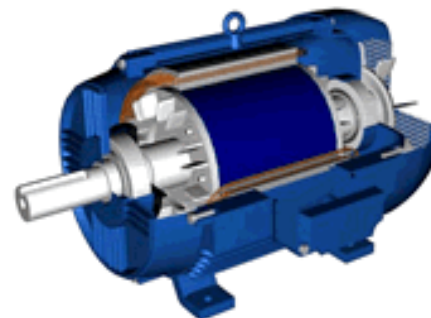
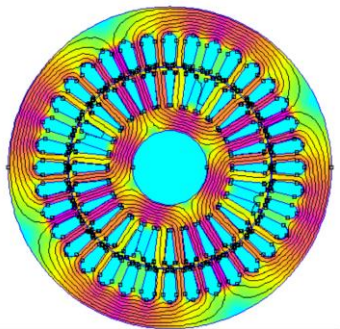


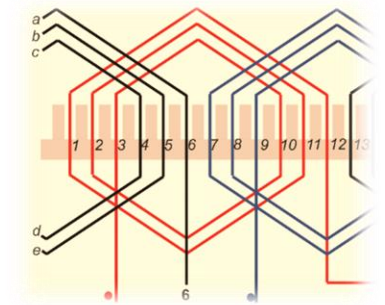
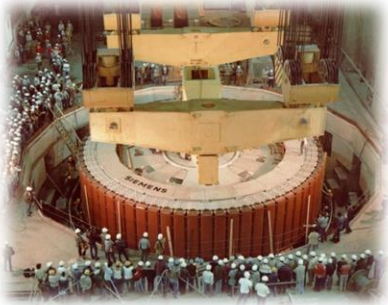
Aula 4: Circuitos magnéticos

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org

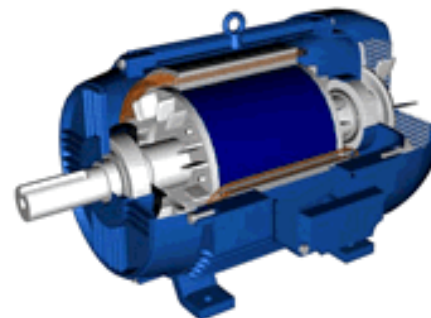
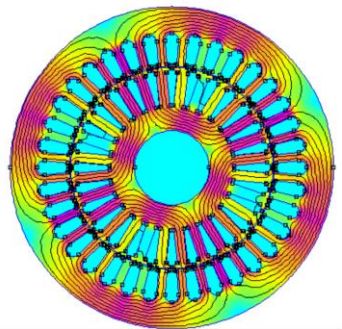


Sumário

- Lei de Ampère
- Circuito magnético
- Relutância magnética
- Analogia elétrica
- Circuitos magnéticos com entreferro
- Fontes de erro



Lei de Ampère



<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



Lei de Ampère

- ❑ Relaciona a intensidade de campo magnético \vec{H} e a corrente i ;
- ❑ Para uma curva fechada qualquer, pode-se escrever que:

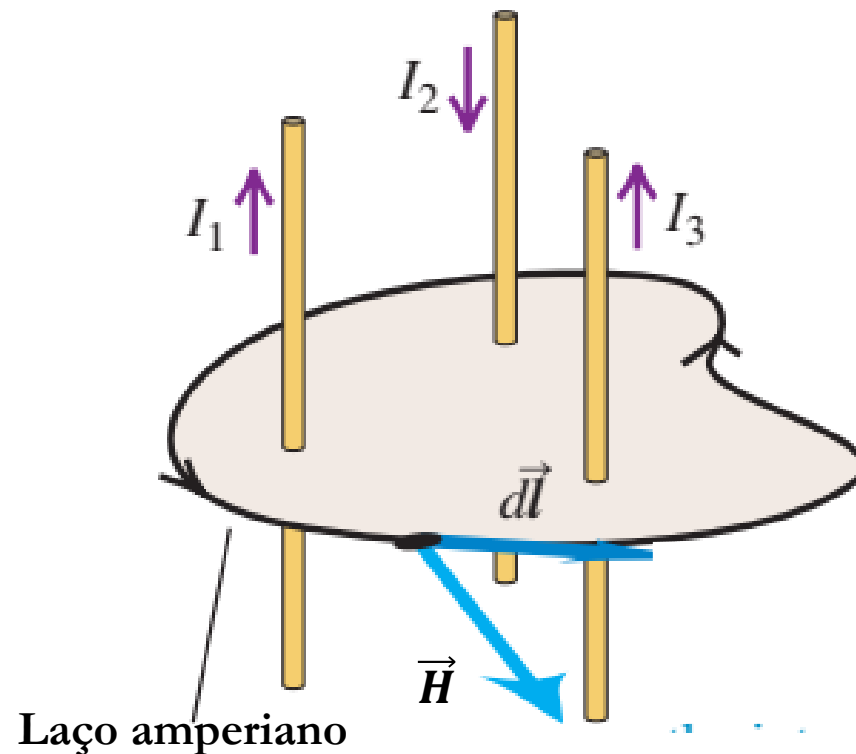
$$\oint H \cdot dl = \sum i$$

- ❑ i são as correntes envolvidas pela curva fechada;
- ❑ dl é um vetor tangente a curva com comprimento infinitesimal;
- ❑ A curva fechada é denominada laço ou curva amperiana.

Lei de Ampère - Interpretação

☐ Lei de Ampère

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i$$



Young and Freedman. "Física III: Eletromagnetismo".

☐ Para este exemplo, pode-se escrever que:

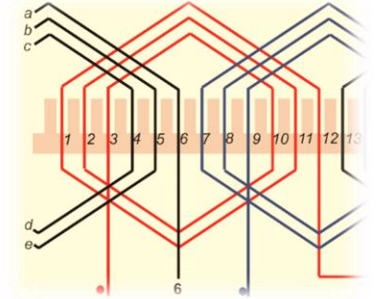
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_1 - I_2 + I_3$$

Lei de Ampère – Aplicação

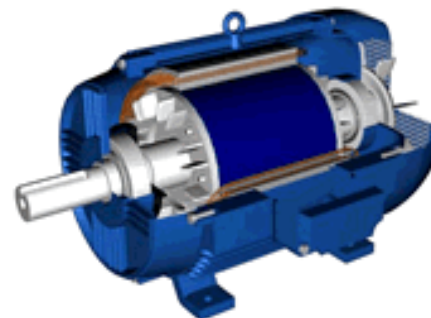
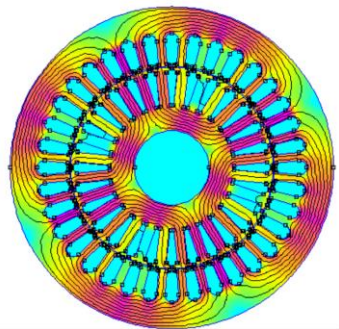
- ❑ Em situações com elevada simetria, a Lei de Ampère permite calcular o módulo da intensidade de campo magnético H ;
- ❑ Além disso, deve-se escolher o laço amperiano adequado;
- ❑ Problemas mais complexos não serão discutidos aqui, pois outras ferramentas matemáticas são necessárias.
- ❑ Simplificação para os problemas típicos da disciplina:

$$H = \frac{Ni}{l}$$

Onde i é a corrente elétrica, N é o número de espiras e l é o comprimento do circuito magnético.



Exemplos de aplicação da lei de Ampère

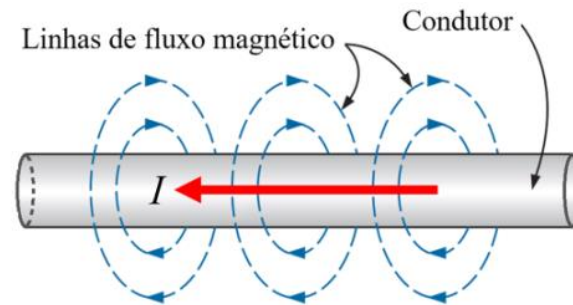


<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



Exemplo 1 – Lei de Ampère

- Utilize a Lei de Ampère para calcular o campo magnético a uma distância r por um fio que conduz uma corrente i ;



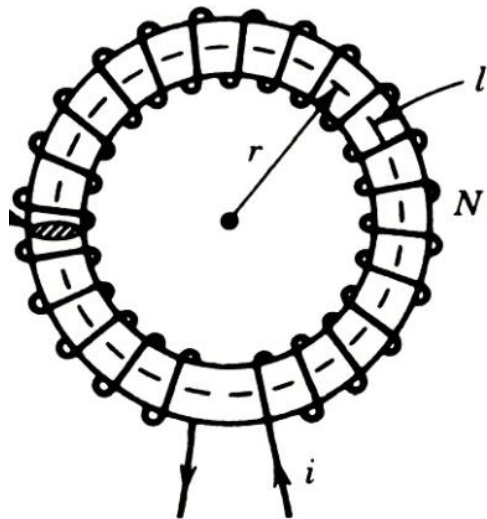
Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

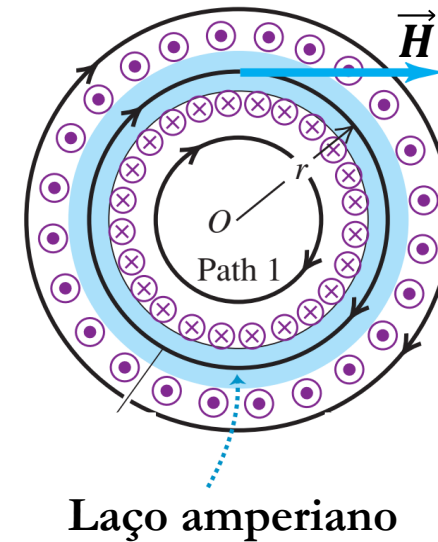
Exemplo 2 – Lei de Ampère

- Exemplo 3: Utilize a Lei de Ampère para calcular o campo magnético no interior de um toróide a uma distância r do centro.

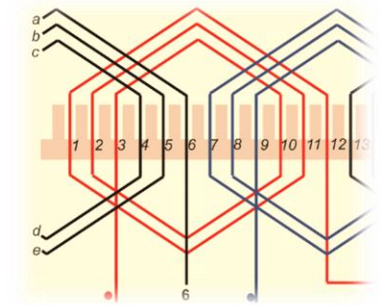
P. C. Sen. “Principles of Electrical Machines and Power Electronics”..



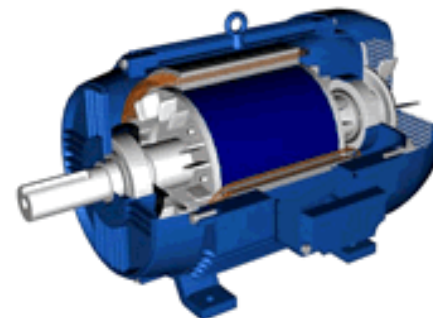
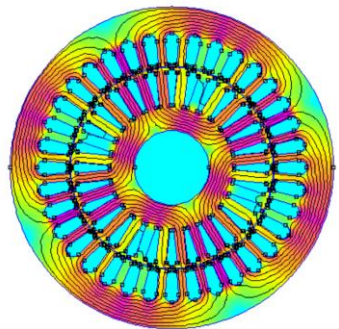
Young and Freedman. “Física III: Eletromagnetismo”..



<http://www.magmattec.com.br/indutores>



Circuito magnético



<http://www.semage.com.br/calternada.php>

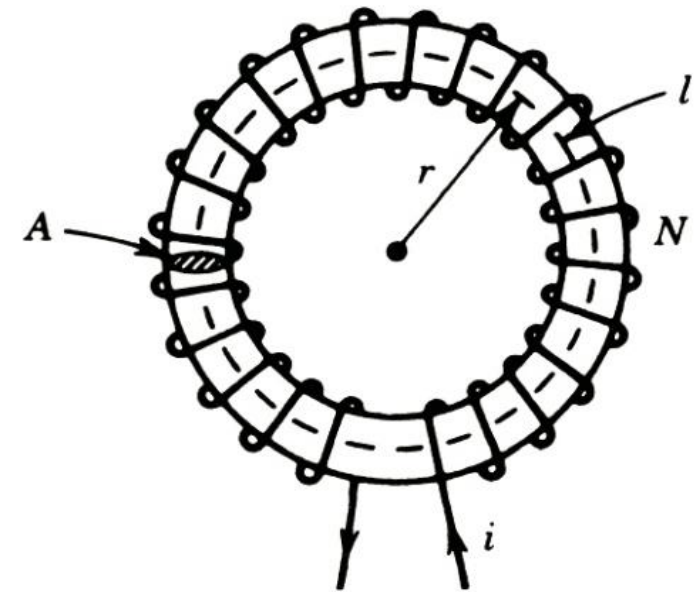


Análise de um Toróide

- ❑ Considere um núcleo magnético toroidal de permeabilidade magnética μ , raio médio r e área de seção reta A . Uma bobina com N espiras construída utilizando-se este núcleo toroidal e é percorrida por uma corrente i . Calcular:
- ✓ A intensidade de campo magnético no interior deste toróide
 - ✓ A densidade de fluxo magnético neste toróide
 - ✓ O fluxo magnético no interior deste toróide



<https://www.mag-inc.com/Products/Powder-Cores/Edge-Cores>



P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..

Solução

□ De acordo com a Lei de Ampère:

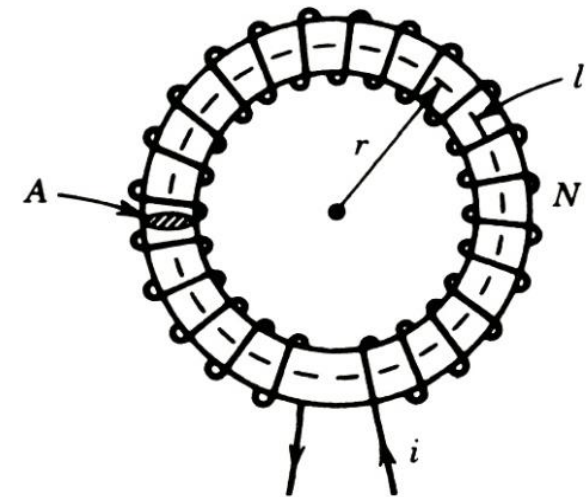
$$H = \frac{N i}{2 \pi r}$$

□ Por sua vez, a densidade de fluxo é dada por:

$$B = \mu H \Leftrightarrow B = \frac{\mu N i}{2 \pi r}$$

□ Finalmente, o fluxo magnético é dado por:

$$\phi = B A \Leftrightarrow \phi = \frac{\mu N i A}{2 \pi r}$$



P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..

Relutância magnética

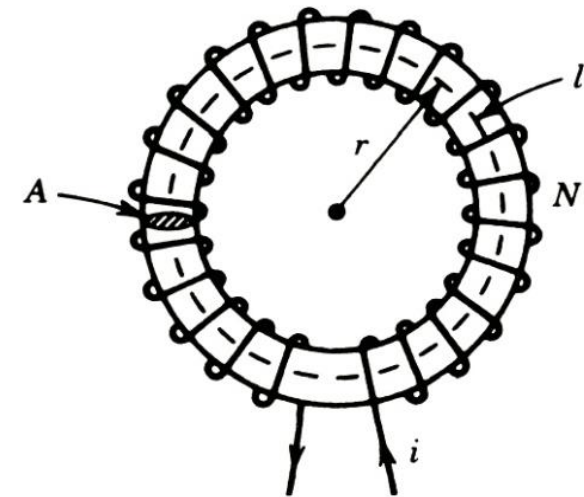
- Assumindo-se que $l = 2 \pi r$ é o comprimento médio do núcleo toroidal, o fluxo magnético pode ser reescrito como:

$$\phi = \frac{\mu N i A}{2 \pi r} \Leftrightarrow \phi = \frac{N i}{l / \mu A} \Leftrightarrow \phi = \frac{N i}{\mathfrak{R}}$$

Onde \mathfrak{R} é denominada a relutância magnética e dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

- Note que a relutância magnética não depende da corrente ou do número de espiras;
- A unidade de relutância magnética é o Ampère espira por Weber (Ae/Wb).



P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..

Equação básica dos circuitos magnéticos

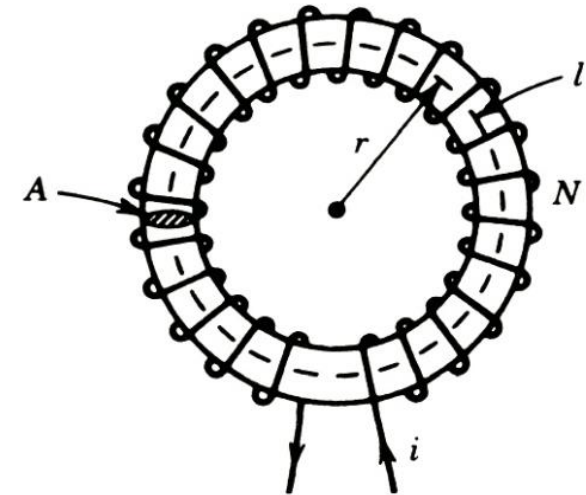
$$Ni = \mathfrak{R}\phi$$

- ❑ O termo $F = Ni$ é denominado força magnetomotriz.
- ❑ Note a semelhança desta equação com a primeira Lei de Ohm:

$$V = Ri$$

- ❑ Note a semelhança da relutância magnética com a resistência elétrica (segunda lei de Ohm):

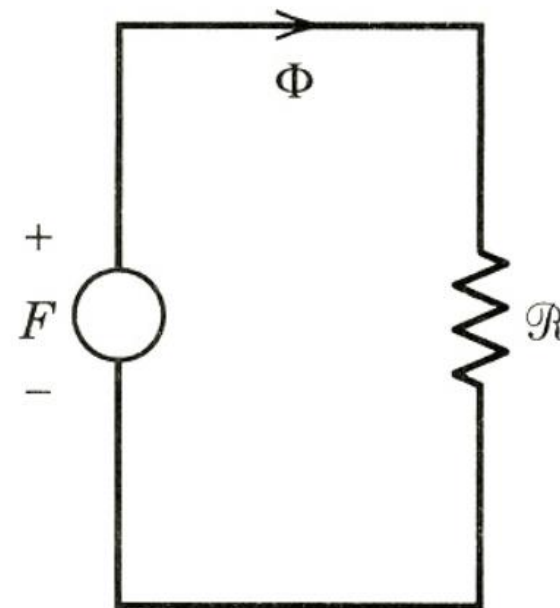
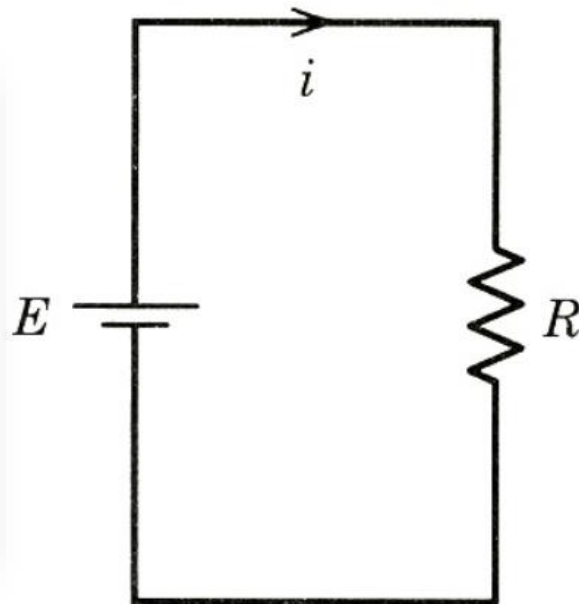
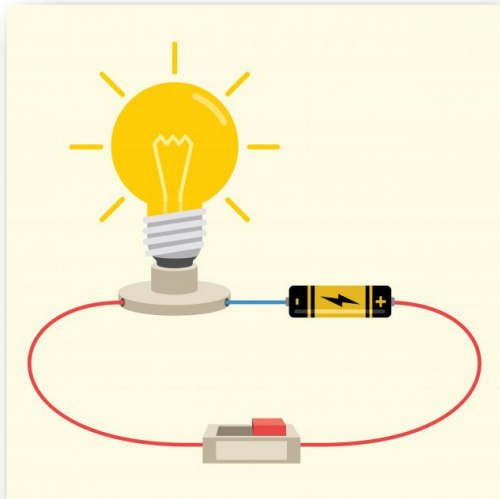
$$R = \frac{l}{\sigma A}$$



P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..

Analogia com circuitos elétricos

Circuitos Elétricos	Circuitos magnéticos
Força eletromotriz V	Força magnetomotriz $F = Ni$
Corrente Elétrica i	Fluxo magnético ϕ
Resistência Elétrica R	Relutância Magnética \mathcal{R}



<https://www.magmattec.com.br/>

P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

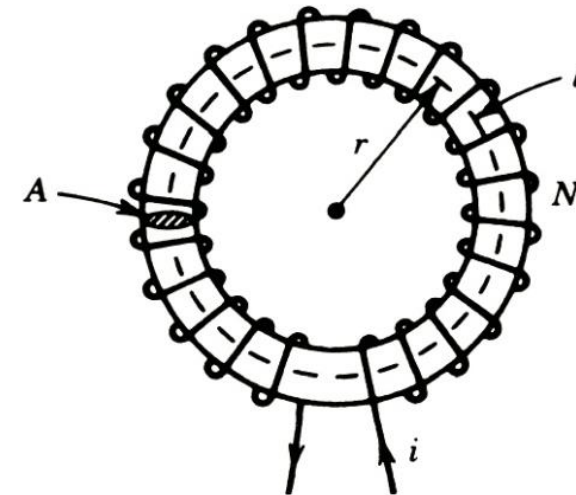
Relação entre relutância magnética e auto-indutância

$$L = \frac{\lambda}{i}$$

- ❑ $\lambda = N\phi$ é o enlace de fluxo ou fluxo concatenado pela bobina.
- ❑ Usando a equação básica de circuitos magnéticos, pode-se obter que:

$$L = \frac{N\phi}{i} = \frac{N}{i} \frac{Ni}{\mathfrak{R}} \Leftrightarrow \boxed{L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}}$$

- ❑ Equação útil para o projeto físico de indutores.



P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..

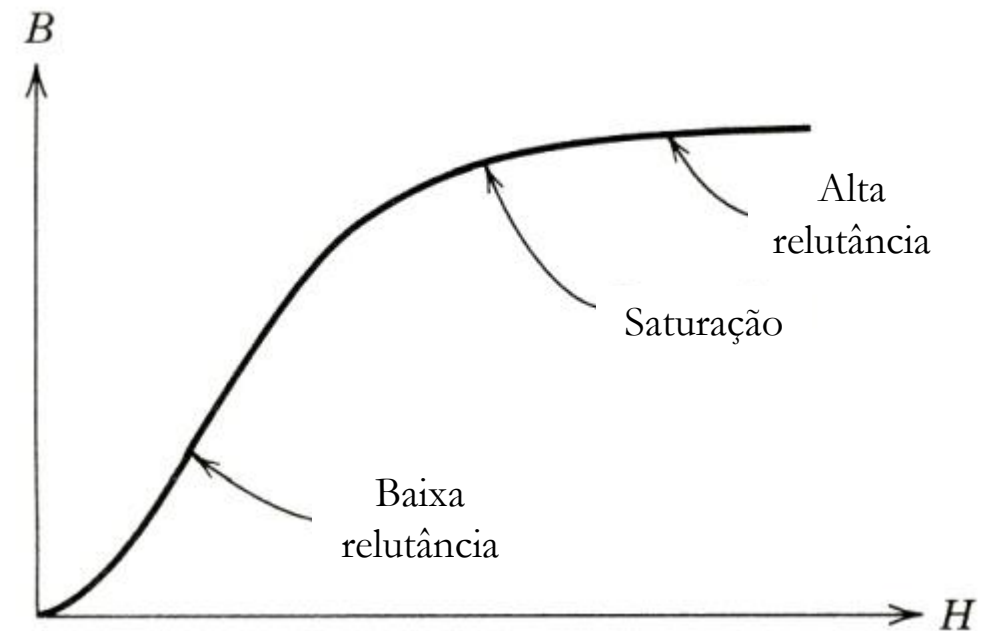
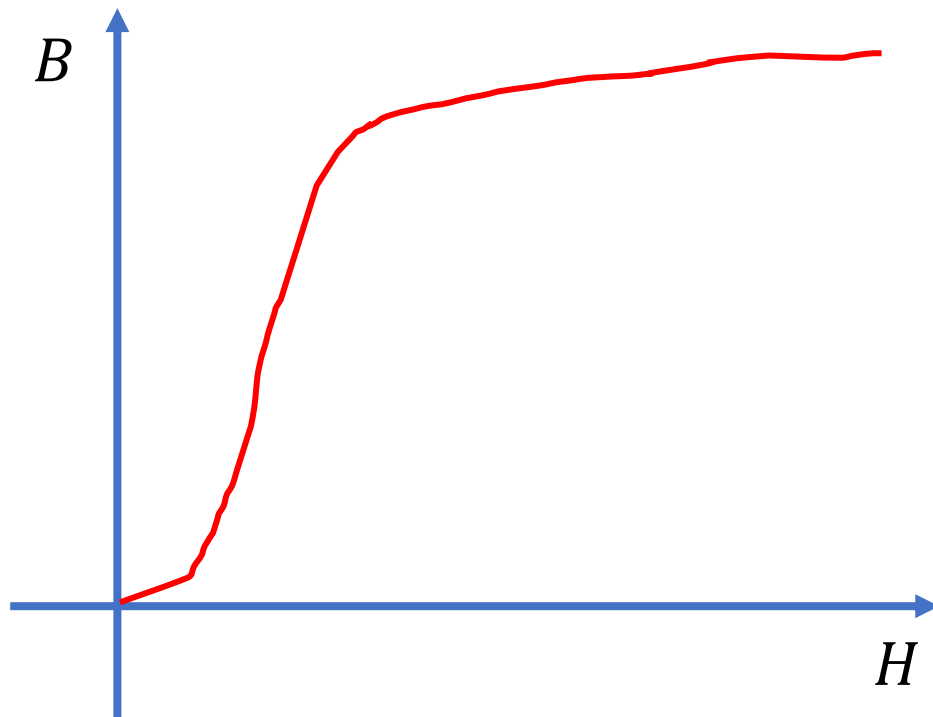


<https://www.ppgce.ufmg.br/defesas/1214M.PDF>

Curva de magnetização x Relutância magnética

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A}$$

❑ Conclusão: Relutância varia de acordo com o ponto de operação.



P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



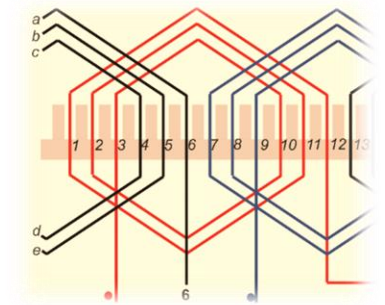
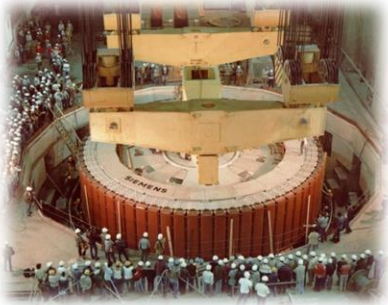
https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



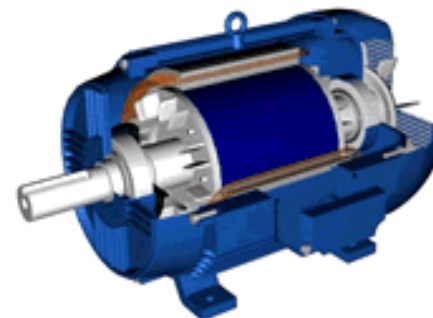
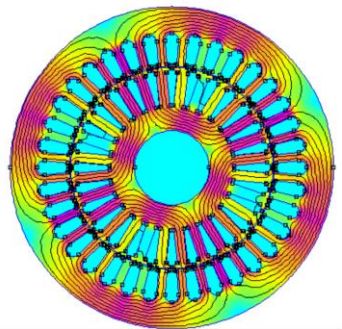
Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>



Circuitos magnéticos com entreferro

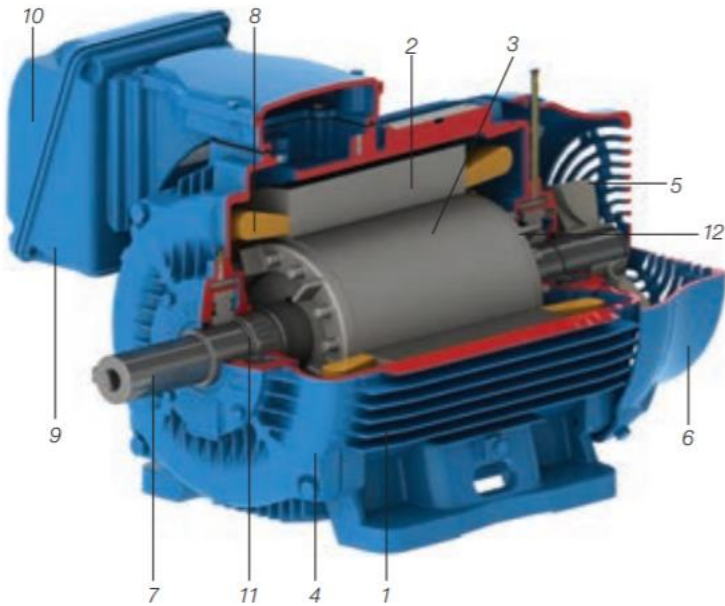


<http://www.semage.com.br/calternada.ph>

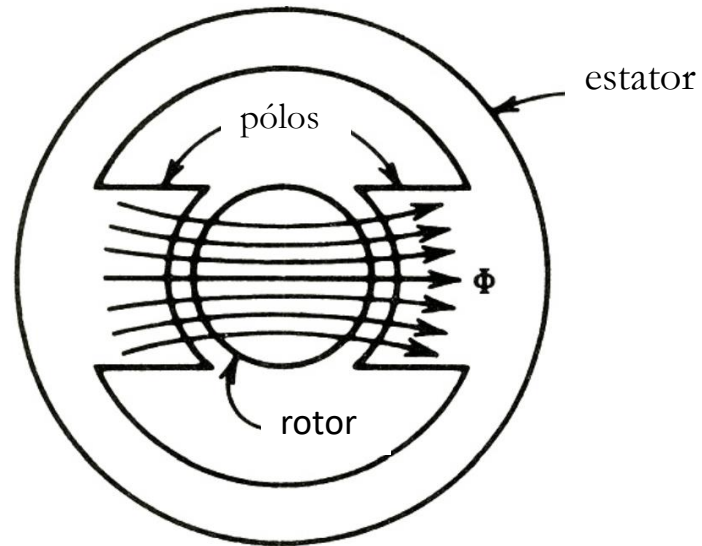


Entreferro

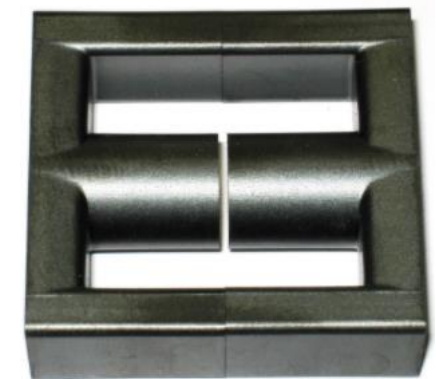
- ❑ Presente em máquinas elétrica rotativas;
- ❑ Inserido propositalmente em indutores para aumentar a linearidade.



WEG. Guia de especificação de motores elétricos

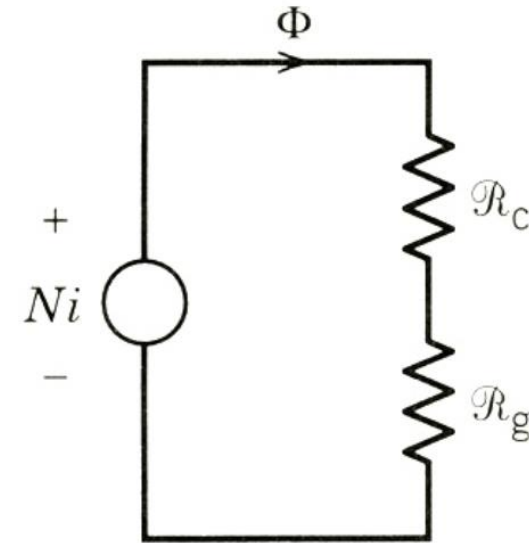
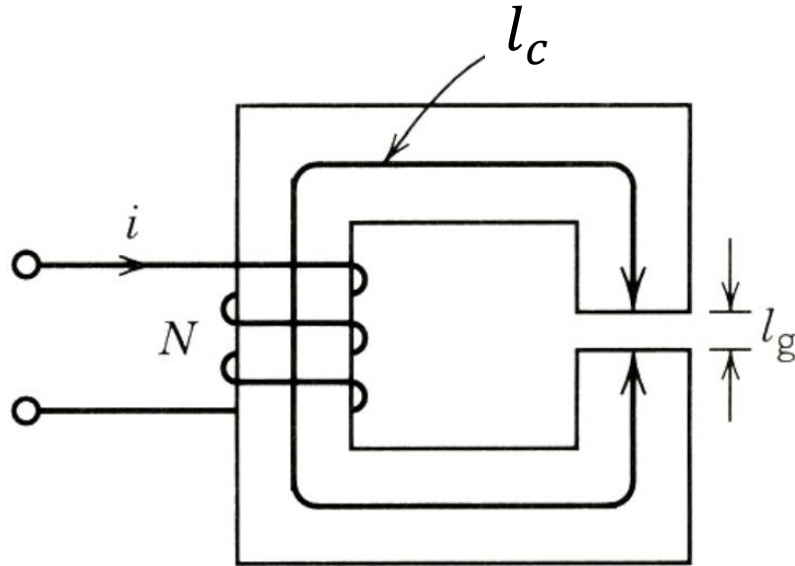


P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..



http://www.encyclopedia-magnetica.com/doku.php/air_gap

Circuito magnético equivalente



$$\phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g}$$

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g$$

$$\mathfrak{R}_c = \frac{l_c}{\mu_c A_c}$$

$$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_g}$$

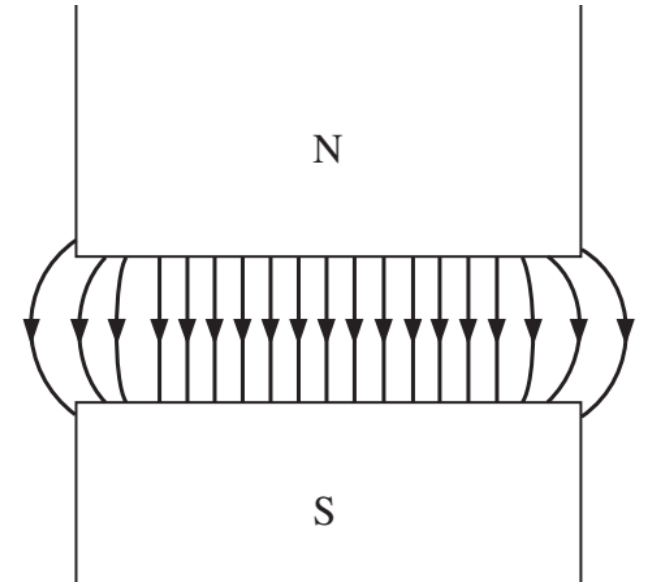
P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics".

Espraiamento

- ❑ Separação das linhas de campo no entreferro;
- ❑ Efeito de aumento de área;
- ❑ Fluxo magnético é o mesmo → Redução da densidade de fluxo

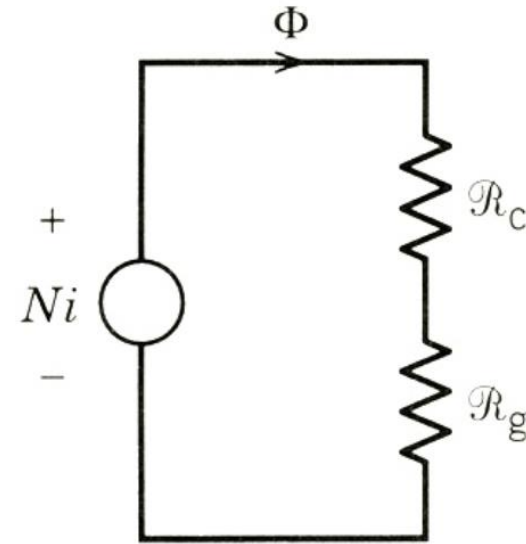
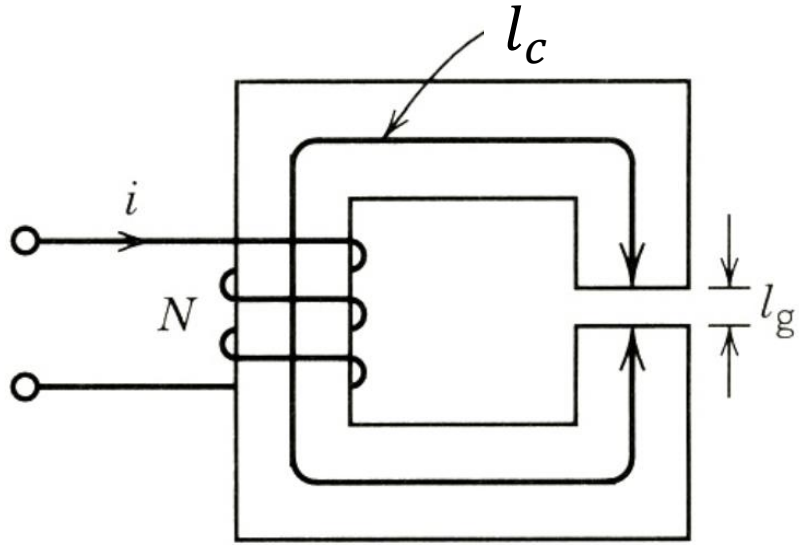
$$B_c = \frac{\phi}{A_c} \qquad B_g = \frac{\phi}{A_g}$$

- ❑ Para um entreferro pequeno, $A_c \approx A_g$ e $B_c \approx B_g$.



S. J. Chapman. "Fundamentos de Máquinas Elétricas".

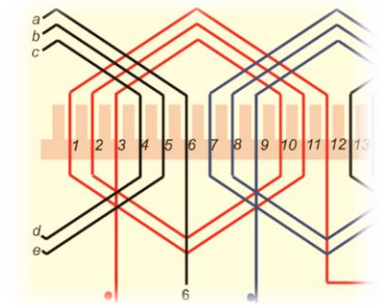
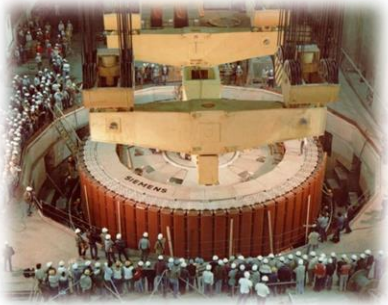
Circuito magnético equivalente



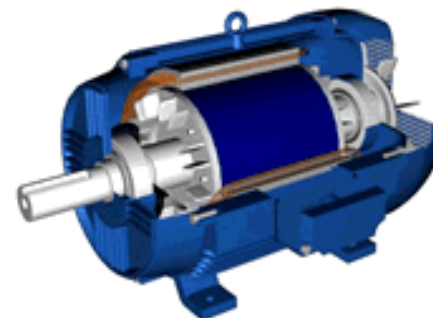
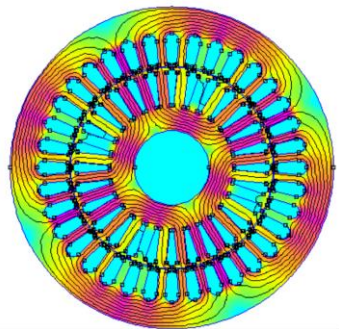
$$\phi = \frac{Ni}{\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g}$$

$$Ni = H_c l_c + H_g l_g$$

Fonte: P. C. Sen. "Principles of Electrical Machines and Power Electronics"..



Simplificações e fontes de erro

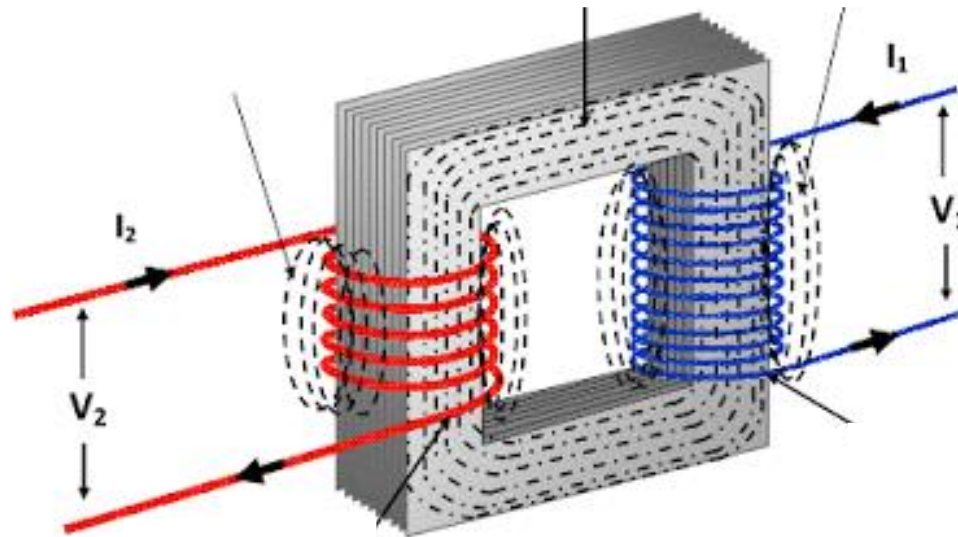


<http://www.semage.com.br/calternada.ph>



Fluxo de dispersão

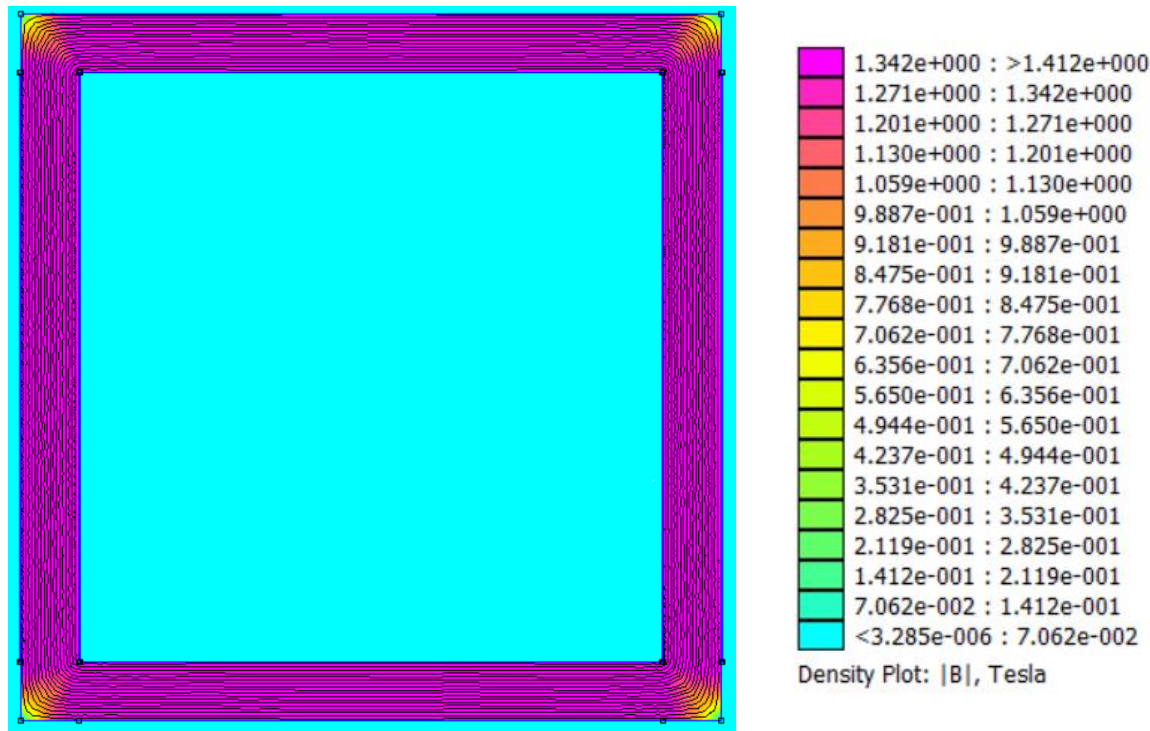
- ❑ Parte das linhas de campo produzidas pela bobina não circulam no interior do núcleo;
- ❑ Permeabilidade do núcleo é supostamente grande mas não é infinita!



<http://www.electricalunits.com/magnetic-leakage-of-transformer/>

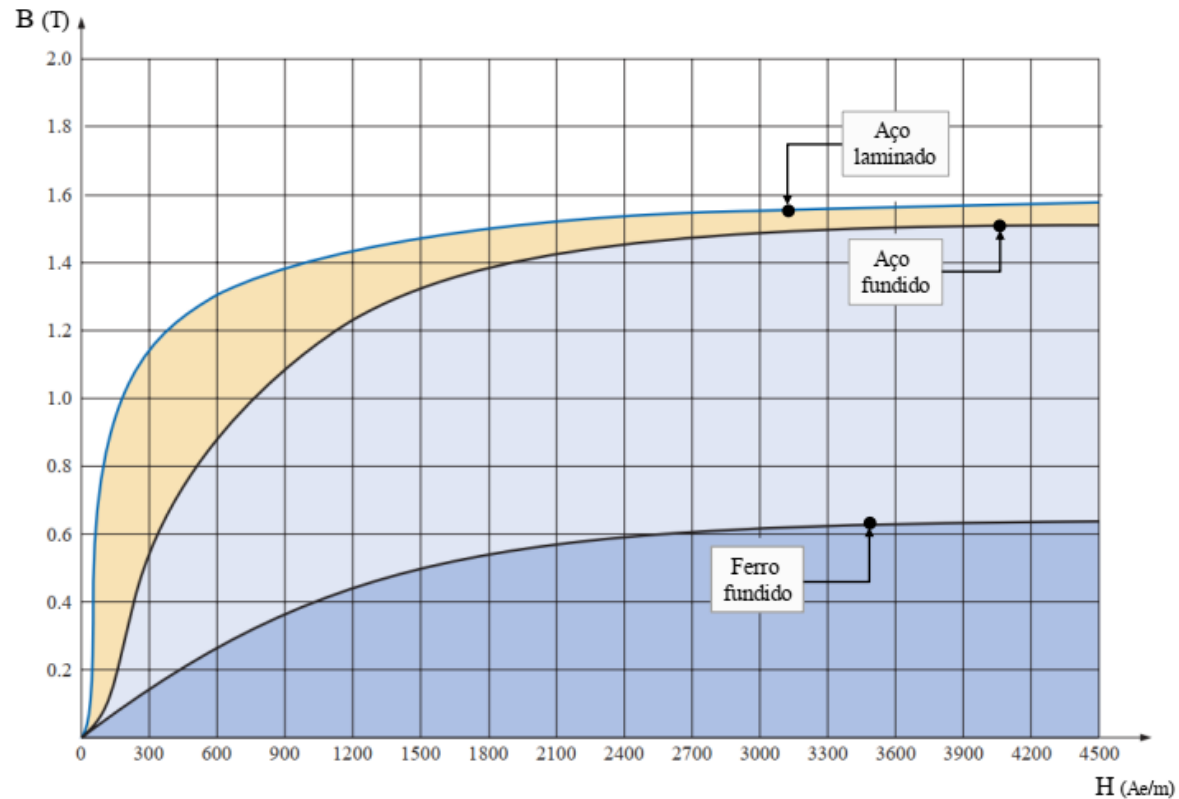
Distribuição das linhas de campo

- ❑ Os cálculos pressupõem que a distribuição de linhas de campo é uniforme;
- ❑ Esta suposição não é muito boa, especialmente nos cantos!

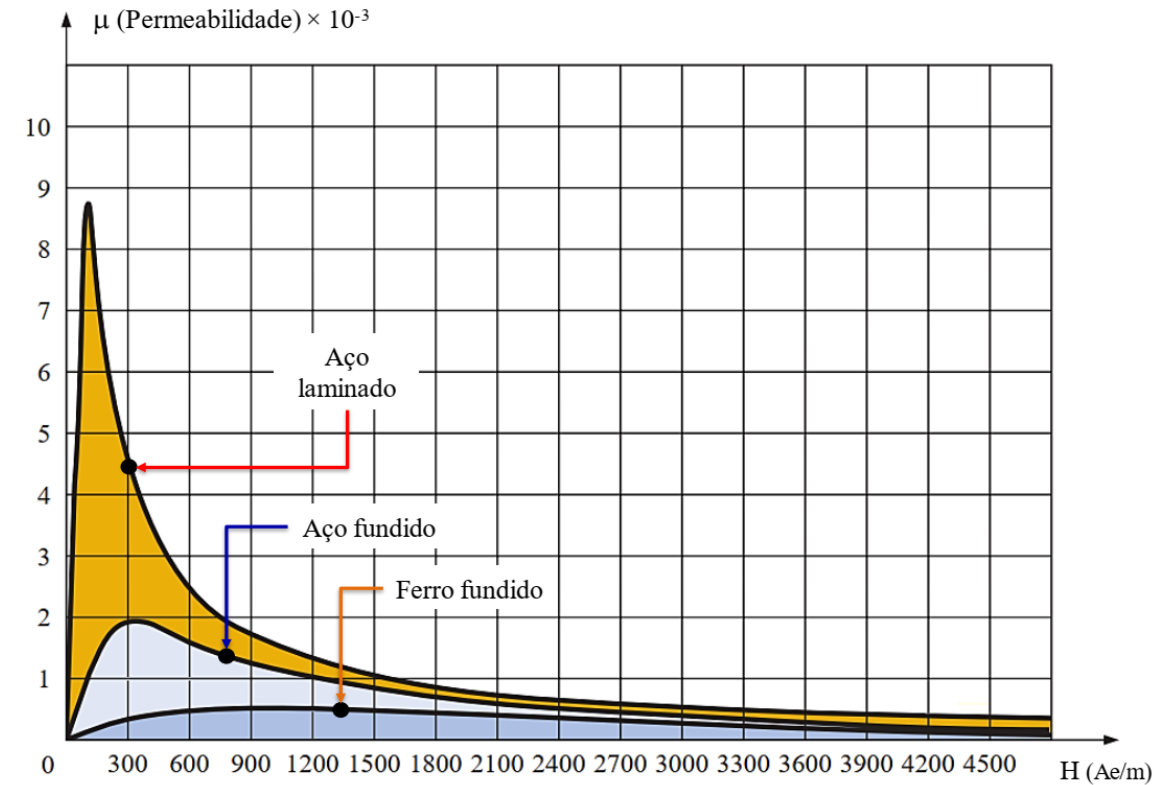


Saturação do material magnético

- Permeabilidade magnética não é constante;



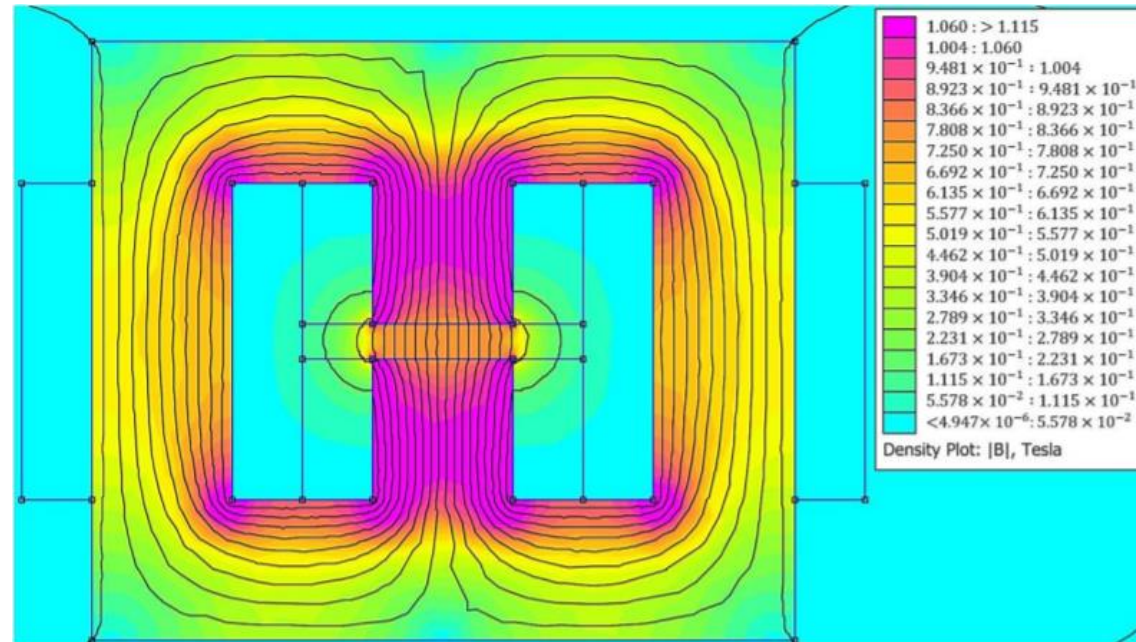
Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.



Boylestad, R. L. . “Introdução a análise de circuitos”.

Efeito do entreferro

- ❑ Fenômeno bastante complexo;
- ❑ Espreadimento modifica a área efetiva do entreferro



Asadi Khanouki, M.; Sedaghati, R.; Hemmatian, M. Multidisciplinary Design Optimization of a Novel Sandwich Beam-Based Adaptive Tuned Vibration Absorber Featuring Magnetorheological Elastomer. *Materials* 2020, 13, 2261.

Conclusões

- ❑ É possível compensar parcialmente as fontes de erro citadas;
- ❑ Isto mantém erros na faixa de 5 %;
- ❑ Aproximação bastante razoável, dada a complexidade da solução de equações de Maxwell;
- ❑ Utilização de softwares é uma solução adotada na indústria.

Obrigado pela Atenção



www.gesep.ufv.br



<https://www.facebook.com/gesep>



https://www.instagram.com/gesep_vicosa/



https://www.youtube.com/channel/UCe9KOSGORXh_hDBIcxMU2Nw



Estimate - Sistemas
Fotovoltaicos



<https://play.google.com/store/apps/details?id=br.developer.gesep.estimate>