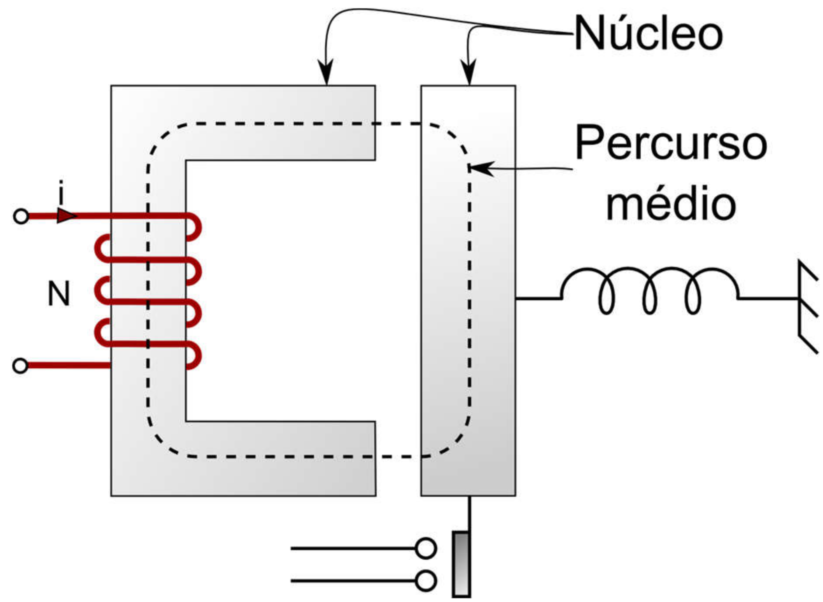
SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

Aula 03

Circuitos Magnéticos

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*.

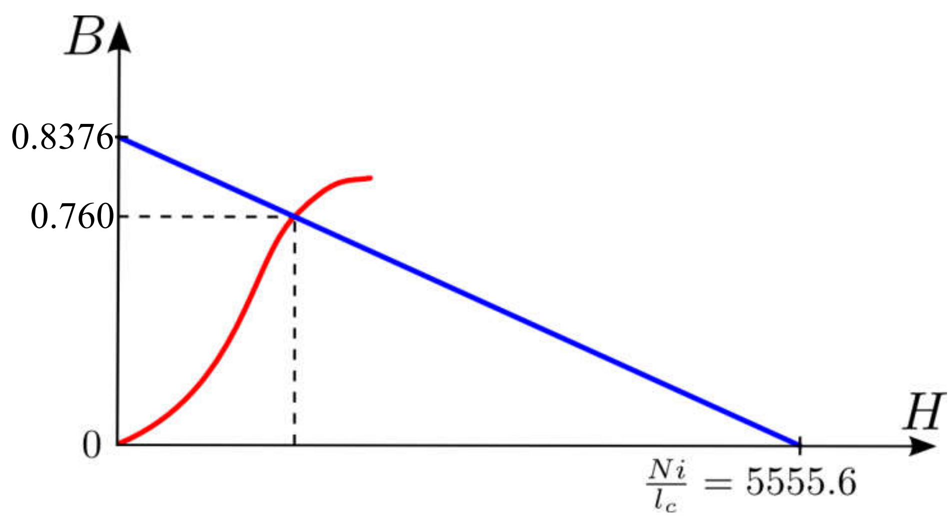
Aplicando a Lei de Ampère temos:

$Ni = H_g g + H_c l_c = (B_g/\mu_0)\, g + H_c l_c$ desprezando-se o espraiamento $B_g = B_c$, assim

$B_c = -\, \mu_0(l_c/g)H_c + (Ni\, \mu_0/g)$ (esta é a equação de uma reta relacionando B_c 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 x 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.

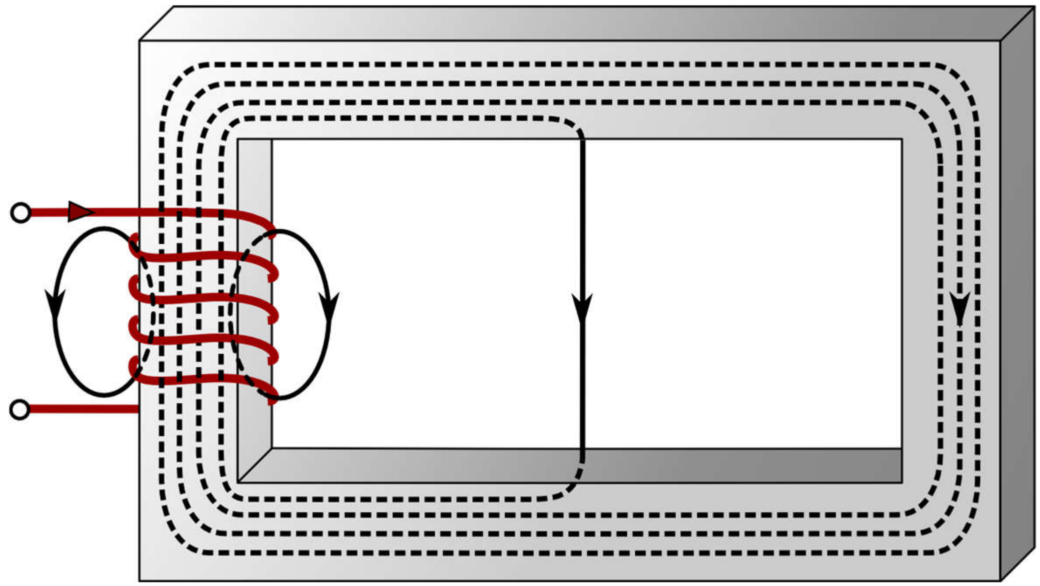
$$B \cong 0{,}76 \text{ T.}$$

Tópicos da Aula de Hoje

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

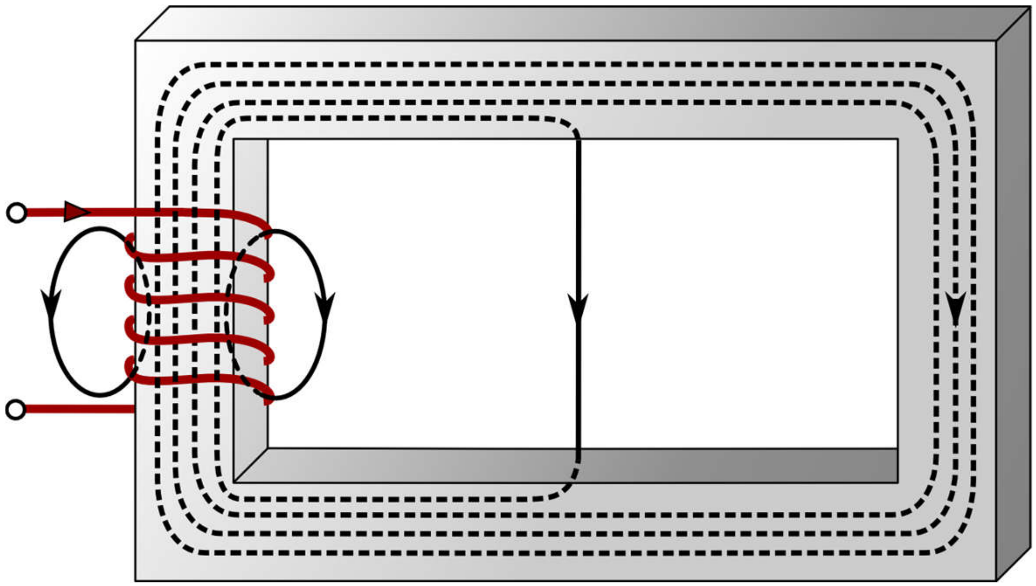
Dispersão de fluxo magnético

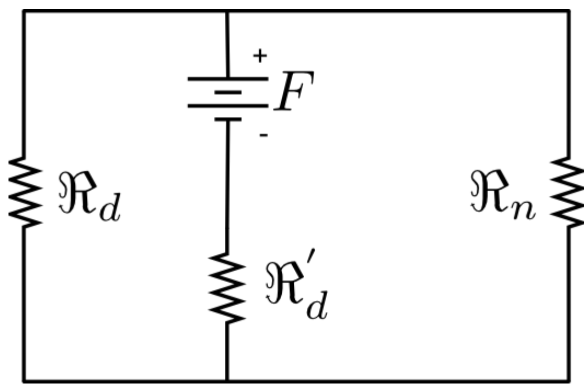
Na realidade, parte das linhas de campo não estão contidas no núcleo. Estas linhas se fecham pelo ar. Tal fenômeno é denominado **dispersão**.



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:

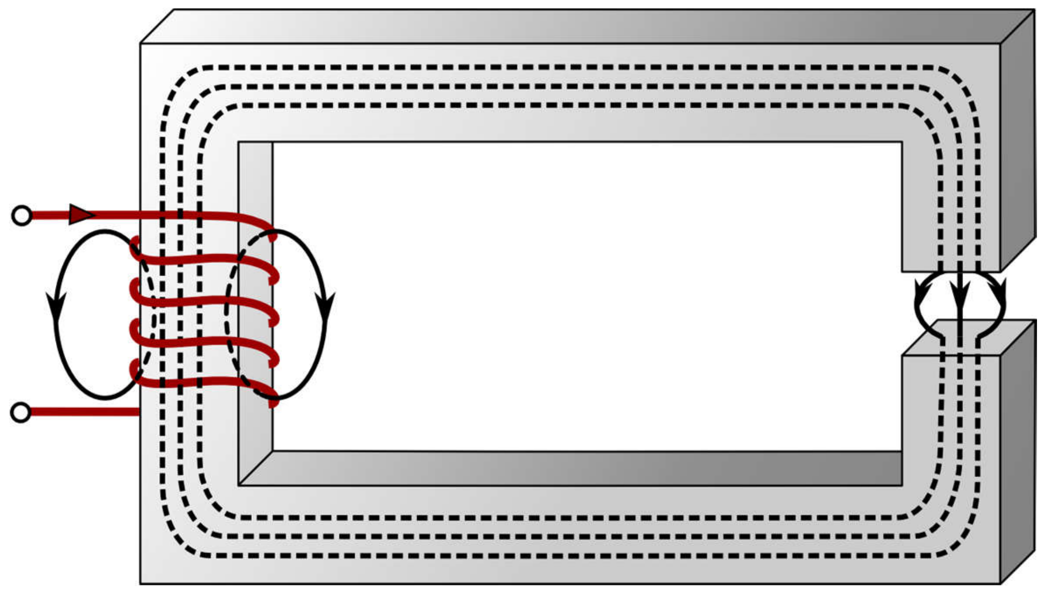
$\Re_d$ = relutância de dispersão do núcleo (valor bastante elevado)

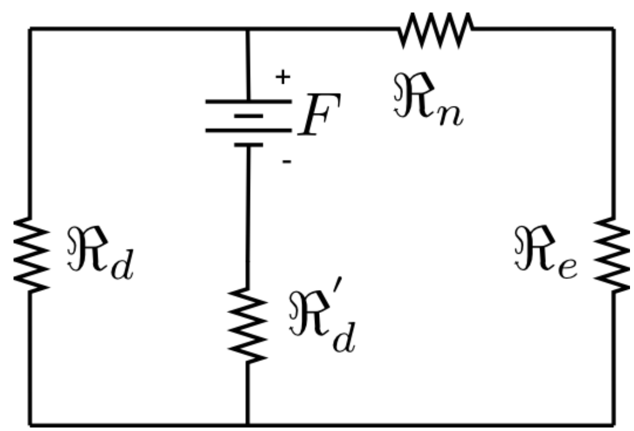
$\Re'_d$ = relutância de dispersão da bobina (valor bastante pequeno)

$\Re_n$ = relutância do resto do núcleo

Dispersão de fluxo magnético

DISPERSÃO + ESPRAIAMENTO:





sendo:

$\Re_d$ = relutância de dispersão do núcleo (valor bastante elevado)

$\Re'_d$ = relutância de dispersão da bobina (valor bastante pequeno)

$\Re_n$ = relutância do resto do núcleo

$\Re_e$ = relutância do entreferro

Lei de Ampère – Circuito Magnético Equivalente

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

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:

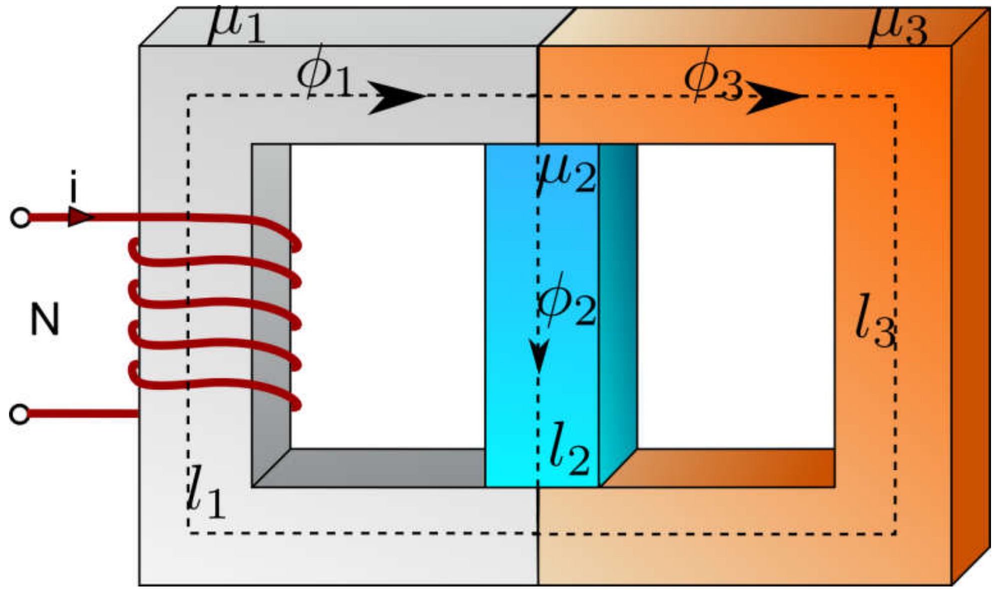
$$\sum F = \sum \Re \Phi$$

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:

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

A malha dos materiais 2 e 3, fornece:

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

Circuitos Magnéticos com Junções

Usando B = μH e Φ = BA, temos:

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

ou:

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

Circuitos Magnéticos com Junções

ou ainda:

$$\begin{cases} \Re_1\Phi_1 + \Re_2\Phi_2 = Ni \\ \Re_2\Phi_2 - \Re_3\Phi_3 = 0 \end{cases}$$

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

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

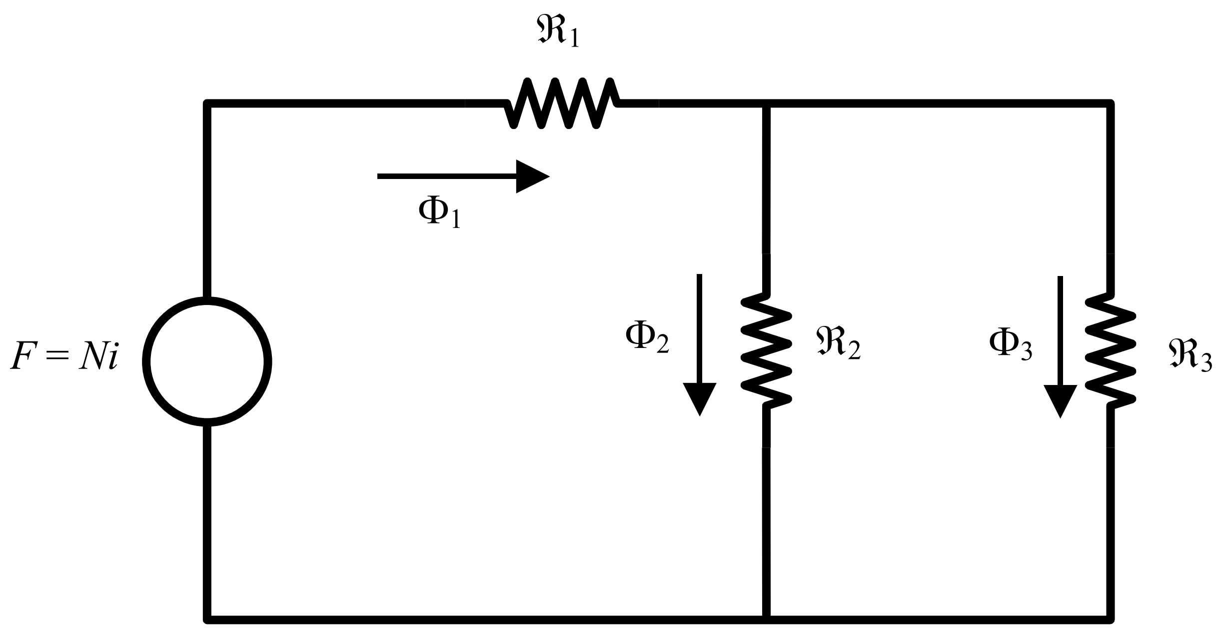
$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$$

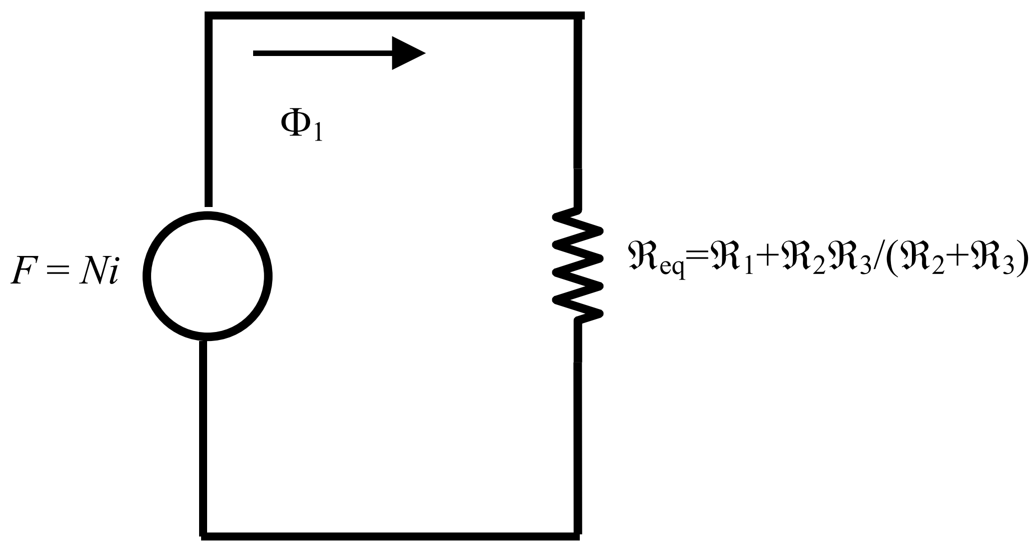
Resolvendo-se este sistema de equação, temos:

$$\Phi_1 = \frac{Ni}{\Re_1 + \dfrac{\Re_2\Re_3}{\Re_2 + \Re_3}}$$

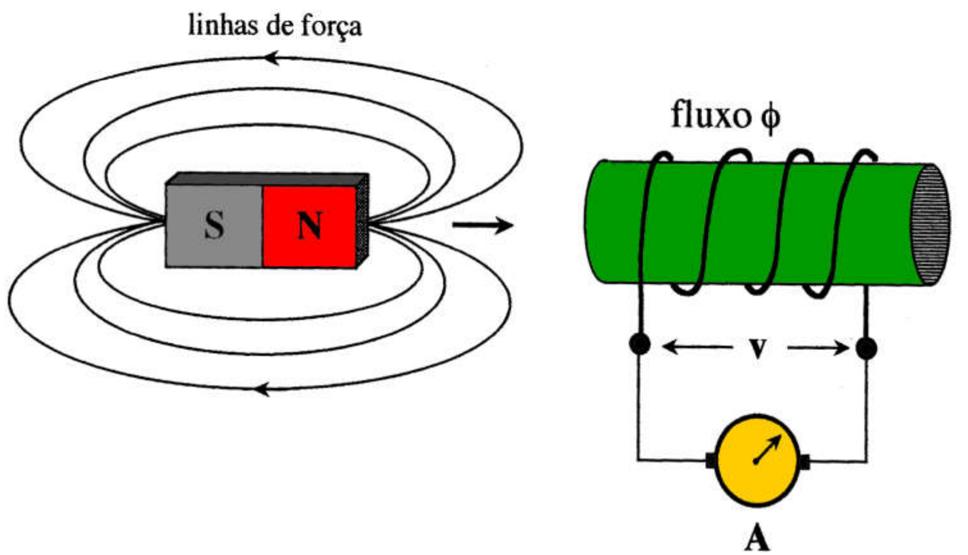
Circuitos Magnéticos com Junções

Circuito magnético equivalente (circuito elétrico análogo):





Lei de Faraday

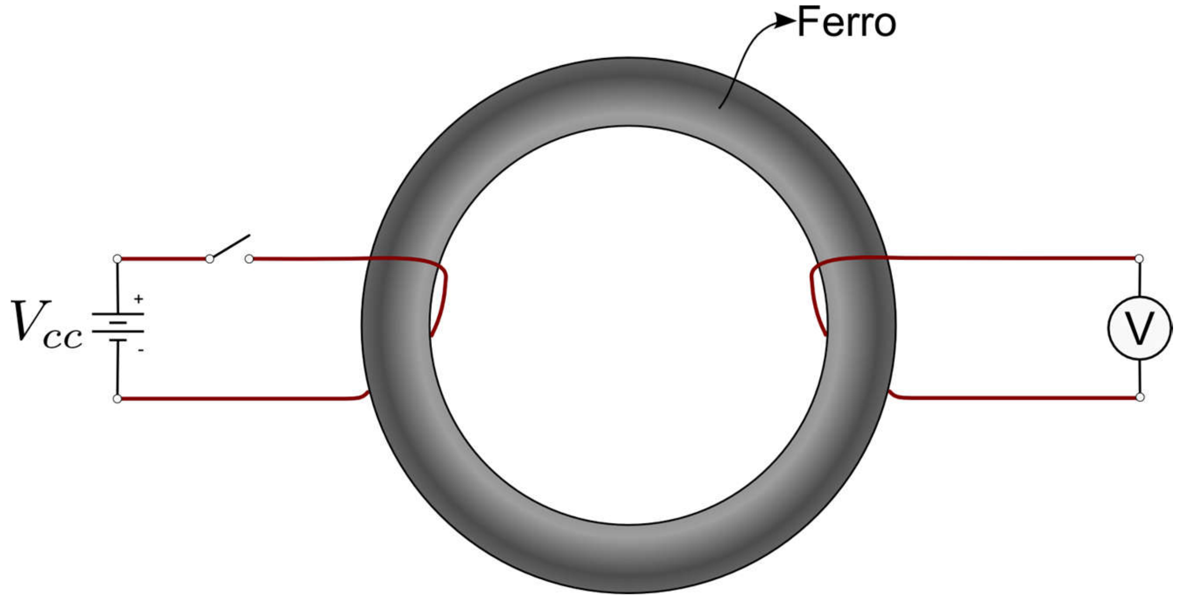


No experimento acima, observou-se que:

• 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.*"

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

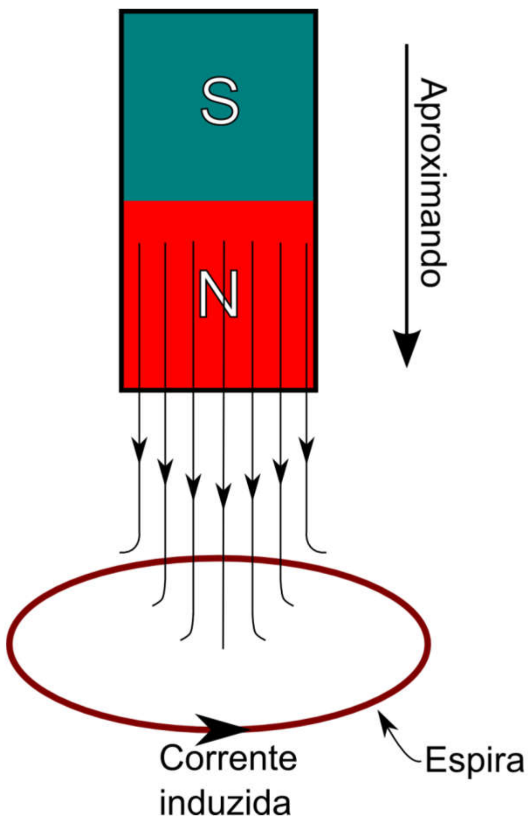
Lei de Faraday

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

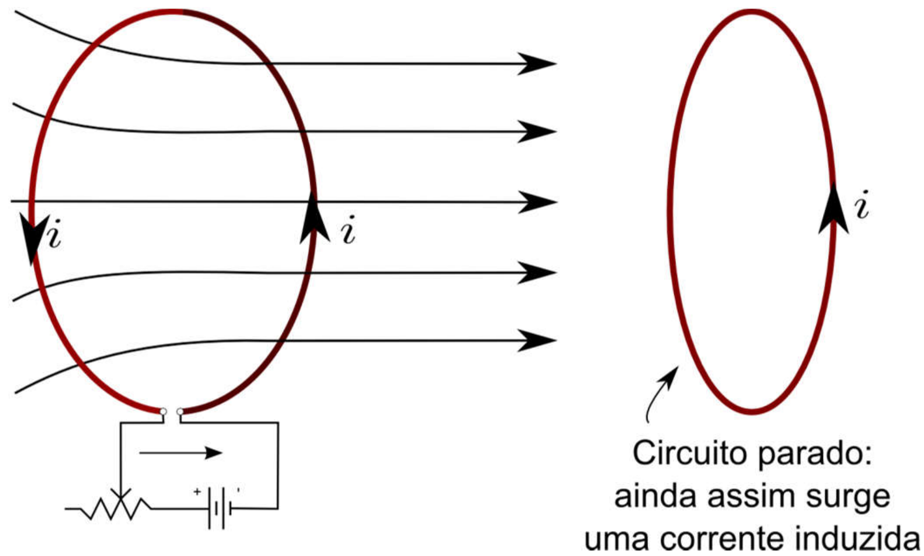
• Utilizar uma corrente variável para produzir um campo magnético variável.

• Provocar um movimento relativo entre o campo magnético e o circuito.

Lei de Lenz



Lei de Lenz



i
i
i
Circuito parado:
ainda assim surge
uma corrente induzida

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.

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

Próxima Aula

- Excitação por corrente alternada
- Indutância
- Energia armazenada

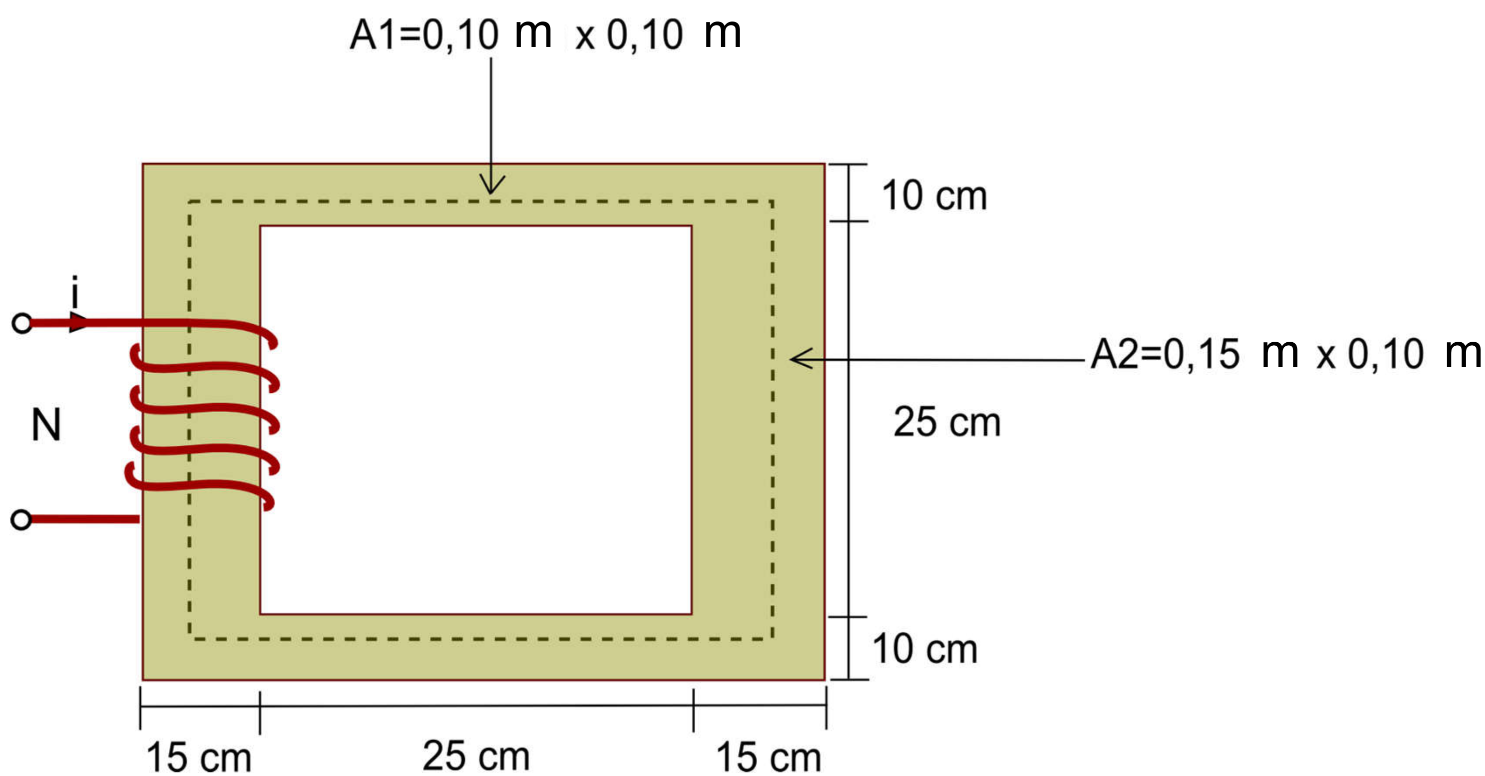
Exercício

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.

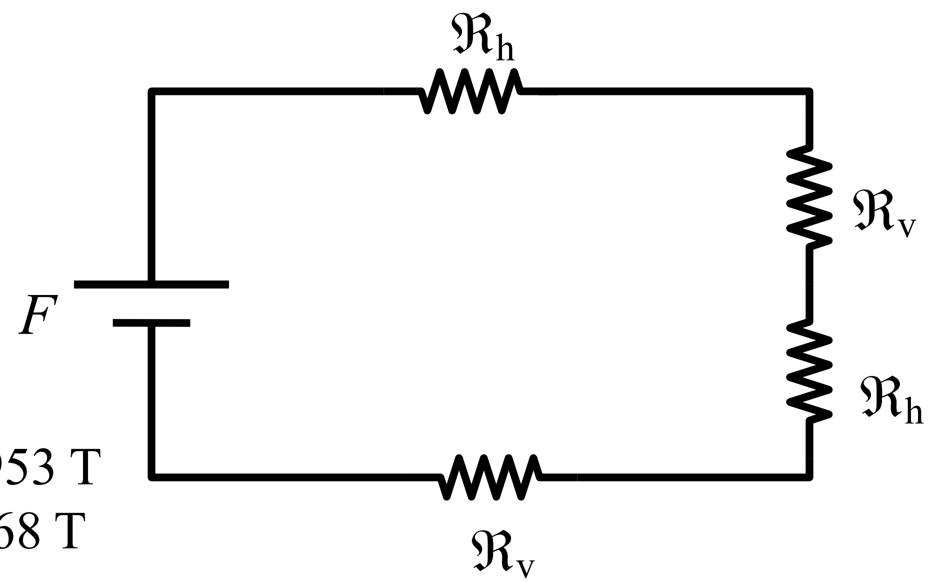


Resposta

O circuito magnético equivalente é mostrado na figura, sendo:

$\Re_{\mathrm{h}} = 0{,}40/(2000\times4\pi\ 10^{-7}\times0{,}10\ \times0{,}10) = 15912$ A.espWb
$\Re_{\mathrm{v}} = 0{,}35/(2000\times4\pi\ 10^{-7}\times0{,}15\ \times0{,}10) = 9284$ A.espWb

$\Re_{\mathrm{total}} = 2\Re_{\mathrm{h}} + 2\Re_{\mathrm{v}} = 50398$ A.esp/Wb



(a) Determine o fluxo do núcleo.

$\Phi = (300\times1)/50398 = 0{,}006$ Wb

(b) $B_h = \Phi/A_h = 0{,}006/(0{,}10\times0{,}10) = 0{,}5953$ T
$B_v = \Phi/A_v = 0{,}006/(0{,}15\times0{,}10) = 0{,}3968$ T

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

$\mathrm{N}i = \Re_{\mathrm{total}}\ \Phi$
$i = \Re_{\mathrm{total}}\ \Phi/\mathrm{N} = 50398\times0{,}012/300 = 2{,}0159$ A