SEL 329 – CONVERSÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA

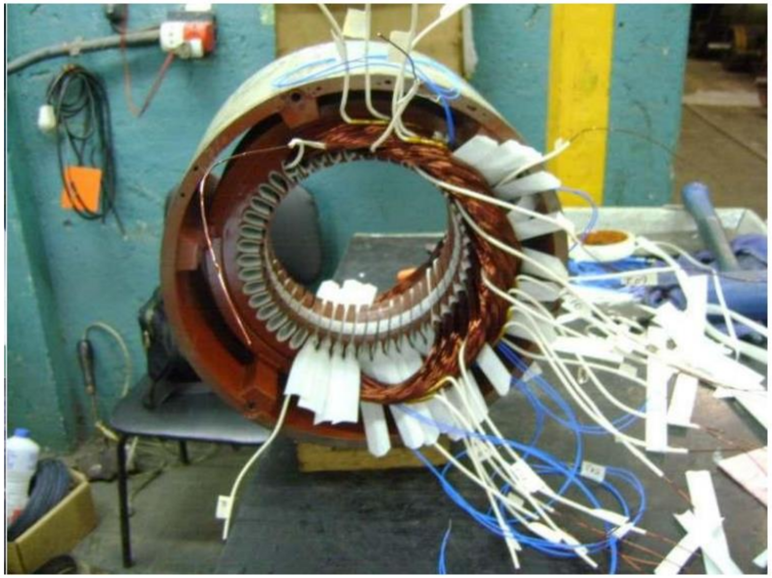
Aula 17

Aula de Hoje

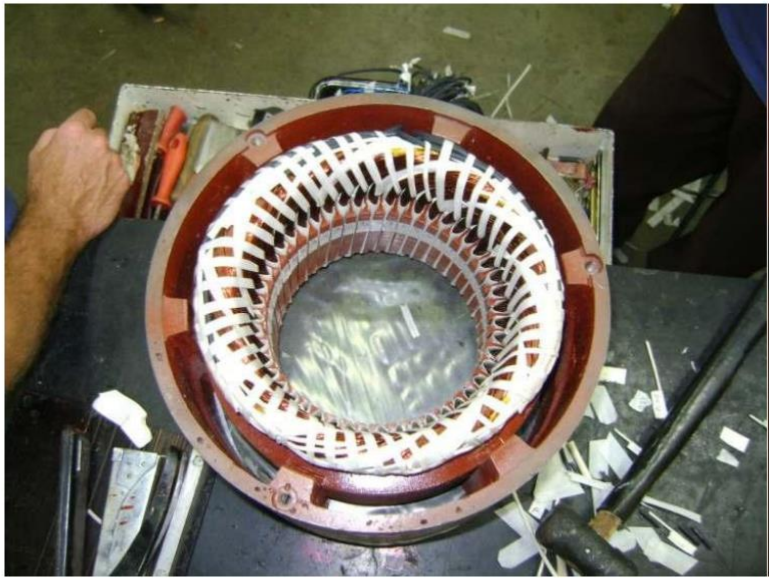
- Enrolamento distribuído
- Máquinas de corrente alternada
  - Campo Magnético Girante

Enrolamento Distribuído

Bobinas

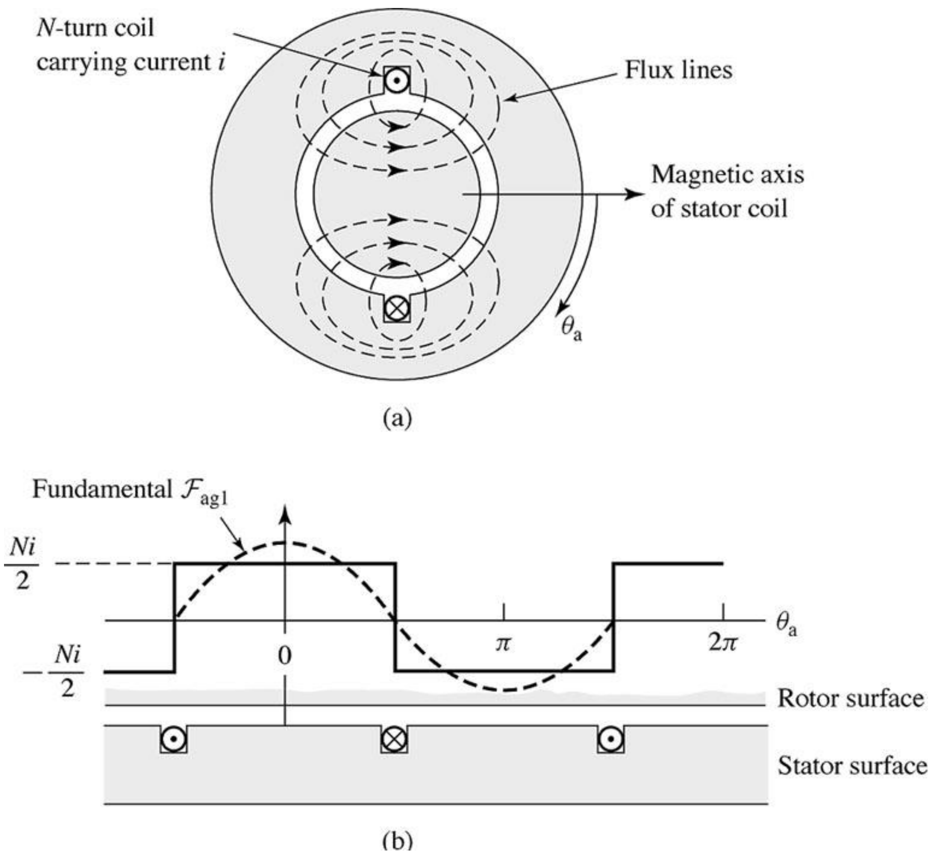


Montagem do Enrolamento



Enrolamento finalizado

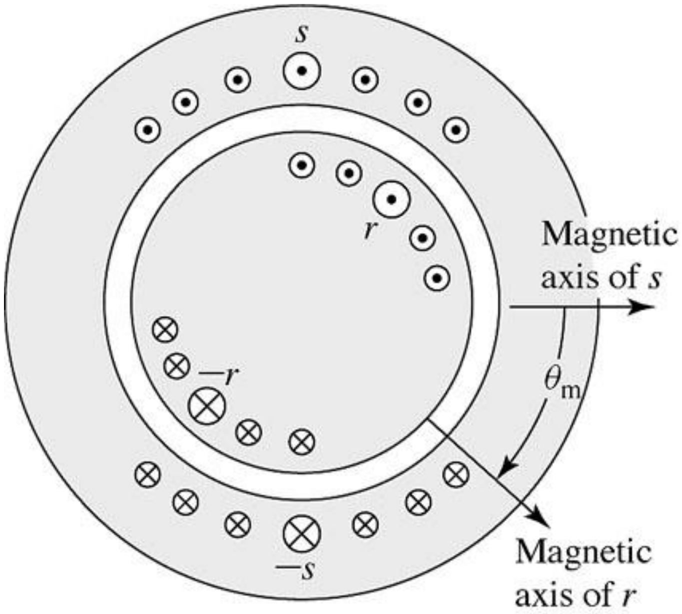
Campo Magnético Produzido por uma Bobina



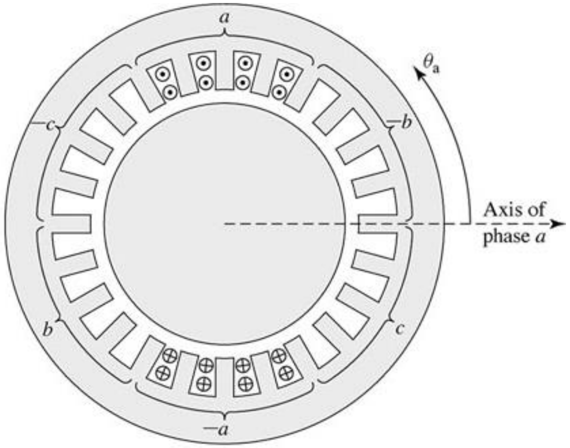
Para um dado instante de tempo, se a bobina de cada fase for concentrada em uma única ranhura, a distribuição espacial de força magnetomotriz será não-senoidal, induzindo tensões altamente distorcidas no enrolamento do rotor;

Campo Magnético Produzido por uma Bobina

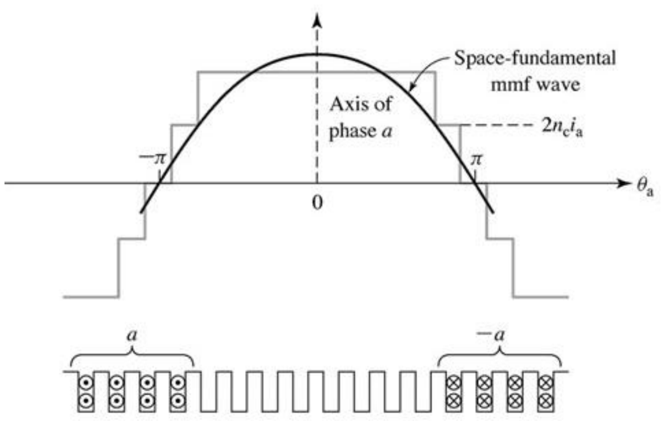
- Para resolver este problema, a bobina é distribuída de forma senoidal em ranhuras sobre toda a periferia do estator, resultando em distribuição espacial de força magnetomotriz aproximadamente senoidal;



(a)



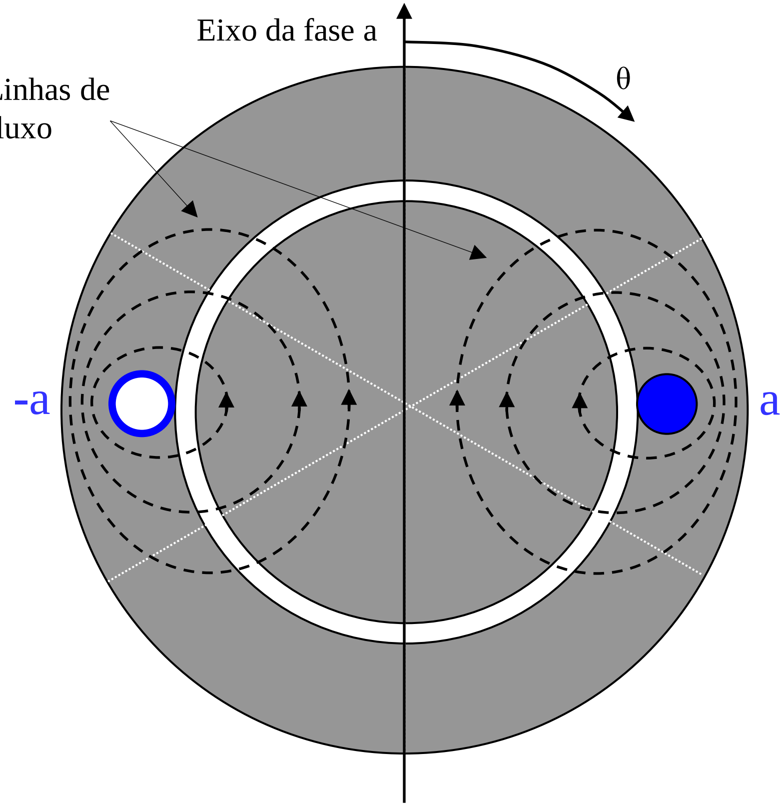
(a)

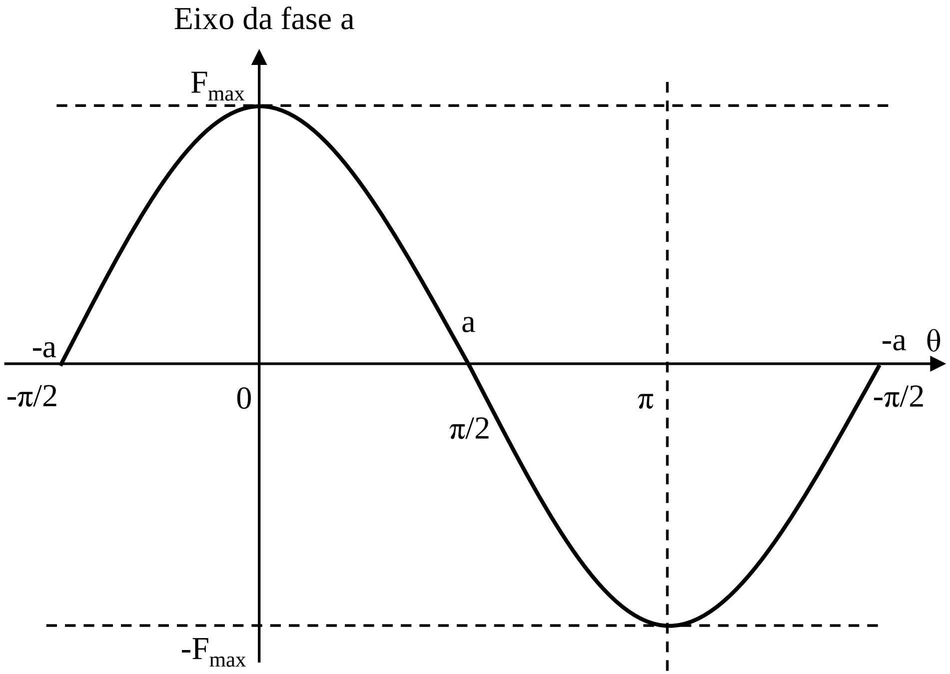


(b)

Campo Magnético Produzido por uma Bobina

- Enrolamento monofásico excitado por uma corrente constante.

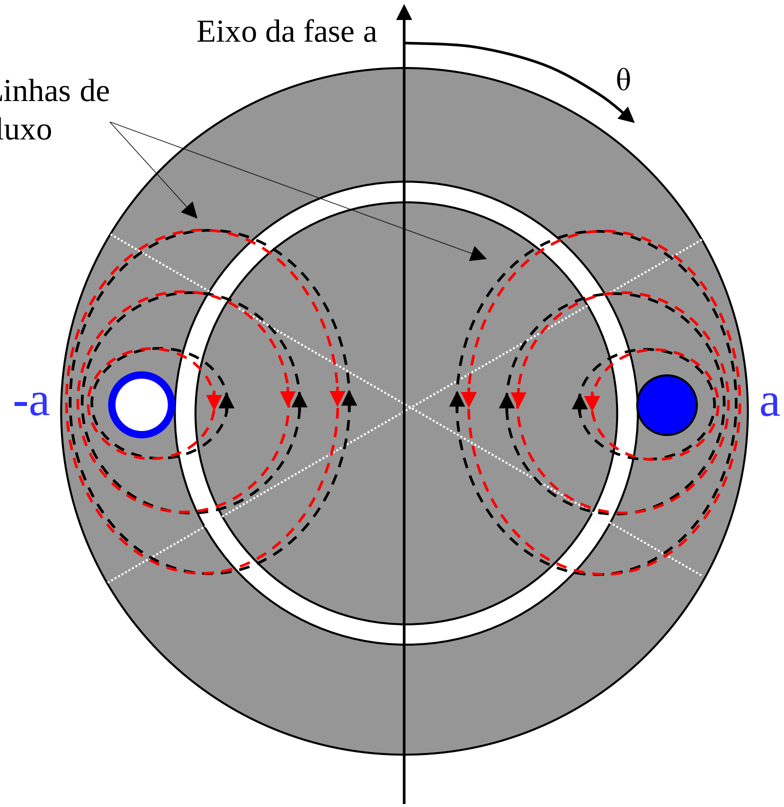


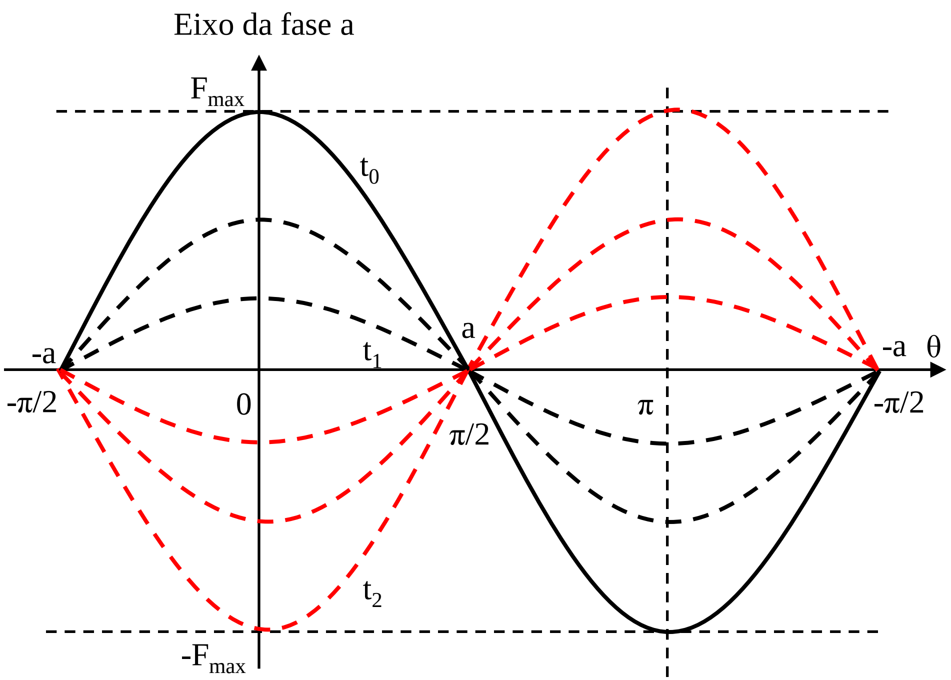


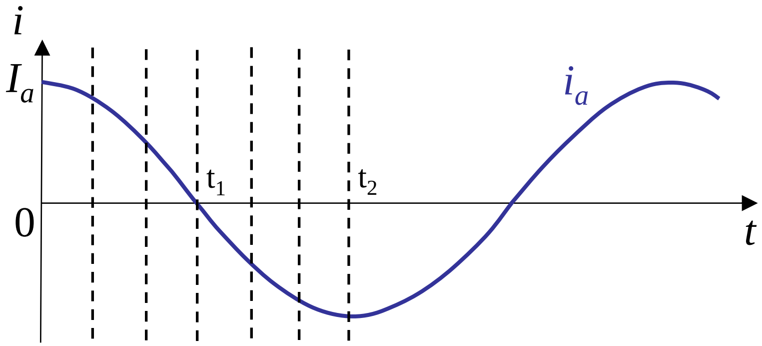
fmm estacionária no tempo e varia senoidalmente no espaço em relação a θ.

Campo Magnético Pulsante

- Enrolamento monofásico excitado por uma corrente senoidal.



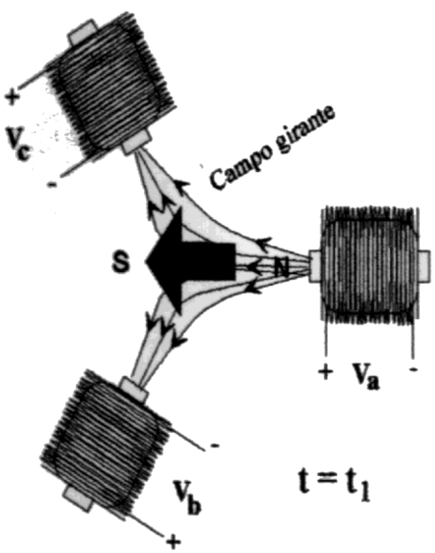


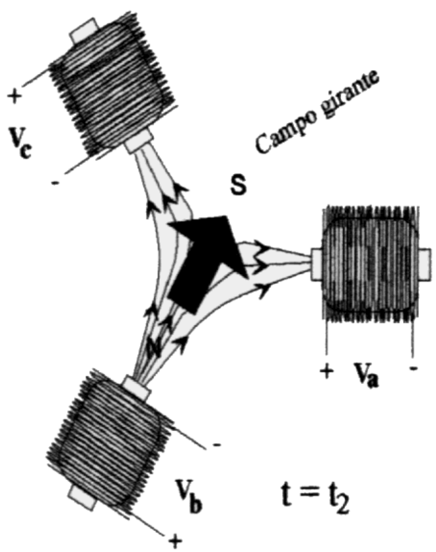


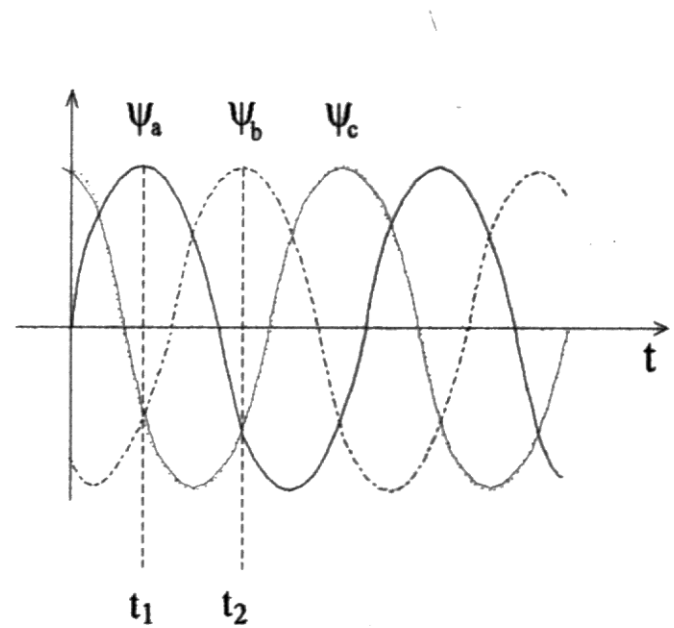
- *fmm* pulsante - varia senoidalmente em relação a θ e ao tempo. (Campo pulsante)

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.**

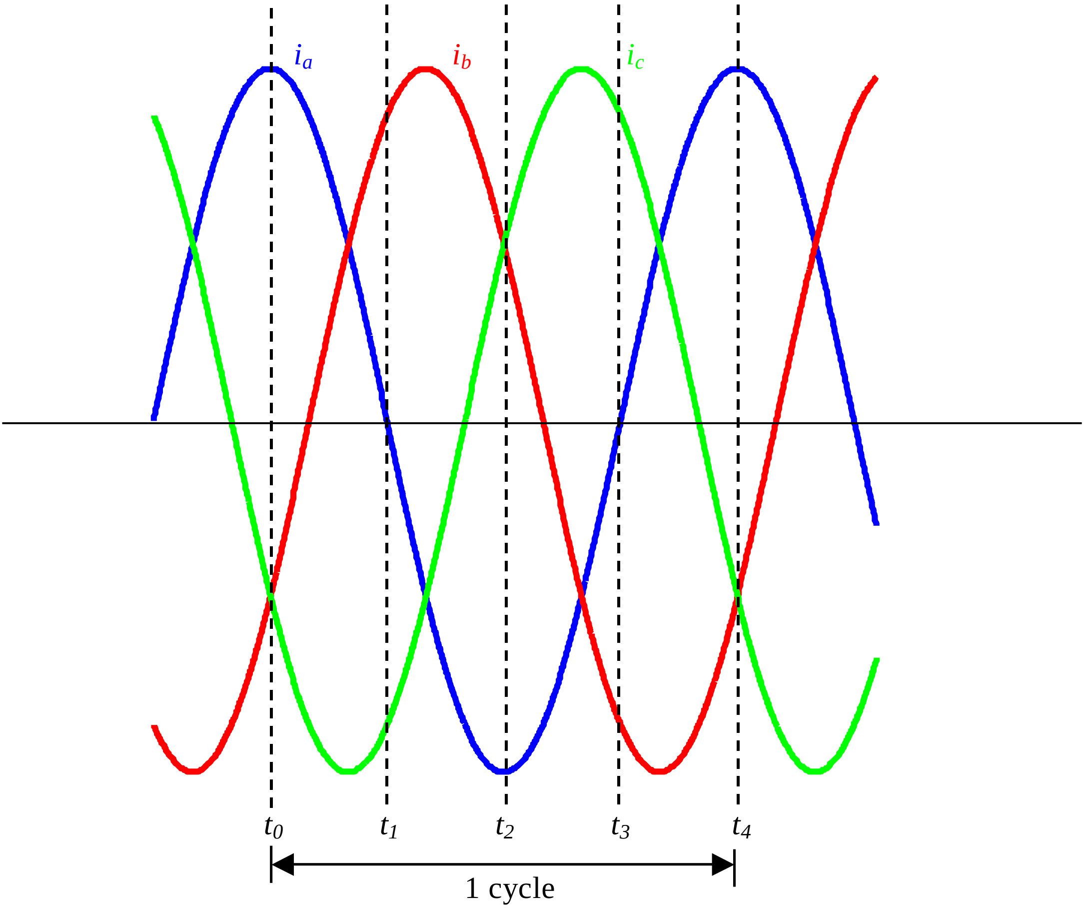


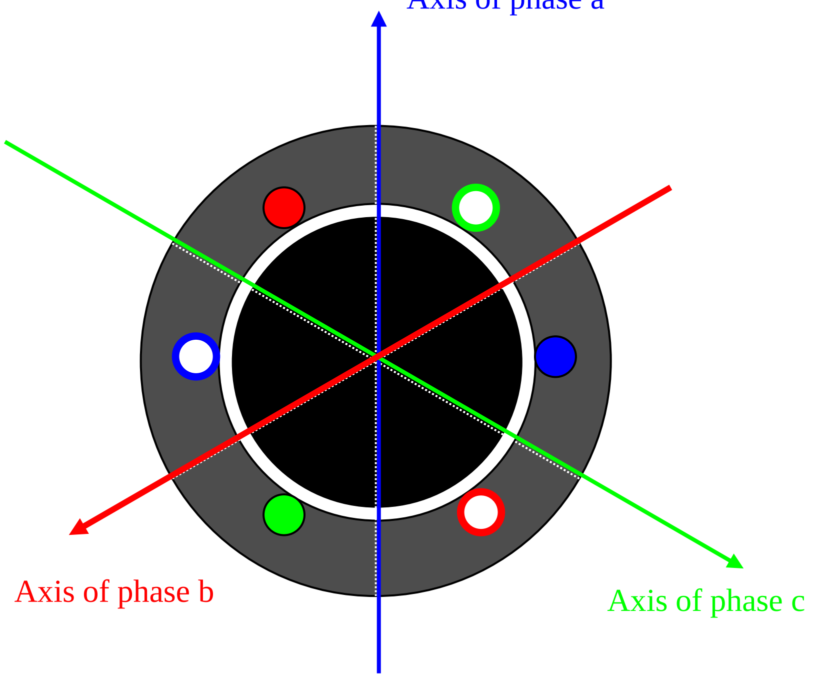




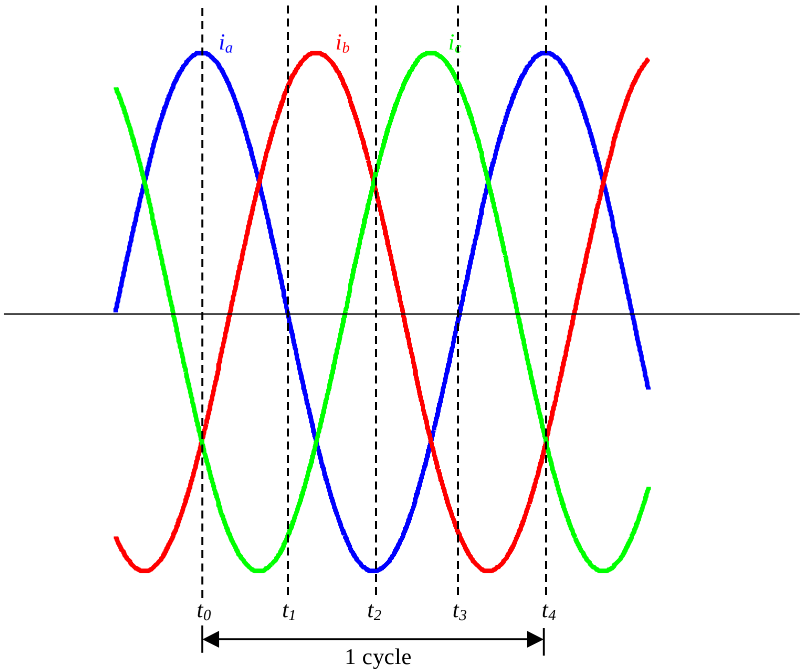
Campo Magnético Produzido por 3 Bobinas

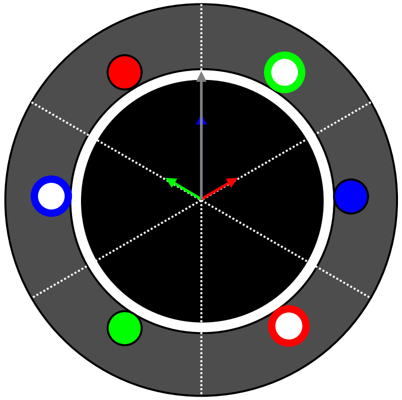
- Campo girante (método gráfico)



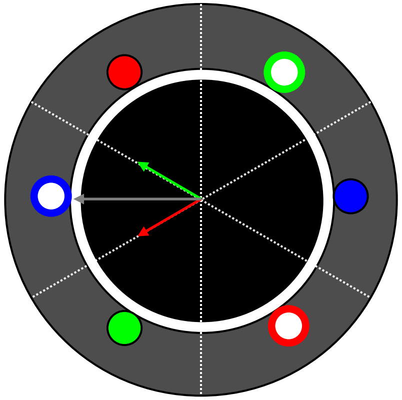


Magnitude do Campo Girante – Método Gráfico

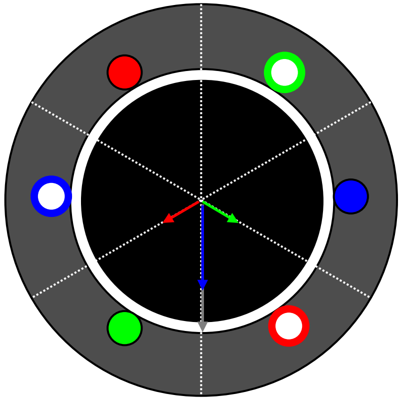


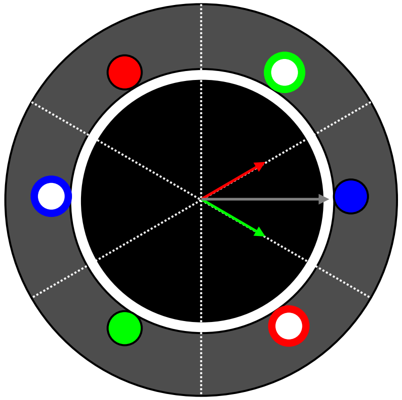


(t_0 e t_4)



(t_1)





animação

(t_2)

(t_3)

Magnitude do Campo Girante – Método Gráfico

- Módulo constante (3/2 Fmax)
- 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

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

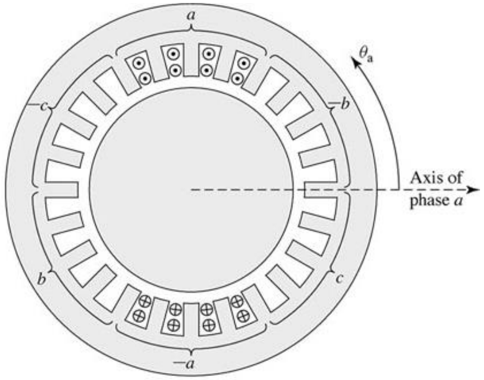
$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^o)$$

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

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



(a)

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

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

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

- **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:

$$\boxed{\begin{aligned} \mathcal{F}_a &= N\cos\theta * i_a = NI_m \cos\omega t \cos\theta \\ \mathcal{F}_b &= N\cos(\theta-120) * i_b = NI_m \cos(\omega t - 120^o)\cos(\theta - 120^o) \\ \mathcal{F}_c &= N\cos(\theta+120) * i_b = NI_m \cos(\omega t + 120^o)\cos(\theta + 120^o) \end{aligned}}$$

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

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

$$tem - se$$

$$\mathcal{F}(\theta,t) = \frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta) + \frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t+\theta)$$

$$+\frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta) + \frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t+\theta-240^o)$$

$$+\frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta) + \frac{1}{2}NI_m\cos(\omega t+\theta+240^o)$$

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

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 $3NI_m/2$;

$$\boxed{\begin{gathered}\mathcal{F}(\theta,t)=\mathcal{F}_a+\mathcal{F}_b+\mathcal{F}_c\\[2em]\mathcal{F}(\theta,t)=\frac{3}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta)\end{gathered}}$$

Tensão Induzida pelo Campo Girante

- A tensão induzida nas bobinas do rotor será senoidal, pois:

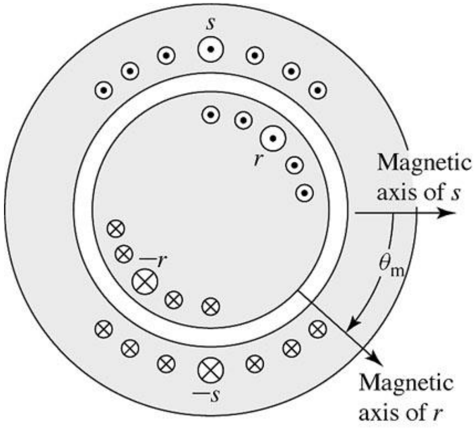
  no tempo: para θ fixo a força magnetomotriz será senoidal

  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);

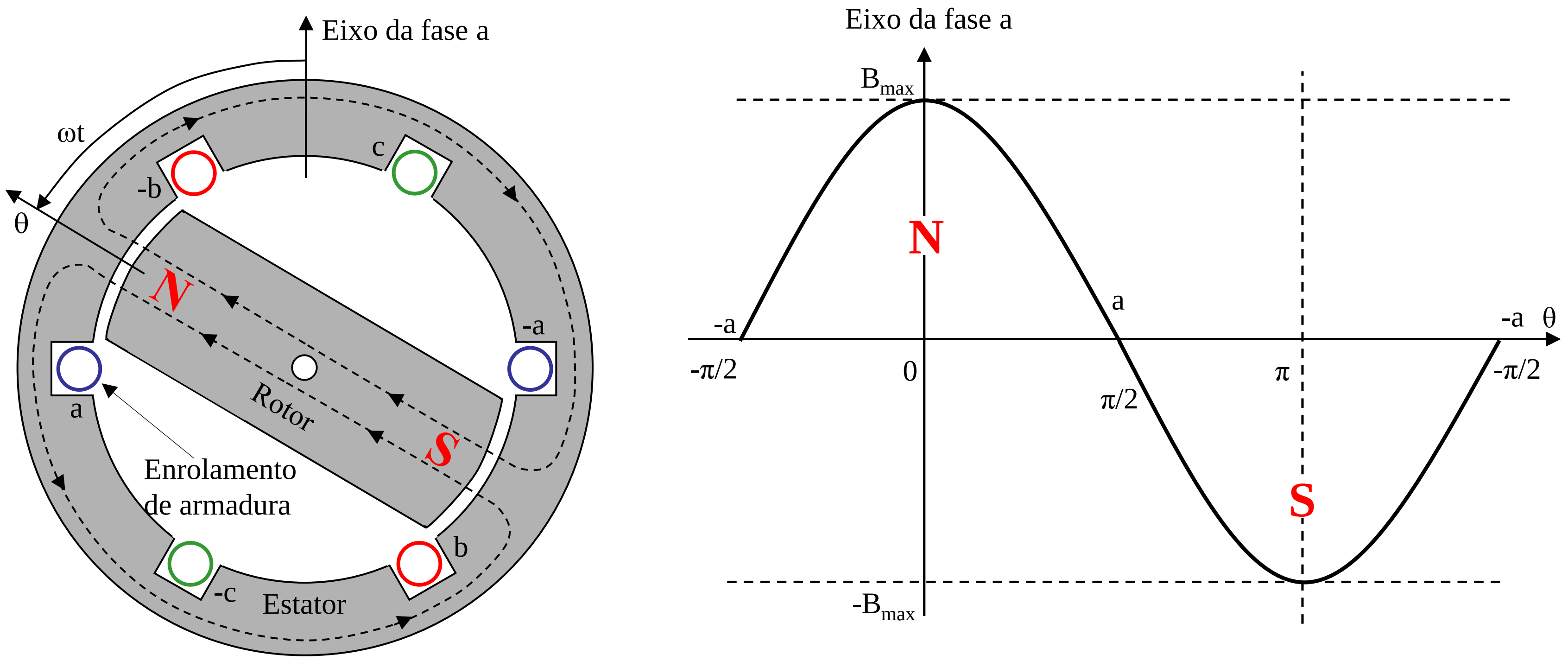
$$\boxed{\begin{gathered}\mathcal{F}(\theta,t)=\mathcal{F}_a+\mathcal{F}_b+\mathcal{F}_c \\ \mathcal{F}(\theta,t)=\frac{3}{2}NI_m\cos(\omega t-\theta)\end{gathered}}$$



(a)

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.

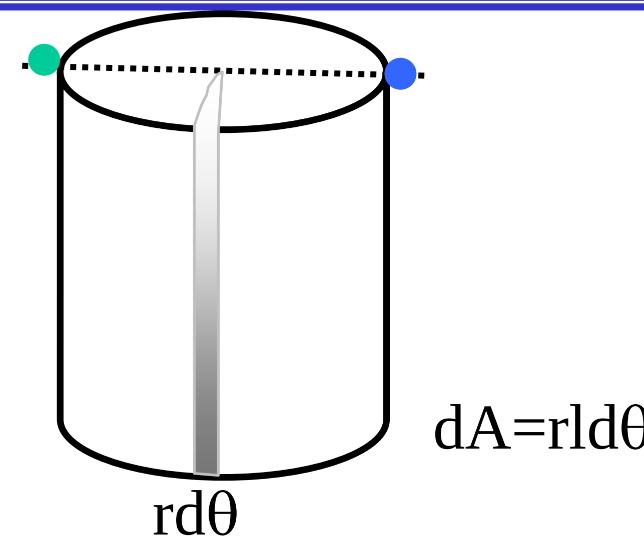
Tensão Induzida pelo Campo Girante

- O fluxo por pólo no entreferro será:

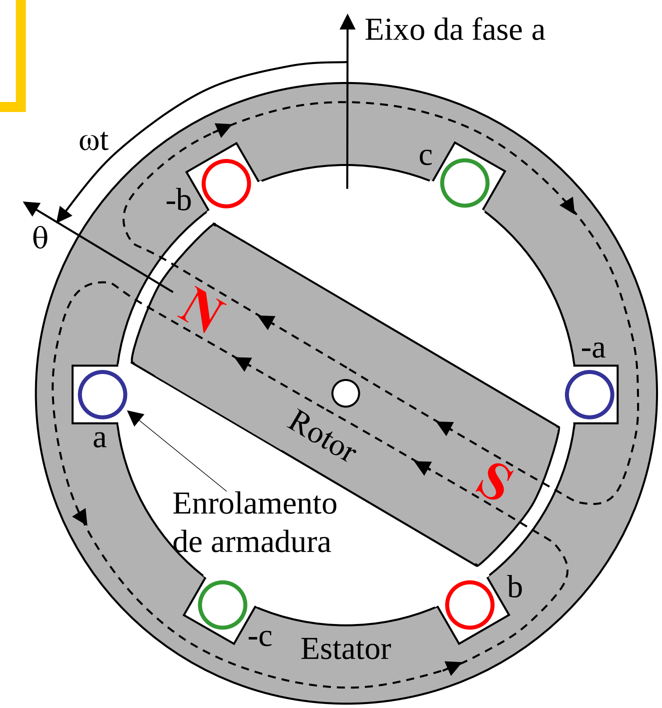
$$\phi_p = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} BdA = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B_{\max} \cos\theta * rld\theta$$

$$= rlB_{\max} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos\theta d\theta = rlB_{\max} \operatorname{sen}\theta \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2}$$

$$\phi_p = 2rlB_{\max}$$



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:

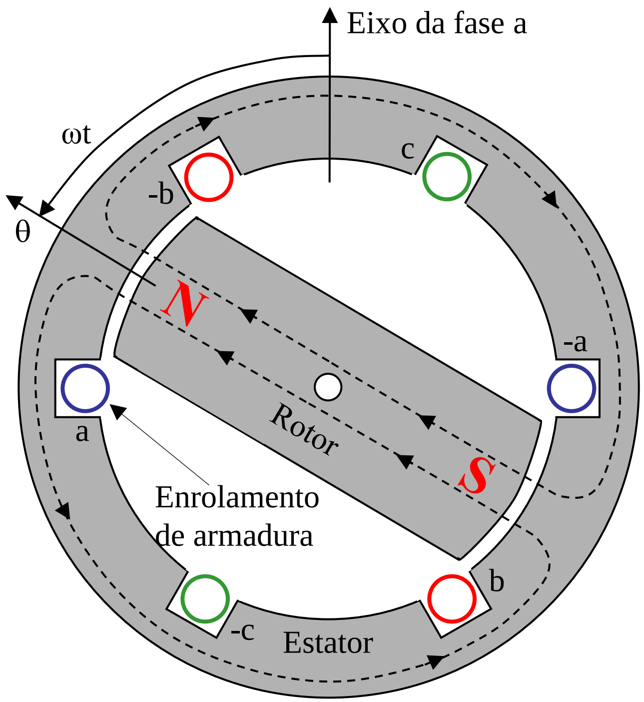
$$\Phi_P = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} B(\theta) lr d\theta = 2 B_{\max} lr$$

- 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:

$$\boxed{\lambda_a(\omega t) = N \Phi_P \cos \omega t}$$

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 ωt=0;
- O fluxo será nulo para ωt=90º;

Assim,

$$\boxed{\lambda_a = N\phi_p \cos \omega t}$$

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

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

de forma similar :

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

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

Tensão Induzida pelo Campo Girante

- O Valor RMS da tensão induzida é:

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

- 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 $\mathbf{e_{ai}}$ 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:

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

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:

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

- 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