

Conversão de Energia I

Capitulo 4 – Princípios
da conversão
eletromecânica da
energia;

1. Introdução

- De uma forma bastante simplificada podemos tratar os motores com os conceitos de repulsão/atração entre polos magnéticos;
- Contudo, o que realmente explica o funcionamento dos motores é o conceito da ação dos campos magnéticos sobre as correntes;
- Avalia-se que de 70 a 80% da energia elétrica consumida pelo conjunto de todas as indústrias seja transformada em energia mecânica através de motores elétricos;
- Admitindo-se um rendimento médio da ordem de 85% do universo de motores em aplicações industriais, cerca de 15% da energia elétrica industrial transforma-se em perdas nos motores.

- mesmo que ímãs permanentes sejam frequentemente usados, principalmente em pequenos motores, pelo menos alguns dos 'ímãs' de um motor devem ser 'eletroímãs'
- Um motor não pode funcionar se for construído exclusivamente com ímãs permanentes, não só não haverá o torque inicial para 'disparar' o movimento, se eles já estiverem em suas posições de equilíbrio, como apenas oscilarão, em torno dessa posição, se receberem um 'empurrão' externo inicial

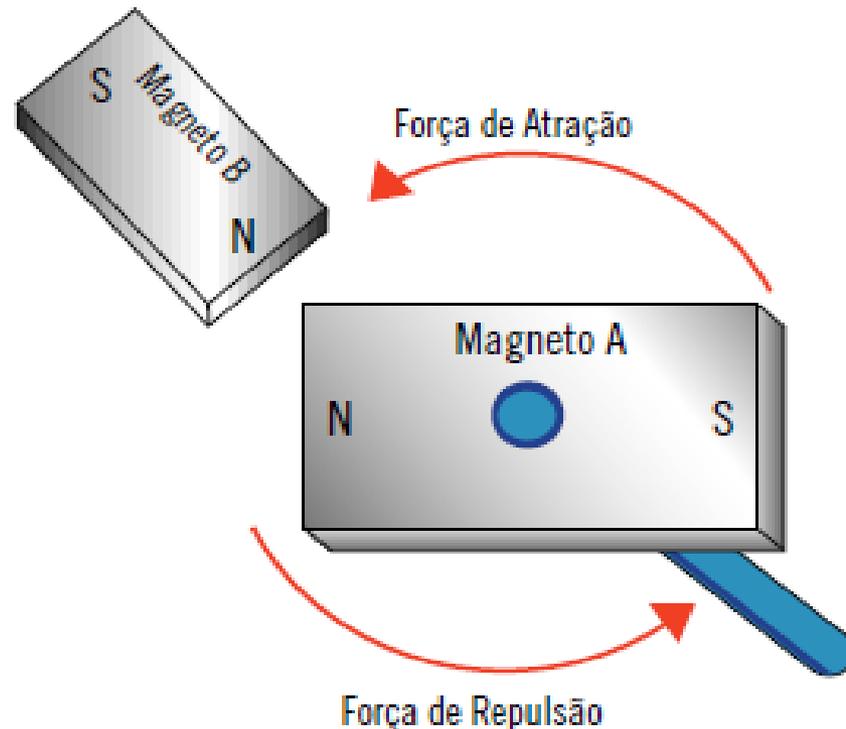
- As máquinas elétricas rotativas são equipamentos destinados a converter energia mecânica em energia elétrica, ou vice-versa;
- No primeiro caso elas recebem o nome de *motores elétricos* e, no segundo, *geradores elétricos*;
- O processo de conversão se realiza por meio dos fenômenos estudados e consolidados pelas leis fundamentais da eletricidade e do magnetismo:
 - Lei da indução eletromagnética, Lenz-Faraday
 - Lei do circuito elétrico, lei de Kirchhoff
 - Lei circuital do campo magnético, lei de Ampère

- As máquinas elétricas são projetadas e construídas de forma tal a realizarem com a máxima facilidade e eficiência possíveis o processo de conversão. Elas possuem, basicamente duas partes:
 - Uma parte que é fixada ao solo ou a alguma outra superfície, chamada de *estator*
 - Uma parte móvel montada sobre um eixo, alojada no interior do estator de forma a permitir sua rotação, chamada *rotor*.

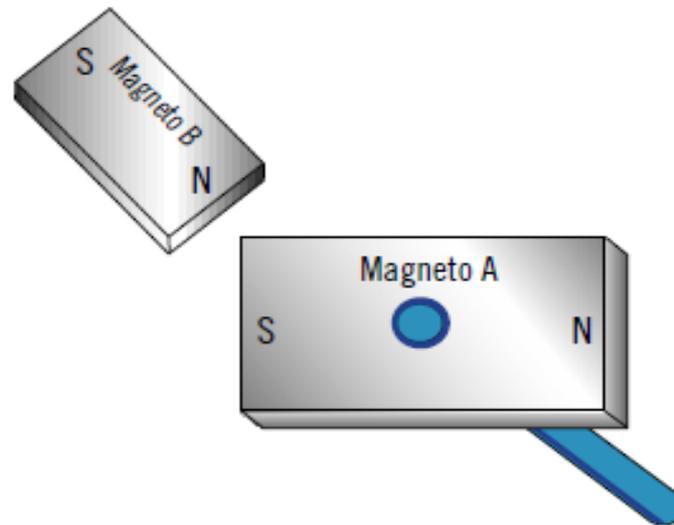
2. Produção de energia mecânica com campos magnéticos

- Um campo eletromagnético se comporta como um campo magnético que ocorre naturalmente;
- Ambos os tipos de campo possuem polos norte e sul;
- Os polos opostos dos campos magnéticos se atraem e os polos iguais dos campos eletromagnéticos se repelem, da mesma forma que no exemplo da barra magnética.

- O Ímã A está montado sobre um eixo que gira livremente;
- Quando o polo norte do Ímã B é colocado próximo ao polo norte do Ímã A, a força magnética de repulsão entre os dois pólos norte afasta o polo norte do Ímã.



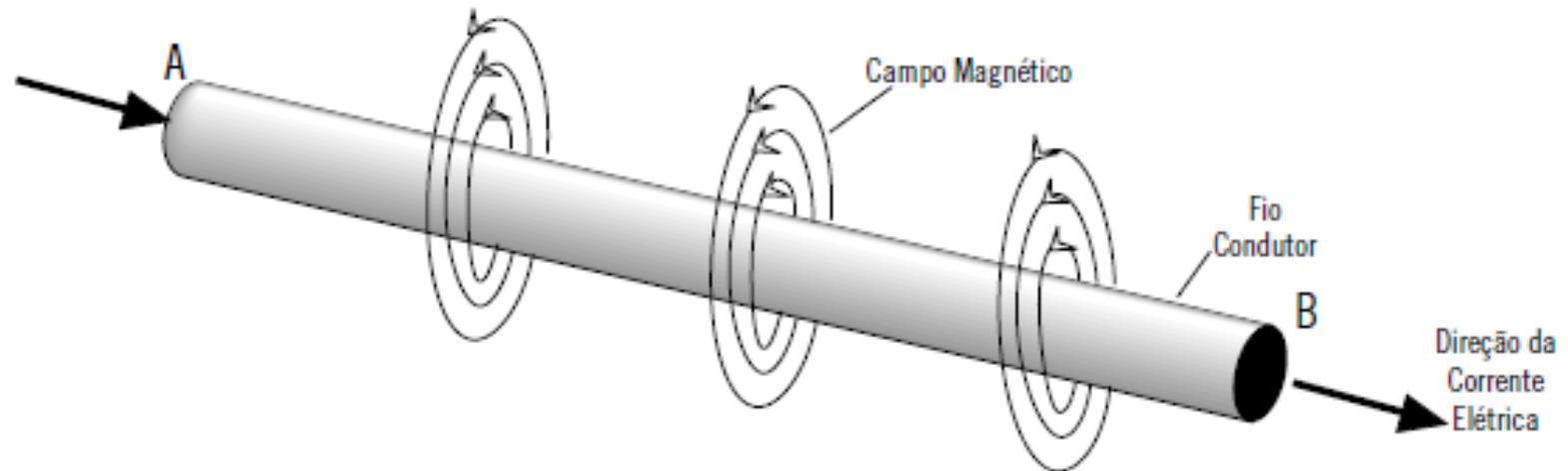
- O Ímã A gira. A força de atração entre os polos norte do Ímã B e o polo sul do Ímã A faz com que este continue a girar, até que seu polo sul esteja mais perto do polo norte do Ímã fixo;
- A rotação do Ímã A é a energia mecânica produzida pela interação das forças magnéticas entre os Ímãs A e B.



3. Campo eletromagnético produzido pela corrente passando através de um fio

- Já vimos que os campos magnéticos podem ser produzidos usando a eletricidade;
- *Estes campos magnéticos produzidos por corrente elétrica são denominados **campos eletromagnéticos**;*
- Os motores elétricos usam eletroímãs ao invés dos ímãs naturais porque:
 - Os eletroímãs podem produzir e variar as forças de atração e repulsão milhares de vezes mais fortes do que aquelas produzidas pelos ímãs naturais e;
 - Os eletroímãs podem ser ligados e desligados, enquanto os ímãs naturais possuem um campo magnético permanente.

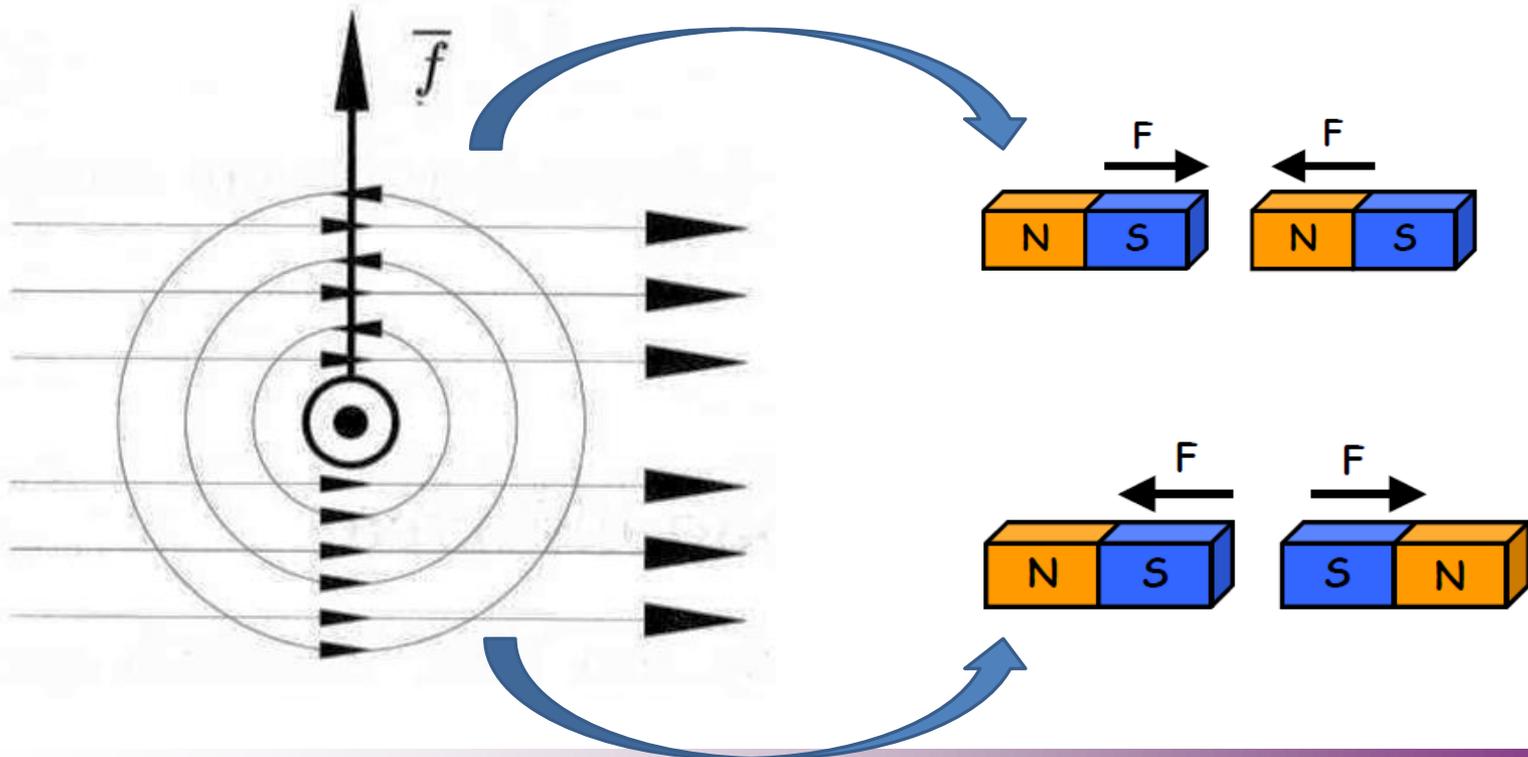
- A corrente passando através de um condutor, como um fio de cobre, gera um campo eletromagnético em volta do fio;
- Não há polos norte e sul verdadeiros, pois o campo foi produzido por um ímã circular. Porém, se pudéssemos produzir um intervalo no campo magnético, apareceriam os polos norte e sul.



3. Força Eletromagnética

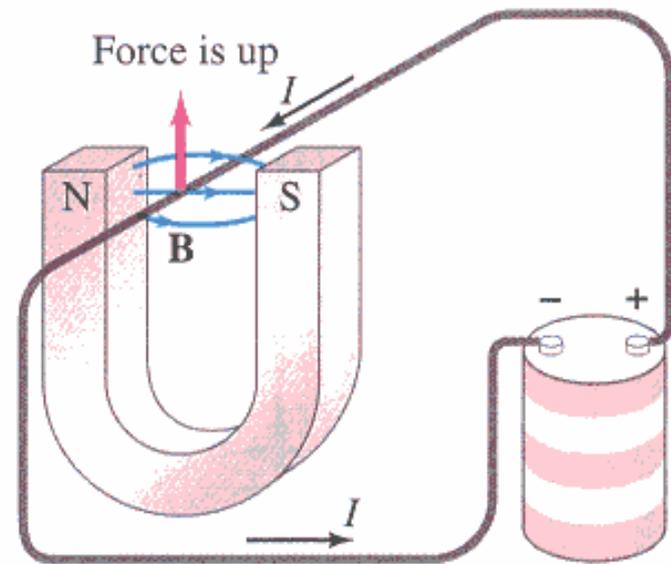
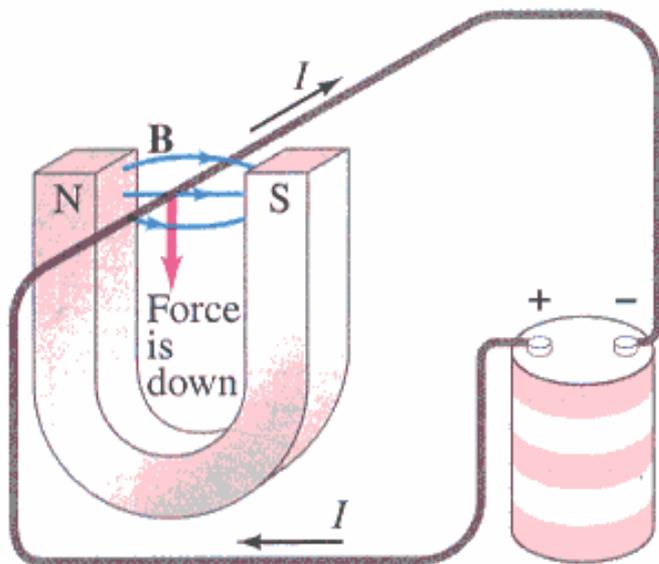
- Cargas elétricas em movimento (corrente elétrica) criam um campo eletromagnético;
- Vimos que este campo exerce uma força magnética na agulha de uma bússola, por exemplo;
- Pela terceira lei de Newton (ação e reação), podemos esperar que o reverso seja verdadeiro, ou seja, que um campo magnético de um ímã exerça uma força em um condutor conduzindo corrente.
- Estando as cargas elétricas em movimento e inseridas em um campo magnético, há uma interação entre esse campo e o campo originado pelas cargas em movimento. Essa interação manifesta-se por forças que agem na carga elétrica. Estas forças são denominadas **forças eletromagnéticas**.

- Desta forma:
- Um condutor percorrido por corrente elétrica, imerso em um campo magnético, sofre a ação de uma força eletromagnética.



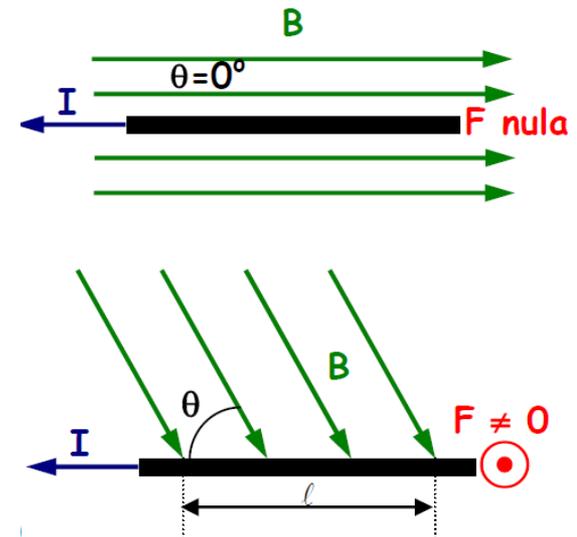
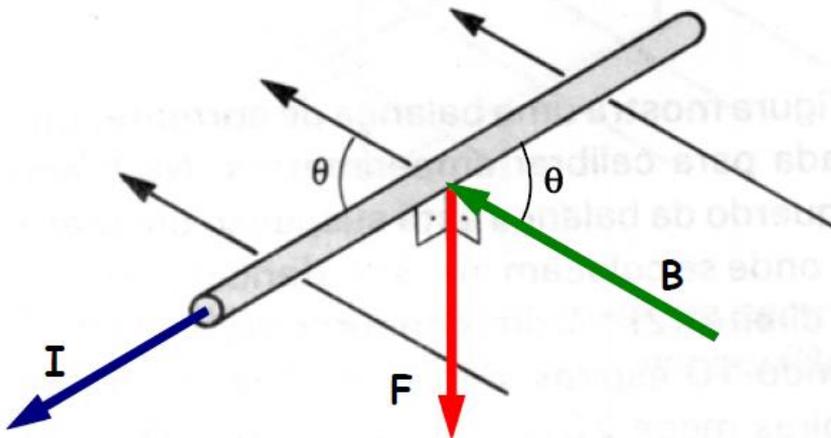
Força eletromagnética sobre um condutor retilíneo

- A força age na direção perpendicular às linhas de campo.



- Experimentalmente podemos conferir que, se aumentarmos a intensidade da corrente I , aumentaremos a intensidade da força F exercida sobre o condutor;
- Da mesma forma, um campo magnético mais intenso (maior densidade B) provoca uma intensidade de força maior devido à maior interação entre os campos magnéticos;
- Também pode ser comprovado que, se o comprimento L ativo do condutor sob a ação do campo (atingido pelas linhas de campo) for maior, a intensidade da força sobre ele será maior.

- A intensidade da força eletromagnética exercida sobre o condutor também depende do ângulo entre a direção da corrente e a direção do vetor densidade de campo magnético, como mostra a figura abaixo.
- Quando o campo for perpendicular à direção da corrente, a força exercida sobre o condutor será máxima. Quando o campo e a corrente tiverem a mesma direção a força sobre o condutor será nula.



- Isso significa que a intensidade da força eletromagnética F exercida sobre o condutor é diretamente proporcional à:
 - densidade do campo magnético B
 - à intensidade de corrente elétrica que percorre o condutor;
 - ao comprimento longitudinal do condutor;
 - ao ângulo de incidência das linhas de campo no condutor.
- O **módulo do vetor força magnética** que age sobre o condutor pode ser dado por:

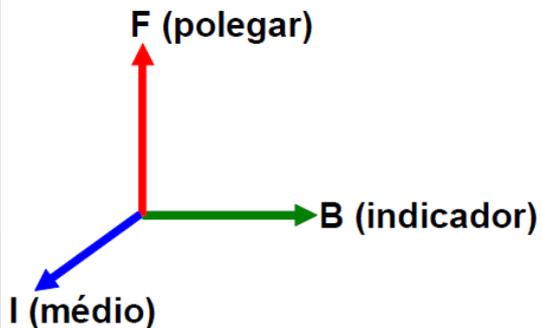
$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \text{sen}\theta$$

onde:

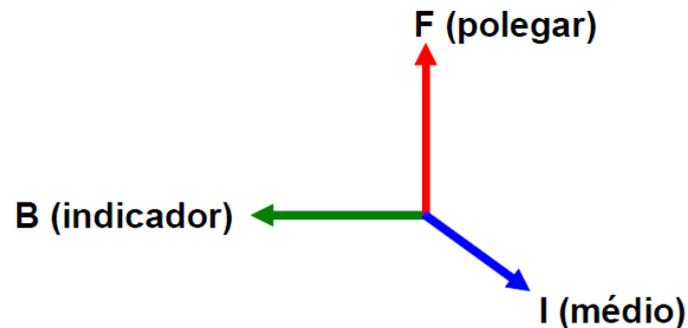
- F – intensidade do vetor força eletromagnética [N];
- B – densidade de campo magnético ou densidade de fluxo magnético [T];
- l - comprimento ativo do condutor sob efeito do campo magnético [m];
- θ - ângulo entre as linhas de campo e a superfície longitudinal do condutor [° ou rad]

REGRA DE FLEMING –Mão Esquerda

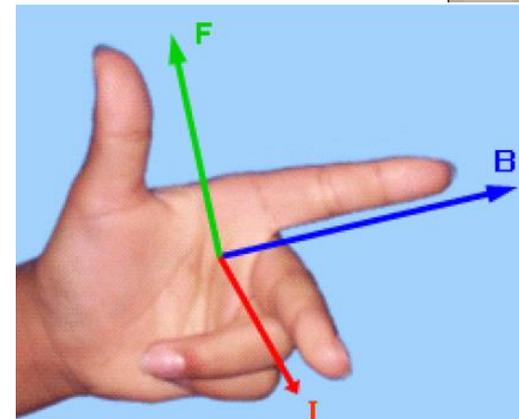
- A direção e o sentido da força que o condutor sofre, são determinadas pela REGRA DE FLEMING – para a Mão Esquerda → ação Motriz (isso devido a ação da força que tende a provocar movimento)
 - Dedo POLEGAR → sentido da FORÇA MAGNÉTICA, F ;
 - Dedo INDICADOR → sentido do VETOR CAMPO MAGNÉTICO, B ;
 - Dedo MÉDIO → sentido da CORRENTE, I .



(a) Ação Motriz: mão esquerda

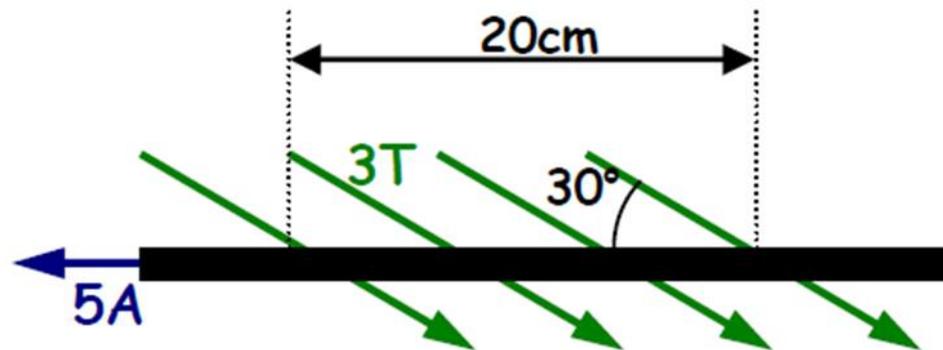


(b) Ação Geradora: mão direita



Exercício 1

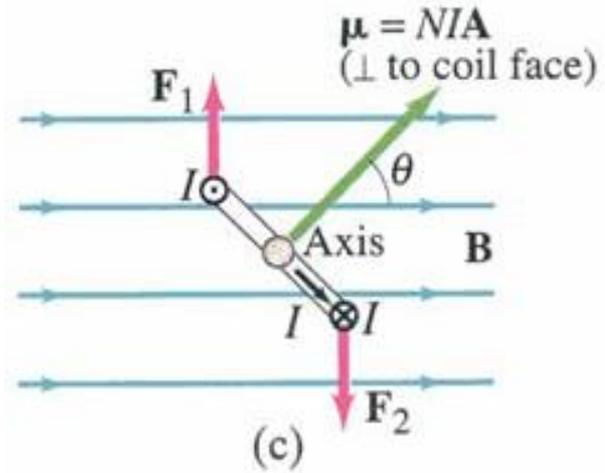
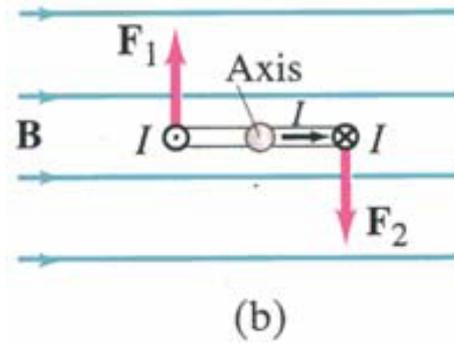
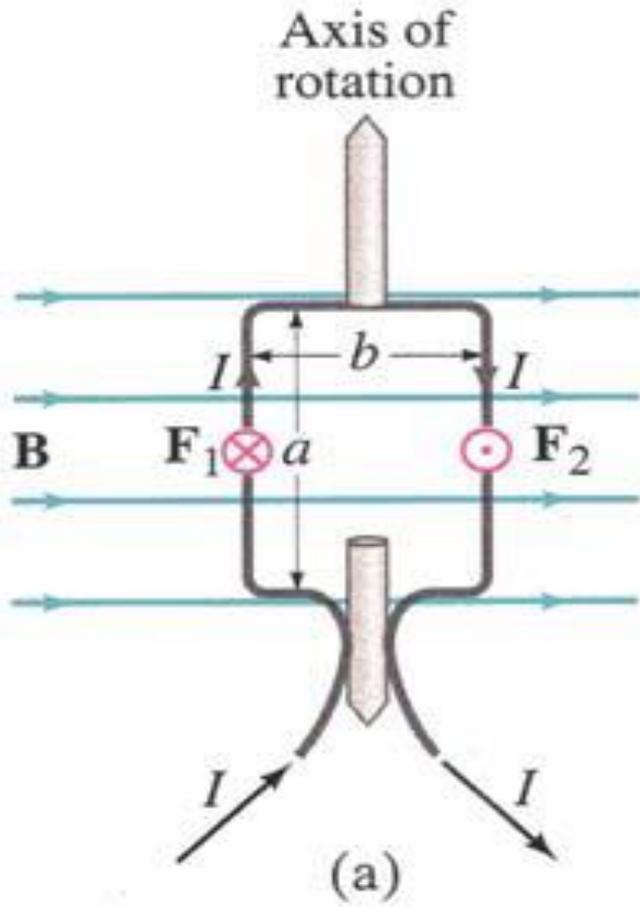
Um condutor retilíneo é percorrido por uma corrente elétrica de 5 A e está com 20 cm de seu comprimento longitudinal imerso em um campo magnético uniforme de 3 T, fazendo um ângulo de 30° . Determine o vetor força eletromagnética resultante (módulo, direção e sentido). (Resp. $F=1,5$ N)



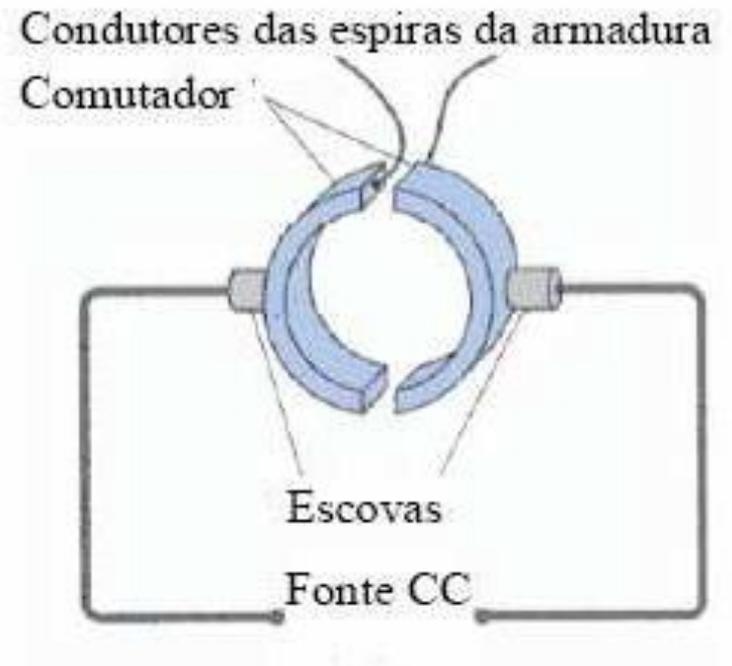
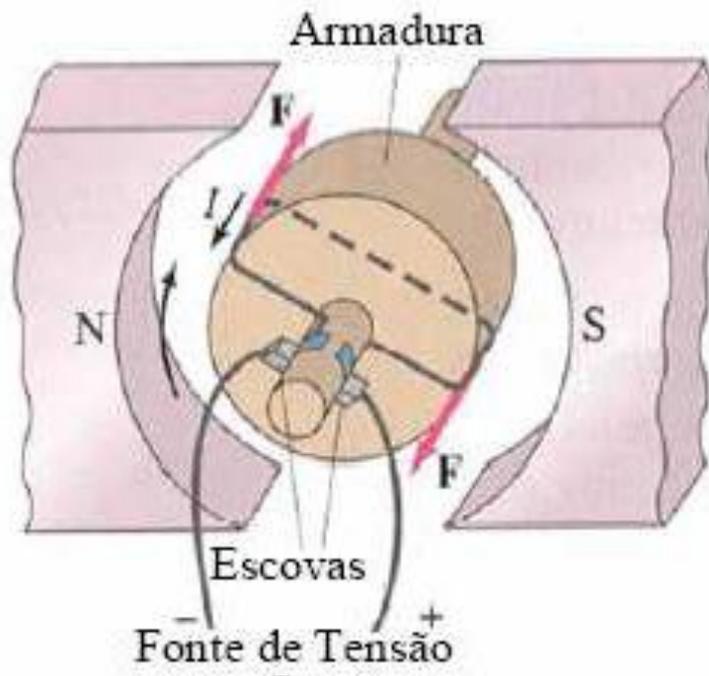
5. Torque de giro de uma espira

- Uma espira condutora livre pode girar em torno do seu eixo, quando:
 - submetida a um campo magnético; e
 - percorrida por corrente elétrica sofre um torque de giro.
- Na figura a seguir, podemos observar que os condutores da espira percorridos por corrente I (no sentido horário na espira) e submetidos a uma densidade de campo magnético B (no sentido indicado, para a direita) sofrem a ação de forças magnéticas cujos sentidos são dados pela regra de Fleming (mão esquerda – ação motriz). A composição dos vetores produz um torque girante.

- Torque, momento ou momento de força, é a tendência de uma força para girar um objeto em torno de um eixo;
- Assim como a força é um empurrão ou um puxão, um torque pode ser pensado como um toque para um objeto;
- Matematicamente, o torque é definido como o produto da distância transversal do braço de alavanca e da força, que tende a produzir a rotação.

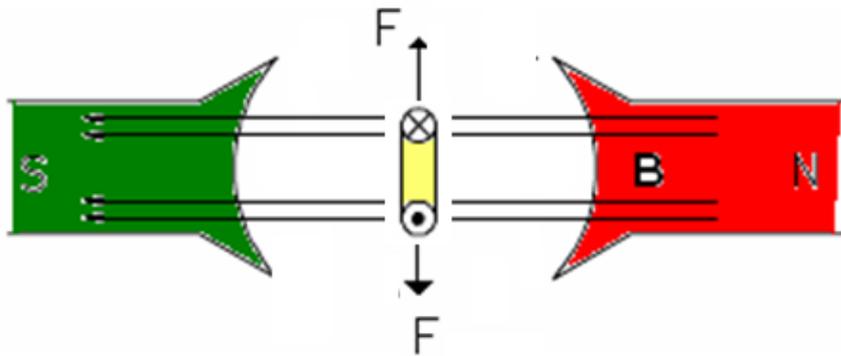


O motor rudimentar



<http://www.youtube.com/watch?v=SKEuxLlyNh8>

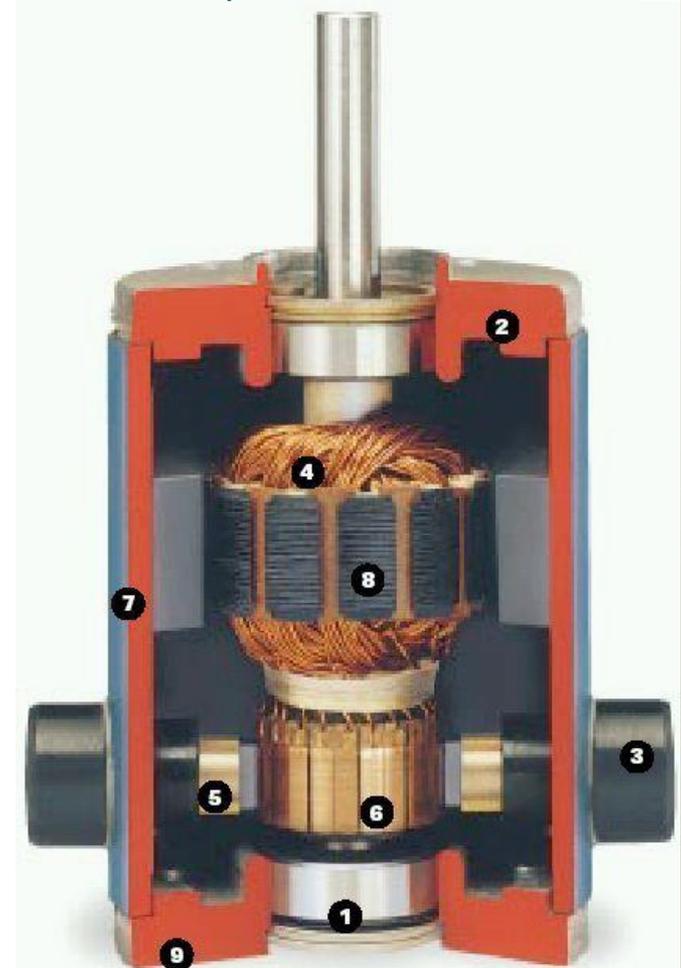
Quando a força na espira não proporciona movimento é necessário inverter o sentido da corrente para manter o movimento.



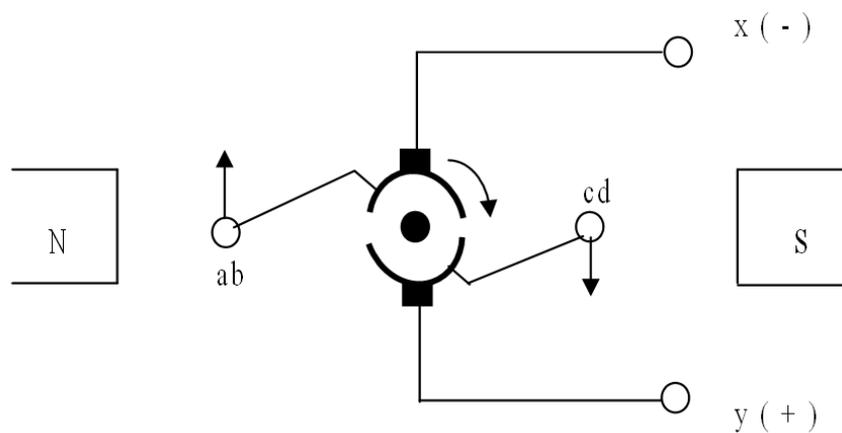
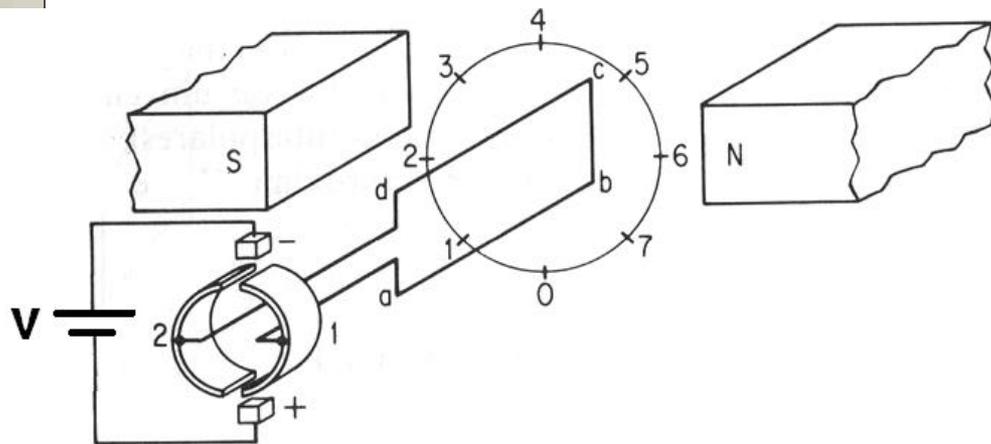
Ao lado temos um motor de corrente contínua com ímã permanente no estator.

6) Representa o comutador formado por lâminas metálicas isoladas entre si.

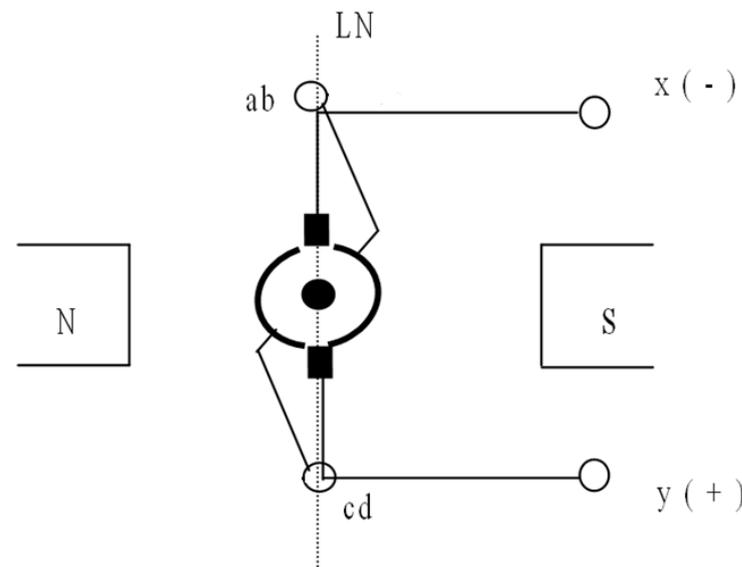
5) São as escovas que conduzem corrente para as lâminas do comutador.



Operação do comutador no motor elementar



comutador, com giro de 90°.



comutador, com giro de 180°.

- Do estudo da mecânica, sabemos que torque é dado pela equação:

$$\tau = F \cdot d$$

- onde d é o chamado “braço de torque”, distância do eixo (pivot) até a borda da espira;
- A força eletromagnética sobre um condutor pode ser calculada por: $F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin\theta$
- No caso da bobina da figura, $l = a$ e $\sin\theta = \sin 90^\circ = 1$
- Como a força eletromagnética sobre o segmento 1 da espira é a mesma sobre o segmento 2. Assim:

$$F_1 = F_2 = B \cdot I \cdot a$$

- O torque total é a soma dos torques nos dois segmentos:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = F_1 d_1 + F_2 d_2 = F_1 \frac{b}{2} + F_2 \frac{b}{2}$$

pois $d_1 = d_2 = b/2$.

- Substituindo a equação da força:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = (B \cdot I \cdot a) \frac{b}{2} + (B \cdot i \cdot a) \frac{b}{2}$$

- Assim:

$$\tau = B \cdot I \cdot a \cdot b$$

- A área da espira pode ser dada pelo produto $A = a \cdot b$, assim o torque em uma espira fica sendo:

$$\tau = B \cdot I \cdot A$$

- O torque total em N espiras pode ser dado pela equação:

$$\tau = N \cdot B \cdot I \cdot A$$

- Se a normal (perpendicular) à superfície da espira faz um ângulo γ com o campo magnético, a força não varia, mas o braço do torque varia para:

$$d = \frac{b}{2} \text{sen}\gamma$$

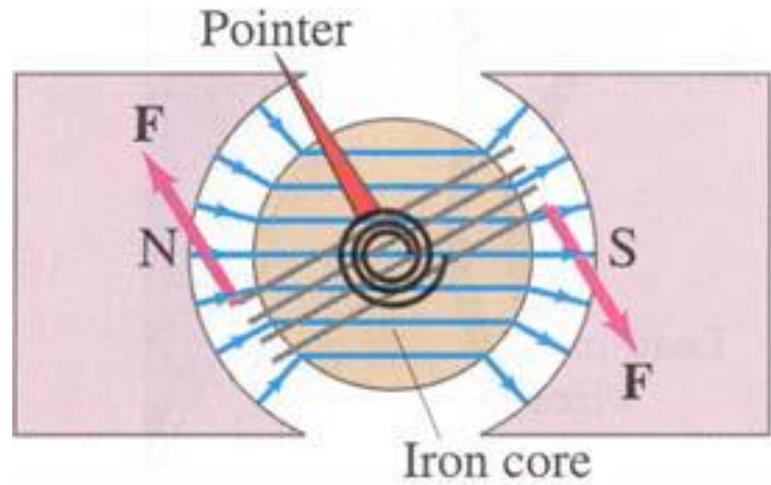
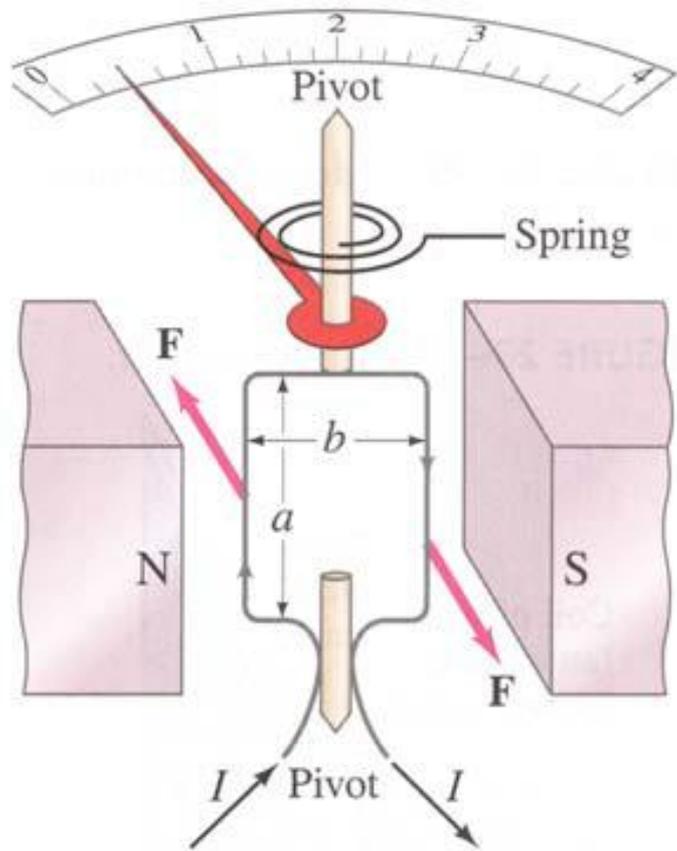
- Então, o torque total para uma bobina de N espiras percorrida por corrente e girando em um campo magnético é dado por:

$$\tau = N \cdot B \cdot I \cdot A \cdot \text{sen}\gamma$$

- onde:

- τ - torque de giro [N.m];
- N – número de espiras;
- B – densidade de campo magnético [T];
- I – corrente elétrica na(s) espira(s) [A];
- A – área das espiras (a x b) [m²];
- γ - ângulo da normal (perpendicular) à face da espira com a direção das linhas de campo [° ou rad].

- O princípio do torque de giro em uma espira tem várias aplicações práticas como: motores elétricos, instrumentos de medição analógicos (voltímetros, amperímetros, ohmímetros, etc.) entre outros dispositivos;
- A figura a seguir mostra o princípio de funcionamento de um amperímetro (medidor de corrente elétrica) baseado no torque girante sobre uma bobina. Quanto maior a corrente, maior o torque girante capaz de vencer o contra-torque da mola, indicando assim uma dada escala pré-calibrada para a intensidade da corrente.



Exercício 2

- Uma bobina retangular de dimensões 5,40 cm por 8,50 cm é constituída por 25 espiras de fio condutor e percorrida por um corrente de 15 mA. Suponha que um campo magnético de módulo 0,350 T seja aplicado paralelamente ao plano da bobina. Determine o módulo do torque que atua sobre a bobina. **(R.: $5,95 \cdot 10^{-4}$ Nm)**

Exercício 3

- Uma bobina circular de raio igual à 5 cm possui 30 espiras e está situada no plano XZ. Sabendo que ela conduz uma corrente de 5 A no sentido anti-horário (vista de cima) e está imersa em um campo magnético uniforme paralelo a superfície da bobina ($B = 1,2 \text{ T}$), determine o torque sobre a bobina. (**R.: 1,41 Nm**)

Operação como Gerador:

Faraday em 1832, mostrou que a tensão elétrica, tradicionalmente chamada de força eletromotriz (fem), são geradas numa bobina quando ocorrem variação do fluxo no seu interior.

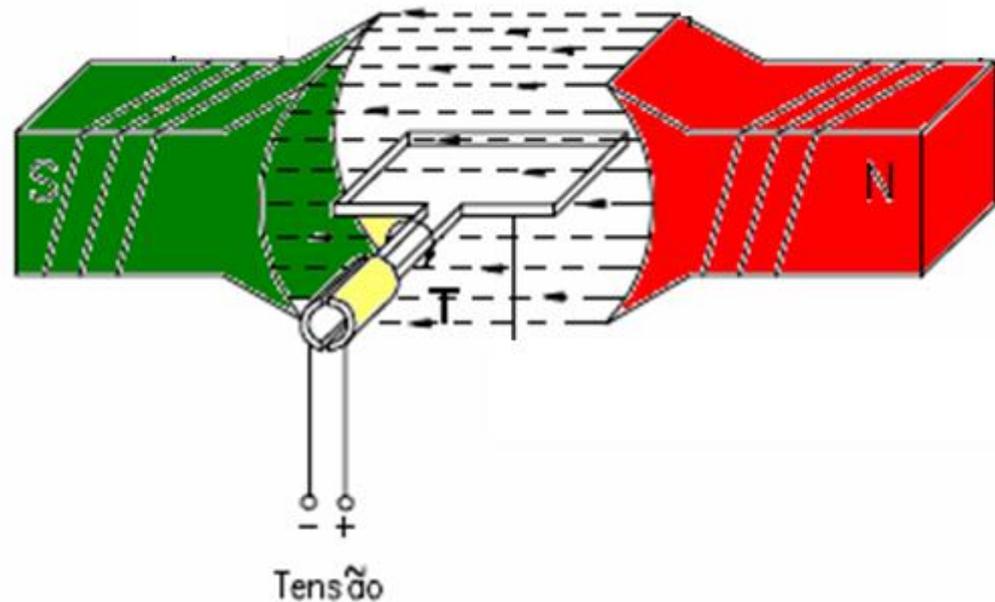
$$fem = N \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

Onde:

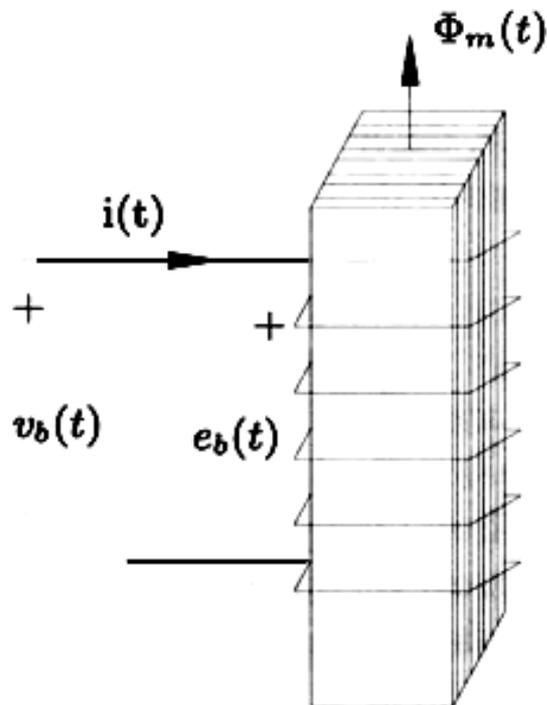
fem = força eletromotriz induzida [V];

N = número de espiras da bobina;

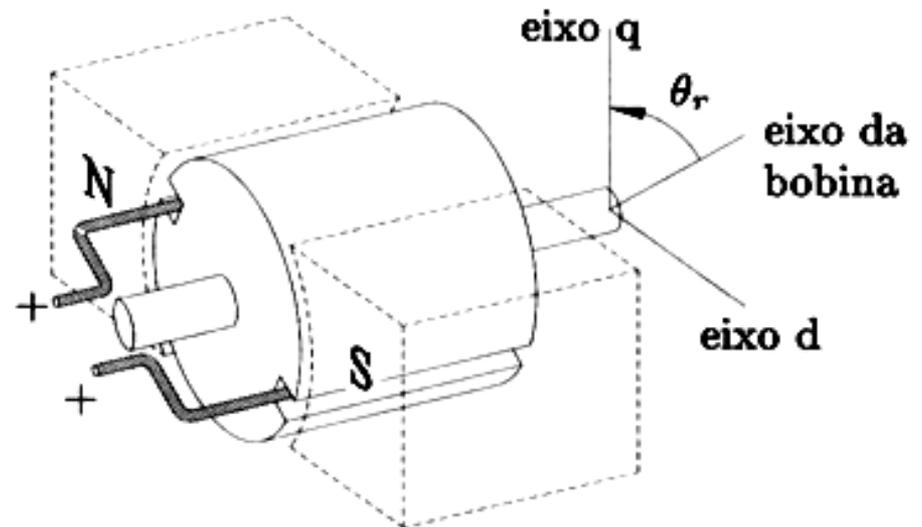
$N\Phi(t)$ = fluxo concatenado pela bobina a cada instante;



A fem pode ser gerada por causa da variação da magnitude do fluxo como ocorre nos transformadores, ou pelo movimento relativo da bobina em relação ao fluxo como ocorre no gerador elementar apresentado abaixo.



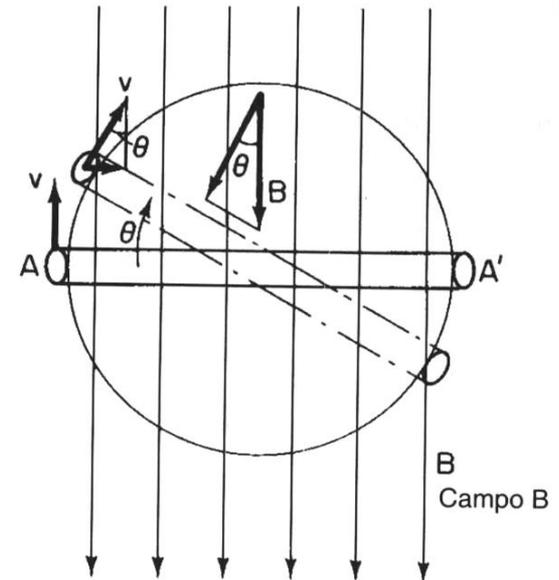
(a) Fem gerada por fluxo senoidal em uma bobina estacionária



(b) Fem gerada por fluxo estacionário em uma bobina girante

Se a densidade de fluxo for uniforme e a superfície plana, o fluxo concatenado será dado pela equação:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = B \cdot A \cdot \cos\theta$$



Onde:

A = área da espira [m²];

B = densidade de fluxo [Wb/m²];

θ = ângulo entre a espira e o campo magnético

Aplicando a lei de Faraday teremos a seguinte tensão induzida. Considerando que a espira está rotacionando numa velocidade angular " ω_r ".

$$fem = \frac{d(B \cdot A \cdot \cos(\omega_r t))}{dt} = B \cdot A \cdot \omega_r \cdot \text{sen}(\omega_r t)$$

Densidade de campo multiplicada pela área da espira nos fornece o fluxo máximo concatenado pela espira.

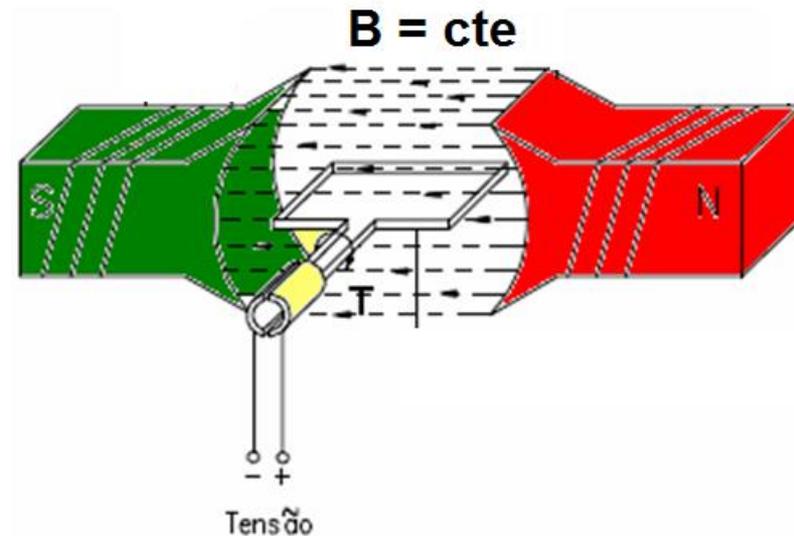
$$\Phi_{pico} = A \cdot B$$

Se for mais de uma espira basta multiplicar pelo número de espiras, para obter o fluxo máximo na bobina.

$$N \cdot \Phi_{pico} = N \cdot A \cdot B$$

Substituindo na equação de cálculo da força eletromotriz induzida, obtemos:

$$fem = N \Phi_{pico} \cdot \omega_r \cdot \text{sen}(\omega_r t)$$



Quanto maior a densidade de campo, a área da espira, o número de espiras ou a velocidade de rotação da espira maior será a tensão induzida.

$$fem = N \Phi_{pico} \cdot \omega_r \cdot \text{sen}(\omega_r t)$$

Quando houver corrente circulando pela bobina haverá uma queda interna de tensão devido a resistência da bobina ficando a tensão terminal, da seguinte forma:

$$v(t) - e(t) = r_b \cdot i(t)$$

Onde:

$v(t)$ = tensão nos terminais da bobina [V];

$e(t)$ = tensão induzida na bobina (fem) [V];

r_b = resistência do enrolamento da bobina;

A força eletromotriz induzida nos terminais da bobina varia de forma senoidal, conforme a equação anteriormente desenvolvida.

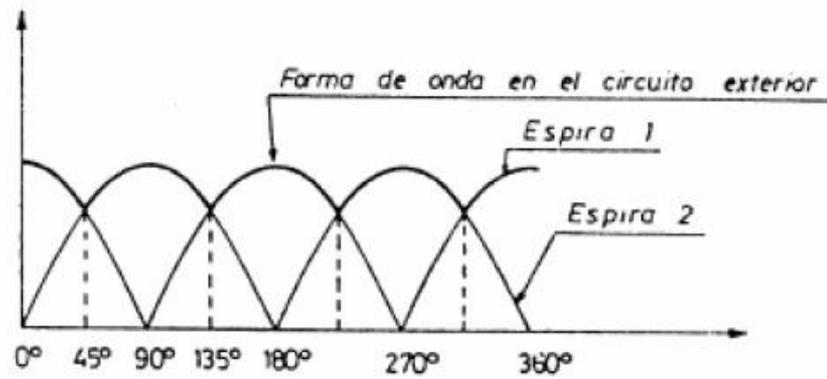
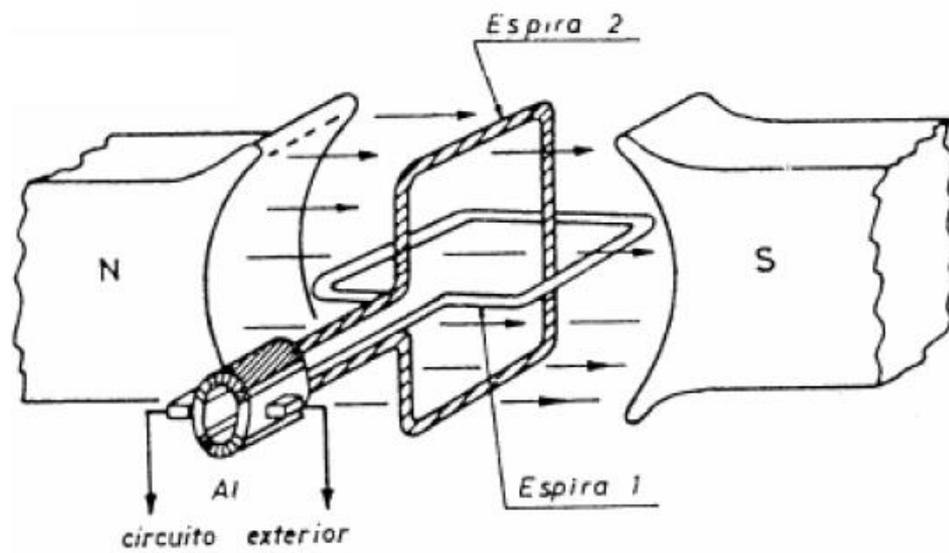
$$e(t) = N \Phi_{pico} \cdot \omega_r \cdot \text{sen}(\omega_r t)$$

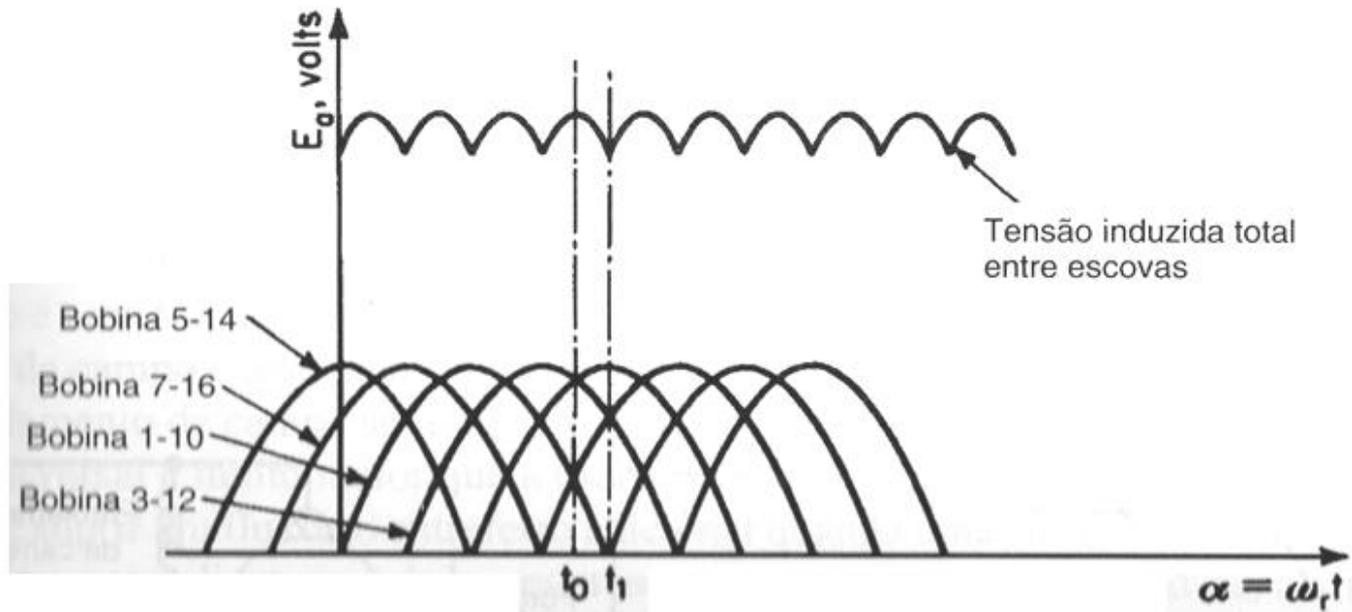
Colocando em função da frequência.

$$e(t) = N \Phi_{pico} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

Como a tensão induzida é senoidal o valor eficaz dessa tensão fica da seguinte forma:

$$E_{rms} = \frac{N \cdot \Phi_{pico} \cdot \omega_r}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot \Phi_{pico} = 4,44 \cdot F \cdot N \cdot \Phi_{pico}$$





Exercício 4:

A espira apresentada na figura abaixo está sobre a influência de um campo uniforme de $0,1 \text{ [T]}$, sua dimensão é de $10 \times 10 \text{ [cm]}$. Qual deve ser a frequência de rotação dessa espira para que apresente uma tensão eficaz de $1,5 \text{ [V]}$.

