

# **SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA**

## **Aula 01**

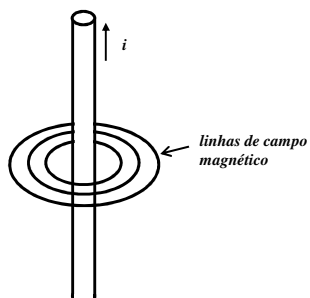
### **Circuitos Magnéticos**

#### **Tópicos da Aula de Hoje**

- Produção de campo magnético a partir de corrente elétrica
- Lei circuital de Ampère
- Intensidade de campo magnético (**H**)
- H em torno de um fio longo
- Lei de Biot-Savart
- H produzido por uma espira
- H produzido por um solenóide
- Densidade de fluxo magnético (**B**)
- Fluxo magnético ( **$\Phi$** )

### Produção de Campo Magnético

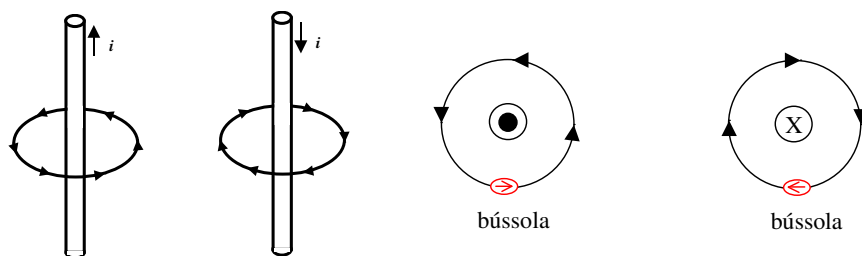
Quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica surge em torno dele um campo magnético.



**Obs:** As linhas de campo magnético são circunferências concêntricas

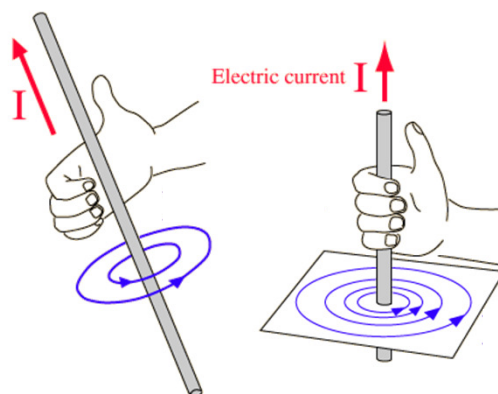
### Produção de Campo Magnético

O sentido do campo magnético pode ser determinado pela regra da mão direita



## Produção de Campo Magnético

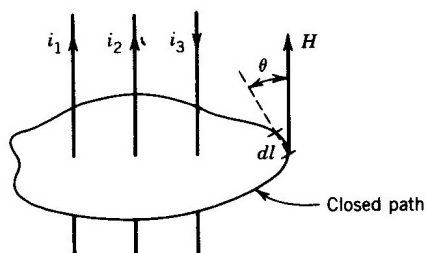
- As linhas de campo são perpendiculares ao condutor



## Intensidade de Campo Magnético

### Lei Circuital de Ampère:

- A integral de linha do vetor intensidade de campo magnético  $\mathbf{H}$  ao longo de um percurso fechado é igual à corrente total (líquida) enlaçada por esta trajetória.

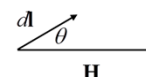


$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^n i_k$$

Obs:

Produto escalar

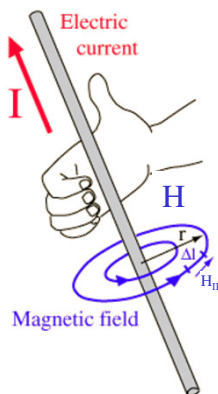
$$\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H \cdot dl \cdot \cos \theta$$



Soma algébrica

$$\sum_{k=1}^n i_k = i_1 + i_2 - i_3$$

### H Produzido por um Condutor Longo



$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^n i_k = i$$

- Para obter H a uma distância  $r$  do condutor, considere um círculo de raio  $r$
- Em cada ponto do círculo  $\mathbf{H}$  e  $d\mathbf{l}$  estão na mesma direção, consequentemente  $\theta = 0$ .
- Por conta da simetria do percurso circular, H será constante.
- Logo:

$$\therefore \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint H dl = H \oint dl = H 2\pi r = i$$

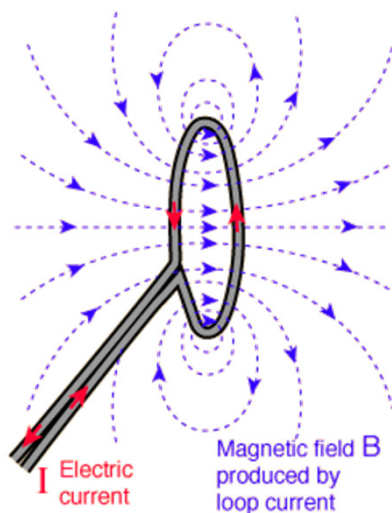
$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

### H Produzido por um Condutor Longo

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

- H é dado em A/m
- H é diretamente proporcional à corrente
- H é inversamente proporcional à distância

### H produzido por uma espira



- Cada elemento infinitesimal da espira percorrido por uma corrente contribui para a produção de campo

- Cada elemento contribui para o campo magnético na mesma direção na região interna da espira (círculo)

- A corrente elétrica em uma espira circular concentra o campo magnético no centro da espira, i.e., o campo magnético é mais intenso na região interna da espira do que na região externa

### H produzido por uma espira

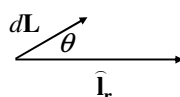
**Lei de Biot-Savart** (dois físicos franceses): também relaciona a intensidade de campo magnético com a corrente que o cria por meio da seguinte equação:

$$d\mathbf{H} = \frac{I d\mathbf{L} \times \hat{\mathbf{r}}}{4\pi r^2}$$

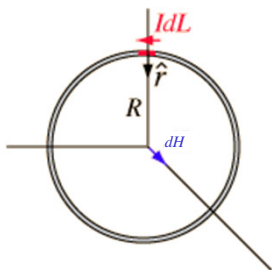
Obs:

Produto vetorial

$$d\mathbf{L} \times \hat{\mathbf{r}} = dL \cdot \hat{\mathbf{r}} \cdot \sin\theta$$



### H produzido por uma espira



- a distância  $d\mathbf{L}$  ao centro é constante ( $R = \text{cte}$ )
- o ângulo  $\theta$  entre o vetor unitário  $\mathbf{r}$  e o elemento de comprimento  $d\mathbf{L}$  é sempre 90 graus

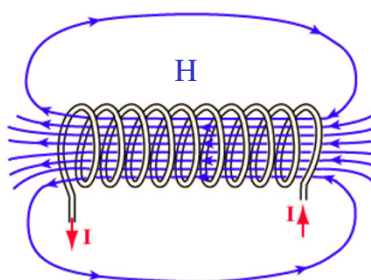
Aplicando-se a lei de Biot-Savart, tem-se

$$d\mathbf{H} = \frac{I d\mathbf{L} \times \hat{\mathbf{r}}}{4\pi R^2} = \frac{IdL \sin\theta}{4\pi R^2}$$

$$\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi R^2} \oint dL = \frac{I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{I}{2R}$$

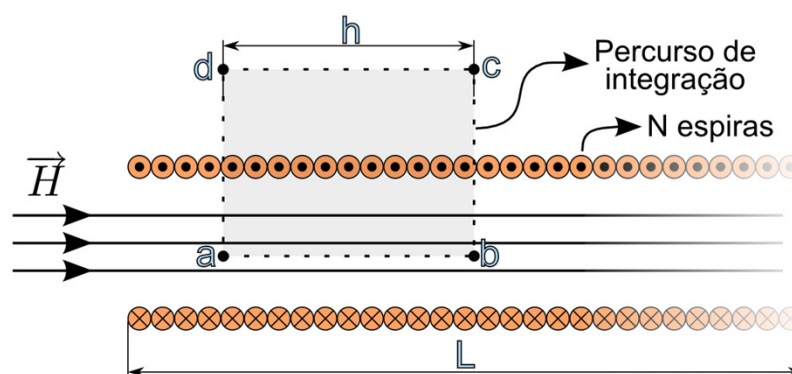
$$\mathbf{H} = \frac{I}{2R}$$

### H produzido por um solenoide (N espiras)

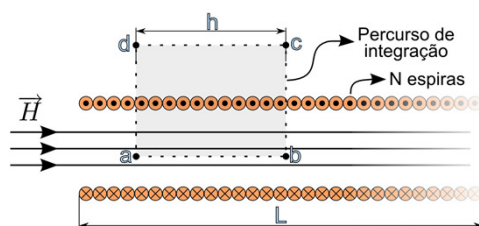


- Em seu interior as linhas de campo são paralelas (campo praticamente uniforme)
- No exterior o campo é fraco e divergente
- Solenoide ideal (distância entre as espiras é zero)
- As linhas externas são espalhadas, enquanto que as internas são concentradas.

### H produzido por um solenóide (N espiras)



### H produzido por um solenóide (N espiras)



Aplicando-se a lei de Ampère ao percurso retangular abcd, tem-se:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_b^c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_c^d \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} + \int_d^a \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\int_a^b \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b H dl \cos 0 = \int_a^b H dl = H \int_a^b dl = H \cdot h$$

$$\int_d^a \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_d^a H dl \cos 90 = 0$$

$$\int_b^c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_b^c H dl \cos 90 = 0$$

$$\int_c^d \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_c^d H dl \cos 90 = 0$$

}  $\longrightarrow$   $\mathbf{H}$  é perpendicular ao percurso de integração

$\int_c^d \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 \longrightarrow \mathbf{H}$  é aproximadamente nulo em todos os pontos externos

### H produzido por um solenóide (N espiras)

Portanto:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Hh$$

A corrente enlaçada (concatenada) pelo percurso de integração é igual a  $i$  (corrente do solenóide) vezes o número de espiras envolvidas:

comprimento	número de espiras	
L	N	
h	X	$\longrightarrow X = \frac{Nh}{L}$

Logo:  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Hh = \frac{Nh}{L} i \longrightarrow H = \frac{Ni}{L} = N_e I$

Em que  $N_e = N/L$  é o número de espiras por unidade de comprimento (ou número efetivo de espiras)

- H é dado em A.esp/m (ou simplesmente Ae/m)
- H é diretamente proporcional à corrente e ao número de espiras

### Densidade de Fluxo Magnético

#### Lei Circuital de Ampère:

- Alternativamente: A integral de linha do vetor densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$  ao longo de um percurso fechado é igual à corrente total (líquida) enlaçada por esta trajetória multiplicada pela permeabilidade magnética  $\mu$  do meio (material)

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu \sum_{k=1}^n i_k = \mu I$$

Em que:  $\mu$  é a **permeabilidade magnética** do meio [Wb/A.m]

$$\left. \oint \frac{\mathbf{B}}{\mu} \cdot d\mathbf{l} = I = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \right\} \begin{array}{l} \checkmark \frac{\mathbf{B}}{\mu} = \mathbf{H} \\ \checkmark \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \end{array}$$

- B [Wb/m<sup>2</sup>] ou [T]
- H Ae/m
- $\mu$  [Wb/A.m]



### Densidade de Fluxo Magnético

$$B = \mu H \quad \text{e} \quad H = \frac{NI}{l} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} B \text{ depende do meio} \\ H \text{ não depende do meio} \end{array}$$

No espaço livre (vácuo), tem-se

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

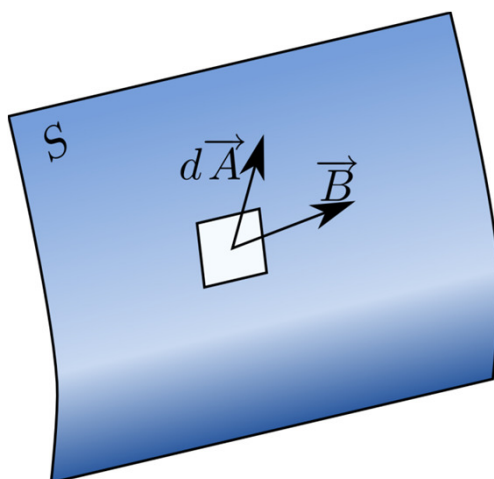
Em que:  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do espaço livre =  $4\pi \times 10^{-7}$  [Wb/A.m]

É comum empregar a **permeabilidade relativa** do meio, dada por:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad [\text{adimensional}]$$

Nos materiais utilizados em máquinas elétricas,  $\mu_r$  usualmente varia de 2000 a 6000.

### Fluxo Magnético



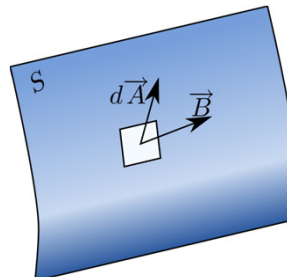
## Fluxo Magnético

- O fluxo elementar do vetor de indução magnética  $\mathbf{B}$  através do elemento de área  $d\mathbf{A}$  é dado por:

$$d\Phi = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

- O fluxo total através de toda a superfície  $S$  é dado por:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

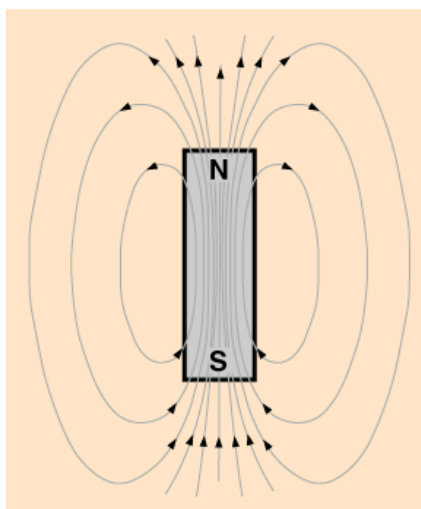


- Se todas as direções de  $\mathbf{B}$  e  $d\mathbf{A}$  coincidem e sendo  $\mathbf{B}$  uniforme (constante em módulo e direção), tem-se:

$$\Phi = BA \quad [\text{Wb}] \quad (1 \text{ Wb} = 10^8 \text{ linhas de campo magnético})$$

## Ímã Permanente

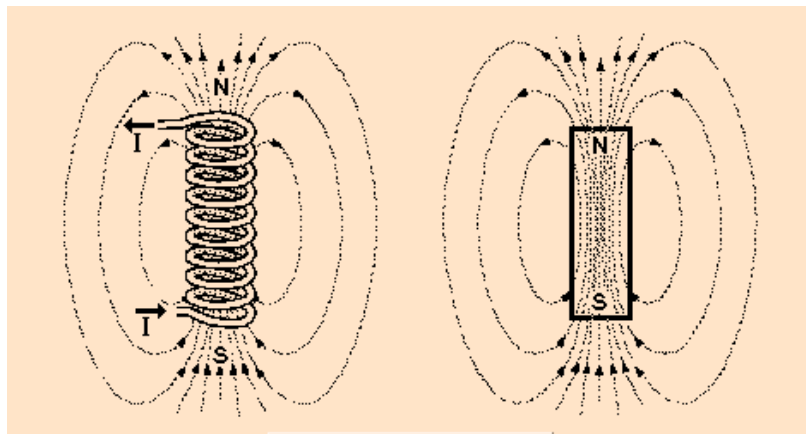
As linhas de campo magnético de um ímã permanente formam caminhos fechados. Por convenção, a direção é admitida como saindo do polo norte e entrando no polo sul.



Ímãs permanentes podem ser fabricados utilizando materiais ferromagnéticos

### Solenóide

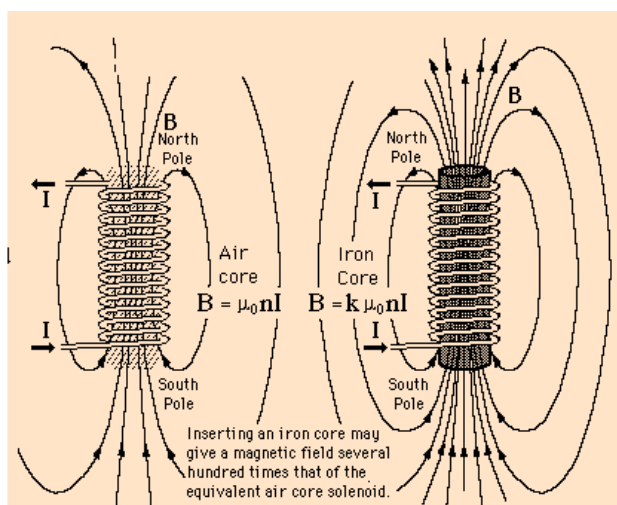
As linhas de campo produzidas por uma corrente elétrica em um solenóide são similares às de um ímã permanente



No entanto, no caso do solenoide, a intensidade do campo magnético pode ser controlada por meio da variação da corrente elétrica

### Solenóide com núcleo de material ferromagnético

Um núcleo de material ferromagnético tem o efeito de multiplicar por centenas ou milhares de vezes o campo magnético de um solenoide comparado com o caso com núcleo de ar.



## Eletroímãs

O efeito resultante é aumentar consideravelmente a densidade de campo magnético resultante.

A densidade de campo do eletroímã é dada por:

$$B = \mu H = \mu NI$$

Em que:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

$\mu$  = é a permeabilidade magnética do material;

$\mu_0$  = é a permeabilidade magnética do vácuo (ar);

$\mu_r$  = é a permeabilidade relativa do material em relação ao vácuo

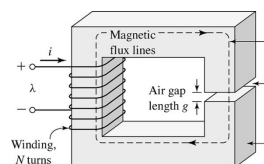
A permeabilidade relativa do material é responsável pelo efeito multiplicador produzido pelo núcleo de material ferromagnético na densidade de campo resultante.

**Qual a sua aplicação no contexto de conversão eletromecânica de energia?**

## Eletroímãs x Ímãs Permanentes

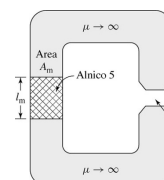
**Eletroímã:**

- Facilidade para controlar o campo produzido (vantagem)
- Possibilidade de ocorrência de curtos-circuitos (desvantagem)
- Energização de parte móveis – desgastes dos contatos, faiscamento (desvantagem)
- Praticamente todas as máquinas de grande porte utilizam eletroímãs (baixo custo de produção)
- Magnetismo está presente enquanto há passagem de corrente elétrica. Durante esse processo o eletroímã aquece, porém o magnetismo não é alterado pelo calor



**Ímã permanente:**

- Não é possível controlar o campo produzido (desvantagem)
- É mais robusto do ponto de vista que não há possibilidade de ocorrência de curtos-circuitos e necessidade de energização de partes móveis (vantagem)
- Baixa robustez mecânica
- Alto custo de produção (desvantagem)
- Campo magnético é retido no material após ser magnetizado por corrente. O ímã permanente não produz calor, porém caso você o aqueça ele poderá perder com o tempo suas características magnéticas.
- Maior aplicação em máquinas de menor porte



### **Próxima Aula**

- Curva de magnetização
- Curva de permeabilidade
- Laço de histerese
- Susceptibilidade e permeabilidade magnética
- Força magnetomotriz
- Relutância
- Analogia entre circuitos elétricos e magnéticos
- Circuitos magnéticos com entreferro
- Espraiamento