

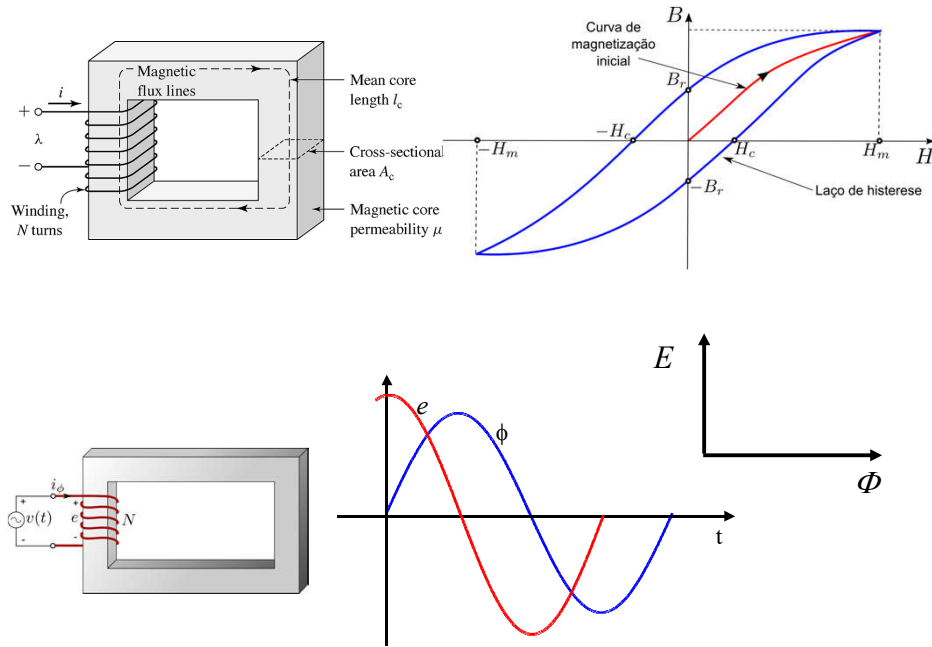
SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECCÂNICA DE ENERGIA

Aula 06

Tópicos da Aula de Hoje

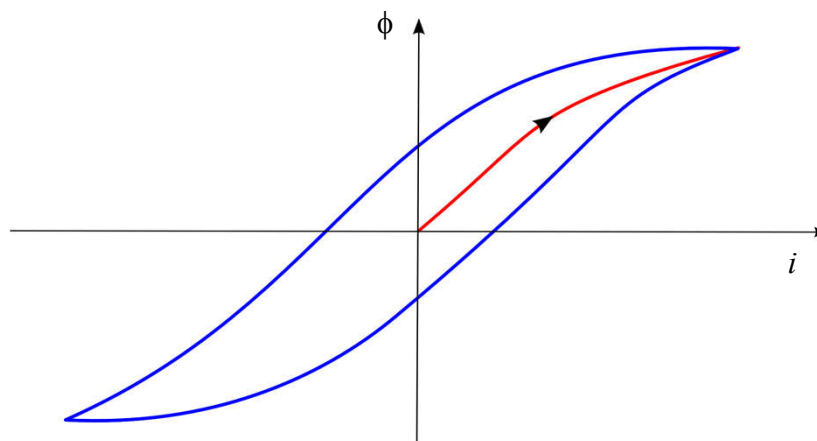
- Corrente de excitação
 - ✓ desprezando histerese
 - ✓ considerando histerese
- Ímãs permanentes

Corrente de excitação

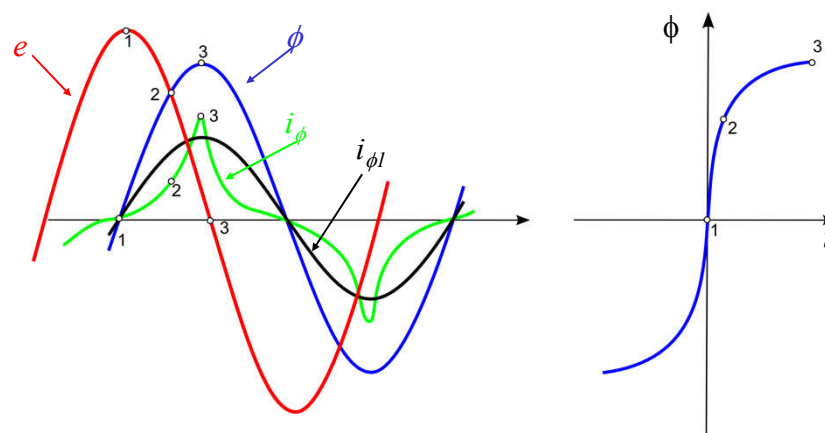


Corrente de excitação

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



Corrente de excitação desprezando a histerese



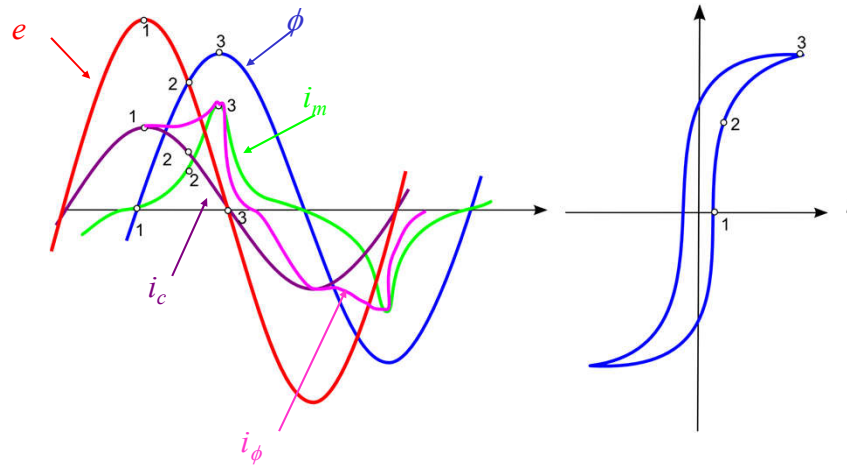
Corrente de excitação desprezando a histerese

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

- ✓ A corrente de excitação não é senoidal, sendo que as componentes de múltiplas da frequência fundamental (basicamente terceira harmônica) são devidas 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 duas 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, sendo que as componentes de múltiplas da frequência fundamental (basicamente terceira harmônica) são devidas 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.

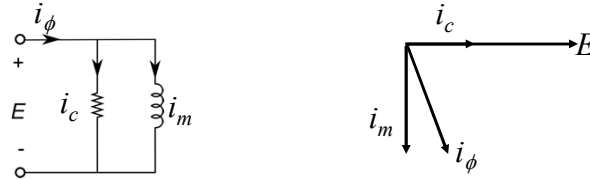
✓ A componente fundamental da corrente de magnetização está 90° atrasada em relação à tensão aplicada na bobina do núcleo. Por conseguinte, não há perdas envolvidas com esta componente.

Corrente devido às perdas por histerese e correntes parasitas i_c :

✓ A 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:

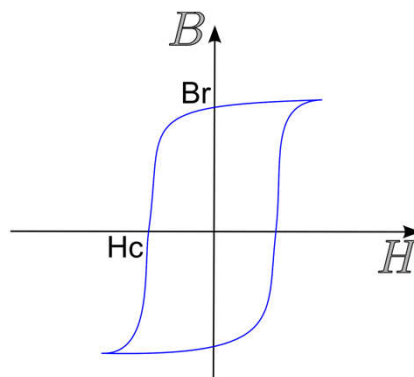
- ✓ Não confundir corrente de excitação e magnetização. A segunda é uma componente da primeira.
- ✓ Geralmente, as características não lineares da forma de onda da corrente de excitação não precisam ser levadas em conta, uma vez que a corrente de excitação assume valores pequenos, principalmente em transformadores de grande porte. **Por exemplo, a corrente de excitação de um típico transformador de potência assume um valor em torno de 1 a 5% da corrente nominal.**

E por falar em perdas.....

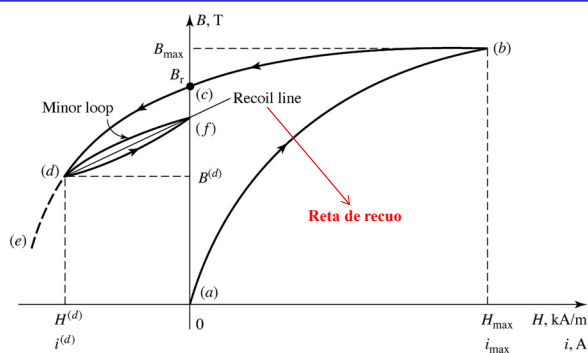
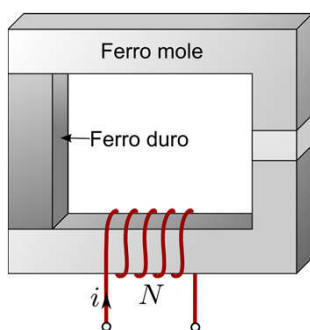
- ✓ O aço elétrico utilizado na fabricação de máquinas elétricas pode ser classificado em:
 - Aço de grão orientado: o aço é laminado de forma a facilitar a magnetização. Por meio de processos adequados, os cristais da liga de silício e ferro são posicionados de modo que os caminhos mais fáceis de magnetização encontram-se alinhados. Como resultado, eles podem operar com densidades de fluxo magnético mais elevadas, menores perdas no núcleo e maior permeabilidade em comparação aos aços de grão não orientados. São tipicamente empregados em equipamentos estáticos (e.g. transformadores).
 - Aço de grão não orientado: os cristais são orientados aleatoriamente, produzindo um material de características uniformes em todas as direções. São usados em aplicações em que o fluxo magnético não segue um caminho que pode ser orientado na direção de laminação ou em que o baixo custo é importante. Exemplo: máquinas elétricas rotativas.
 - Aço totalmente processado: redução das perdas em até 10% e aumento da permeabilidade em até 50%.
 - Aço semi processado: redução das perdas em até 50% e aumento da permeabilidade em até 300%.

Ímãs permanentes

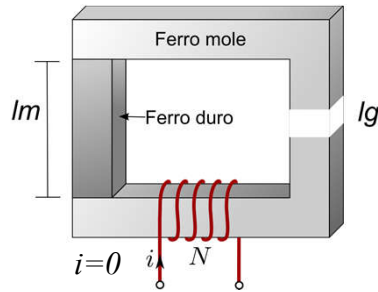
Um **ímã permanente** é capaz de manter o campo magnético sem a necessidade de uma fmm produzida por um eletroímã. Ímãs permanentes são normalmente constituídos de ligas de ferro, níquel e cobalto. Eles são caracterizados por um elevado valor de campo remanente B_r e coercividade H_c .



Magnetização de ímãs permanentes



Magnetização de ímãs permanentes



Hipóteses

- Despreza-se o espraçamento
- Núcleo de ferro mole com permeabilidade infinita

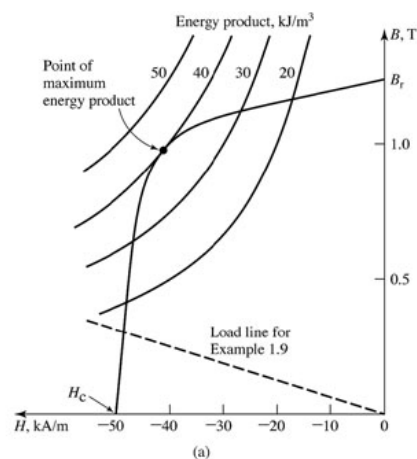
$$H_m l_m + H_g l_g = 0$$

$$H_g = -(l_m/l_g)H_m$$

$$\phi = B_m A_m = B_g A_g$$

$$B_g = (A_m/A_g)B_m$$

Magnetização de ímãs permanentes



Visto que:

$$H_g = -(l_m/l_g)H_m$$

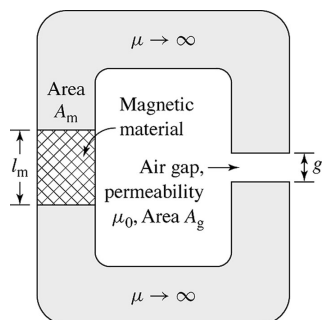
$$B_g = (A_m/A_g)B_m$$

Então:

$$B_g = \mu_0 H_g = -\mu_0 (l_m/l_g)H_m$$

$$B_m = -\mu_0 (A_g/A_m)(l_m/l_g)H_m$$

reta de carga

Exemplo

$$l_g = 0,2 \text{ cm}$$

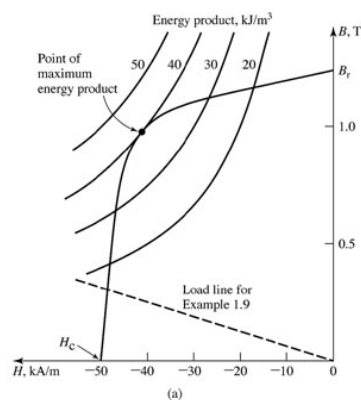
$$l_m = 1,0 \text{ cm}$$

$$A_m = A_g = 4 \text{ cm}^2$$

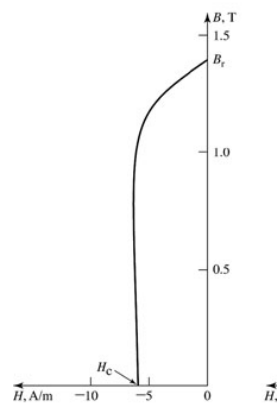
Calcule o fluxo no entreferro quando (a) o material magnético é o Alnico 5 e (b) o aço elétrico M-5

$$B_m = -\mu_0 (A_g/A_m) (l_m/l_g) H_m$$

$$B_m = -6,28 \times 10^{-6} \times H_m$$

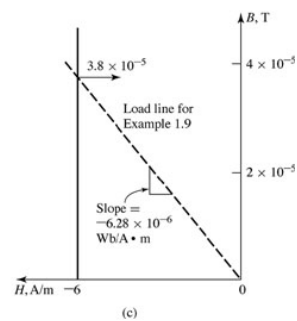
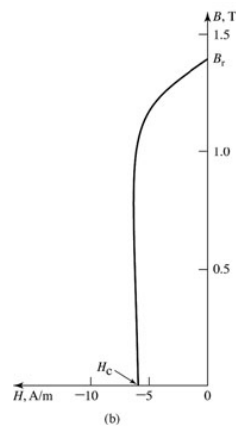
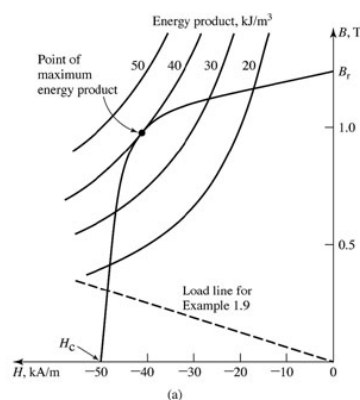
Exemplo

(a) Alnico 5



(b) aço elétrico M-5

Exemplo



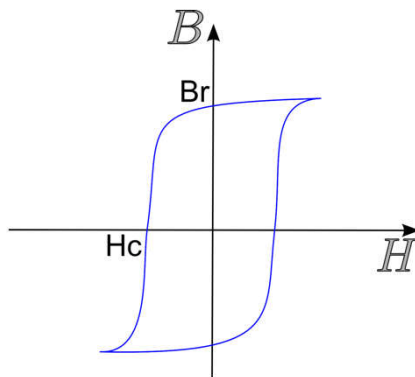
(a) 0,30 T

(b) $3,8 \times 10^{-5} \text{ T}$

Quais as conclusões dessa análise?

Ímãs permanentes

Portanto, é necessário ter elevados valores de campo remanente B_r e coercividade H_c simultaneamente.



Ímãs permanentes – produto energético máximo

O volume do material ferromagnético é:

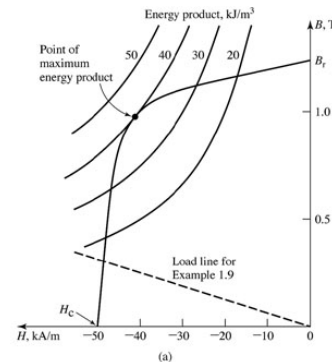
$$V_m = A_m l_m$$

$$V_m = (B_g A_g / B_m) \times (H_g l_g / H_m)$$

Portanto:

$$V_m = (B_g^2 V_g) / (\mu_0 B_m H_m)$$

$B_m H_m =$ **produto energético**. Quando este valor é máximo, leva a uma minimização do volume do material magnético.



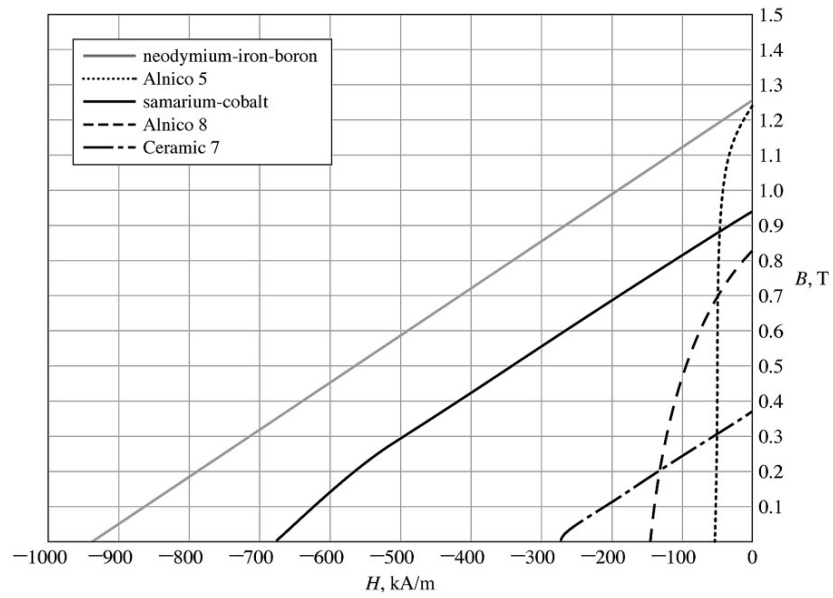
Ímãs permanentes

- **Alnico**: os materiais denominados como Alnico são formados por uma liga de ferro, alumínio, níquel e cobalto (por isso a denominação) e são amplamente utilizados desde dos anos 1930s. O alnico 5 apresenta um valor de densidade de fluxo residual (remanescente) relativamente elevada mas, ao mesmo tempo, um valor de coercitividade relativamente baixo. O alnico 8 tem uma densidade de fluxo residual menor mas uma coercitividade maior que a do alnico 5, portanto, sendo menos propenso à desmagnetização. As desvantagens dos materiais do tipo alnico são a coercitividade relativamente baixa e fragilidade mecânica.

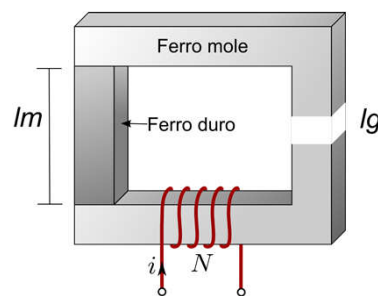
- **Cerâmica** (ferrite): os ímãs permanente de cerâmica são feitos de pós de óxido de ferro e carbonato de bário ou estrôncio e têm densidades de fluxo residual inferiores às dos materiais do tipo alnico, mas suas coercitvidades são significativamente maiores, sendo, portanto, menos propensos à desmagnetização. Os ímãs de cerâmica têm boas características mecânicas e sua fabricação é de baixo custo.

- **Terras raras**: os ímãs permanentes de terras raras (samário-cobalto, neodímio-ferro-boro) começaram a ser utilizados a partir dos anos 1960s. Tais ímãs têm elevados valores de densidade de fluxo residual e coercitvidade (bem como de produto energético máximo)

Ímãs permanentes



Ímãs permanentes: análise e projeto



reta de carga

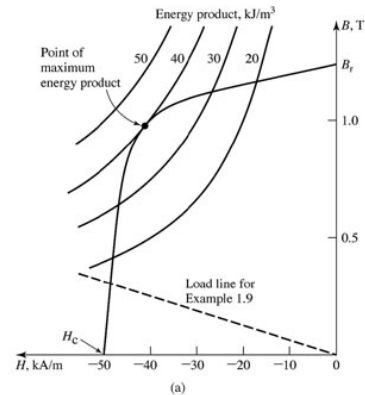


$$B_m = -\mu_0 \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \left(\frac{l_m}{l_g} \right) H_m$$

Ímãs permanentes: análise e projeto

Conhecendo a curva de magnetização do material e as dimensões dos materiais pode-se determinar a densidade de fluxo no núcleo e no entreferro através da reta de carga:

$$\text{inclinação da reta: } -\mu_0 \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \left(\frac{l_m}{l_g} \right)$$



Ímãs permanentes: análise e projeto

Conhecendo a curva de magnetização do material, as dimensões do entreferro e o valor requerido de densidade de fluxo no entreferro, deve-se determinar as dimensões do material do ímã permanente.

O volume do material magnético é dado por:

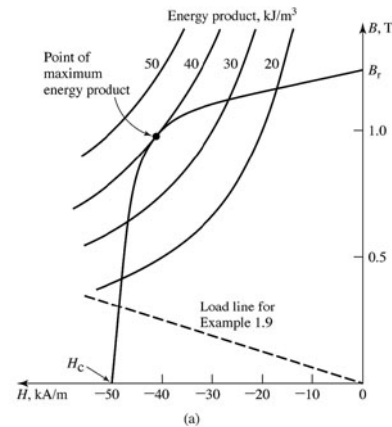
$$\begin{aligned} V_m &= A_m l_m \\ V_m &= \left(\frac{B_g A_g}{B_m} \right) \left(\frac{H_g l_g}{H_m} \right) \\ V_m &= \left(\frac{B_g^2 V_g}{\mu_0 B_m H_m} \right) \end{aligned}$$

$B_m H_m =$ **produto energético máximo** (leva a uma minimização do volume do material magnético)

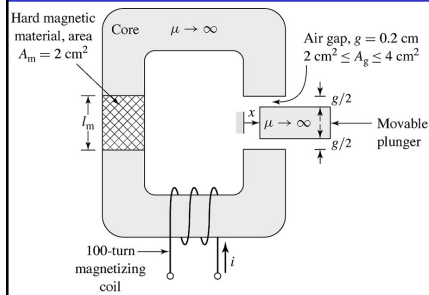
Ímãs permanentes: análise e projeto

Deve-se determinar as dimensões do ímã permanente para garantir operação no ponto de produto energético máximo, garantindo minimização do volume de material necessário.

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \left(\frac{l_m}{l_g} \right)$$



Exemplo 1

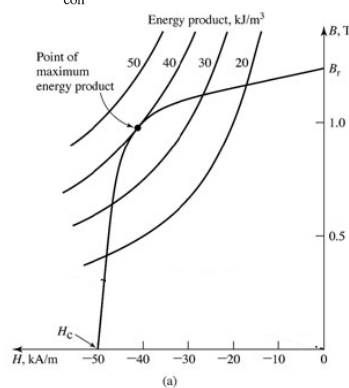


$$2 \text{ cm}^2 \leq A_g \leq 4 \text{ cm}^2$$

Alnico 5

$$A_g = 2 \text{ cm}^2 \text{ (área inicial)}$$

$$l_g = 0,2 \text{ cm}$$

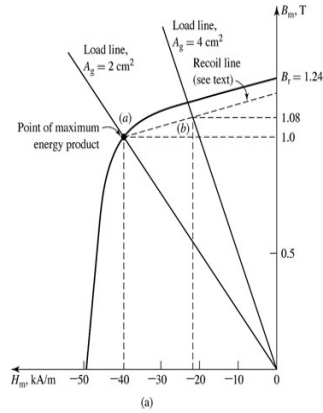


(a) encontre o comprimento do ímã l_m tal que o sistema opere na reta de recuo que intercepta o ponto de produto B-H máximo na curva de magnetização do Alnico 5.

(b) calcule a densidade de fluxo B_g no entreferro, quando o êmbolo move-se entre os extremos.

Exemplo 1**Solução:**

(a) Da curva de magnetização, no ponto de máximo produto energético, temos: $B_m = 1,0 \text{ T}$ e $H_m = -40 \text{ kA/m}$.



$$B_m = -\mu_0 \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \left(\frac{l_m}{l_g} \right) H_m \Rightarrow l_m = l_g \left(\frac{A_m}{A_g} \right) \frac{B_m}{-\mu_0 H_m}$$

$$l_m = 0,2 \left(\frac{2}{2} \right) \left(\frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \times 4 \times 10^4} \right) = 3,98 \text{ cm}$$

Exemplo 1

b) Inclinação da reta de recuo = inclinação da curva BxH, em $H = 0$ e $B = B_r$

Dados: $A_m = 2 \text{ cm}^2$

$l_m = 3,98 \text{ cm}$

$l_g = 0,2 \text{ cm}$

$A_g = 2 \text{ cm}^2 \rightarrow$ inclinação r. de carga $= -2,5007 \times 10^{-5} \text{ Wb/A.m}$

$A_g = 4 \text{ cm}^2 \rightarrow$ inclinação r. de carga $= -5,0014 \times 10^{-5} \text{ Wb/A.m}$

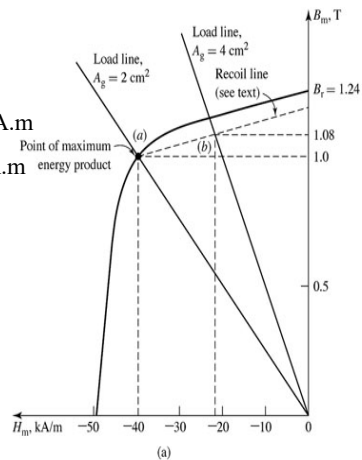
$A_g = 2 \text{ cm}^2 \rightarrow B_m = 1,00 \text{ Wb/m}^2$

$A_g = 4 \text{ cm}^2 \rightarrow B_m = 1,08 \text{ Wb/m}^2$

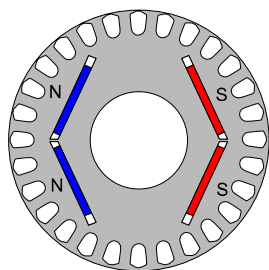
Mas $B_g = B_m (A_m / A_g)$

$A_g = 2 \text{ cm}^2 \rightarrow B_g = 1,00 \text{ Wb/m}^2$

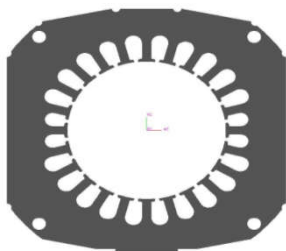
$A_g = 4 \text{ cm}^2 \rightarrow B_g = 0,54 \text{ Wb/m}^2$



Protótipo de Motor com Rotor de Ímã Permanente



Projeto das lâminas do rotor

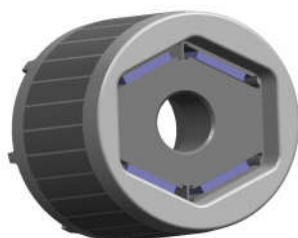


Lâminas do estator

Protótipo de Motor com Rotor de Ímã Permanente

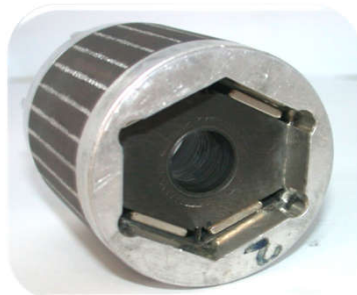


Estator

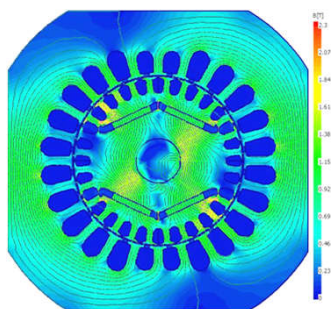


Modelo Final do Rotor

Protótipo de Motor com Rotor de Ímã Permanente



Peça real



Distribuição do campo magnético

Próxima Aula

- Transformadores
 - ✓ Princípio de operação do transformador
 - ✓ Transformador em vazio e em carga
 - ✓ Circuito equivalente em vazio e com carga
 - ✓ Obtenção dos parâmetros do circuito equivalente