

# **SEL 329 – CONVERSÃO ELETROME CÂNICA DE ENERGIA**

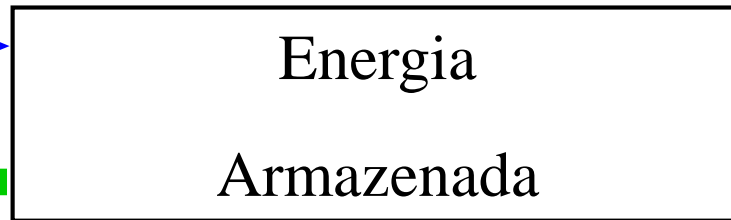
## **Princípios de Conversão de Energia**

**(livro guia P. C. SEM pag95-120)**

# Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia

---

Energia elétrica



Energia mecânica



Dispositivo de conversão  
eletromecânica de energia

# Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia

---

Exemplos:

Transdutores

(sinais pequenos,  
condições lineares)

- Microfones
- Instrumentos de medição analógicos
- Alto-falantes
- Aplicações de materiais piezoelétricos

Dispositivos de  
produção de  
força

- Solenoides
- Relés
- Imãs

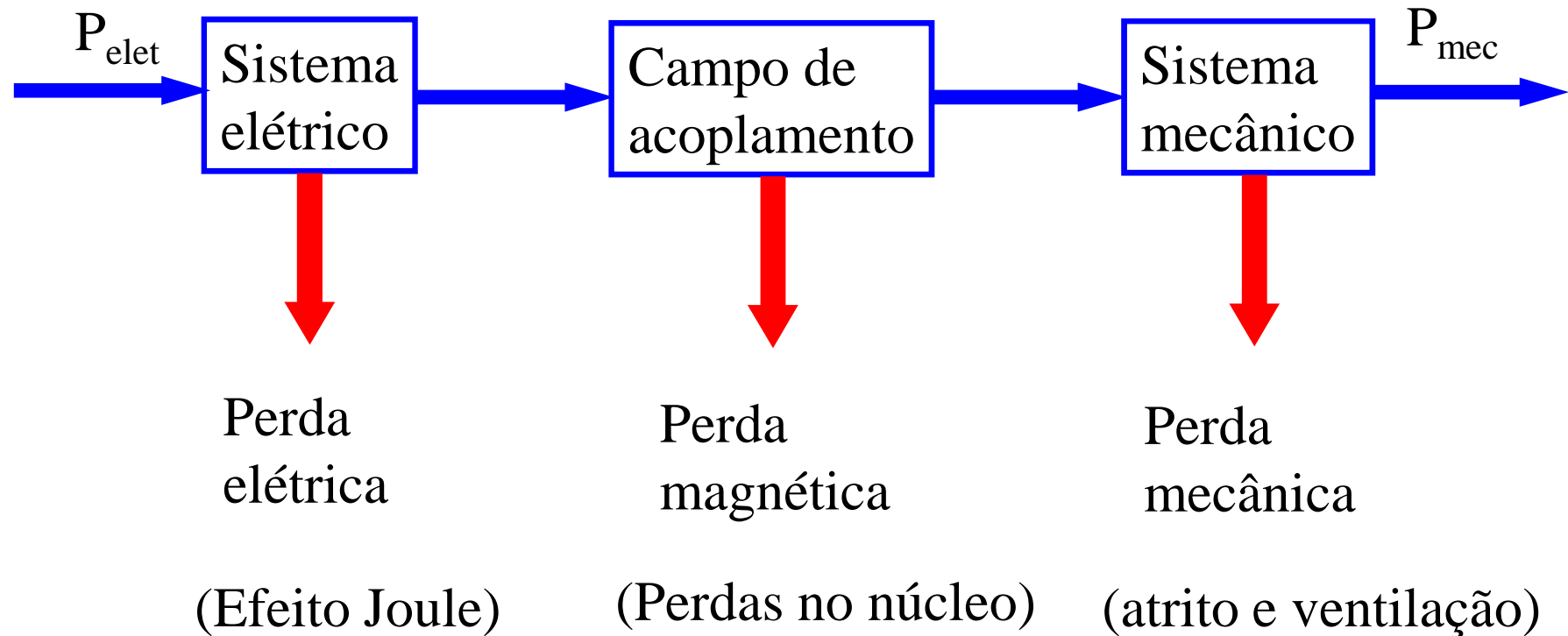
Conversão  
permanente de  
energia

- Motores,
- Geradores

# Princípios de Conversão Eletromecânica de Energia

---

Assim:



## Equação do Balanço de Energia

---

As perdas não contribuem ao processo de conversão

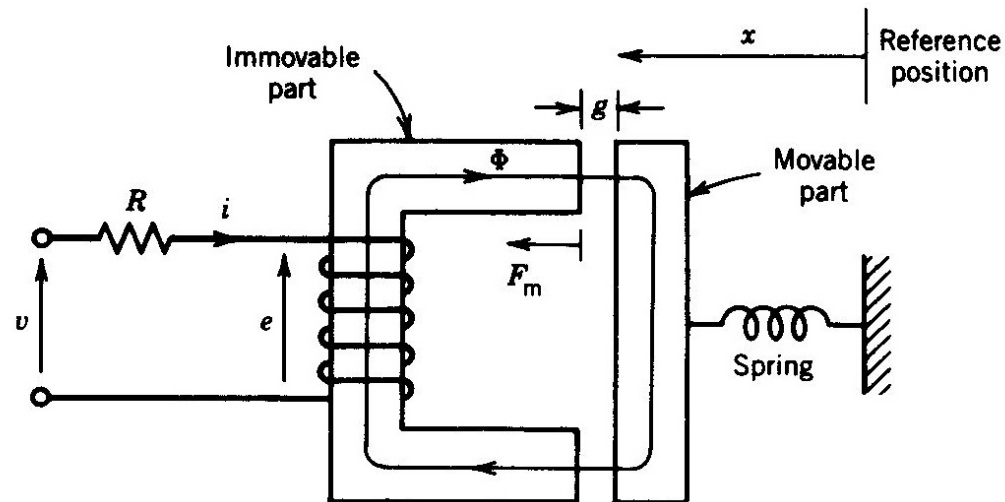
$$W_e = W_{mec} + W_{campo}$$

Considerando um intervalo de tempo incremental  $dt$ , no qual uma quantidade de energia elétrica incremental  $dW_e$  flui pelo sistema, e desprezando todas as perdas (caso não seja possível desprezá-las podem tratar-se separadamente), tem-se:

$$dW_e = dW_{mec} + dW_{campo} \quad (1)$$

Ou seja, parte da energia é armazenada no campo e parte é convertida em energia mecânica

# Dispositivos Eletromecânicos com Excitação Única



Admitindo a parte móvel bloqueada,  $dW_{mec} = 0$ , resulta

$$dW_e = dW_{campo}$$

Toda a energia fornecida é armazenada no campo magnético, estabelecendo um fluxo magnético e, portanto, uma tensão induzida:

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

a energia elétrica adicional pode ser dada por:  $dW_e = dW_{campo} = ei dt = \frac{d\lambda}{dt} i dt = id\lambda$

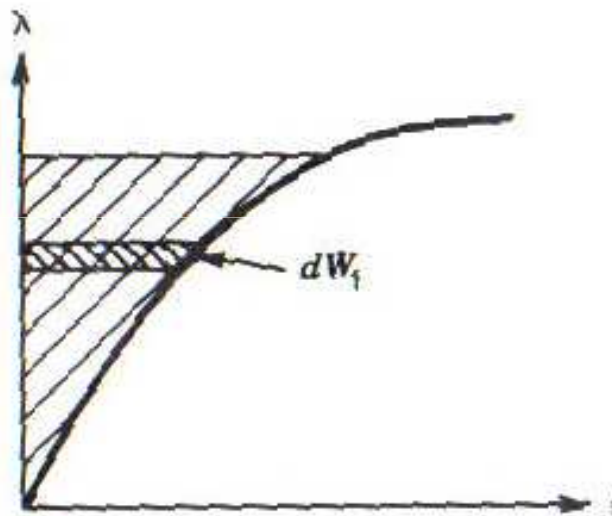
## Dispositivos Eletromecânicos com Excitação Única

---

Logo:

$$dW_{\text{campo}} = \int i d\lambda$$

a energia armazenada no campo magnético é dada pela área sobre a curva  $\lambda-i$ :



Considerando a parte móvel bloqueada, toda a energia elétrica incremental fornecida pela fonte será armazenada no campo magnético (desprezando as perdas)

Para um circuito magnético com entreferro

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g$$

$$i = (H_c l_c + H_g l_g)/N$$

$$W_{\text{campo}} = \int i d\lambda$$

$$W_{\text{campo}} = \int \frac{H_c l_c + H_g l_g}{N} d\lambda$$

$$\lambda = N\Phi = NBA$$

$$W_{\text{campo}} = \int \frac{(H_c l_c + H_g l_g) NA}{N} dB$$



$$W_{\text{campo}} = \int (HcLc + Hglg) AdB$$

Para o entreferro:

$$Hg = \frac{B}{\mu_0}$$

$$W_{\text{campo}} = \int \left( HcdBAlc + \frac{B dB lgA}{\mu_0} \right)$$

A .lc = volume do material magnético

A. lg = volume do entreferro

Considerando que o sistema tem comportamento linear, então:

$$H_c = \frac{B_c}{\mu_c}$$

$$W_{\text{campo}} = \int \left( \frac{B_c dB_c (\text{Vol nucleo})}{\mu_c} + \frac{B dB (\text{Vol entreferro})}{\mu_o} \right)$$

$$W_{\text{campo}} = \frac{B_c^2}{2\mu_c} \text{Vol}_{\text{nucleo}} + \frac{B_g^2}{2\mu_o} \text{Vol}_{\text{entreferro}} \quad (\text{Energia armazenada total})$$



(Energia armazenada no núcleo)



(Energia armazenada no entreferro)

Considerando que toda a energia armazena-se no entreferro, tem-se:

$$W_{\text{campo}} = \frac{B_g^2}{2\mu_o} Vol_{\text{entreferro}}$$

# Exemplo

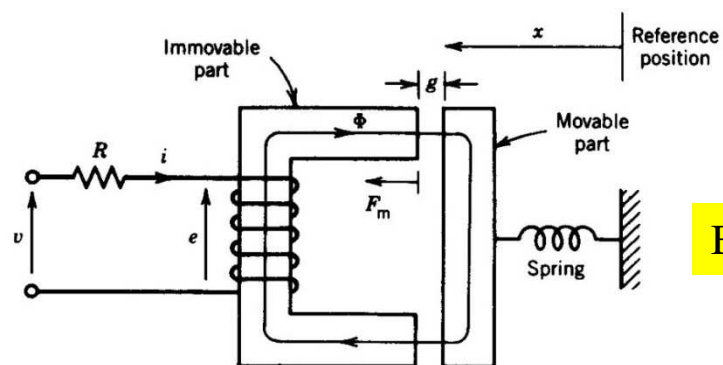
As dimensões de um sistema de atuador é mostrado abaixo. O núcleo magnético é feito de aço-fundido (cast-steel) cuja característica B-H é mostrado abaixo. A bobina tem 250 espiras e a resistência da bobina é 5ohms. Para um entreferro de 5mm, uma fonte DC é conectada na bobina para produzir um fluxo de 1 tesla no entreferro.

- a) Determine a tensão da fonte DC
- b) Encontre a energia do campo magnético armazenado.

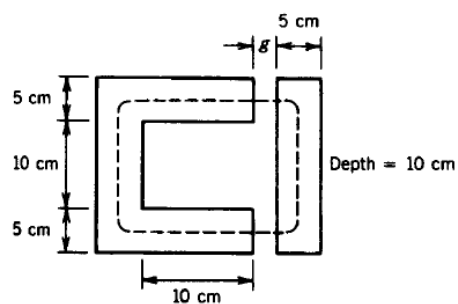
a)  $V_{DC}$

1

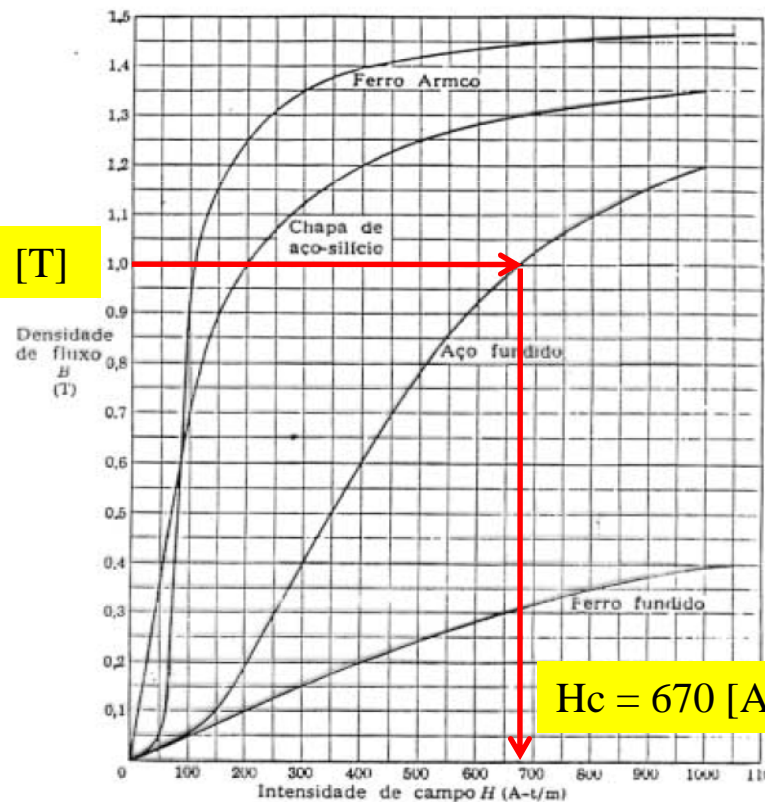
Para o  $B_c=1T$ , determina-se  $H_c$



$B_c=1 [T]$



Dimensões do núcleo



$H_c = 670 [A-e/m]$

## Exemplo

---

2 Determinação do comprimento do núcleo:  $l_c = 2(10+5) + 2(10+5) = 60\text{cm}$

3 Intensidade do campo magnético no entreferro:  $H_g = B_g / \mu_0$

$$H_g = 1 / (4 \times \pi \times 10^{-7}) = 795800 \text{ A-e/m}$$

4 Cálculo da corrente requerida:  $i = (H_c l_c + H_g l_g) / N$

$$i = (670 \times 0,6 + 795800 \times 2 \times 5 \times 10^{-3}) / 250$$

$$i = 33,44\text{A}$$

5 A tensão da fonte DC é:  $V_{DC} = Rxi$

$$V_{DC} = 5 \times 33,44 = 167,2\text{V}$$

## Exemplo

---

b)  $W_{\text{campo}} = \frac{B_c^2}{2\mu_c} Vol_{\text{nucleo}} + \frac{B_g^2}{2\mu_o} Vol_{\text{entreferro}}$

1  $Vol_{\text{nucleo}} = 2(0,05 \times 0,1 \times 0,2) + 2(0,05 \times 0,1 \times 0,1); \quad Vol_{\text{nucleo}} = 0,003 \text{m}^3$

2 Energia armazenada no núcleo:  $W_{\text{nucleo}} = \frac{B_c^2}{2\mu_c} Vol_{\text{nucleo}} \quad \mu_c = B_c / H_c$

$$W_{\text{nucleo}} = 1,005 \text{ J}$$

3 Energia armazenada no entreferro:  $W_{\text{entreferro}} = \frac{B_g^2}{2\mu_o} Vol_{\text{entreferro}}$

$$Vol_{\text{entreferro}} = 2(0,05 \times 0,1 \times 0,005); \quad Vol_{\text{entreferro}} = 0,05 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

$$W_{\text{entreferro}} = 1^2 / (2 \times (4\pi \times 10^{-7})) \times (0,05 \times 10^{-3})$$

## Exemplo

---

$$W_{\text{entreferro}} = 19,895 \text{ J}$$

4

Energia total

$$W_{\text{campo}} = 20,9 \text{ J}$$

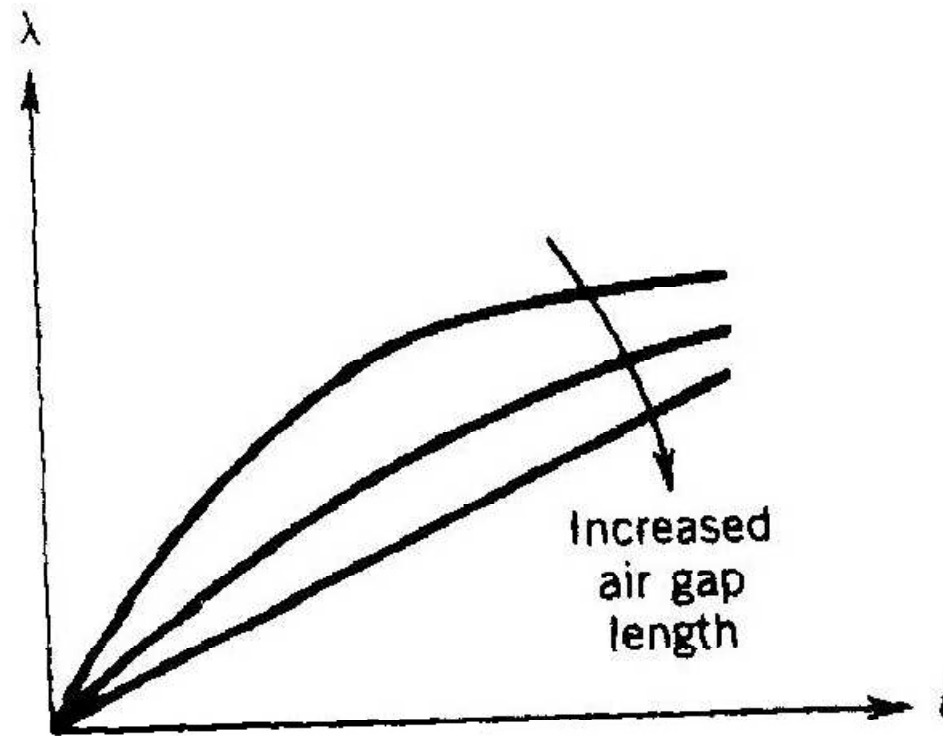
# Energia e Co-energia



## Energia e Co-Energia

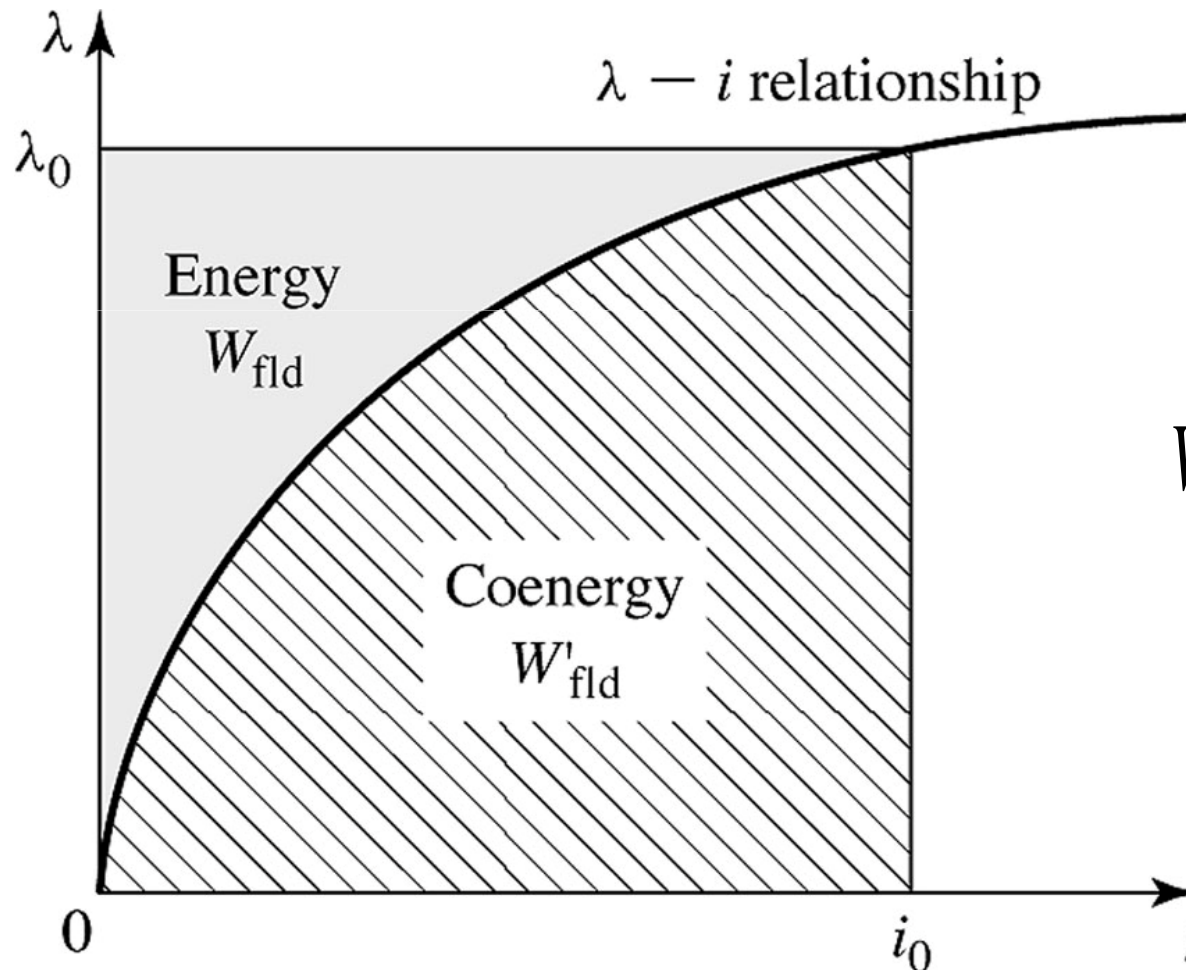
---

A característica  $\lambda$ - $i$  de um dispositivo eletromagnético depende do entreferro. Quanto maior o entreferro mais linear é a característica  $\lambda$ - $i$ , uma vez que a permeabilidade do ar é constante.



## Energia e Co-Energia

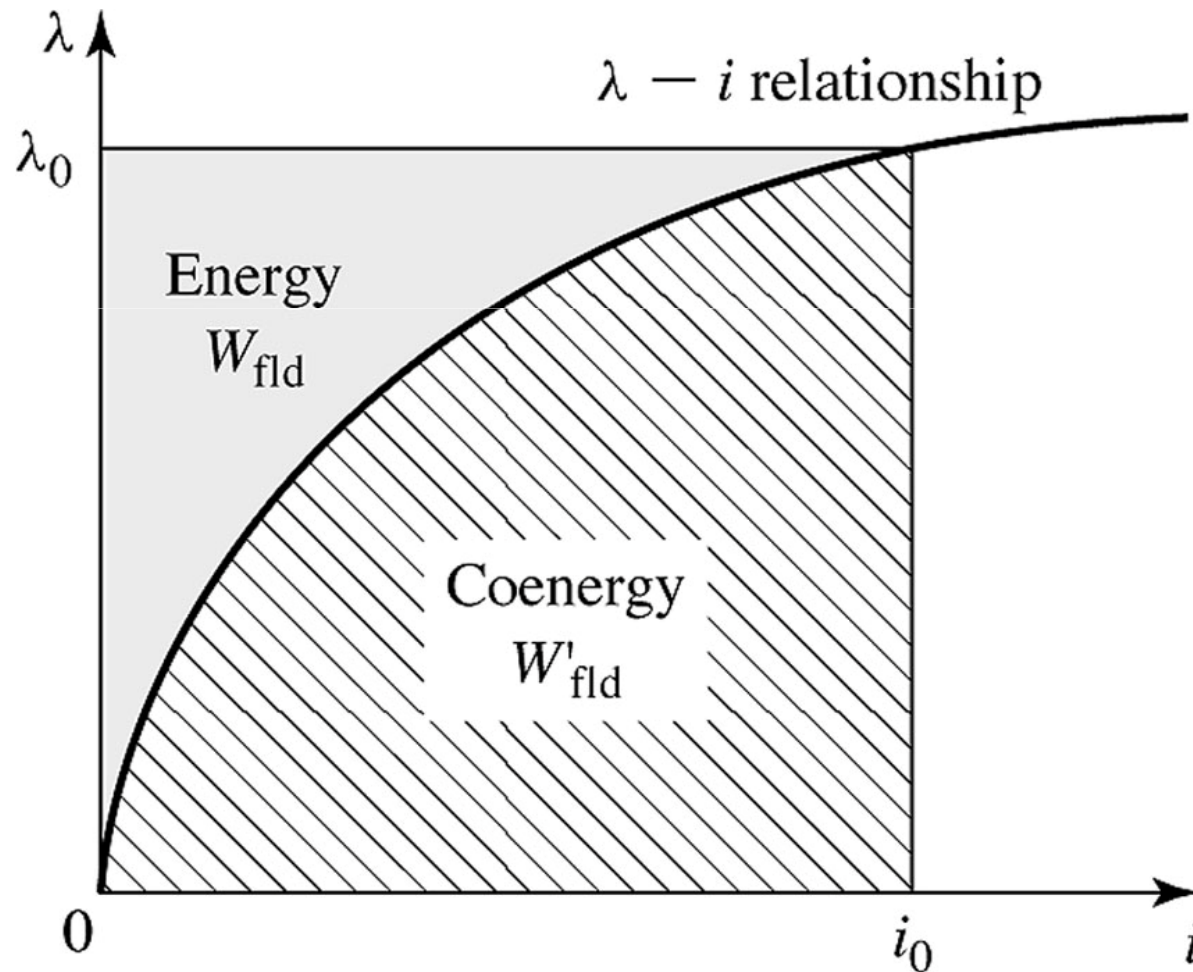
Para um dado comprimento do entreferro, a energia armazenada no campo magnético é representada pela área entre o eixo  $\lambda$  e a característica  $\lambda-i$ ,



$$W_{\text{campo}} = \int i d\lambda$$

## Energia e Co-Energia

A área entre o eixo  $i$  e a curva  $\lambda$ - $i$  é definida como co-energia, e pode ser obtida por:



$$W'_{\text{campo}} = \int \lambda di$$

## Energia e Co-Energia

---

Esta quantidade não tem significado físico, mas é útil na obtenção das expressões da força ou torque desenvolvido por um sistema eletromagnético.

Tem-se então, que:

$$W_{\text{campo}} + W'_{\text{campo}} = \lambda_o i_o$$

Se  $W_{\text{campo}} = W'_{\text{campo}}$  o sistema é linear, ou seja, é regido pelo entreferro.