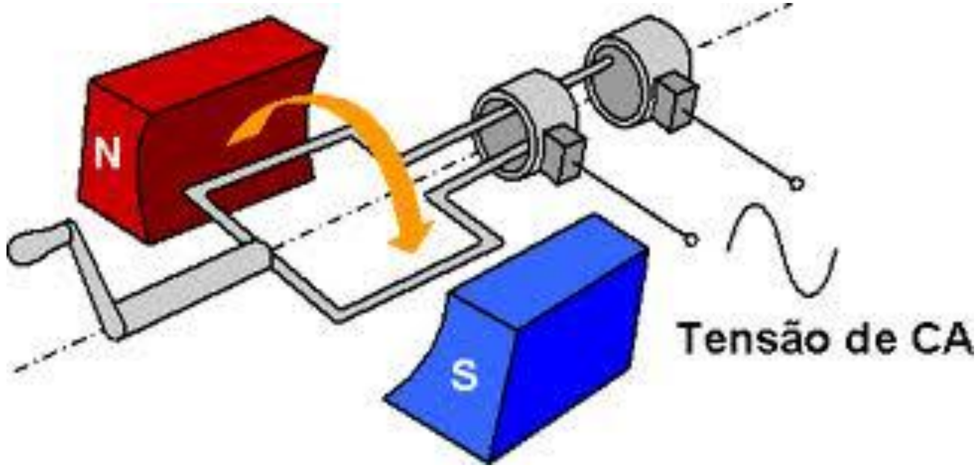


Fig.2

- Observa-se também que, mantendo o campo fixo, mas variando a área de um circuito em contato com o campo magnético, ou ainda a orientação do circuito relativa ao campo, uma corrente no circuito também é gerada;
- Em conjunto, estas observações indicam que a variação do fluxo magnético gera um campo elétrico associado a uma f.e.m. que, na presença de cargas, gera uma corrente induzida.

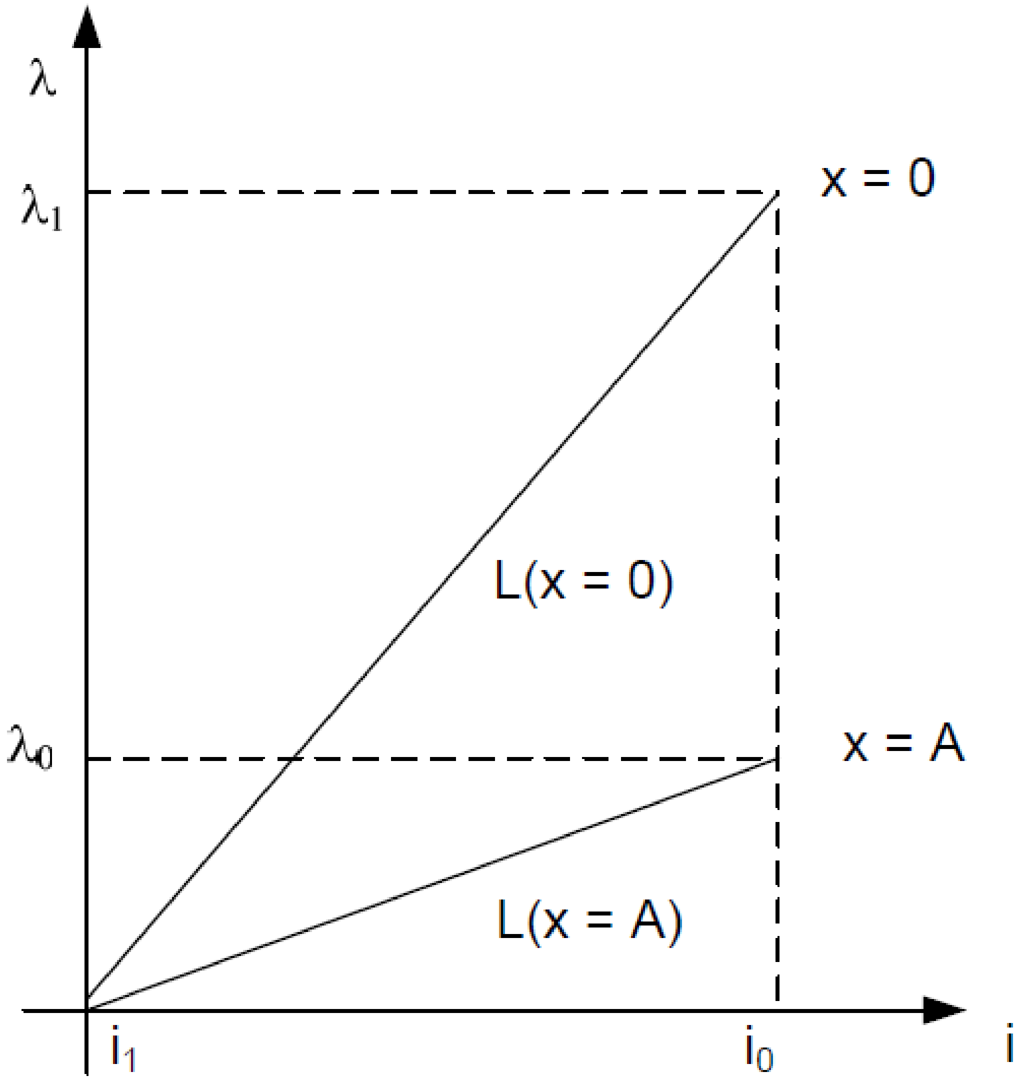


- A lei de Faraday estabelece que a f.e.m. induzida em uma bobina por um campo magnético variável no tempo é proporcional ao número de espiras que enlaçam o fluxo, assim como a taxa de variação do fluxo em relação ao tempo.
- Em outras palavras:

$$e = N\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt}$$

- Em um circuito magnético, a relação entre a corrente que circula na bobina e o fluxo produzido é linear e é denominada de INDUTÂNCIA (L):
- Fisicamente, indutancia é a capacidade de uma bobina em criar um fluxo magnético apartir de determinada corrente que a percorre, medida em "henry" cujo símbolo é H.

$$L = \frac{\lambda}{i}$$


λ
λ1
x = 0
L(x = 0)
λ0
x = A
L(x = A)
i1
i0
i

- A indutância também pode ser caracterizada como aquela propriedade de um elemento do circuito pela qual a energia pode ser armazenada num campo de fluxo magnético.

- Assim, A partir das equações:

$\mathrm{FMM} = \mathrm{NI}, \phi = {}^{\mathrm{FMM}}/_{\mathrm{R_{Total}}}$ e $\lambda = \mathrm{N}\phi$, podemos escrever:

$$\mathrm{L} = \frac{\mathrm{N}^2}{\left({}^{\mathrm{l_g}}/_{\mathrm{A_g}.\mu_0}\right)} = \frac{\mathrm{N}^2\mathrm{A_g}.\mu_0}{\mathrm{l_g}} = \frac{\mathrm{N}^2}{\mathrm{R_{Total}}}$$

$$L = \frac{N^2 A_g . \mu_0}{l_g} = \frac{N^2}{R_{entreferro}}$$

- Como pode ser visto, a equação genérica contempla o Relutância total;
- Contudo, devido a Relutância do entreferro dominar, ou seja, ser muito maior do que a Relutância do núcleo, a equação pode ser simplificada para contemplar apenas a relutância do entreferro;

- Substituindo o fluxo concatenado na lei de Faraday, a tensão no indutor é dada por:

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}(\mathrm{Li}) = \mathrm{L}\frac{\mathrm{di}}{\mathrm{dt}}$$

- Para circuitos magnéticos estáticos, a indutância é fixa e a equação se reduz à forma já conhecida. Entretanto, nas máquinas, a indutância pode ser variável no tempo e a equação precisa ser expressa por:

$$e = \mathrm{L}\frac{\mathrm{di}}{\mathrm{dt}} + \mathrm{i}\frac{\mathrm{dL}}{\mathrm{dt}}$$

- Já a energia magnética total armazenada em um indutor é dada por:

$$w = \frac{1}{2} L.\, i^2$$

- Devido ao fato de que a energia associada com o parâmetro indutância aumenta e diminui com a corrente, pode-se concluir que o indutor é capaz de devolver energia à fonte da qual recebe.

Exercício 4:

Para o circuito baixo, calcular:

a) A fem para $B=1sen377t$ webber/m^2;
b) As relutâncias do núcleo e do entreferro;
c) A indutância L;
d) A energia para $B_n=1$ webber/m^2;

Lembrando:

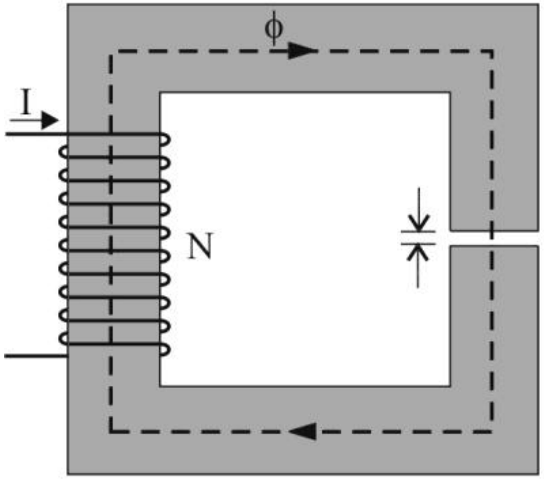
$A_n=A_g=9cm^2$

$g=0,05$ cm e $l_n=30$ cm

N=500 espiras

$\mu r=5000$

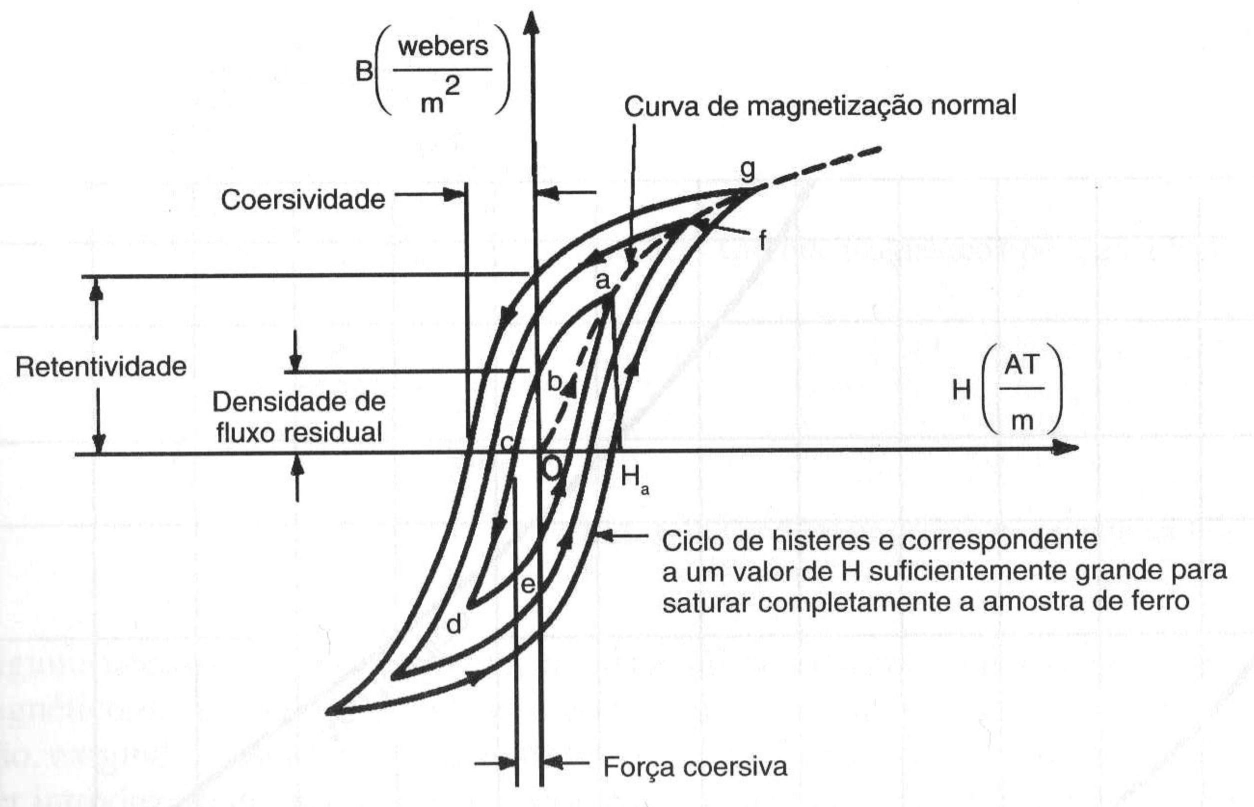
i=0,89 A



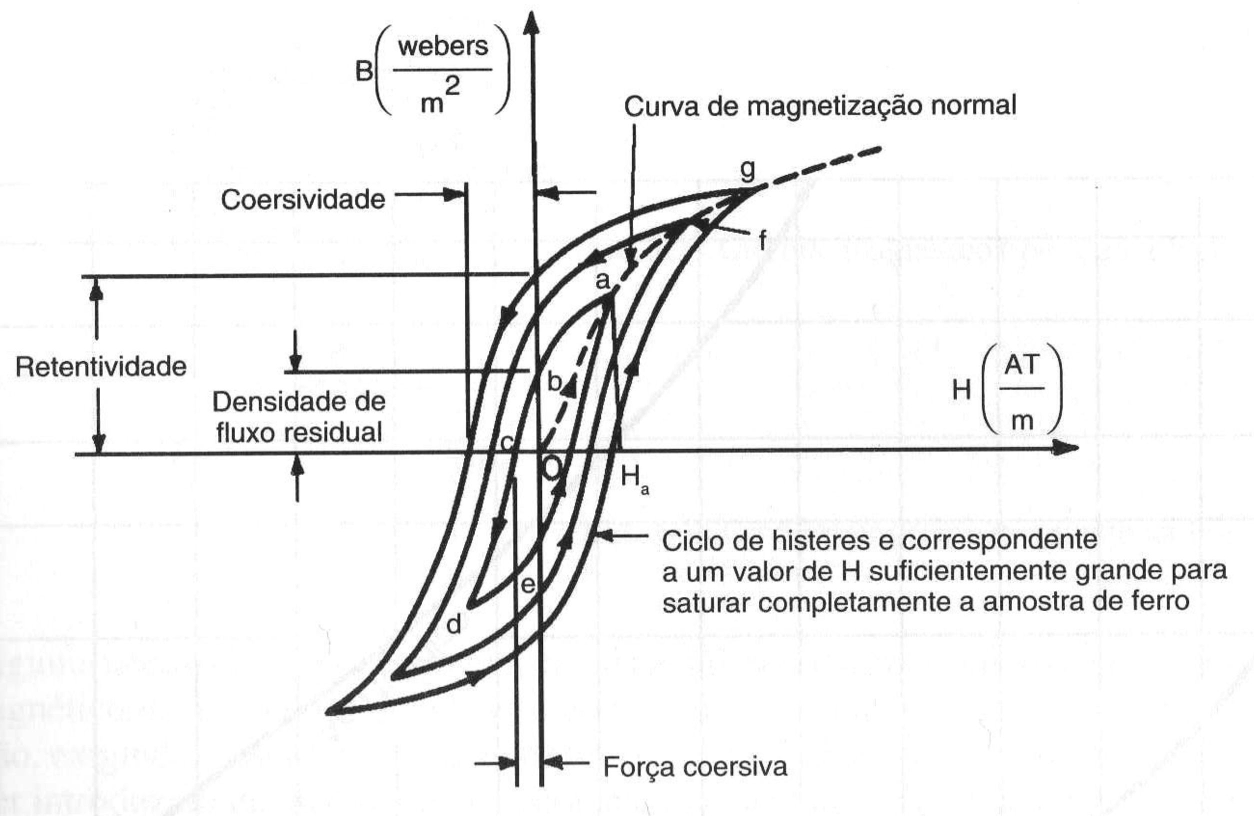
4. Histerese

- A curva de magnetização normal ocorre quando o material está totalmente desmagnetizado e é submetido a um campo magnético.
- Quando o campo magnético é retirado os domínios magnéticos não se desfazem totalmente ficando uma magnetização residual.
- Dessa forma a linha de coordenadas BH para valores crescentes de H não é coincidente com aquela obtida para os valores decrescentes

- Quando H atinge zero a densidade de fluxo magnética não é nula, sendo denominada de densidade de fluxo residual;
- Quando o material foi completamente saturado a densidade de fluxo residual é denominada de retentividade.



- A intensidade do campo magnético necessário para reduzir a densidade de fluxo magnético a zero é chamada de força coerciva;
- O valor máximo da força coerciva é chamado de coersividade.



5. Perdas em circuitos magnéticos

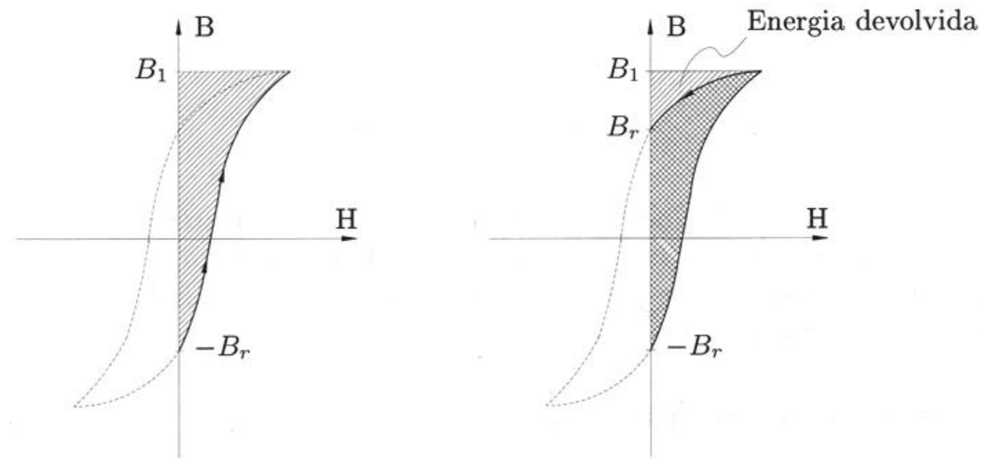
- As perdas totais no núcleo magnético, também chamadas perdas-ferro, são divididas em duas perdas histerese P_h e perdas por corrente parasitas P_P;

$$P_{fe} = P_h + P_P$$

- Dependem da:
  - Metalurgia;
  - Frequência;
  - Espessura do material;
  - E da indução magnética máxima.

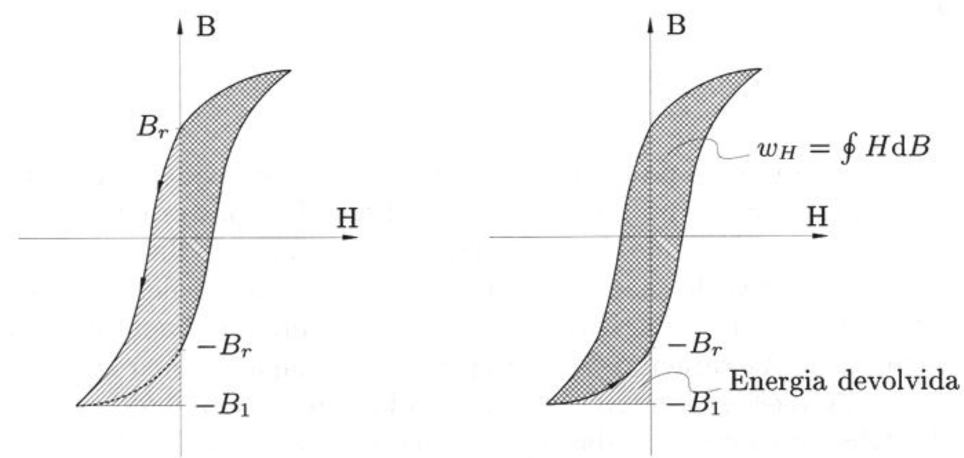
Perdas Por Histerese

- De maneira simplificada, quando um material é submetido a um campo magnético externo alternado, seus domínios estarão em contínuo movimento, buscando alinhar-se com H. Isso causa um "atrito" entre os domínios, aquecendo o material e ocasionando as chamadas perdas por histerese. Demonstra-se que essas perdas são proporcionais à área encerrada na curva de histerese;
- A área interna ao laço da histerese representa as perdas por unidade de volume do material por ciclo de magnetização.



(a) Energia fornecida ao núcleo: W=$\int_{-B_r}^{B_1} H\mathrm{d}B > 0$

(b) Energia devolvida à fonte: W=$\int_{B_1}^{B_r} H\mathrm{d}B < 0$



(c) Energia fornecida ao núcleo: W=$\int_{B_r}^{-B_1} H\mathrm{d}B > 0$

(d) Energia devolvida ao núcleo: W=$\int_{-B_1}^{-B_r} H\mathrm{d}B < 0$

Perdas Por Histerese

$$P_h = v \cdot f \cdot K_h \cdot B_m^n$$

Onde:

P_h = Perdas por histerese [W];

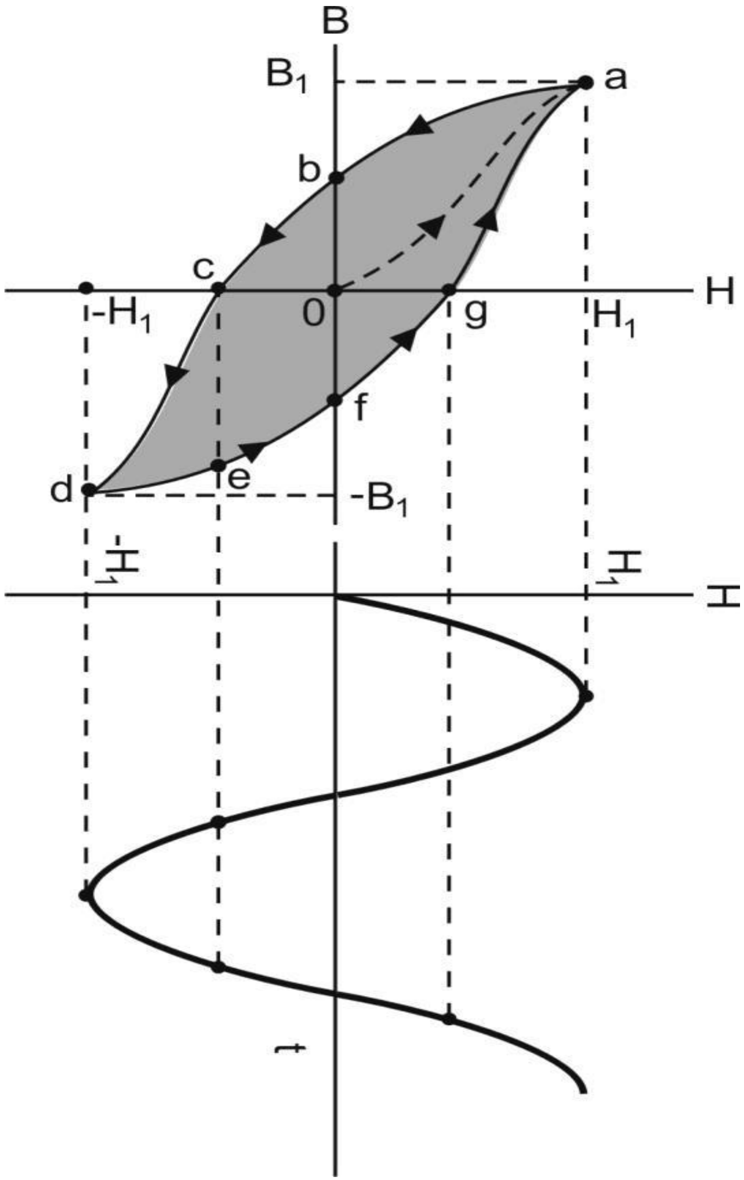
v = volume total do material [m^3];

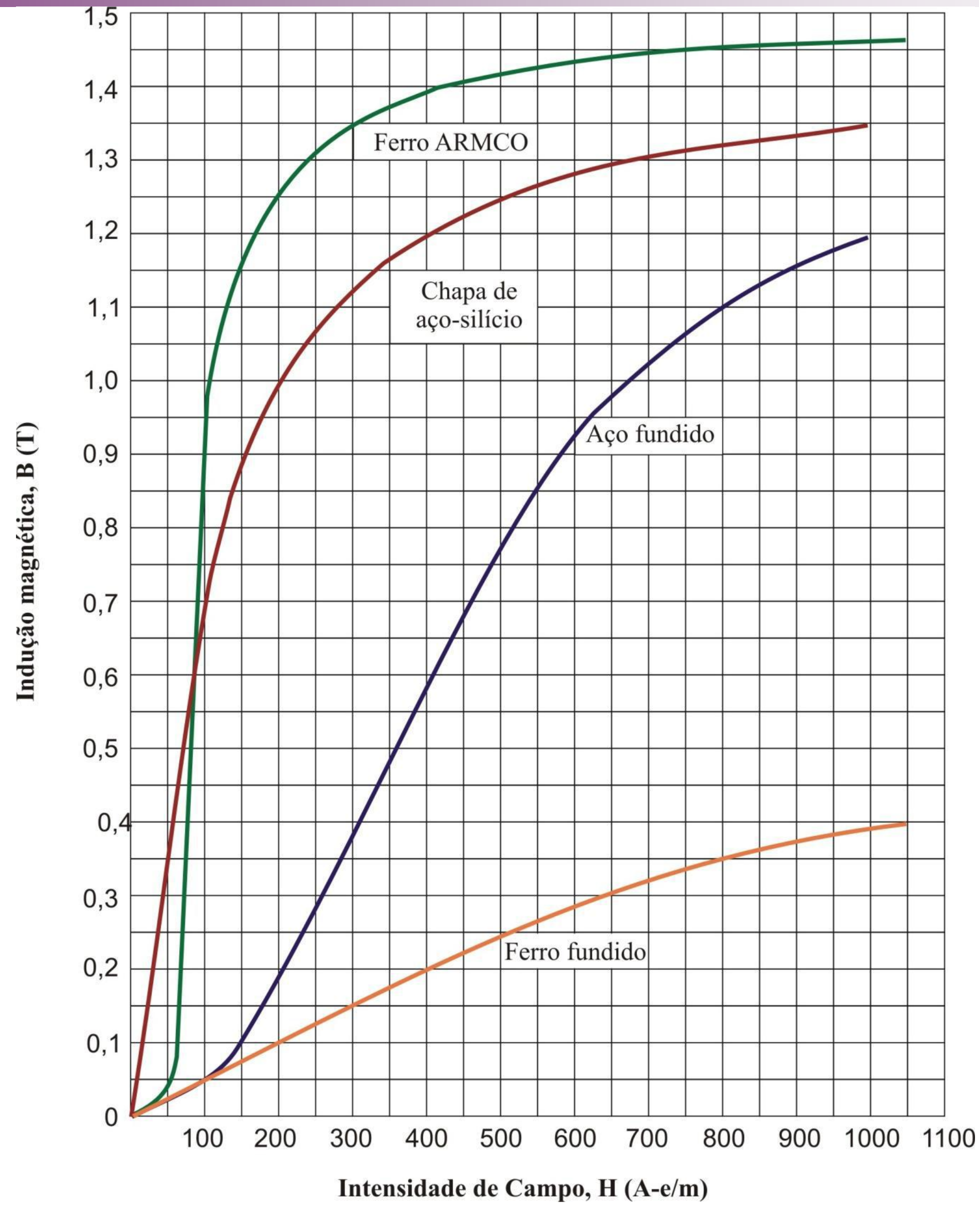
f = frequência de variação do fluxo [Hz];

K_h = constante que depende do material;

B_m = Valor máximo da densidade de fluxo;

n = depende do material empregado, situa-se na faixa de $1{,}5 < n < 2{,}5$;


B
B1
a
b
c
0
g
H
-H1
H1
f
d
e
-B1
t


Indução magnética, B (T)
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,0
0,9
0,8
0,7
0,6
0,5
0,4
0,3
0,2
0,1
0
Ferro ARMCO
Chapa de aço-silício
Aço fundido
Ferro fundido
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000 1100
Intensidade de Campo, H (A-e/m)

Perdas Corrente Parasita

Perdas de potência associada com as correntes circulantes que existem em percursos fechados dentro do corpo de um material ferromagnético e causam uma perda indesejável por aquecimento.

$$P_P = v \cdot \tau^2 \cdot K_P \cdot f^2 \cdot B_m^2$$

Onde:

P_P = Perdas por corrente parasitas [W];

v = volume total do material [m^3];

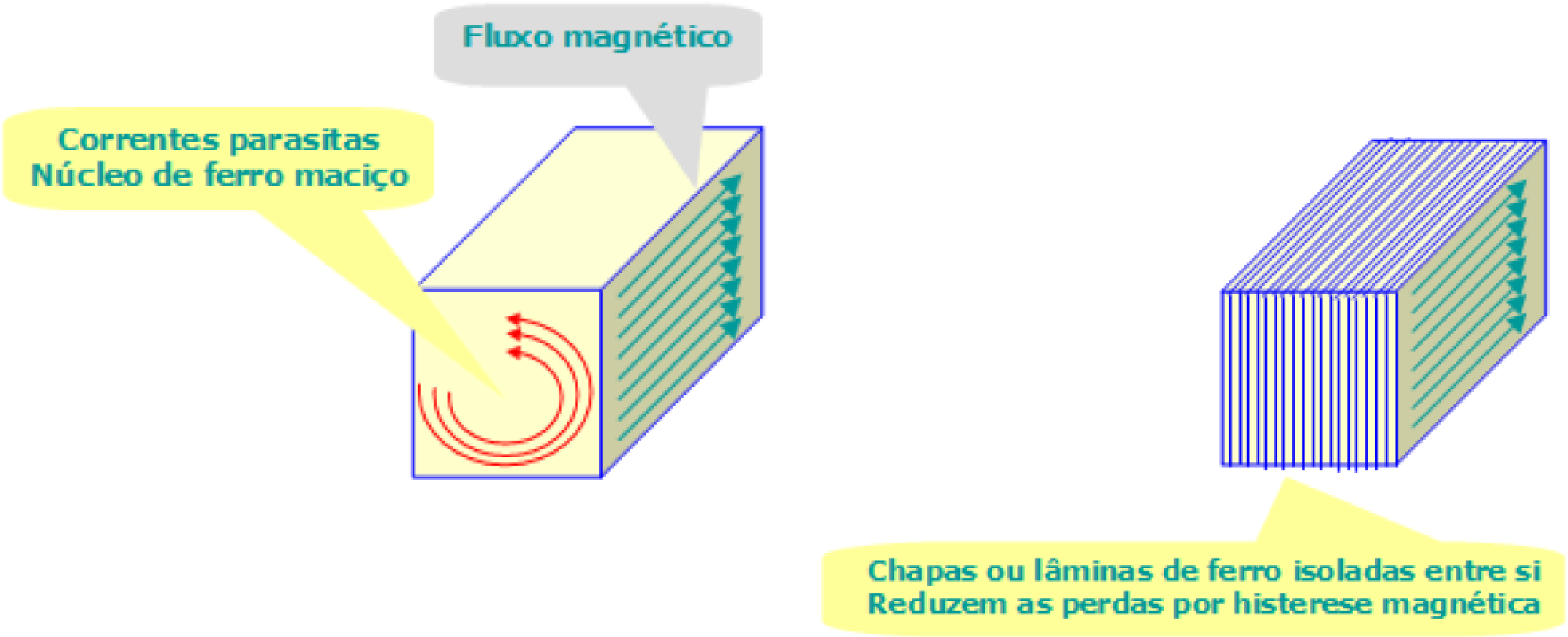
t = espessura de laminação

f = frequência de variação do fluxo [Hz];

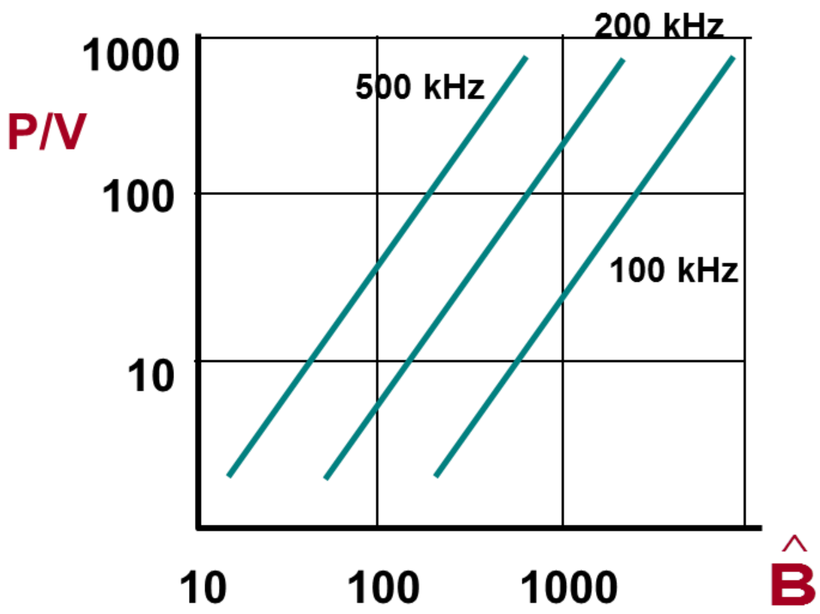
K_h = constante que depende do material;

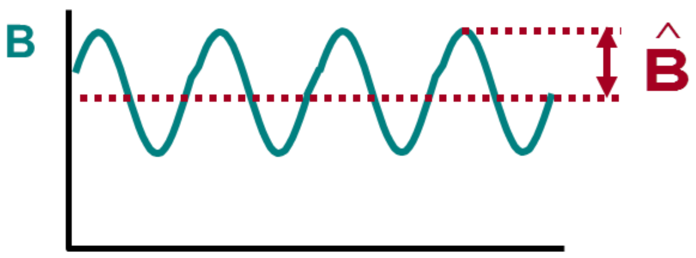
B_m = Valor máximo da densidade de fluxo;

Uma das formas de reduzir as perdas por corrente parasitas e construir o núcleo com chapas laminadas e isoladas eletricamente entre si.



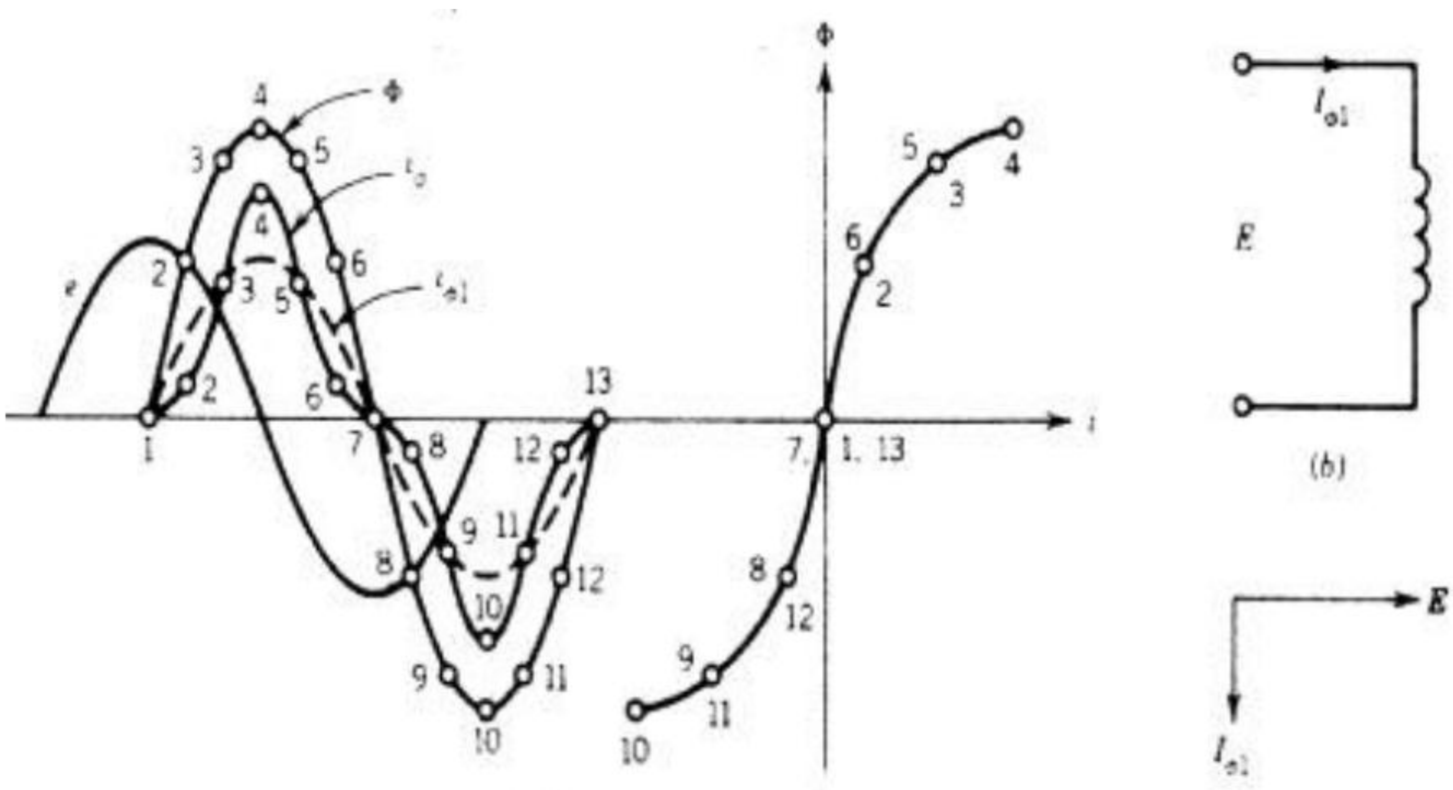
Excitação CA

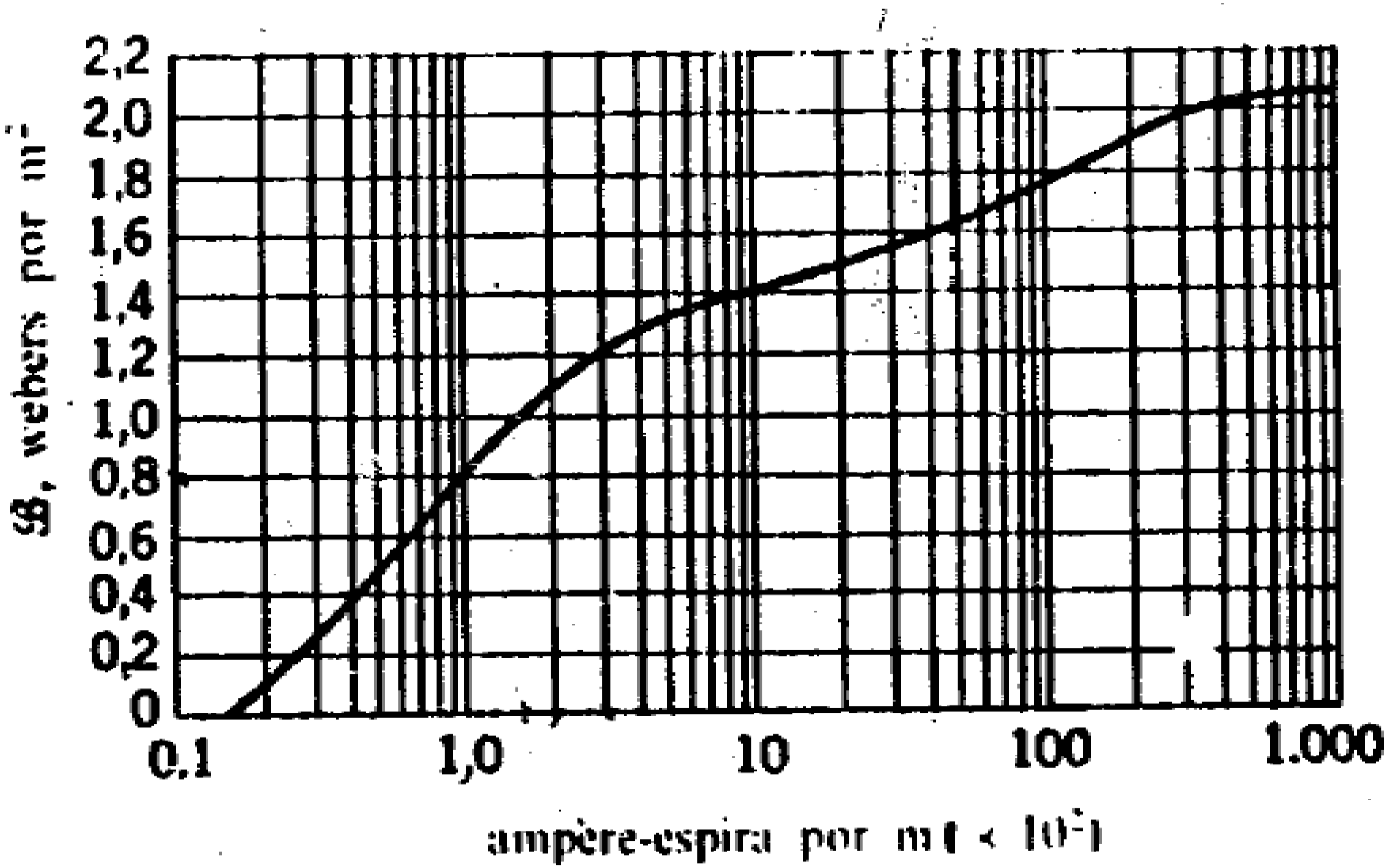




Sómente a componente alternada do Fluxo provoca perdas. Nas curvas se entra com a amplitude da componente alternada.

Excitação CA



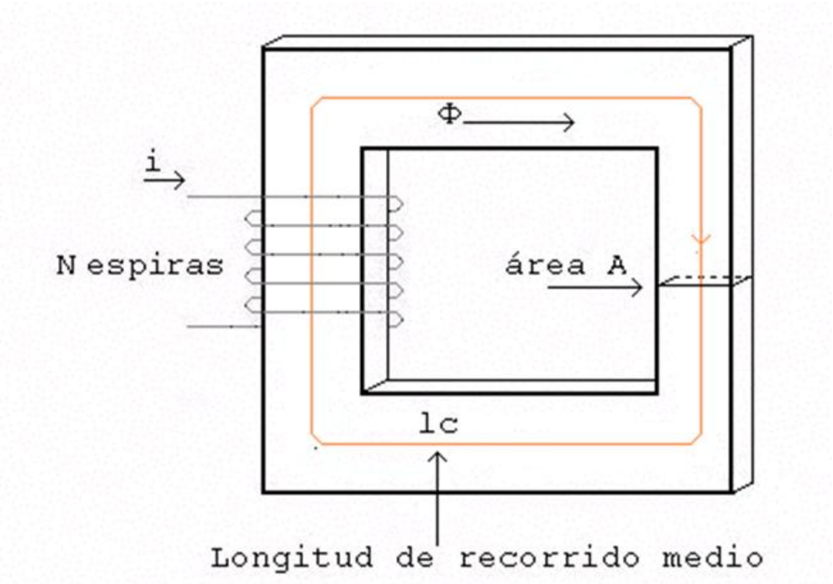


ℬ, webers por m²
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0
0.1
1,0
10
100
1.000
ampère-espira por m (× 10⁻²)

- As características de materiais magnéticos sob excitação CA são usualmente apresentadas em termos de potencia aparente por unidade de massa, P_a, como função da indução magnética, em lugar da curva BxH;
- Particularmente em trafos e reatores com entreferro e em menor frequência, em máquinas rotativas, o material magnético funciona à mesma indução magnética na estrutura inteira;
- A potencia aparente de excitação para o material é encontrada como produto de P_a pela massa.

- Assim, aplicando-se uma tensão $v_{ef} = \sqrt{2}V sen2\pi ft$ à entrada do enrolamento da figura abaixo, a indução magnética será calculada da seguinte forma:

$$\mathcal{B} = \frac{1}{NA_n}\int vdt$$



$$\mathcal{B} = \frac{-\sqrt{2}V}{NA_n 2\pi f}\cos 2\pi ft$$

$$\mathcal{B}_{max} = \frac{-\sqrt{2}V}{NA_n 2\pi f} = \frac{V}{4{,}44 NA_n f}$$

- Ou seja, a tensão eficaz pode ser relacionada com a máxima indução magnética por:

$$V = 4{,}44\mathcal{B}_{max} N A_n f$$

- O comportamento de H é fortemente não senoidal, quando B é senoidal. Podemos definir um valor eficaz de H_{ef} de H_n e dai um valor de corrente I eficaz, tais que:

$$I_{ef} = \frac{H_{ef} l_n}{N}$$

- Assim, o produto VI, é a potencia aparente aplicada no terminal de entrada do enrolamento para prover a excitação do material, na indução máxima:

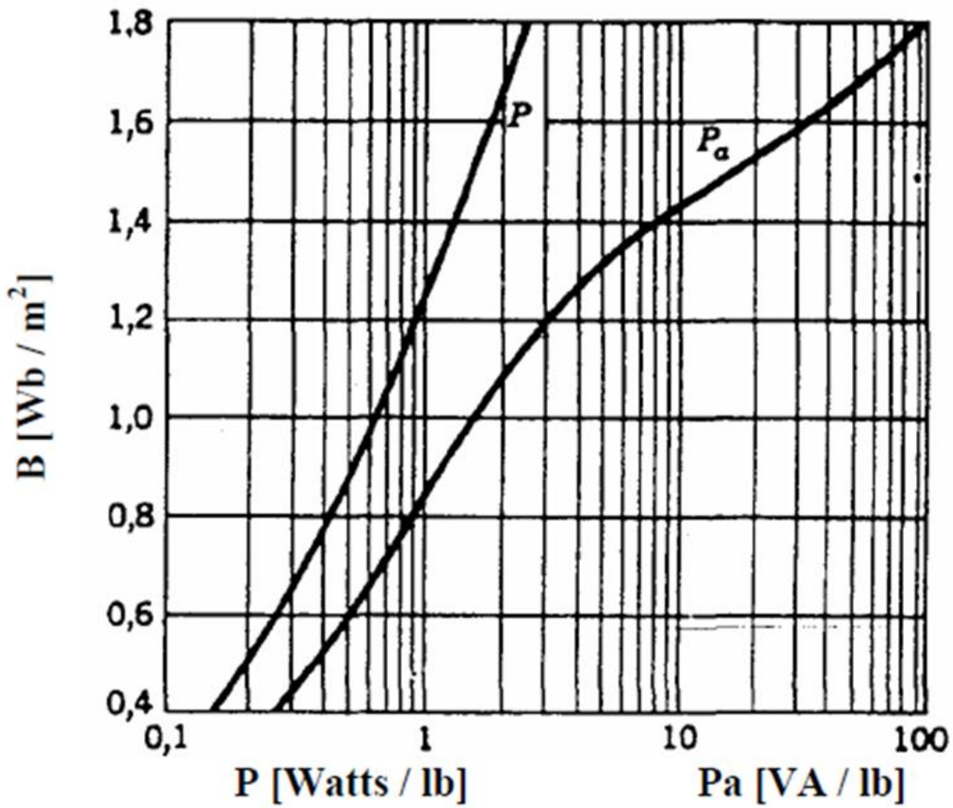
$$VI = 4{,}44f(\mathcal{B}_{max}H_{ef})A_n l_n$$

- Para um material de densidade ρ_n, a massa é $\rho_n A_n l_n$ e a potência aparente por unidade de massa é dada por:

$$P_a = \frac{VI}{\rho_n A_n l_n} = \frac{4{,}44f}{\rho_n}(\mathcal{B}_{max}H_{ef})$$

- Assim, a característica de P_a pode ser escrita para uma frequência f , em função somente de B_{max}.

Para o aço M-19



- Exercício 5:

O núcleo magnético a seguir é feito de chapas de aço-silício M-19, O enrolamento é excitado com uma tensão adequada para produzir uma indução de B=1,5sen377t webbers/m^2 no núcleo. O material ocupa 0,94 do volume total do núcleo. A densidade do aço é de 7,65g/cm^3. Determinar:

(1 pol = 2,54 cm e 1g = 0,0022 lb)

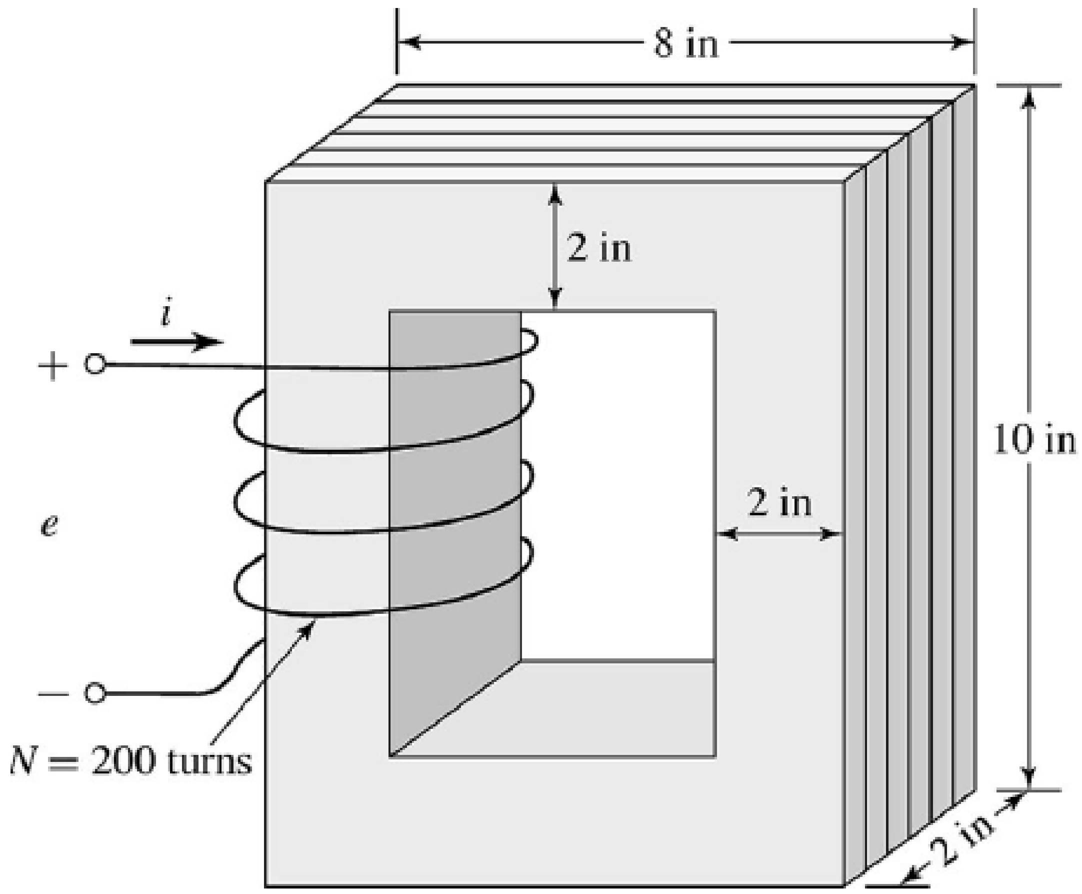
1 – A tensão aplicada;

2 – A corrente de pico;

3 – A corrente eficaz;

4 – A perda no núcleo.

- Circuito magnético



Curva de Magnetização CC