

SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA

Aula 03

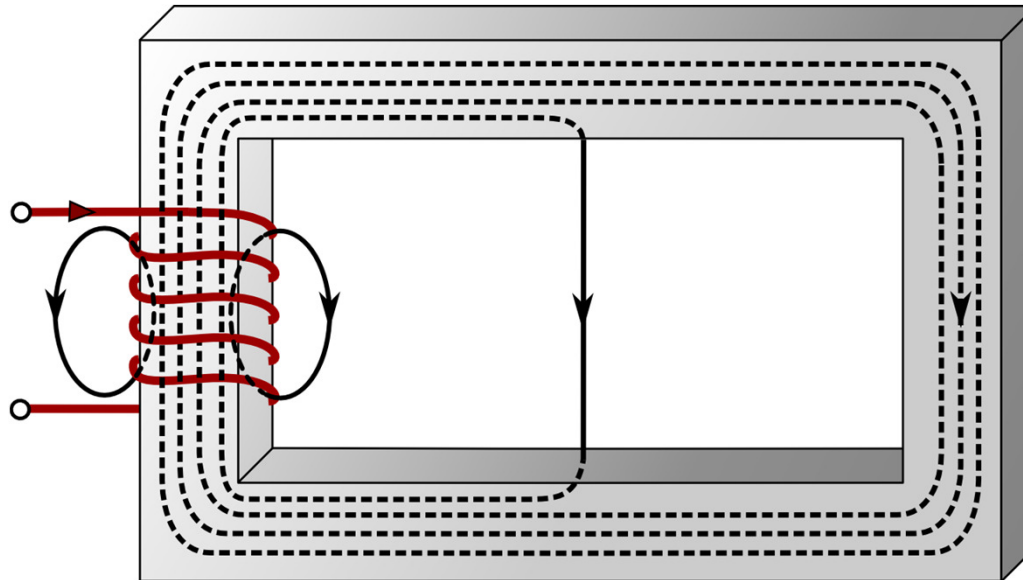
Circuitos Magnéticos

Tópicos da Aula de Hoje

- Dispersão de fluxo magnético
- Circuitos magnéticos com junções
- Lei de Faraday (lei de indução de Faraday)
- Lei de Lenz

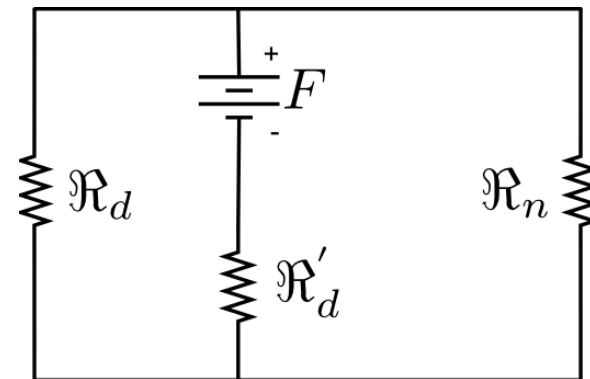
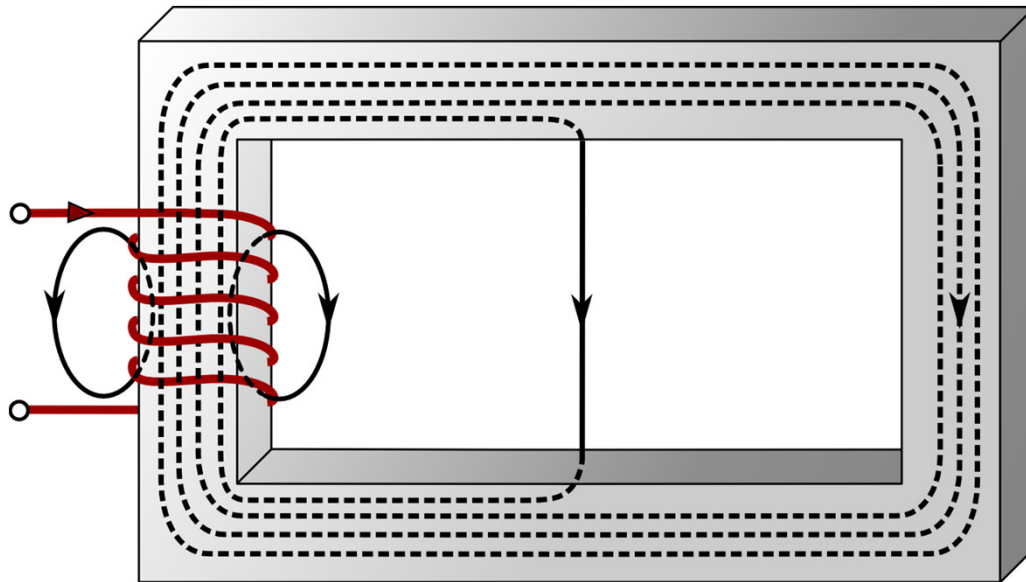
Dispersão de fluxo magnético

Na realidade, parte das linhas de campo não estão contidas no núcleo. Estas linhas se fecham pelo ar. Tal fenômeno é denominado **dispersão**.



Dispersão de fluxo magnético

Esse fenômeno pode ser considerado através da utilização de uma relutância de dispersão com um valor bastante elevado conectada em paralelo com o trecho do circuito onde está localizada a bobina.



sendo:

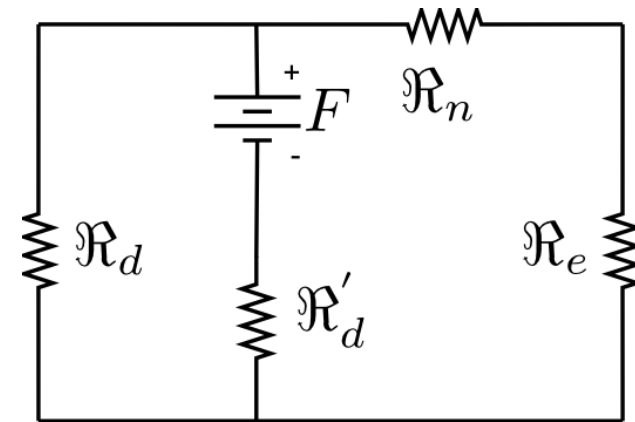
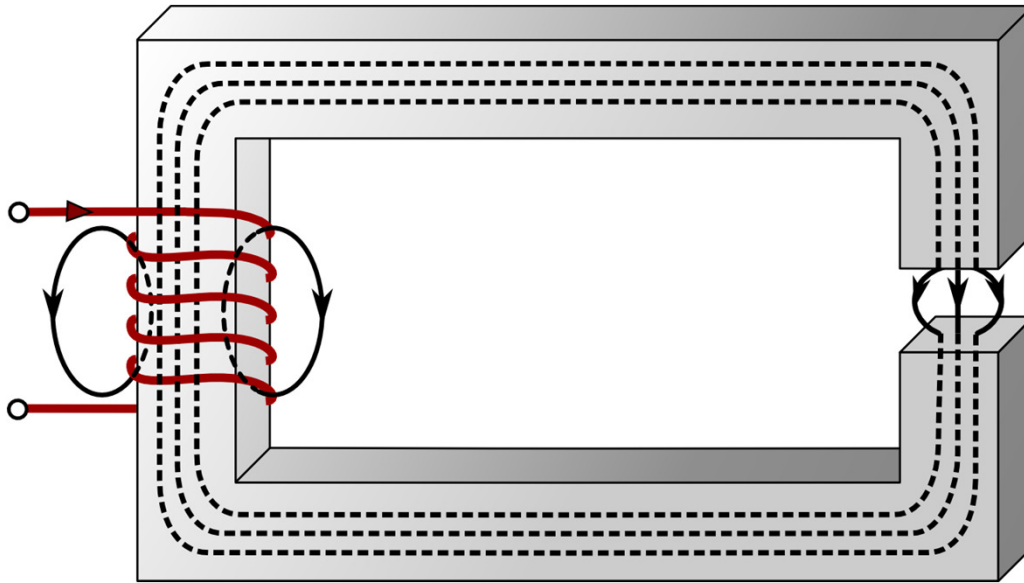
\mathcal{R}_d = relutância de dispersão (valor bastante elevado)

\mathcal{R}'_d = relutância de dispersão do núcleo (valor bastante pequeno)

\mathcal{R}_n = relutância do resto do núcleo

Dispersão de fluxo magnético

DISPERSÃO + ESPRAIAMENTO:



sendo:

\mathcal{R}_d = relutância de dispersão da bobina (valor bastante elevado)

\mathcal{R}'_d = relutância de dispersão do núcleo (valor bastante pequeno)

\mathcal{R}_n = relutância do resto do núcleo

\mathcal{R}_e = relutância do entreferro

Lei de Ampère – Circuito Magnético Equivalente

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \text{ (contida pela trajetória fechada)}$$

A lei circuital de Ampère se aplica para qualquer trajetória fechada em circuitos com várias fontes de excitação. Na teoria de circuitos magnéticos equivalentes para um percurso fechado, esta lei é representada por:

$$\sum F = \sum \mathcal{R}\Phi$$

A continuidade do fluxo magnético é representada igualando-se a zero a soma dos fluxos que entram em qualquer **junção** da trajetória magnética no circuito magnético, ou seja:

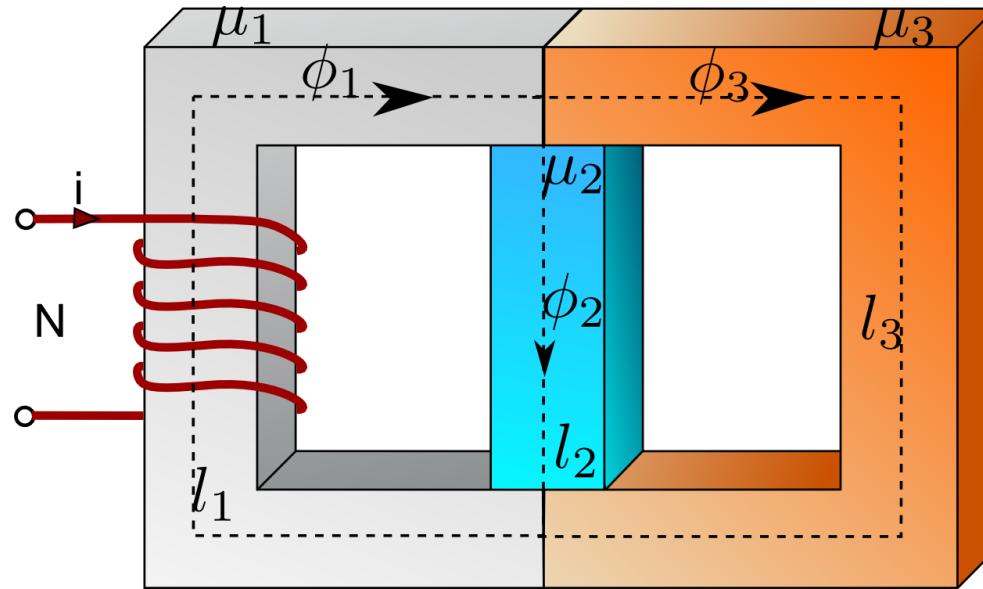
$$\sum \Phi_{\text{na junção}} = 0$$

Obs:

junção = similar ao conceito de nó em circuitos elétricos

percurso fechado = similar ao conceito de malha em circuitos elétricos

Circuitos Magnéticos com Junções



Percorrendo a malha onde há os meios 1 e 2, temos:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H_1 l_1 + H_2 l_2 = Ni$$

A malha dos materiais 2 e 3, fornece:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H_2 l_2 - H_3 l_3 = 0$$

Circuitos Magnéticos com Junções

Usando $B = \mu H$ e $\Phi = BA$, temos:

$$\begin{cases} \frac{B_1}{\mu_1} l_1 + \frac{B_2}{\mu_2} l_2 = Ni \\ \frac{B_2}{\mu_2} l_2 - \frac{B_3}{\mu_3} l_3 = 0 \end{cases}$$

ou:

$$\begin{cases} \frac{\Phi_1}{\mu_1 A_1} l_1 + \frac{\Phi_2}{\mu_2 A_2} l_2 = Ni \\ \frac{\Phi_2}{\mu_2 A_2} l_2 - \frac{\Phi_3}{\mu_3 A_3} l_3 = 0 \end{cases}$$

Circuitos Magnéticos com Junções

ou ainda:

$$\begin{cases} \mathfrak{R}_1 \Phi_1 + \mathfrak{R}_2 \Phi_2 = Ni \\ \mathfrak{R}_2 \Phi_2 - \mathfrak{R}_3 \Phi_3 = 0 \end{cases}$$

ou soma de fluxos na junção ($\Sigma \Phi = 0$):

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 = 0$$

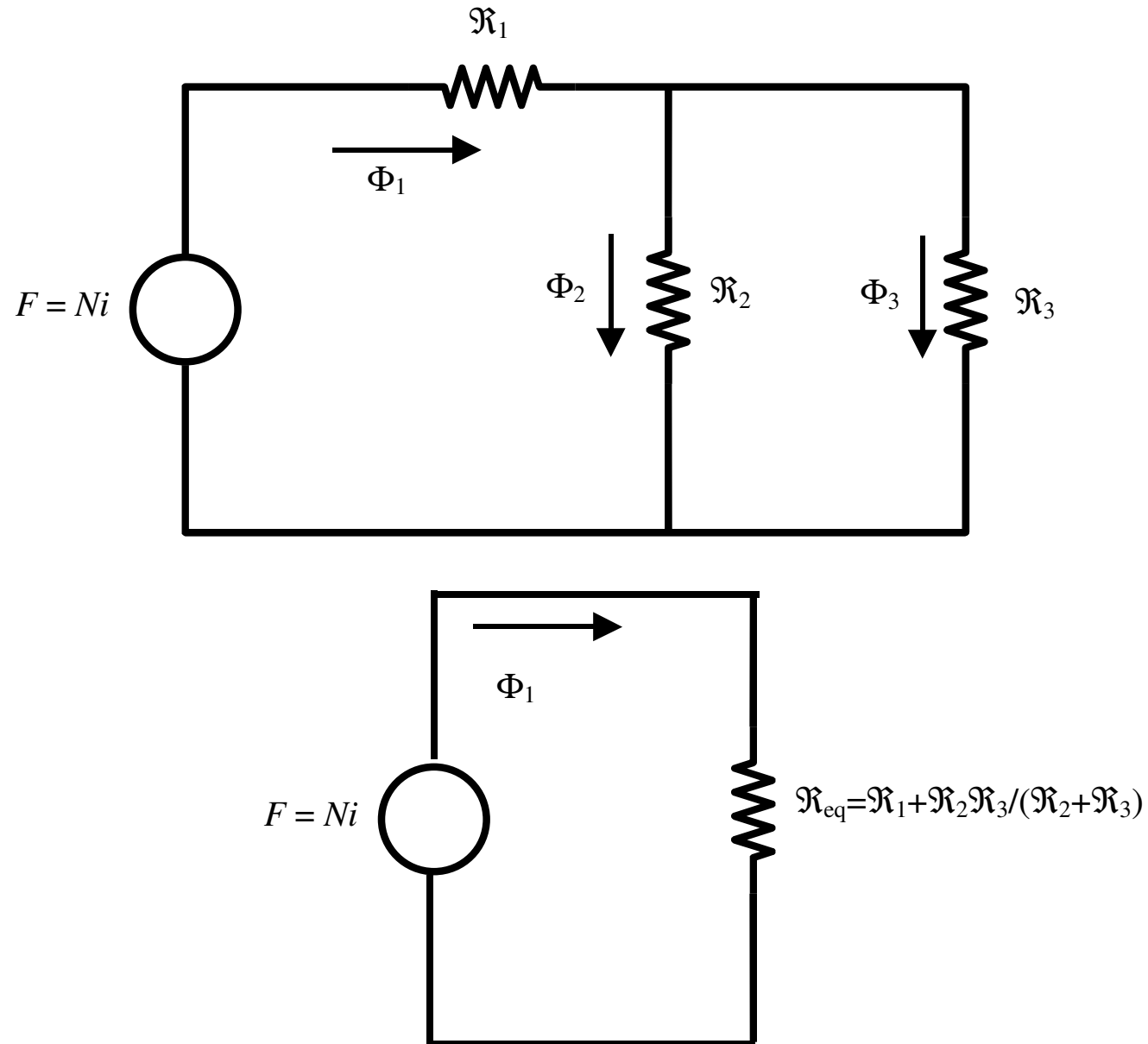
$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

Resolvendo-se este sistema de equação, temos:

$$\Phi_1 = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_1 + \frac{\mathfrak{R}_2 \mathfrak{R}_3}{\mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3}}$$

Circuitos Magnéticos com Junções

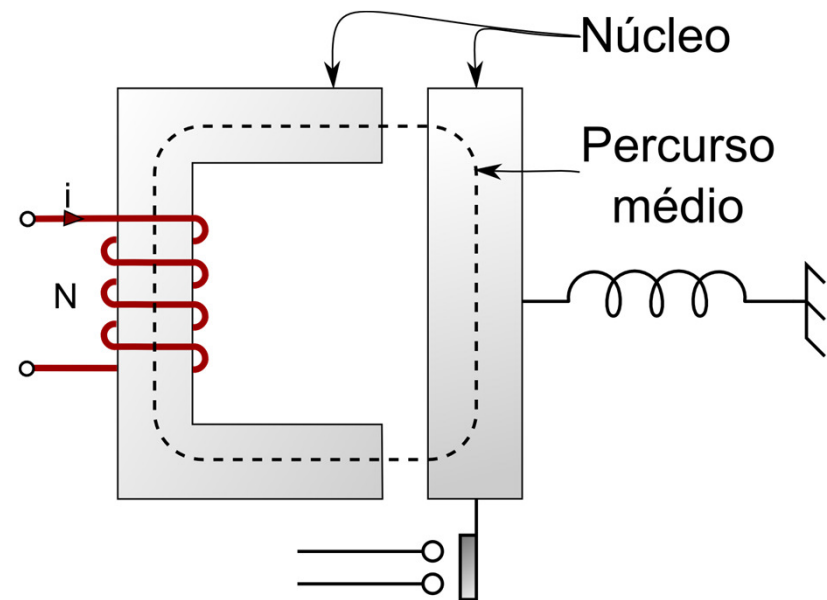
Circuito magnético equivalente (circuito elétrico análogo):



Exemplo (E1.2 – P. C. Sen)

Para o relé mostrado na figura, determine a densidade de fluxo magnético para um corrente de 4 A.

No exemplo prévio, a densidade de fluxo era um dado fornecido, assim, foi fácil determinar a intensidade de campo, a força magnetomotriz e finalmente a corrente elétrica. Neste exemplo, a corrente é fornecida e a densidade deve ser determinada.



Embora a característica B-H do entreferro seja linear, a característica B-H do núcleo é não-linear, dificultando a resolução do problema. Um método utilizado para solucionar este tipo de problema é denominado *reta de carga*.

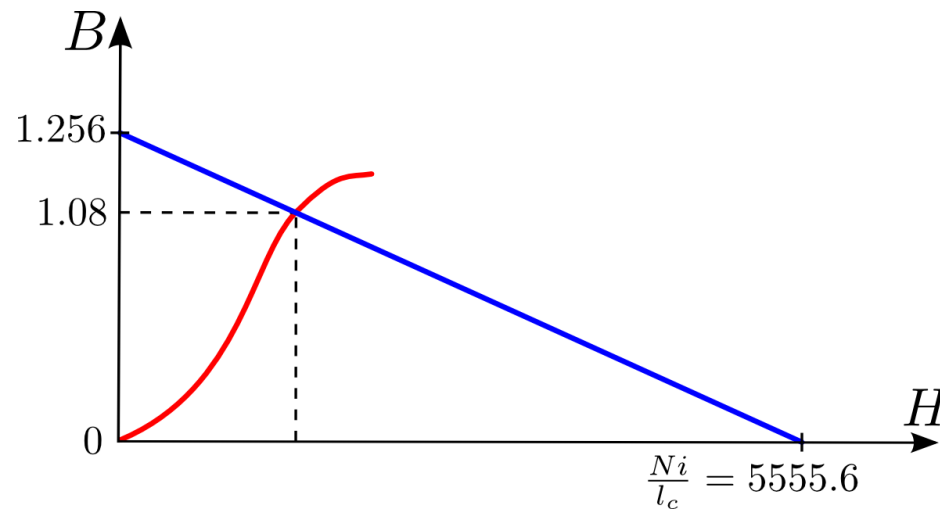
Aplicando a Lei de Ampère temos:

$$Ni = H_g l_g + H_c l_c = (B_g / \mu_0) l_g + H_c l_c \quad \text{desprezando-se o espraçamento } B_g = B_c, \text{ assim}$$

$$B_c = -\mu_0 (l_c / l_g) H_c + (Ni \mu_0 / l_g) \quad (\text{esta é a equação de uma reta relacionando } B_c \text{ e } H_c)$$

Exemplo (E1.2 – P. C. Sen)

Conhecendo a curva de magnetização do núcleo, podemos também traçar a reta descrita pela equação (a qual é conhecida como reta de carga) anterior no mesmo plano $B \times H$, obtendo:



A reta foi traçada determinando-se dois pontos de solução da equação da reta, ou seja:

B_c para $H_c = 0$

H_c para $B_c = 0$

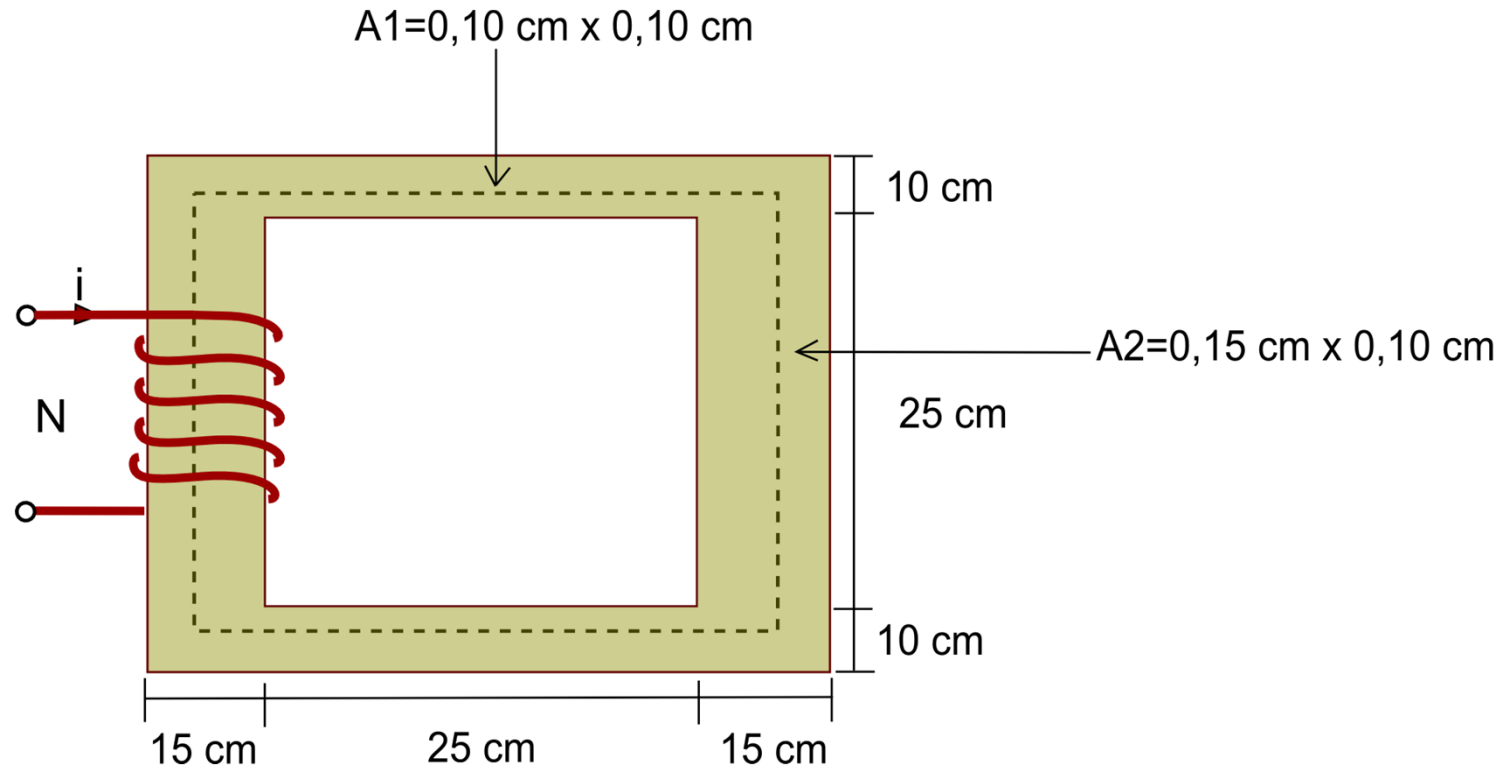
O ponto de intersecção entre a reta de carga e a curva de magnetização, nos fornece a solução do problema.

$$B = 1,08 \text{ T.}$$

Exercícios 1.2 e 1.3 – P. C. Sen

No circuito magnético abaixo dois lados do núcleo são mais finos do que os outros dois lados. A profundidade do núcleo é 10 cm, a permeabilidade relativa do núcleo é 2000, o número de espiras é 300 e a corrente que flui no enrolamento é 1 A.

- (a) Determine o fluxo do núcleo.
- (b) Determine as densidades de fluxo magnético nas diferentes partes do núcleo.
- (c) Calcule a corrente necessária para produzir um fluxo de 0,012 Wb.



Exercícios 1.2 e 1.3 – P. C. Sen

O circuito magnético equivalente é mostrado na figura, sendo:

$$\mathcal{R}_h = 0,40 / (2000 \times 4\pi \cdot 10^{-7} \times 0,10 \times 0,10) = 15912 \text{ A.espWb}$$

$$\mathcal{R}_v = 0,35 / (2000 \times 4\pi \cdot 10^{-7} \times 0,15 \times 0,10) = 9284 \text{ A.espWb}$$

$$\mathcal{R}_{\text{total}} = 2\mathcal{R}_h + 2\mathcal{R}_v = 50398 \text{ A.esp/Wb}$$

(a) Determine o fluxo do núcleo.

$$\Phi = (300 \times 1) / 50398 = 0,006 \text{ Wb}$$

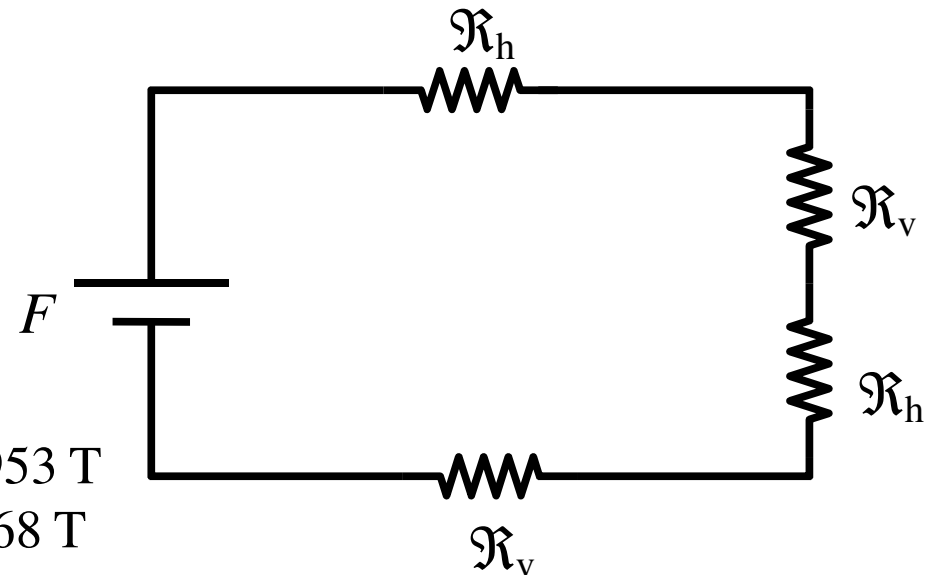
$$(b) B_h = \Phi / A_h = 0,006 / (0,10 \times 0,10) = 0,5953 \text{ T}$$

$$B_v = \Phi / A_v = 0,006 / (0,15 \times 0,10) = 0,3968 \text{ T}$$

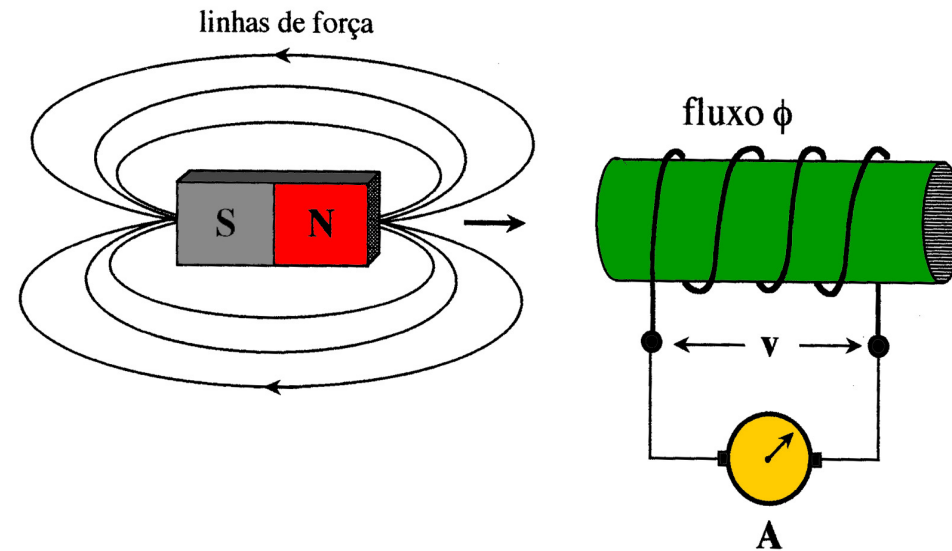
(c) $i = ?$ Para obter $\Phi = 0,012 \text{ Wb}$

$$Ni = \mathcal{R}_{\text{total}} \Phi$$

$$i = \mathcal{R}_{\text{total}} \Phi / N = 50398 \times 0,012 / 300 = 2,0159 \text{ A}$$



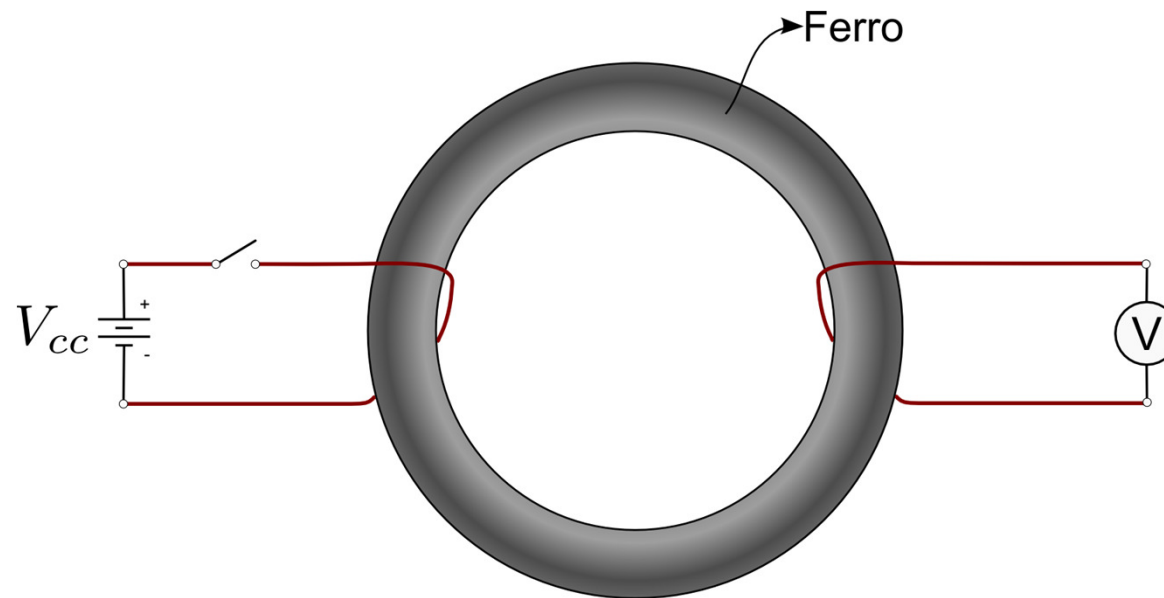
Lei de Faraday



No experimento acima, observou-se que:

- Ao se aproximar ou afastar o ímã do solenóide (bobina) ocorre um deslocamento do ponteiro do galvanômetro.
- Quando o ímã está parado, independentemente de quão próximo este esteja do solenóide, não há deslocamento do ponteiro do galvanômetro.

Lei de Faraday



- Ocorre um deslocamento do ponteiro do galvanômetro no instante em que a chave é fechada ou aberta (fonte CC).
- Para corrente constante (chave fechada), independentemente de quão elevado seja o valor da tensão aplicada, não há deslocamento do ponteiro.

Lei de Faraday

A lei de Faraday declara que:

“Quando um circuito elétrico é atravessado por um fluxo magnético variável, surge uma fem (tensão) induzida atuando sobre o mesmo.”

A lei de Faraday também declara que:

“A fem (tensão) induzida no circuito é numericamente igual à variação do fluxo que o atravessa.”

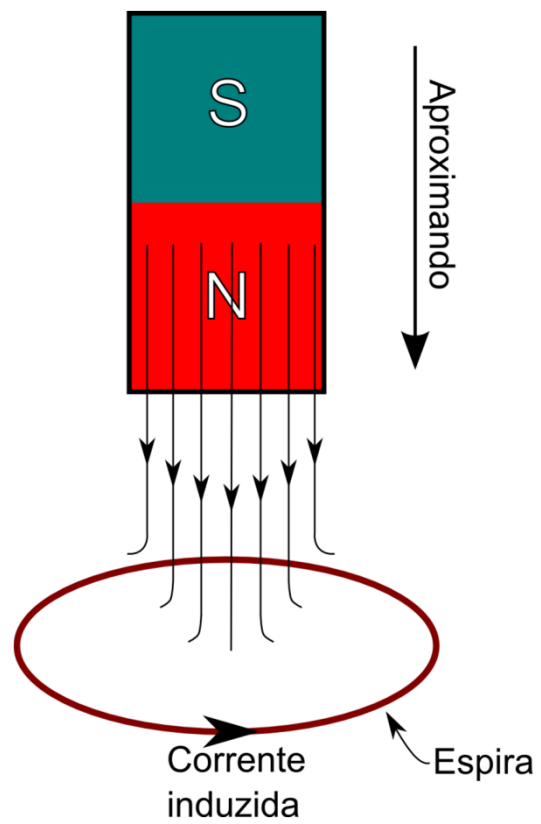
$$e = \frac{d\phi}{dt}$$

Lei de Faraday

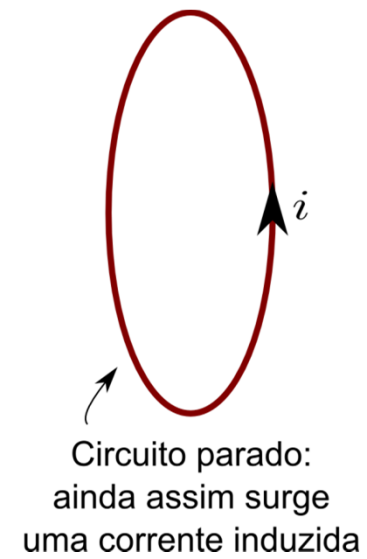
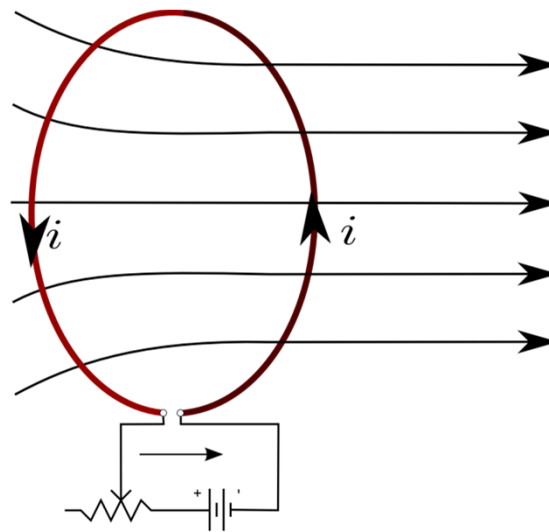
Formas de se obter uma tensão induzida segundo a lei de Faraday:

- Utilizar uma corrente variável para produzir um campo magnético variável.
- Provocar um movimento relativo entre o campo magnético e o circuito.

Lei de Lenz



Lei de Lenz



Lei de Lenz

A lei de Lenz declara:

A tensão induzida em um circuito fechado por um fluxo magnético variável produzirá uma corrente de forma a se opor à variação do fluxo que a criou.

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

Próxima Aula

- Excitação por corrente alternada
- Indutância
- Energia armazenada