

SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECCÂNICA DE ENERGIA

Aula 18

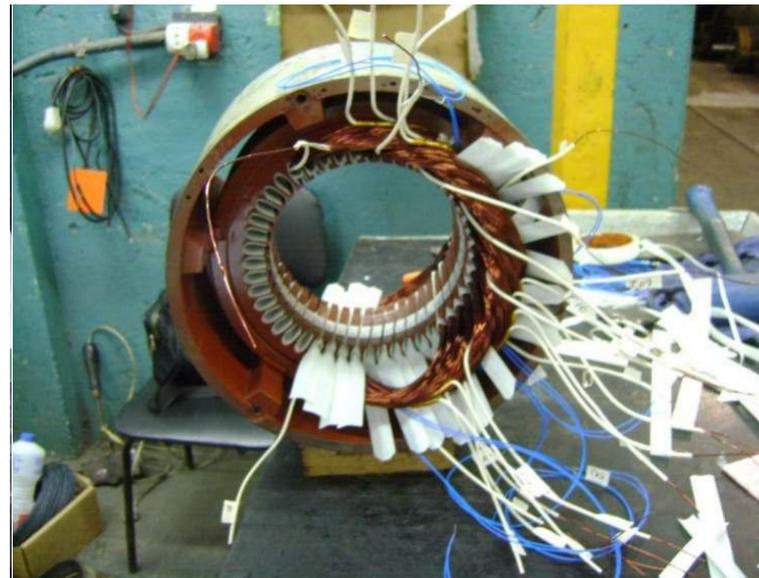
Aula de Hoje

- Enrolamento distribuído
- Máquinas de corrente alternada
 - Campo Magnético Girante

Enrolamento Distribuído



Bobinas

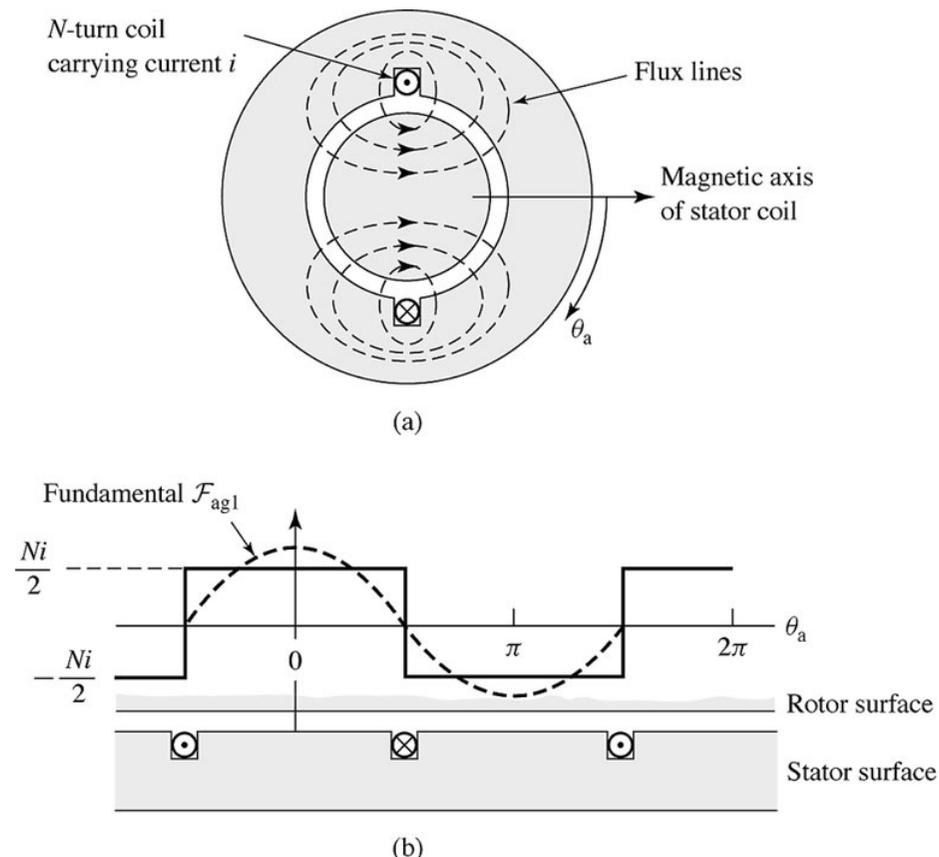


Montagem do Enrolamento



Enrolamento finalizado

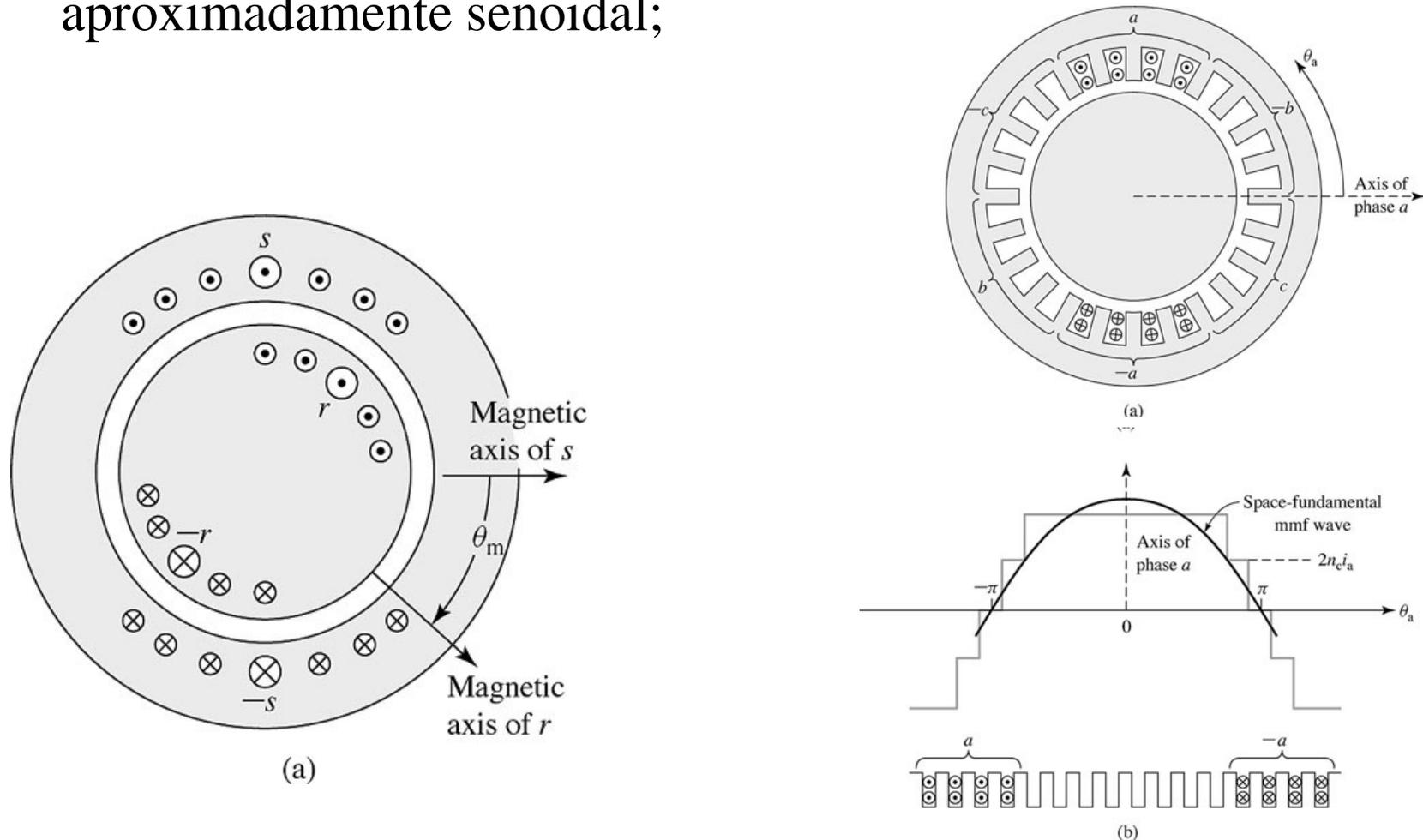
Campo Magnético Produzido por uma Bobina



Para um dado instante de tempo, se a bobina de cada fase for concentrada em uma única ranhura, a distribuição espacial de força magnetomotriz será não-senoidal, induzindo tensões altamente distorcidas no enrolamento do rotor;

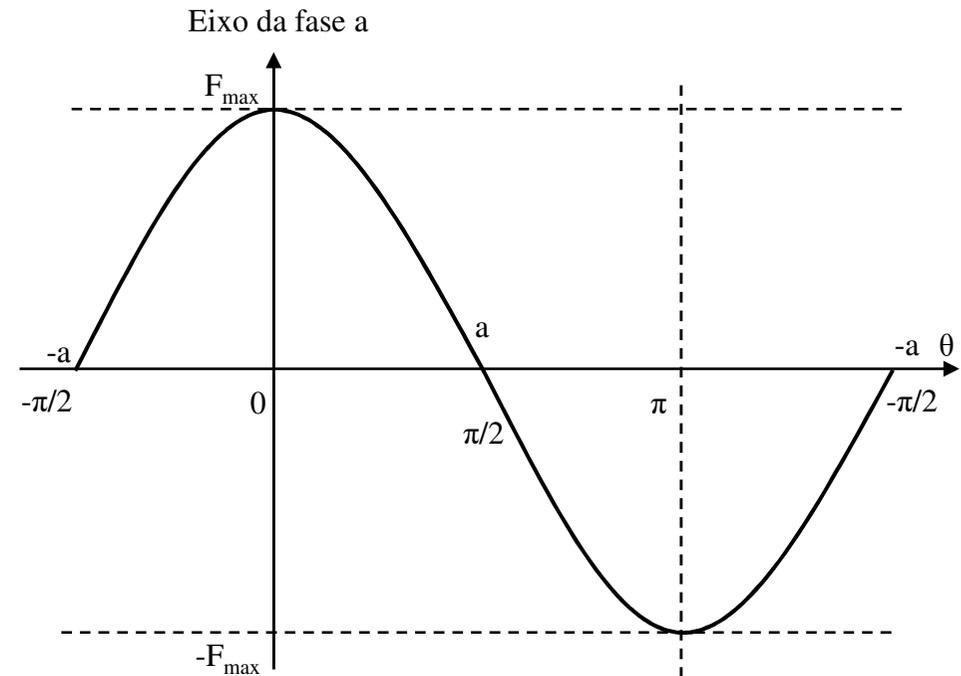
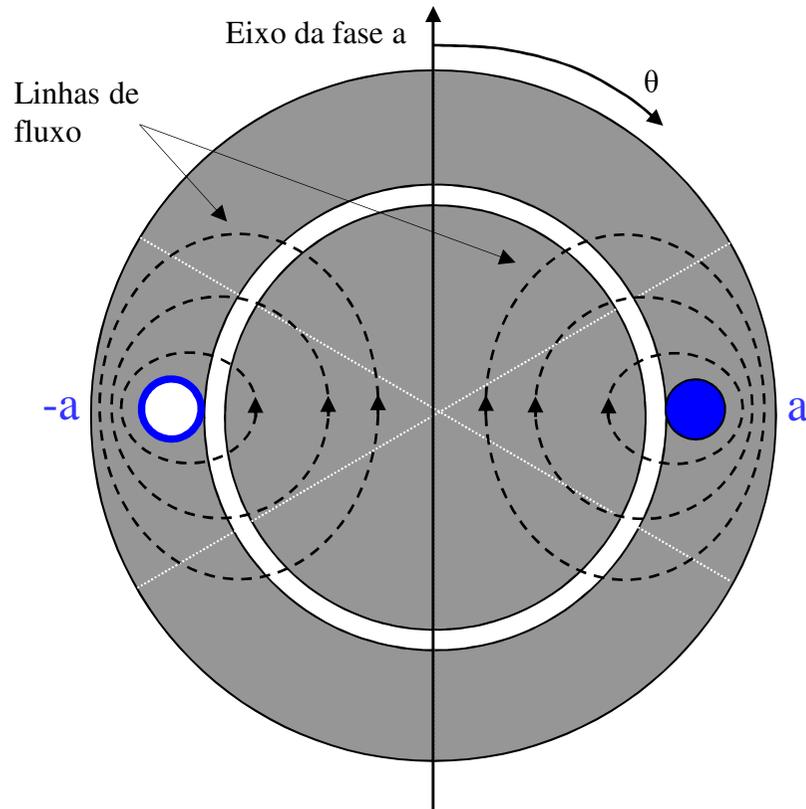
Campo Magnético Produzido por uma Bobina

- Para resolver este problema, a bobina é distribuída de forma senoidal em ranhuras sobre toda a periferia do estator, resultando em distribuição espacial de força magnetomotriz aproximadamente senoidal;



Campo Magnético Produzido por uma Bobina

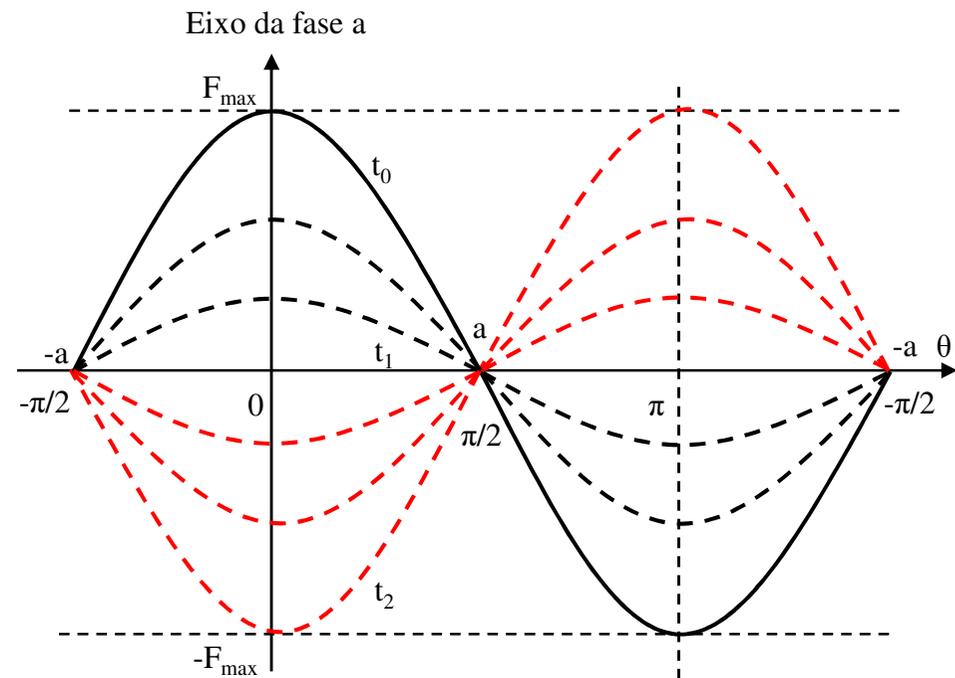
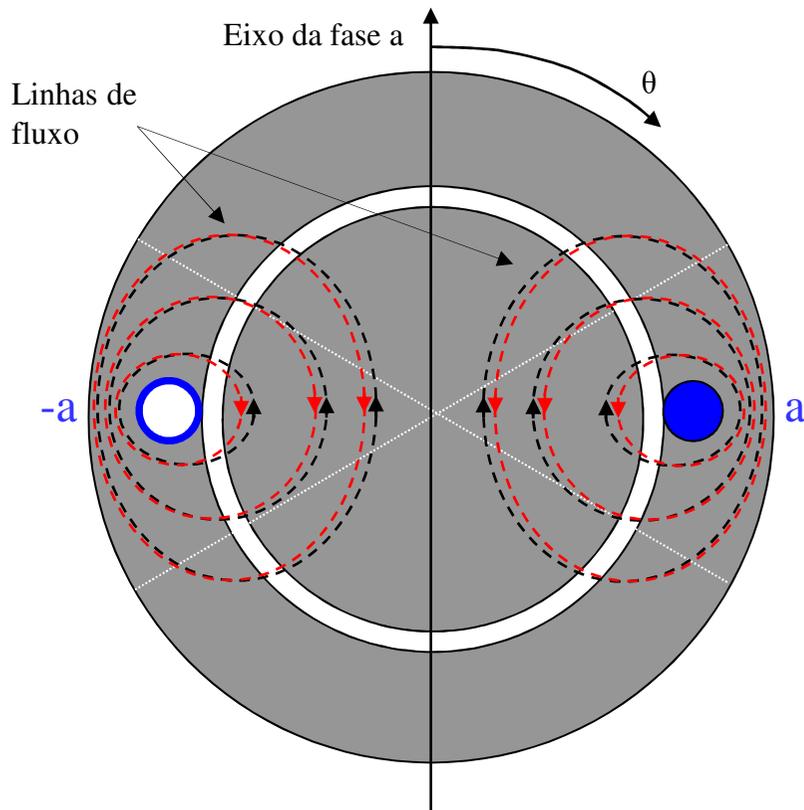
- Enrolamento monofásico excitado por uma corrente constante.



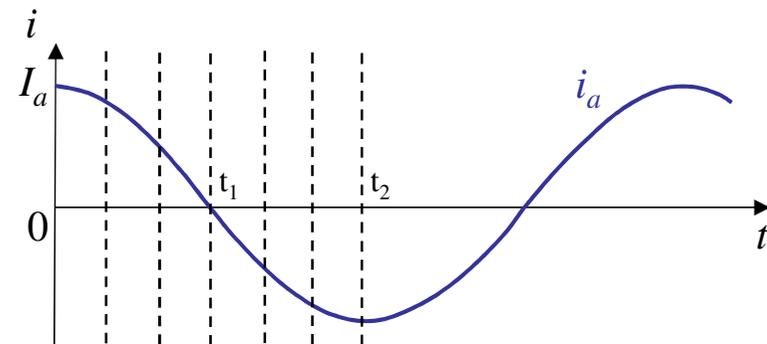
f_{mm} estacionária no tempo e varia senoidalmente no espaço em relação a θ .

Campo Magnético Pulsante

- Enrolamento monofásico excitado por uma corrente senoidal.

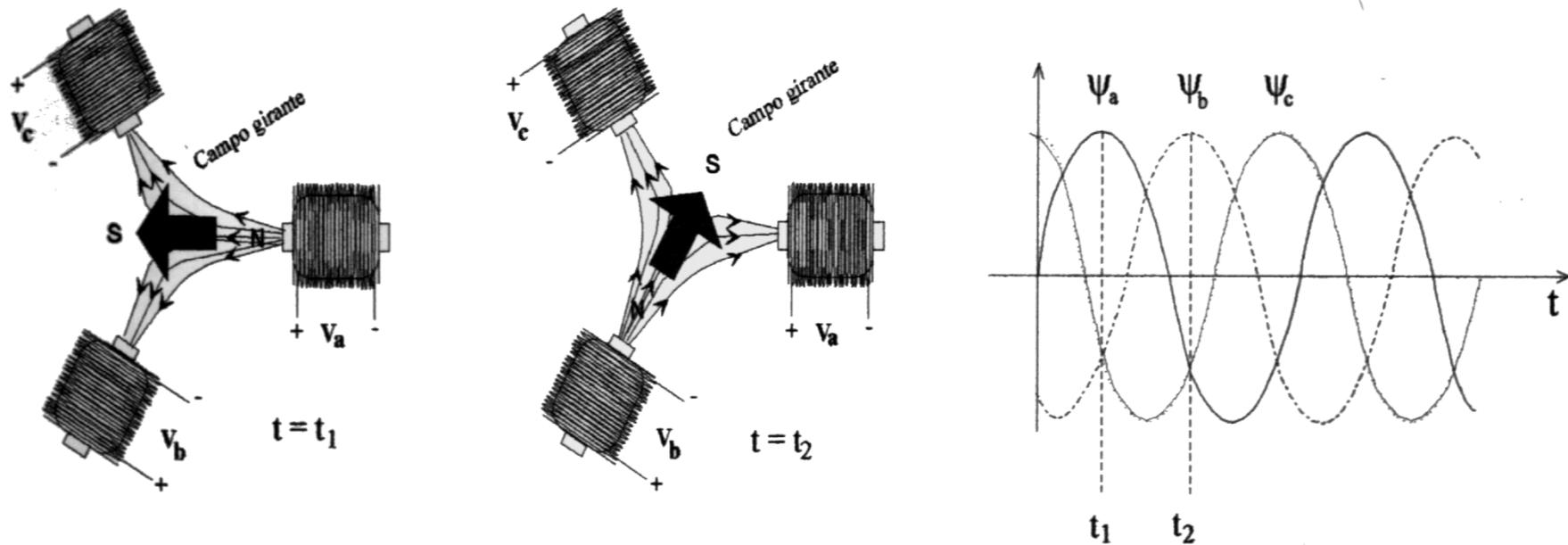


- *fmm pulsante* - varia senoidalmente em relação a θ e ao tempo. (Campo pulsante)



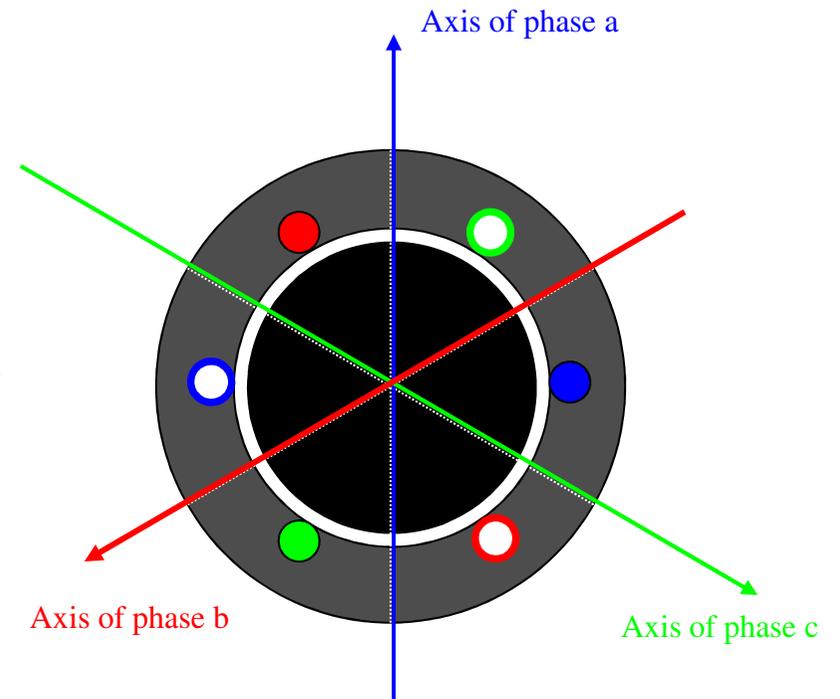
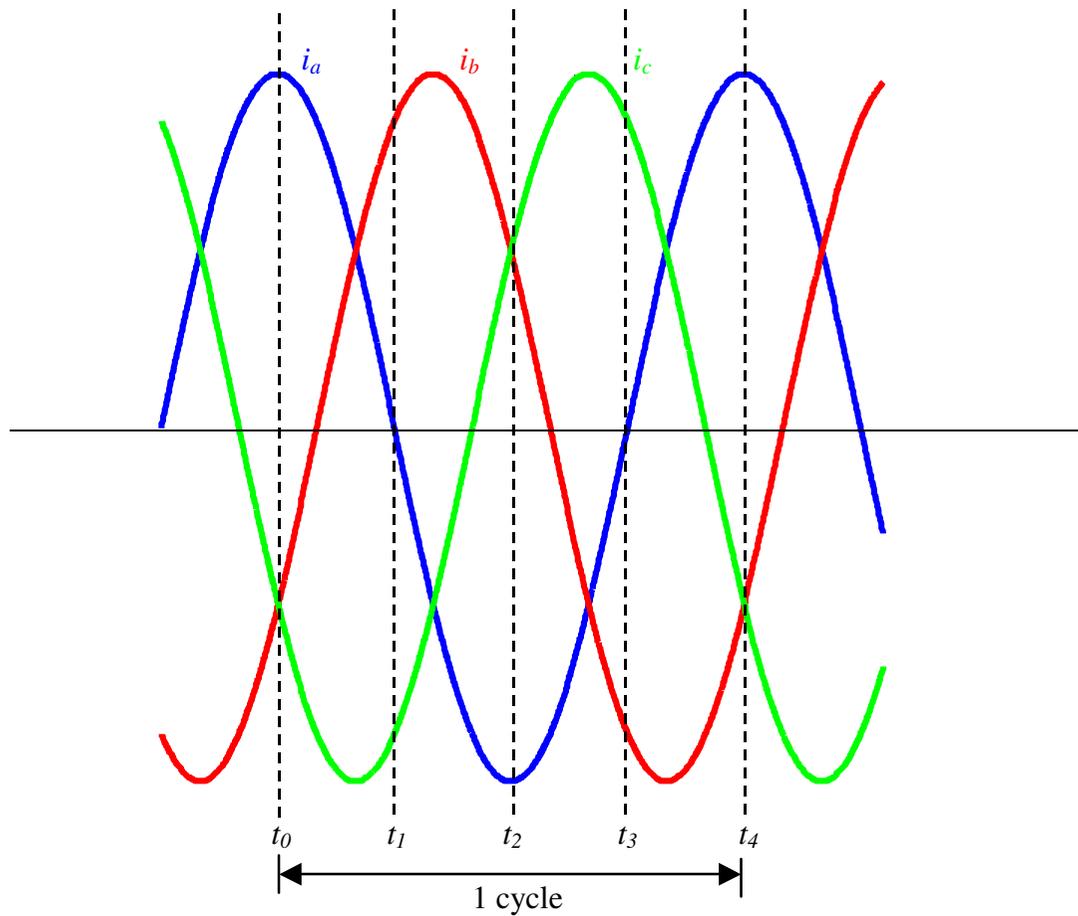
Campo Magnético Girante

Três correntes alternadas senoidais, com mesma amplitude e defasadas de 120 graus, circulando por três bobinas fixas, cujos eixos magnéticos distam 120 graus entre si, produzem um campo magnético girante de intensidade constante.

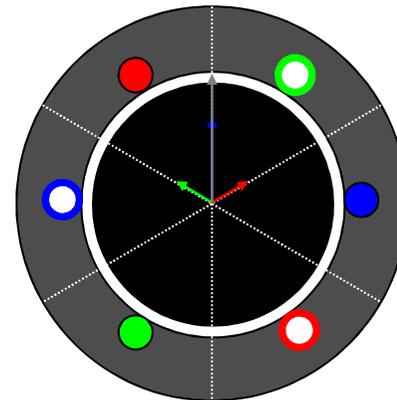
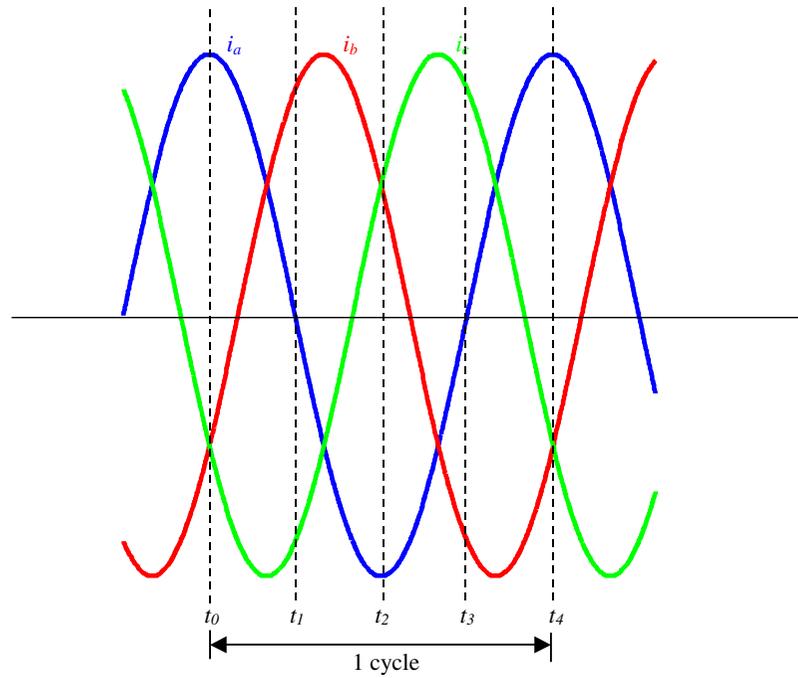


Campo Magnético Produzido por 3 Bobinas

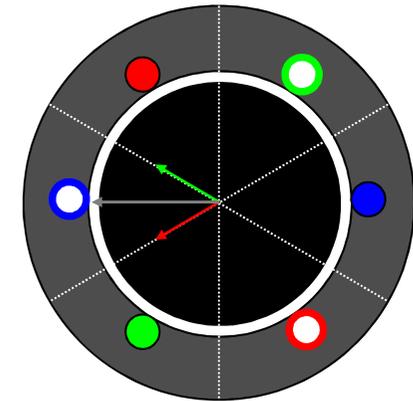
- Campo girante (método gráfico)



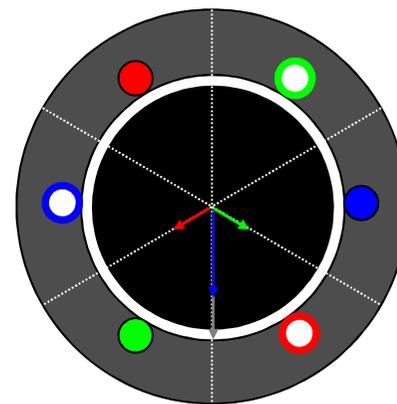
Magnitude do Campo Girante – Método Gráfico



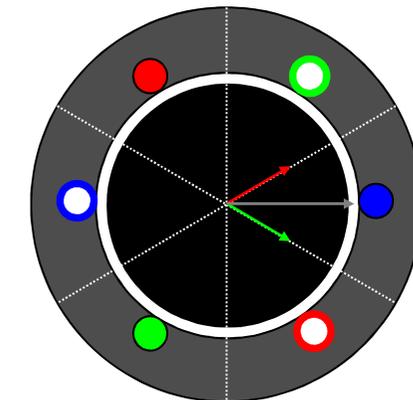
$(t_0 \text{ e } t_4)$



(t_1)



(t_2)



(t_3)

Magnitude do Campo Girante – Método Gráfico

- Módulo constante ($3/2 F_{\max}$)
- Velocidade depende da frequência da rede elétrica ($n = 120f/p$)
- Sequência de fase determina o sentido de rotação do campo girante

Magnitude do Campo Girante – Método Analítico

Considerando correntes trifásicas

$$i_a = I_m \cos \omega t$$

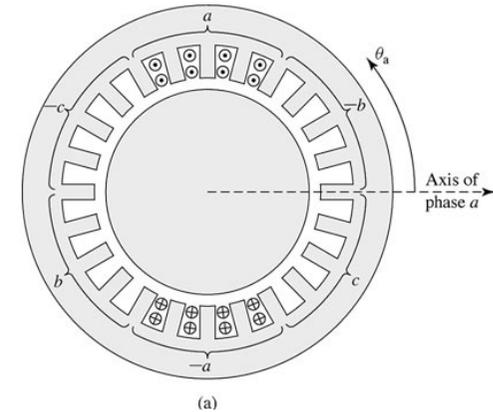
$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t + 120^\circ)$$

Magnitude do Campo Girante – Método Analítico

- A distribuição espacial das bobinas **a**, **b** e **c**, resulta na produção de força magnetomotriz pulsante em cada fase;

$$f.m.m = Ni$$



$$\mathcal{F}_a = N \cos \theta * i_a = NI_m \cos \omega t \cos \theta$$

$$\mathcal{F}_b = N \cos(\theta - 120) * i_b = NI_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$\mathcal{F}_c = N \cos(\theta + 120) * i_c = NI_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ)$$

- **Vamos provar que a f.m.m. líquida é girante, com velocidade síncrona e amplitude constante;**

Magnitude do Campo Girante – Método Analítico

➤ A força magnetomotriz líquida é:

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c$$

$$\mathcal{F}_a = N \cos \theta * i_a = NI_m \cos \omega t \cos \theta$$

$$\mathcal{F}_b = N \cos(\theta - 120) * i_b = NI_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$\mathcal{F}_c = N \cos(\theta + 120) * i_b = NI_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ)$$

$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A - B) + \frac{1}{2} \cos(A + B)$$

tem-se

$$\begin{aligned} \mathcal{F}(\theta, t) &= \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t + \theta) \\ &\quad + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t + \theta - 240^\circ) \\ &\quad + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} NI_m \cos(\omega t + \theta + 240^\circ) \end{aligned}$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta)$$

Magnitude do Campo Girante – Método Analítico

- O que demonstra que a força magnetomotriz é girante, com velocidade $\omega=2\pi f$ e amplitude constante, igual a $3NI_m/2$;

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c$$

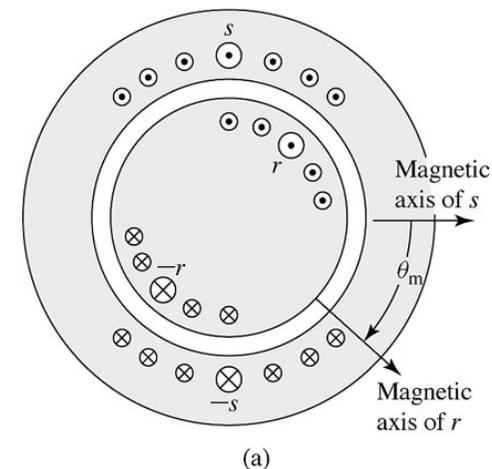
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta)$$

Tensão Induzida pelo Campo Girante

- A tensão induzida nas bobinas do rotor será senoidal, pois:
no tempo: para θ fixo a força magnetomotriz será senoidal
no espaço: para t fixo a força magnetomotriz será senoidal
- A distribuição da densidade de fluxo no entreferro será senoidal: $B(\theta) = B_{\max} \cos(\theta)$;
- A tensão induzida nas bobinas será senoidal e com a mesma frequência do campo girante (bobinas do rotor em aberto);

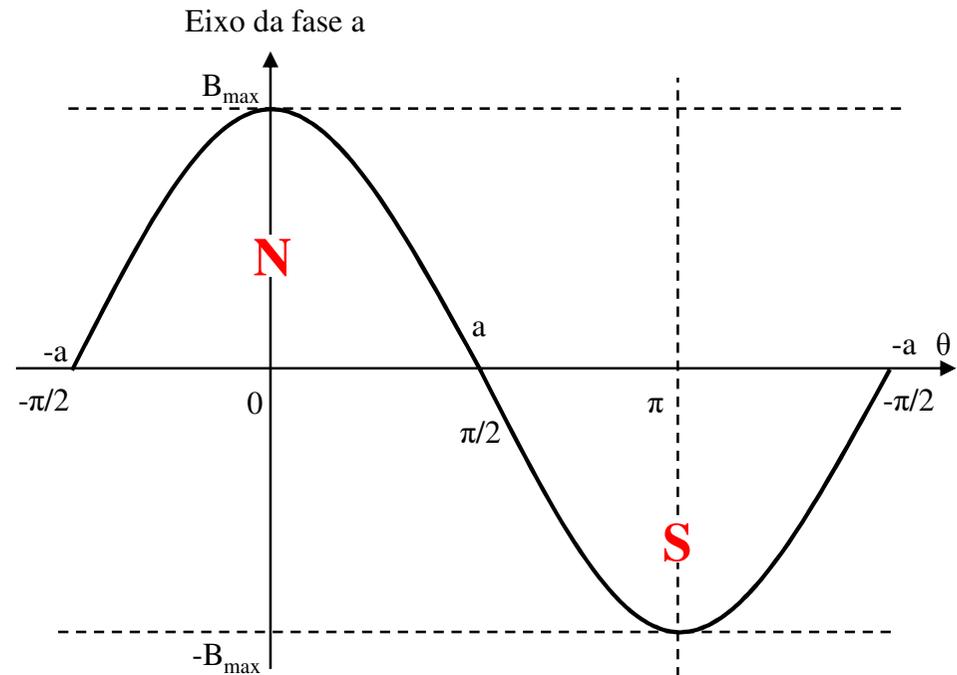
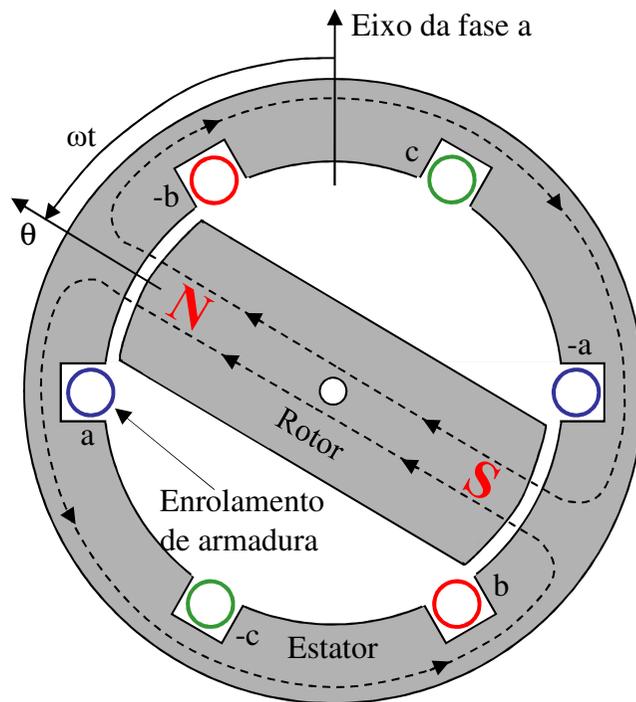
$$\mathcal{F}(\theta, t) = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c$$

$$\mathcal{F}(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\omega t - \theta)$$



Tensão Induzida pelo Campo Girante

- Um campo magnético girante pode ser criado pela rotação de um par magnético.



- O campo girante induzirá tensões nos enrolamentos a-a, b-b e c-c.
- As tensões induzidas podem ser obtidas da lei de indução de Faraday.

Tensão Induzida pelo Campo Girante

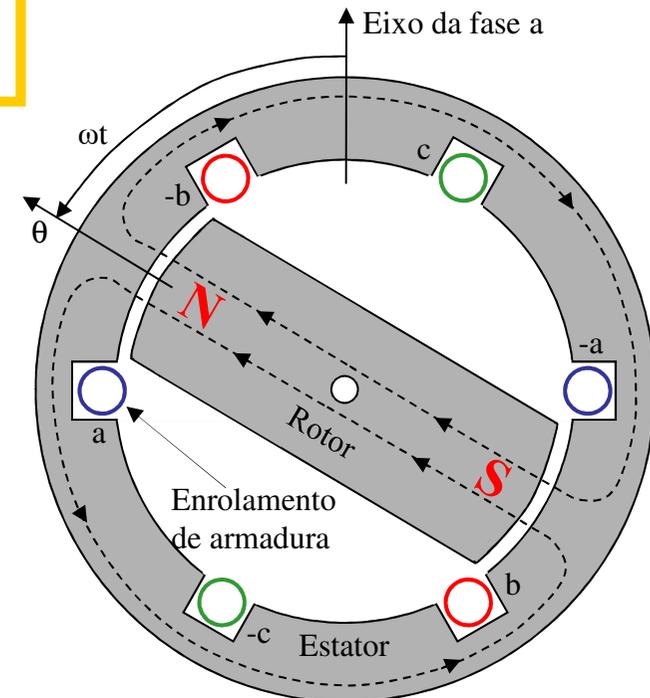
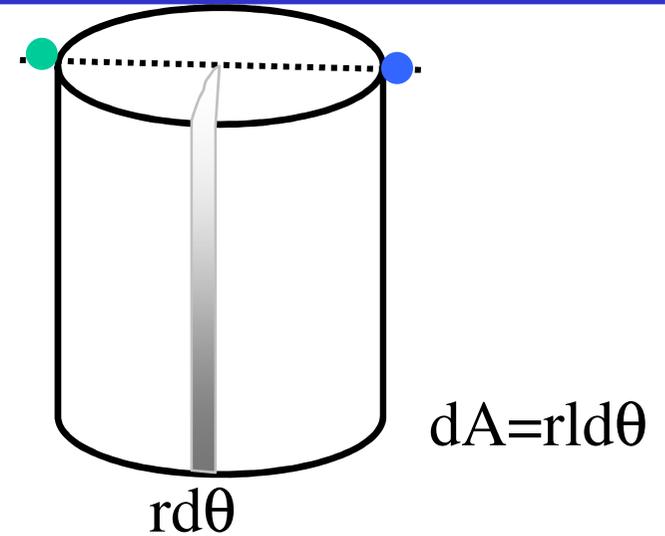
➤ O fluxo por pólo no entreferro será:

$$\phi_p = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B dA = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{\max} \cos \theta * r l d\theta$$

$$= r l B_{\max} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta d\theta = r l B_{\max} \text{sen } \theta \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2}$$

$$\phi_p = 2 r l B_{\max}$$

Em que: r é o raio até o entreferro e l é o comprimento axial do ferro do estator/rotor.



Tensão Induzida pelo Campo Girante

- O fluxo por pólo no entreferro será:

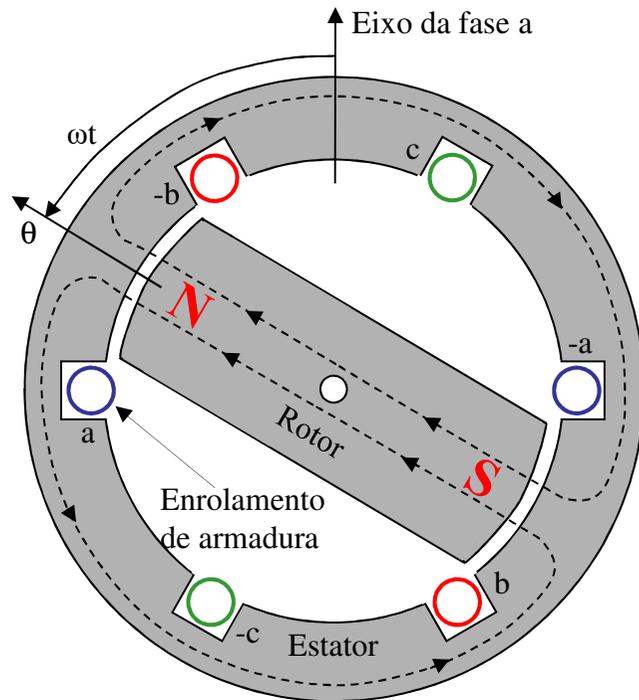
$$\Phi_P = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\theta) l r d\theta = 2B_{\max} l r$$

- À medida que o rotor gira, o fluxo concatenado varia senoidalmente com o ângulo entre os eixos magnéticos das bobinas do estator e do rotor.
- Com o rotor girando a uma velocidade angular constante, o fluxo concatenado com a bobina do estator da fase a é:

$$\lambda_a(\omega t) = N\Phi_P \cos \omega t$$

Tensão Induzida pelo Campo Girante

- Considerando o enrolamento concentrado e com N espiras, o fluxo concatenado com o enrolamento varia no tempo senoidalmente.



- O fluxo será máximo para $\omega t=0$;
- O fluxo será nulo para $\omega t=90^\circ$;

Assim,

$$\lambda_a = N\phi_p \cos \omega t$$

$$e_a = -\frac{d\lambda_a}{dt} = \omega N\phi_p \sen \omega t = E_{\max} \sen \omega t$$

de forma similar :

$$e_b = E_{\max} \sen(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_c = E_{\max} \sen(\omega t + 120^\circ)$$

- Pela lei de Faraday, variação de fluxo produz tensão induzida:

Tensão Induzida pelo Campo Girante

- O Valor RMS da tensão induzida é:

$$E_{\mathcal{RMS}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N \phi_p}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \phi_p}{\sqrt{2}} = 4,44 f N \phi_p$$

- Na máquina real o enrolamento é **distribuído**, e assim as tensões induzidas em cada espira não estarão em fase. Ou seja, a soma vetorial de cada e_{ai} será menor do que a soma algébrica. Logo, para enrolamentos distribuídos aplica-se um fator K_W que varia de 0,85 a 0,95. Portanto:

$$E_{\mathcal{RMS}} = 4,44 f N \phi_p K_W$$

Tensão Induzida pelo Campo Girante

- Um fator de redução (k_w) é usado para o cálculo da tensão induzida em um enrolamento distribuído;
- Para máquinas trifásicas k_w , denominada por constante do enrolamento, varia de 0,85 a 0,95;
- A tensão induzida será então, dada por:

$$E_{RMS} = 4,44 f N_{ph} \phi_p k_w$$

- Onde N_{ph} é o número total de espiras em série, por fase, considerado como concentrado na ranhura central;

Próxima Aula

- Máquina de indução trifásica
- Máquina síncrona