

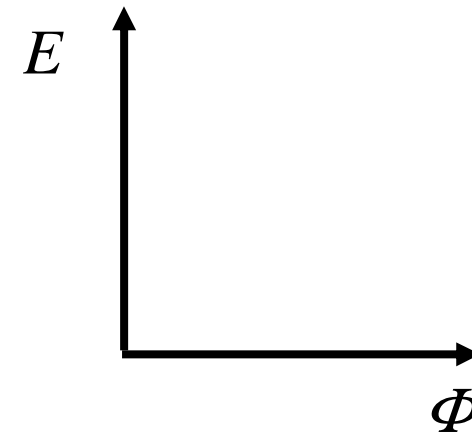
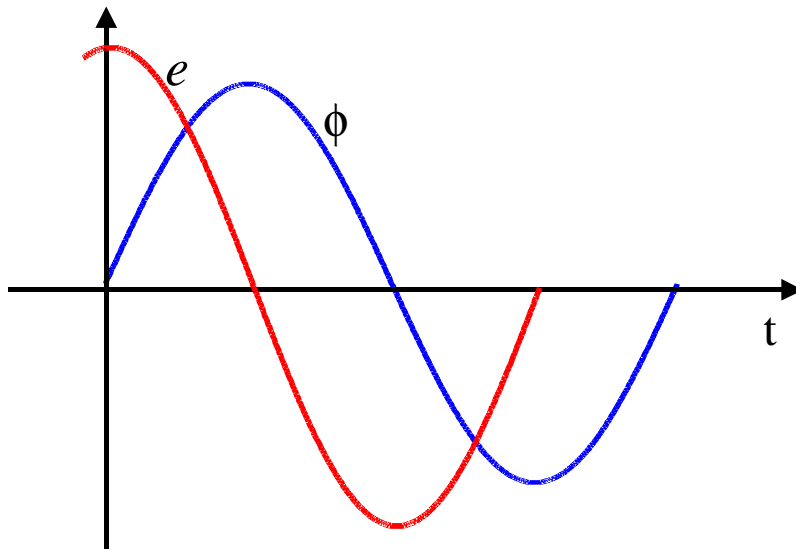
SEL 404 – ELETRICIDADE II

Aula 10

Revisão

Excitação em corrente alternada:

$$E_{rms} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N}{\sqrt{2}} \phi_{\max} = 4,44 f N \phi_{\max} = 4,44 f N A_n B_{\max}$$



Indutância:

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

Indutância na presença de entreferro:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{g} = \frac{N^2}{\frac{g}{\mu_0 A}} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_g}$$

Revisão

Indutância mútua:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

Energia armazenada:

$$\frac{W_B}{\text{volume}} = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \mu_r \mu_0 H^2 \quad [\text{J/m}^3]$$

Tópicos da Aula de Hoje

- Perdas em circuitos magnéticos:
 - ✓ perdas por histerese
 - ✓ perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault)
- Corrente de excitação
 - ✓ desprezando histerese
 - ✓ considerando histerese

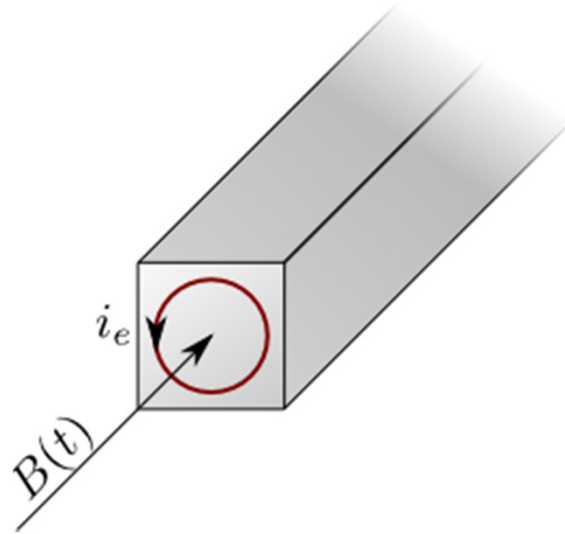
Perdas no núcleo

Quando um núcleo de material ferromagnético é sujeito a uma densidade de fluxo magnético variável no tempo, existem duas causas de perdas de potência na forma de calor no núcleo.

- **Perdas por correntes parasitas** (correntes de Foucault)
- **Perdas por histerese**

Perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault)

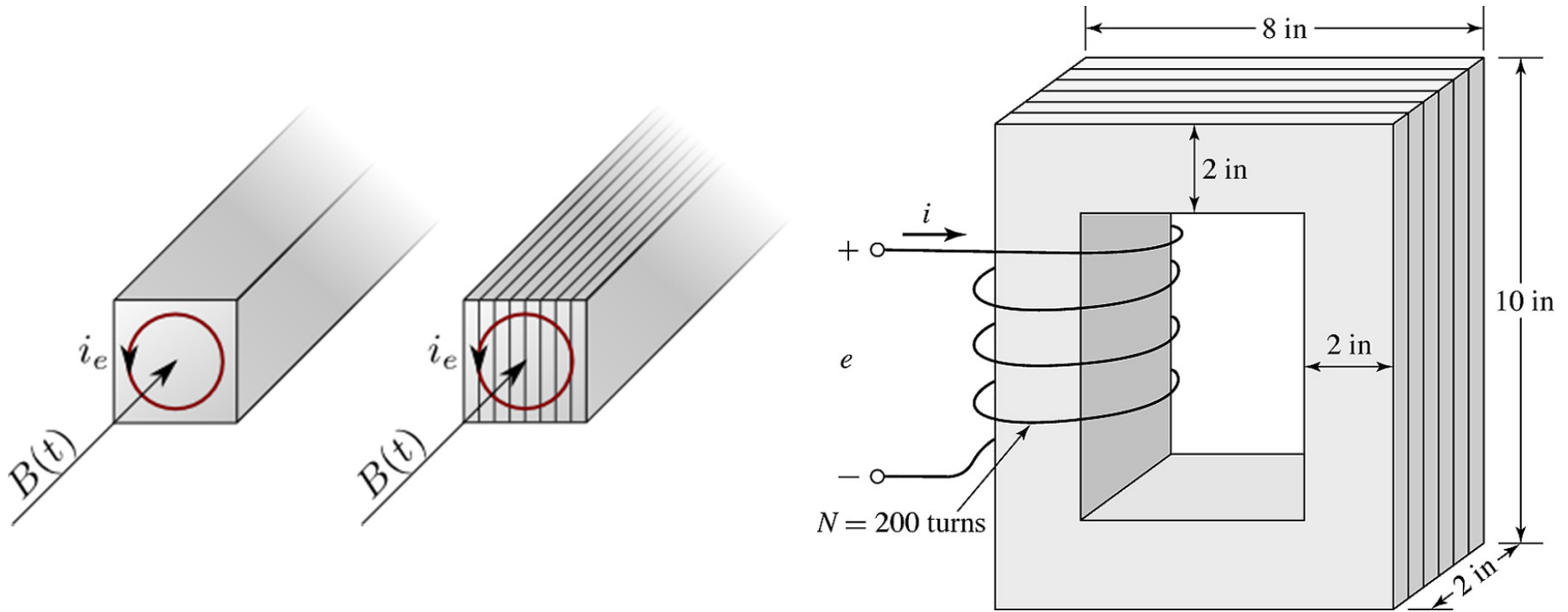
Correntes parasitas: são correntes induzidas no material ferromagnético (núcleo) devido à ação do campo magnético variável que atravessa o núcleo (Lei de indução de Faraday).



Perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault)

Como minimizá-las?

(a) Os núcleos de material ferromagnético são montados com chapas finas (folhas) com uma camada isolante entre as laminações sucessivas (**núcleo laminado**), de forma a aumentar a resistência às correntes parasitas.



Perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault)

Como minimizá-las?

(b) Pode-se também utilizar materiais com alta resistência elétrica para a construção do núcleo. Adicionando uma pequena porcentagem de silício (por exemplo 4%) ao material ferromagnético, o aumento da resistência é significativo.

Perdas por correntes parasitas (correntes de Foucault)

As perdas por correntes parasitas em um circuito magnético sujeito a um fluxo variável podem ser estimadas por:

$$P_e = K_e B_{\max}^2 f^2$$

K_e é uma constante cujo valor depende do material e da espessura das lâminas que compõem o núcleo.

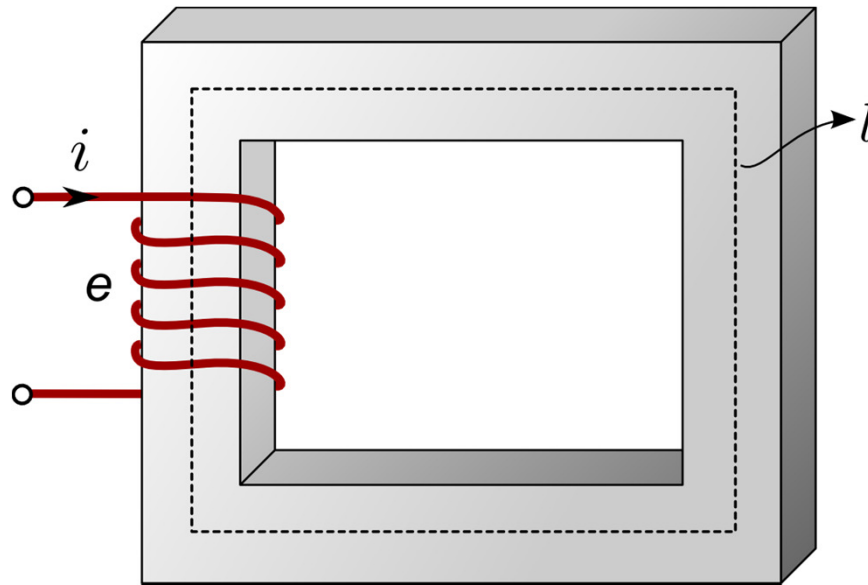
Com a laminação do núcleo, o seu volume efetivo é menor do que o bruto, uma vez que existe um espaço entre as lâminas empilhadas. Assim, define-se o *fator de empilhamento* do núcleo:

$$k_c = \frac{Vol_{efetivo}}{Vol_{bruto}}$$

Os valores típicos de k_c são aproximadamente iguais a 0,95.

Perdas por histerese

Quando o material magnético é submetido a um campo magnético alternado, os dipolos magnéticos se atritam para inverter sua polaridade norte-sul em cada ciclo. Este atrito constante aquece o material ferromagnético, gerando perdas por calor. Essas perdas são denominadas perdas por histerese.



$$i = \frac{Hl}{N}$$

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

Perdas por histerese – estudo quantitativo

Em um dado intervalo de tempo, a energia no núcleo magnético pode ser calculada por:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p \, dt = \int_{t_1}^{t_2} ei \, dt = \int_{t_1}^{t_2} NA \frac{dB}{dt} \frac{Hl}{N} \, dt = Al \int_{B_1}^{B_2} HdB \quad [\text{J}]$$

sendo Al o volume do núcleo

$$\int_{B_1}^{B_2} HdB \quad \text{é a área acima da curva B-H}$$

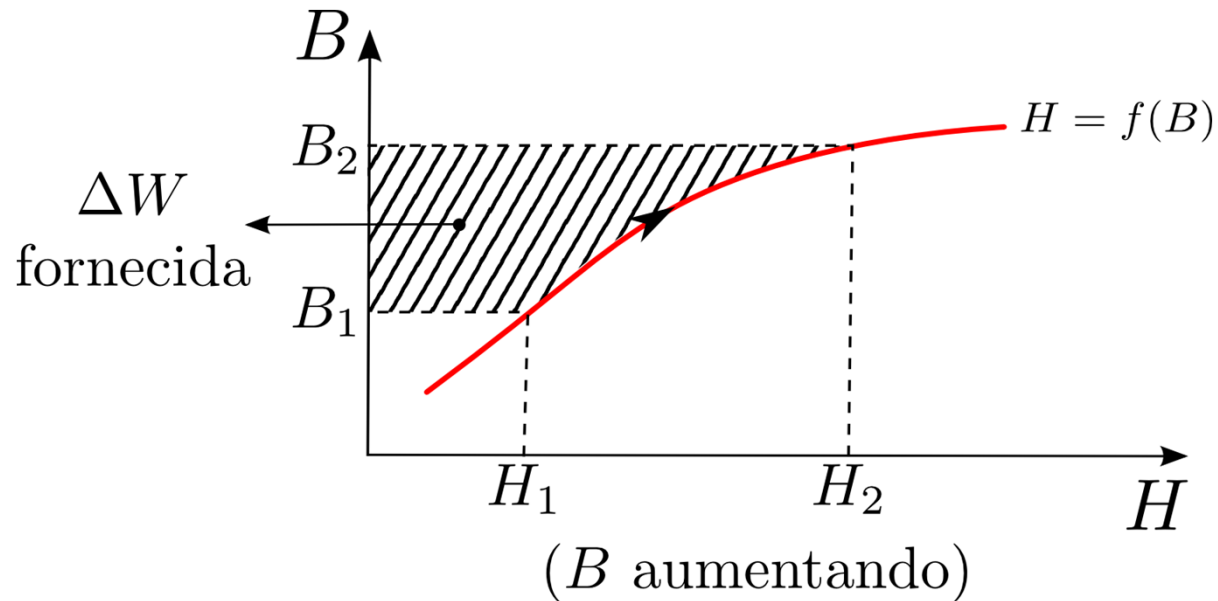
A energia total por unidade de volume é:

$$W = \int_{B_1}^{B_2} HdB \quad [\text{J/m}^3]$$

Perdas por histerese – estudo quantitativo

Um aumento na densidade de fluxo magnético B de B_1 para B_2 , resulta em um aumento de energia por unidade de volume expressa por:

$$W = \int_{B_1}^{B_2} H dB$$

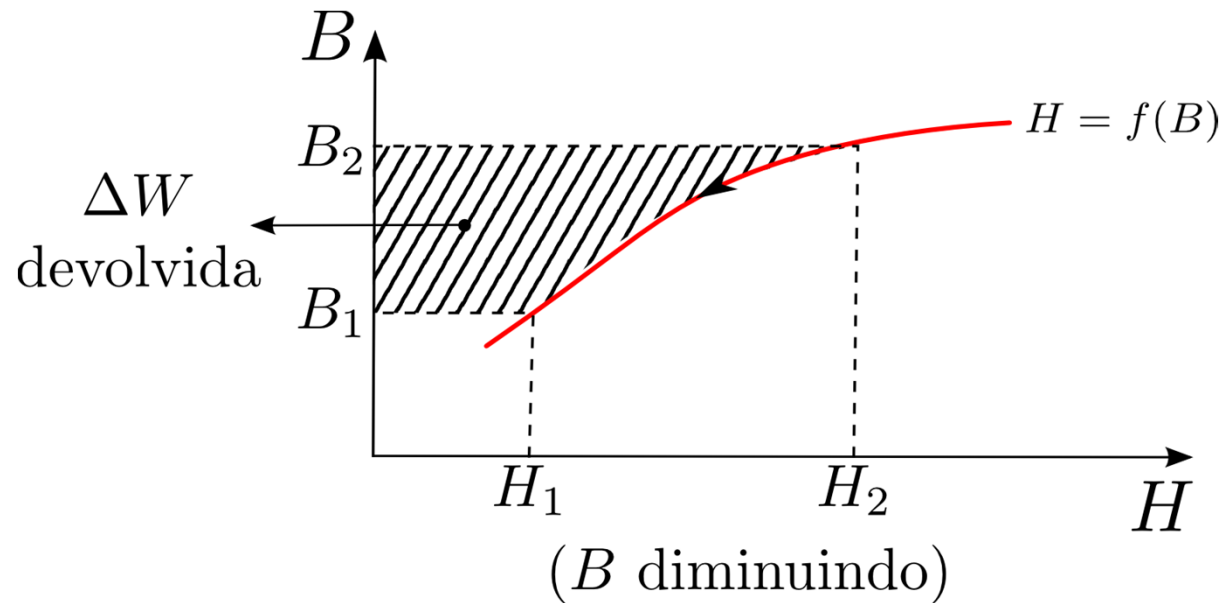


Integral em B = área acima da curva

Perdas por histerese – estudo quantitativo

Um decréscimo na densidade de fluxo magnético B de B_2 para B_1 , resulta em um decréscimo de energia por unidade de volume expressa por:

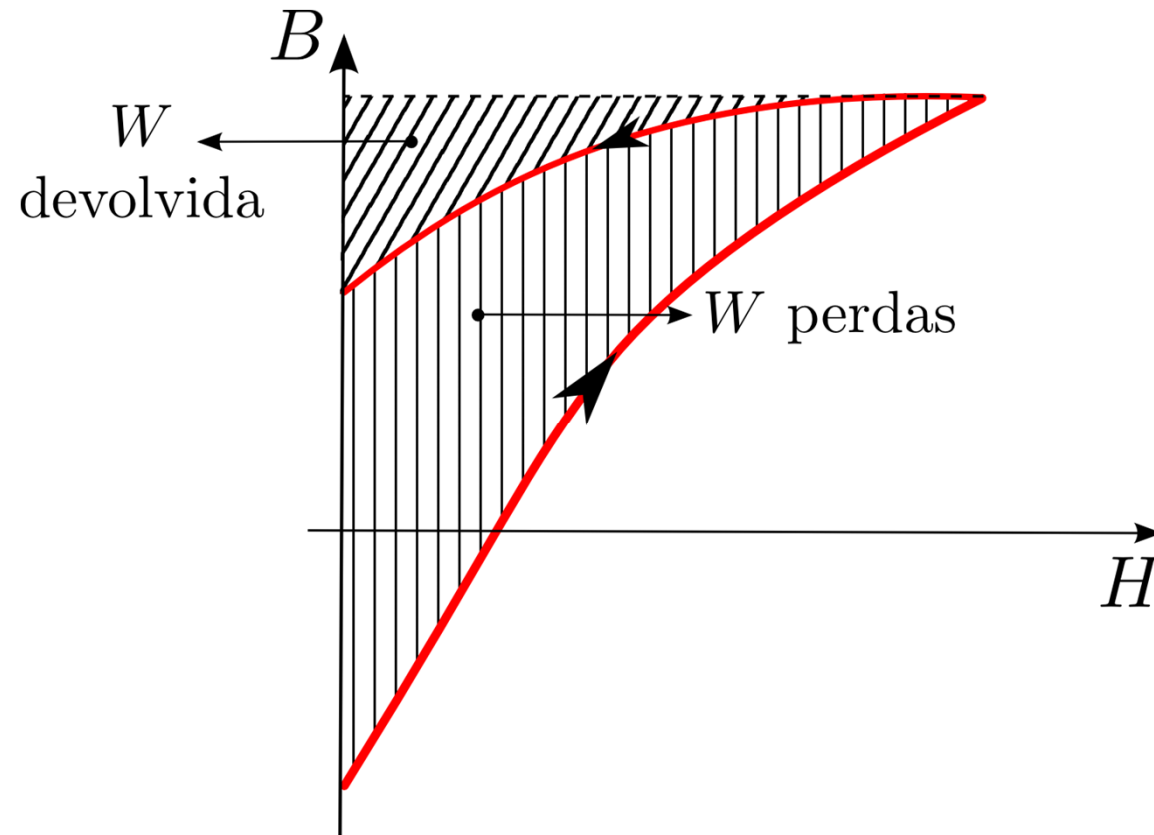
$$W = \int_{B_2}^{B_1} H dB$$



Integral em B = área acima da curva

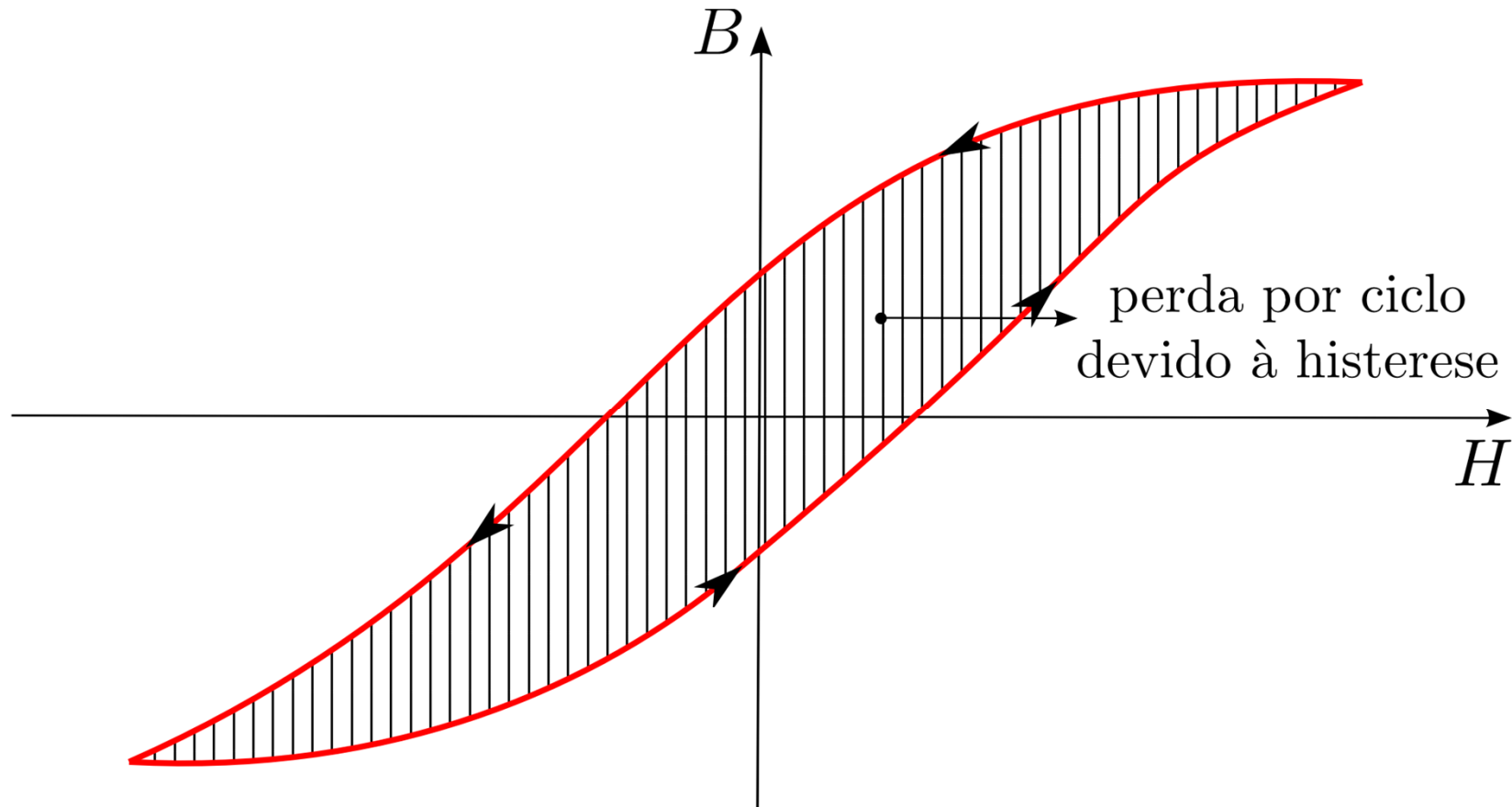
Perdas por histerese – estudo quantitativo

As perdas podem ser calculadas por: $\Delta W_{\text{perdas}} = \Delta W_{\text{fornecida}} - \Delta W_{\text{devolvida}}$



Perdas por histerese – estudo quantitativo

Repetindo a análise para um ciclo elétrico, temos:



Perdas $\propto$ Área do ciclo de histerese

Perdas por histerese – estudo quantitativo

A integral $\int HdB$ para o laço de histerese completo fornece a área interna do ciclo de histerese e corresponde às perdas de histerese por unidade de volume do núcleo por ciclo.

Então,

$$W_{\text{perdas}} \big|_{\text{ciclo}} = Al \oint HdB \quad [\text{J}]$$

Perdas por histerese – estudo quantitativo

Em termos de potência, a perda considerando o efeito de histerese é dada por:

$$P_h = \text{Volume} \times f \times \text{Área do laço de histerese}$$

$$P_h = Alf \oint HdB$$

sendo f a frequência de variação da corrente i .

Embora a fórmula acima seja precisa, a avaliação da área do laço de histerese é uma tarefa difícil devido à relação não-linear entre B e H .

Perdas por histerese – estudo empírico

A área de laço de histerese para materiais utilizados em máquinas elétricas pode ser aproximada pela seguinte equação empírica (desenvolvida por Steinmetz - GE):

$$\oint H dB = K B_{\max}^n$$

onde: $B_{\max}$ é a máxima densidade de fluxo e n varia de 1,5 a 2,5 e K é uma constante. n e K podem ser obtidos a partir de testes de laboratório para cada material.

Assim, a potência das perdas é determinada empiricamente por, sendo que K_h depende das características do material e do volume.

$$P_h = K_h B_{\max}^n f$$

Perdas no núcleo

A soma das perdas por histerese e por correntes parasitas define a perda total de energia no núcleo ferromagnético

$$P_n = P_h + P_e$$

$$P_n = K_h B_{\max}^n f + K_e B_{\max}^2 f^2$$

- As perdas do núcleo podem ser facilmente determinadas utilizando-se um wattímetro.
- Contudo, não é fácil determinar quanto das perdas é devido às correntes parasitas e quanto é devido ao ciclo de histerese.
- Esta decomposição das perdas, usualmente, não é importante.

Exemplo

Considere uma bobina enrolada sobre um núcleo magnético excitado, separadamente, pelas seguintes fontes de tensão

(a) 100 V, 50 Hz

(b) 110 V, 60 Hz

Compare as perdas por histerese e por correntes de Foucault para os dois casos. Considere $n = 2$ para as perdas por histerese.

Solução:

$$P_h = K_h B_{\max}^n f$$

$$P_e = K_e B_{\max}^2 f^2$$

K_h e K_e não dependem da frequência. Para excitação em corrente alternada, temos:

$$E_{rms} = 4,44 f N A B_{\max} \quad \rightarrow \quad B_{\max} = E_{rms} / (4,44 f N A)$$

Exemplo

Portanto, as perdas por histerese são dadas por:

$$P_h = \frac{K_h E_{rms}^2}{(4,44 f N A)^2} f = \frac{K'_h E_{rms}^2}{(N A)^2 f}$$

$$\frac{P_h(b)}{P_h(a)} = \frac{K'_h \frac{E_{rms,b}^2}{N^2 \cdot A^2 \cdot f_b}}{K'_h \frac{E_{rms,a}^2}{N^2 \cdot A^2 \cdot f_a}} = \frac{E_{rms,b}^2}{E_{rms,a}^2} \frac{f_a}{f_b} = \left(\frac{110}{100} \right)^2 \times \frac{50}{60} = 1,21 \times 0,833 = 1,00833$$

A mudança da fonte de (a) para (b) eleva as perdas por histerese em 0,83%.

Exemplo

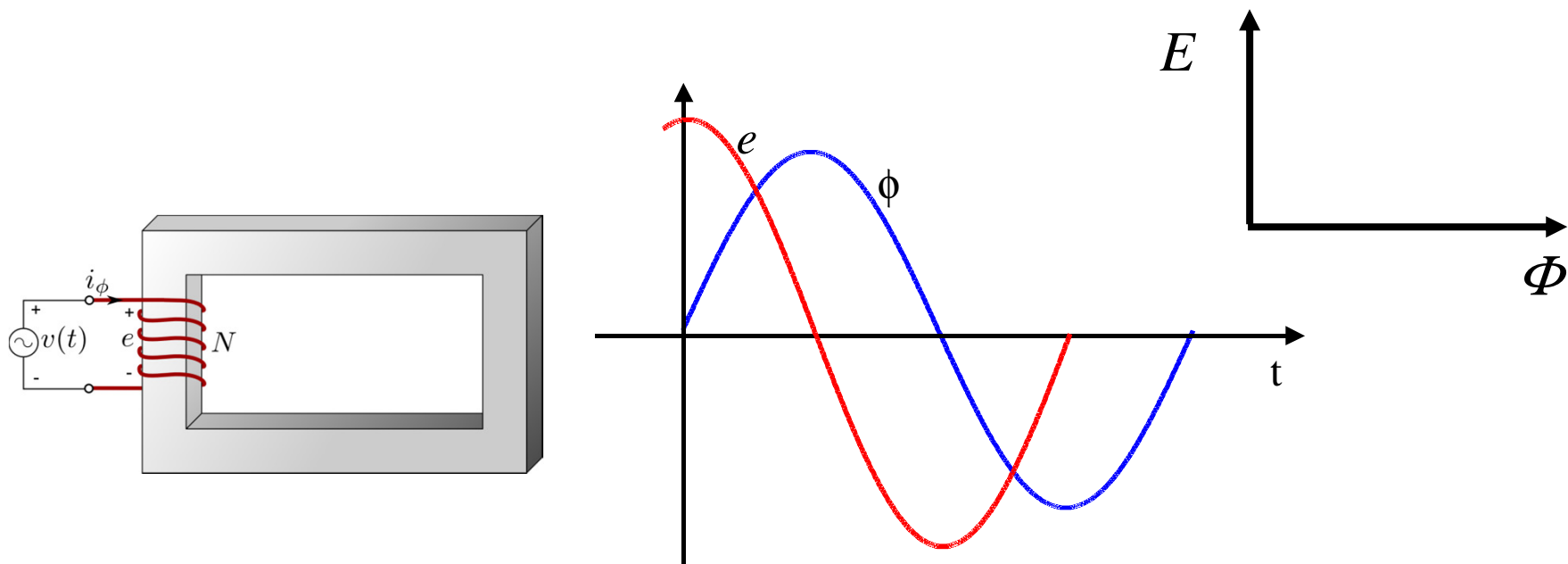
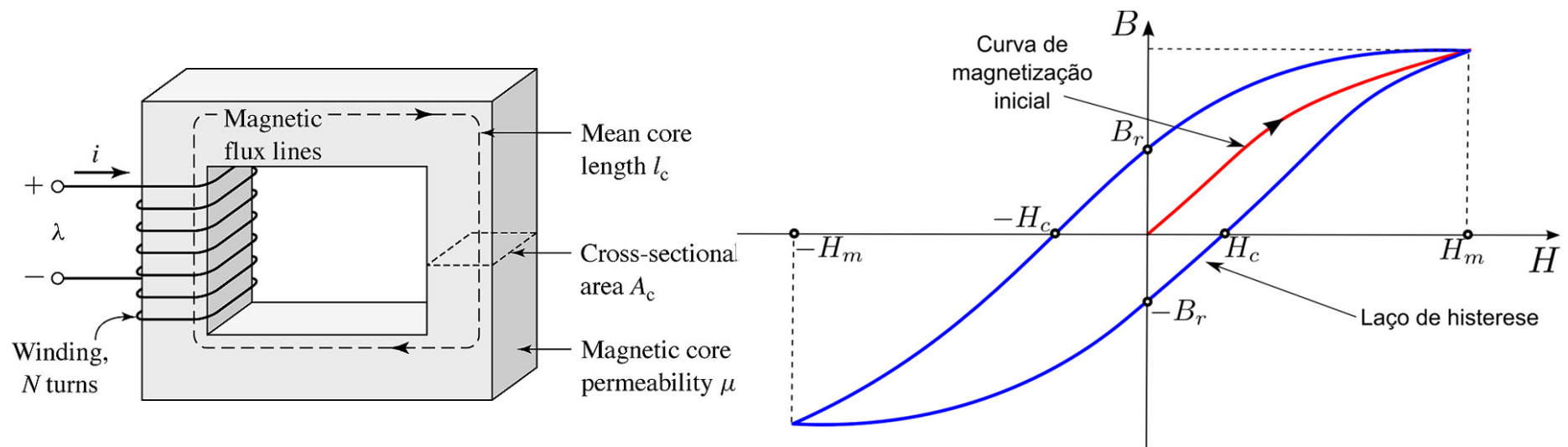
Perdas por correntes parasitas:

$$P_e = K_e B_{\max}^2 f^2 = K_e \frac{E_{rms}^2}{(4,44 f N A)^2} f^2 = K'_e \frac{E_{rms}^2}{N^2 \cdot A^2}$$

$$\frac{P_e(b)}{P_e(a)} = \frac{K'_e \frac{E_{rms,b}^2}{N^2 \cdot A^2}}{K'_e \frac{E_{rms,a}^2}{N^2 \cdot A^2}} = \frac{E_{rms,b}^2}{E_{rms,a}^2} = \frac{110^2}{100^2} = 1,21$$

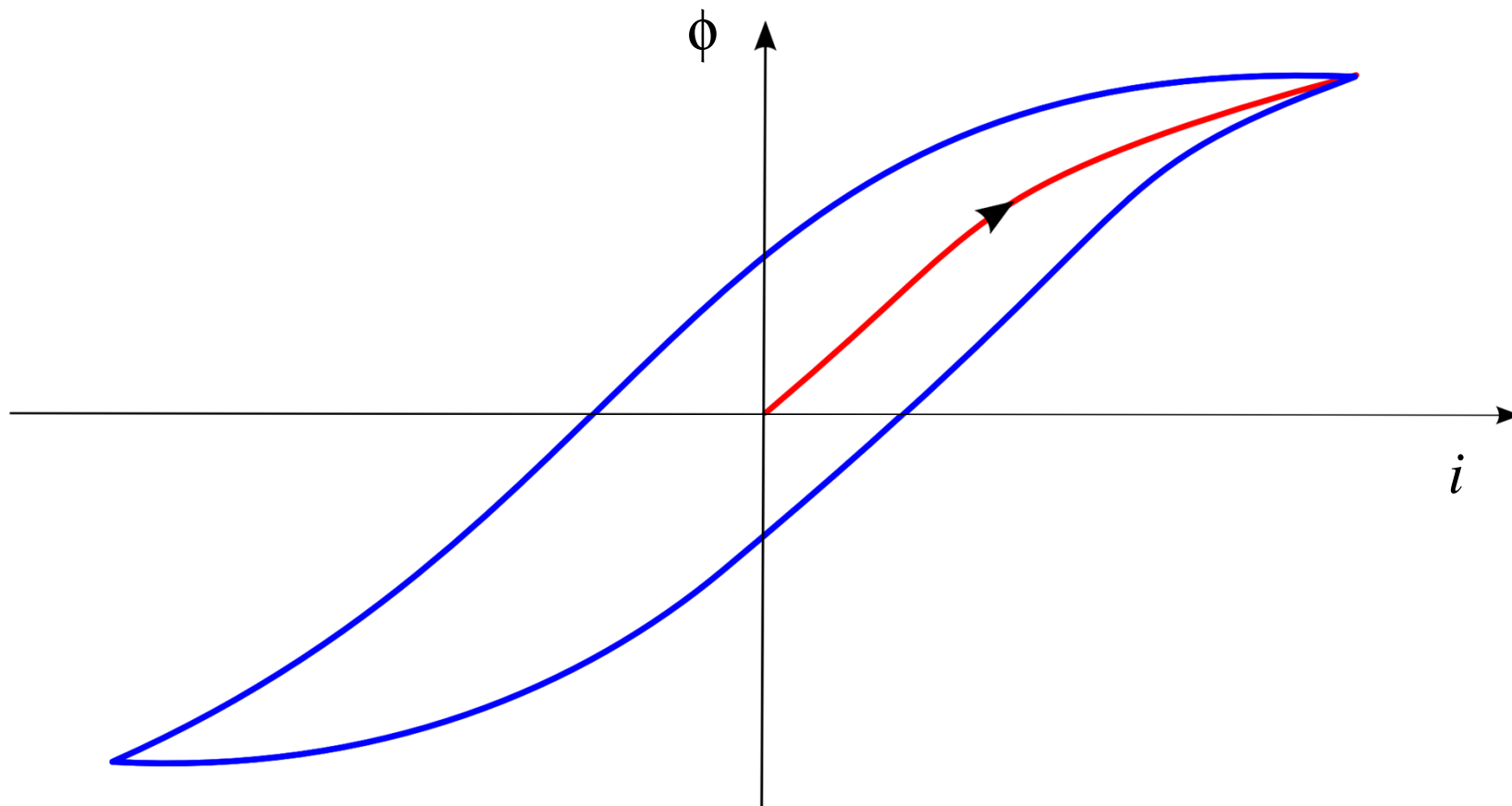
A mudança da fonte de (a) para (b) eleva as perdas por correntes parasitas em 21%.

Corrente de excitação

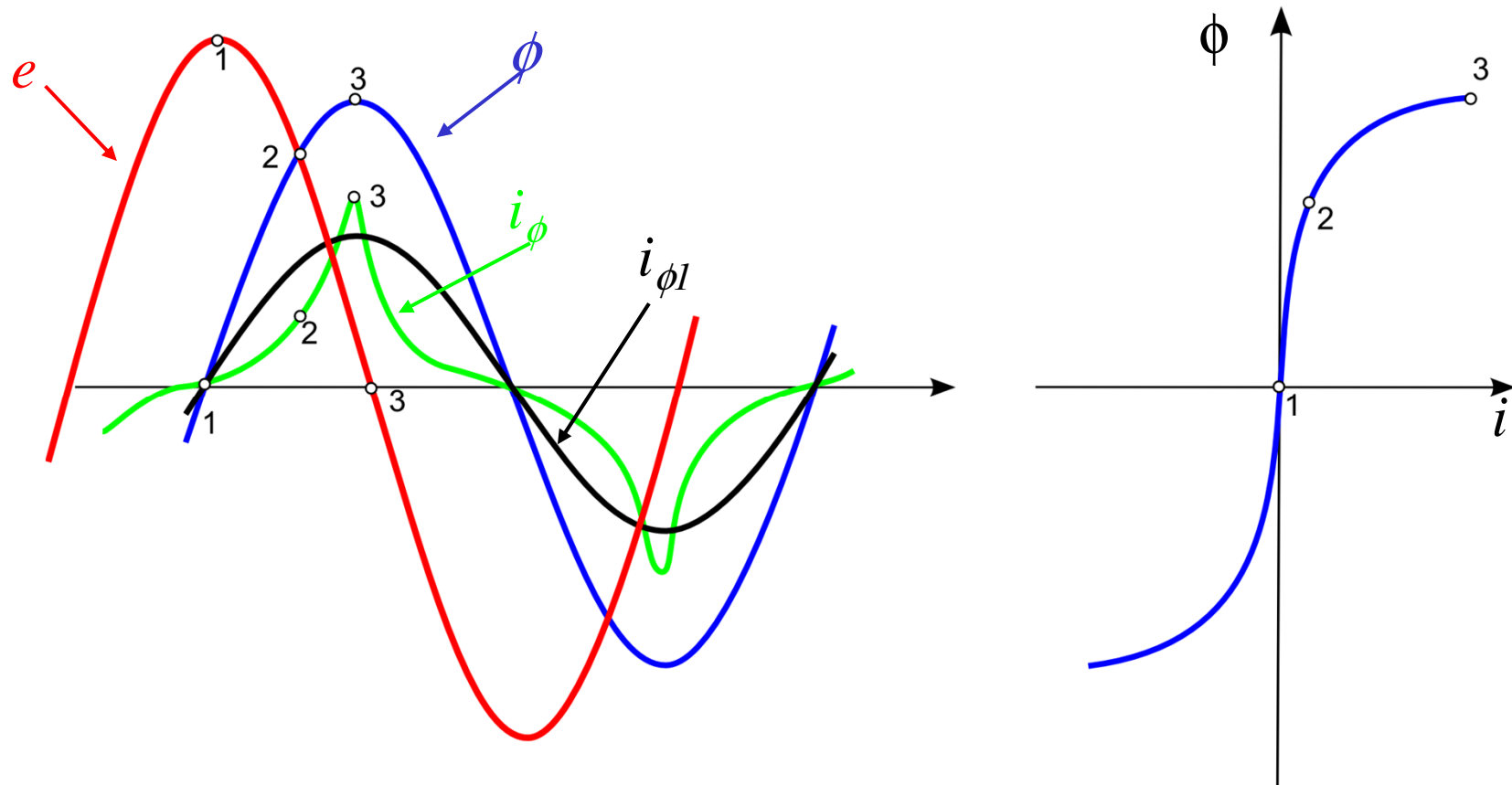


Corrente de excitação

$$\phi = BA \quad e \quad i = Hl/N$$



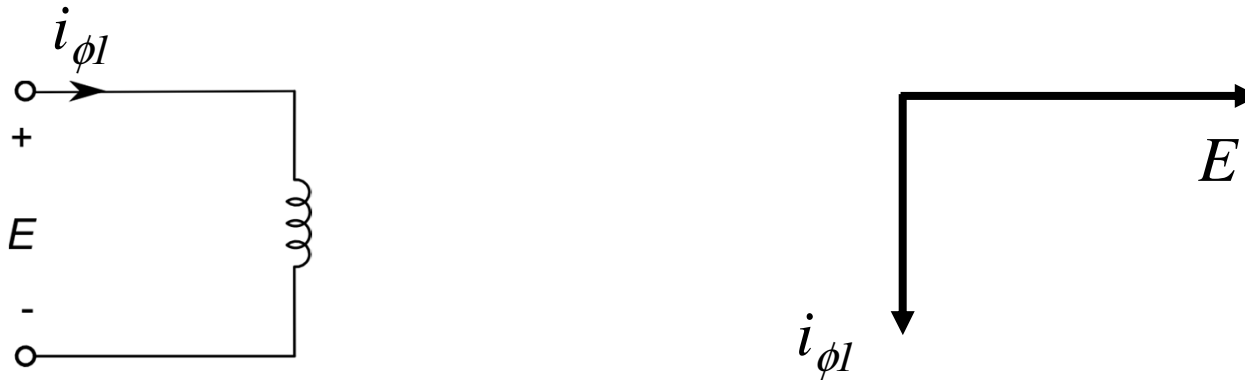
Corrente de excitação desprezando a histerese



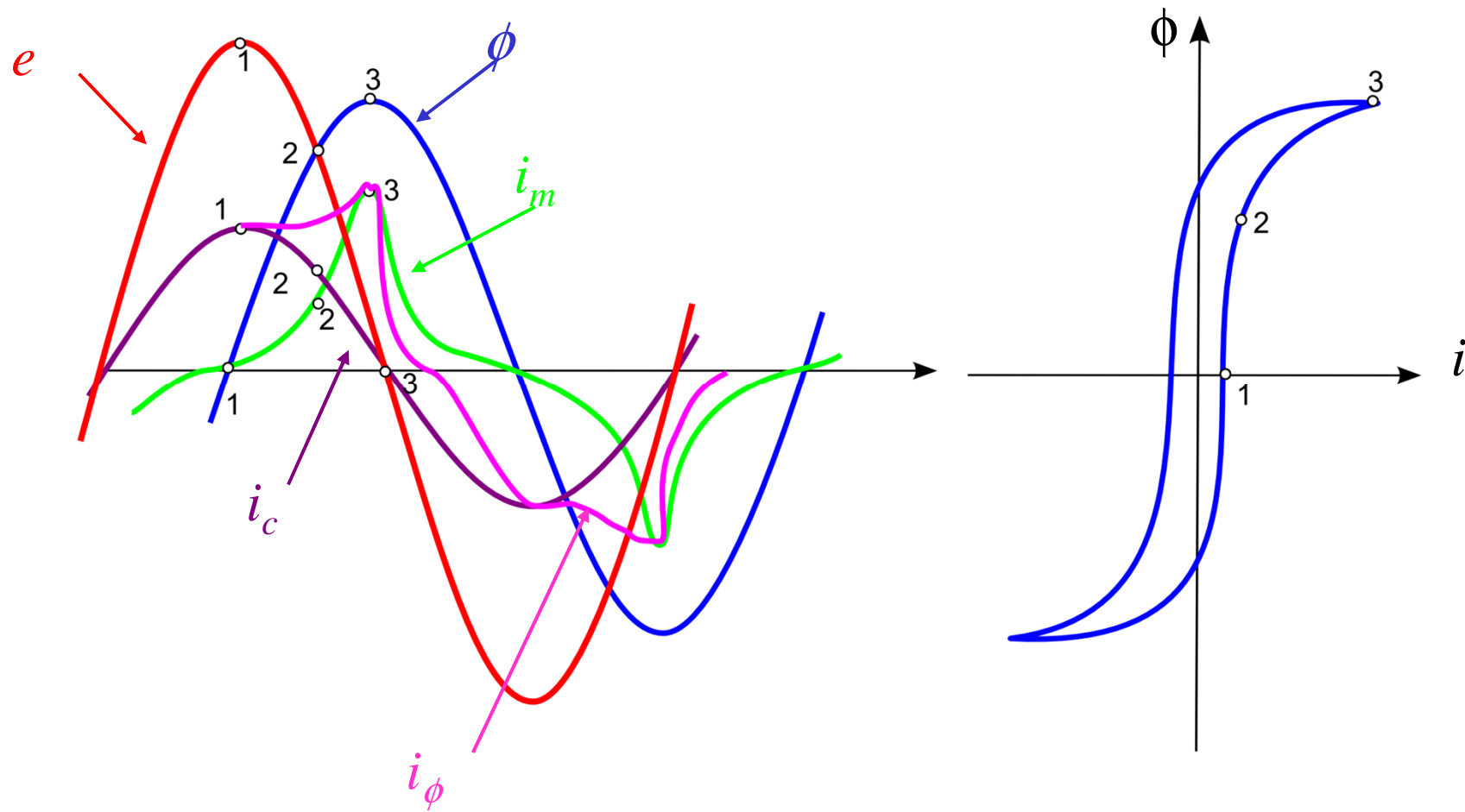
Corrente de excitação desprezando a histerese

Desprezando-se o ciclo de histerese, tem-se:

- ✓ A corrente de excitação não é senoidal devido à saturação do material ferromagnético. Uma vez que o fluxo tenha atingido o ponto de saturação, um pequeno aumento no fluxo requer um grande aumento do valor da corrente de excitação.
- ✓ O componente fundamental da corrente de excitação está 90° atrasado em relação à tensão aplicada na bobina do núcleo. Por conseguinte, não há perdas envolvidas.
- ✓ Neste caso, a bobina pode ser representada pelo seguinte circuito elétrico:



Corrente de excitação considerando a histerese



Corrente de excitação considerando a histerese

Considerando o ciclo de histerese, a corrente de excitação consiste de dois componentes:

- corrente de magnetização i_m , a qual é necessária para produzir o fluxo no material ferromagnético.
- corrente i_c associada às perdas por histerese e correntes parasitas.

Corrente de magnetização i_m :

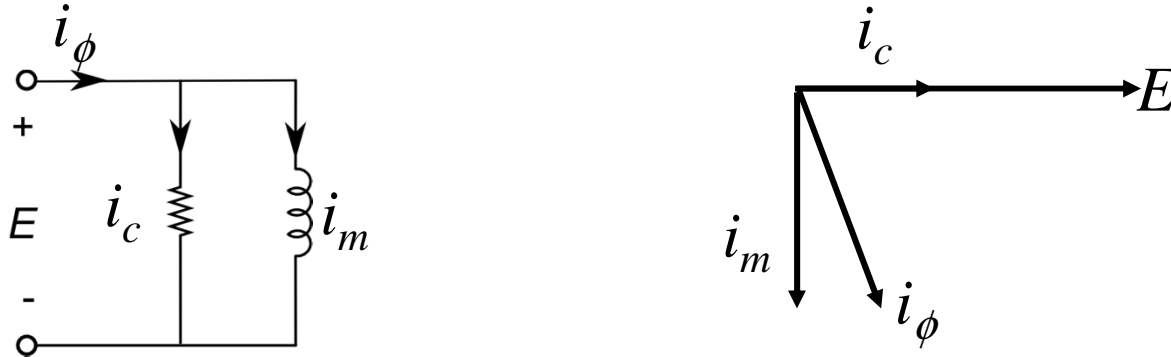
- ✓ A corrente de magnetização não é senoidal, devido à saturação do material ferromagnético. Uma vez que o fluxo tenha atingido o ponto de saturação, um pequeno aumento no fluxo requer um grande aumento do valor da corrente de magnetização.
- ✓ O componente fundamental da corrente de magnetização está 90° atrasado em relação à tensão aplicada na bobina do núcleo. Por conseguinte, não há perdas envolvidas com esta componente.

Corrente devido às perdas por histerese e correntes parasitas i_c :

- ✓ O componente fundamental da corrente associada às perdas está em fase com a tensão aplicada ao núcleo.

Corrente de excitação considerando a histerese

- ✓ Neste caso, a bobina pode ser representada pelo seguinte circuito elétrico:



Observações:

- ✓ Não confundir corrente de excitação e magnetização. A segunda é uma componente da primeira.
- ✓ Geralmente, as características não lineares da forma de onda da corrente de excitação não precisam ser levadas em conta, uma vez que a corrente de excitação assume valores pequenos, principalmente em transformadores de grande porte.