

TENSÃO INSTANTÂNEA GERADA PELA MÁQUINA SÍNCRONA:

$$E(\omega.t) = (2 \cdot N_{ef} \cdot B_{g_{max}} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot n_s) \cdot \text{sen } \omega.t = E_{max} \cdot \text{sen } \omega.t$$

VALOR EFICAZ DA TENSÃO GERADA:

$$E = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot N_{ef} \cdot B_{g_{max}} \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot n_s}{\sqrt{2}} \quad n_s = \frac{f}{p} \rightarrow E = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot N_{ef} \cdot B_{g_{max}} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{p} \cdot f$$

$$B_{g_{max}} = \frac{\pi}{2} \cdot B_{g_{med.}} \rightarrow E = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot \pi \cdot N_{ef} \cdot B_{g_{med.}} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{2p} \cdot f$$

$$B_{g_{med.}} \cdot \frac{\pi \cdot D}{2p} \cdot L = B_{g_{med.}} \cdot \tau_p \cdot L = B_{g_{med.}} \cdot S_p = \Phi_p \rightarrow \text{Fluxo por polo}$$

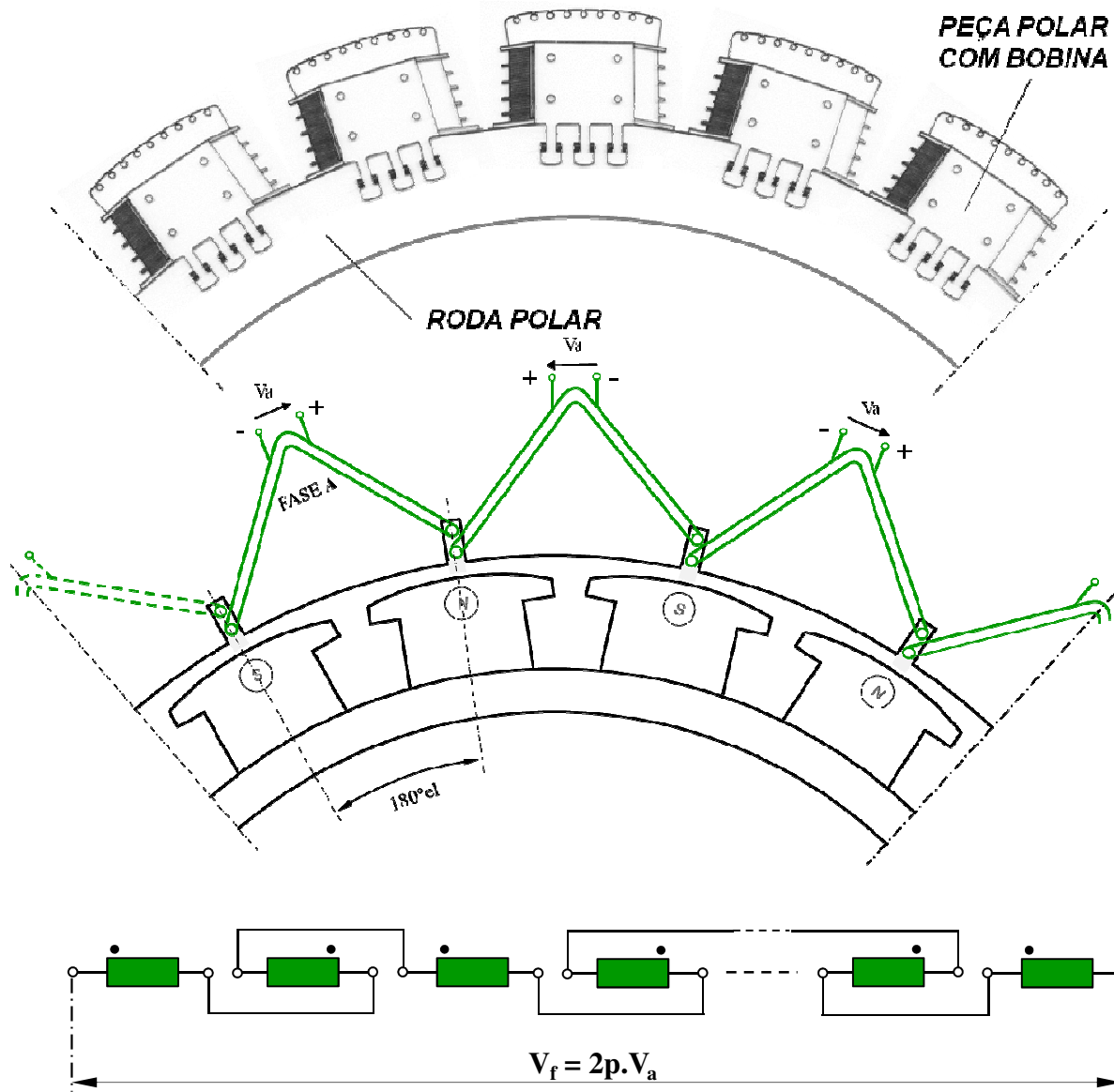
$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_{ef} \cdot \Phi_p = 4,44 \cdot f \cdot N_{ef} \cdot \Phi_p$$

***N_{ef}* : NÚMERO DE ESPIRAS EFETIVO CONSIDERADO:**

→ PARA UMA ÚNICA BOBINA → ***E* : TENSÃO EFICAZ INDUZIDA NA BOBINA**

→ PARA UM CONJUNTO DE BOBINAS FORMANDO UMA FASE DA MÁQUINA → ***E* : TENSÃO EFICAZ INDUZIDA NA FASE**

GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA → MÁQUINAS MULTIPOLARES



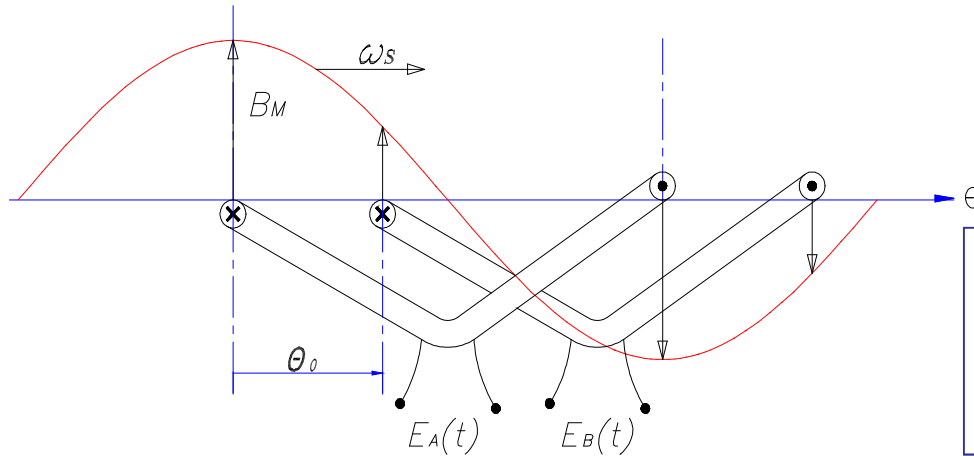
EM MÁQUINAS COM MÚLTIPLOS PARES DE POLOS, AS BOBINAS DO ENROLAMENTO INDUZIDO SÃO ALOJADAS DE MODO A TER-SE UM MELHOR APROVEITAMENTO DO ESPAÇO AO LONGO DO ESTATOR

→ ALOJA-SE UMA BOBINA PARA CADA POLO, DE MODO QUE AS TENSÕES INDUZIDAS SOBRE AS MESMAS SÃO IDÊNTICAS E ESTÃO EM FASE

→ CONECTAM-SE AS BOBINAS EM SÉRIE OU ASSOCIAÇÕES SÉRIE / PARALELO, FORMANDO O ENROLAMENTO DE UMA FASE

→ GERADOR MONOFÁSICO

2p BOBINAS CONECTADAS EM SÉRIE



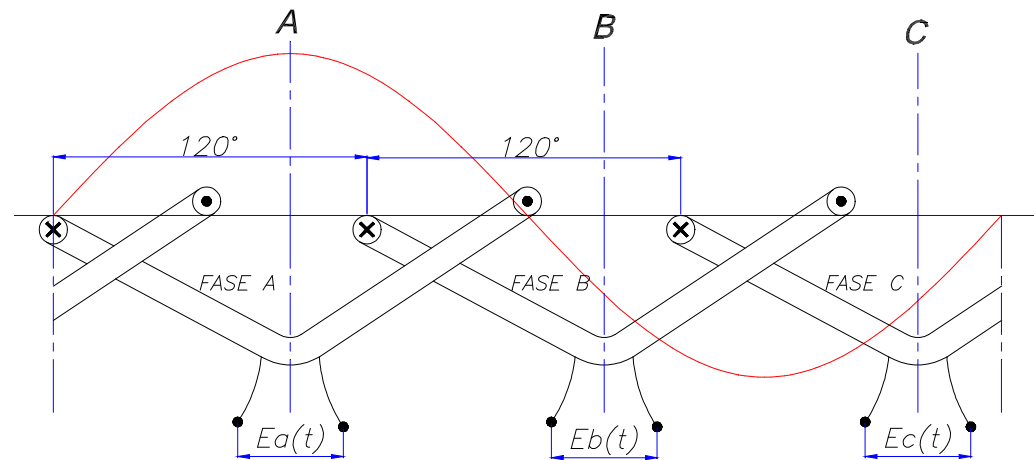
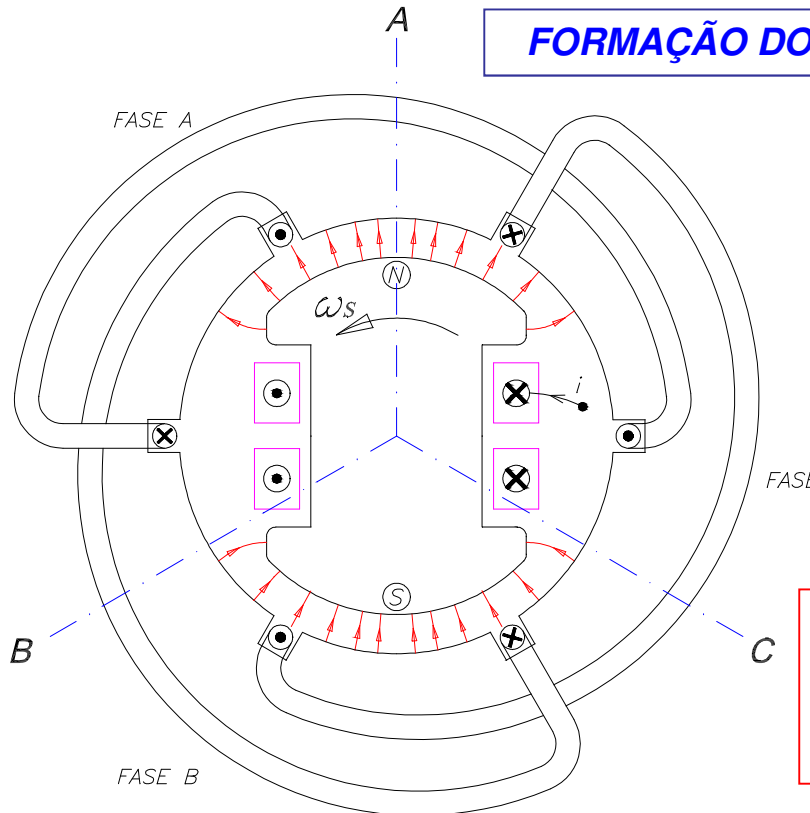
Bobinas com posições diferentes no estator sofrem tensão induzida cujos máximos ocorrem em tempos diferentes → **DEFASAGEM**

$$E_A = E_M \cdot \cos \omega t \quad \text{- para: } \omega t = \theta = 0^\circ \rightarrow E_A = E_M$$

$$E_B = E_M \quad \text{- apenas quando: } \theta = \omega t = \theta_0$$

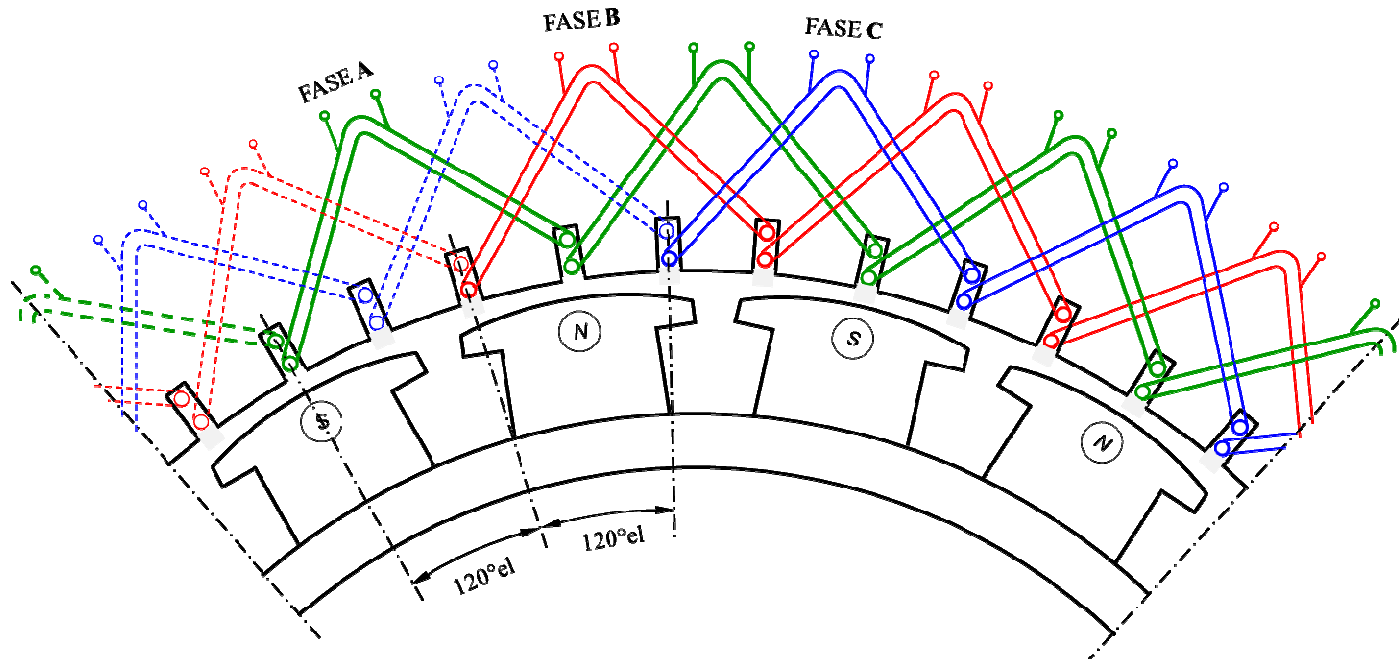
$$\rightarrow E_B = E_M \cdot \cos(\omega t - \theta_0)$$

FORMAÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSÕES



BOBINAS POSICIONADAS NO ESPAÇO (ENTREFERRO) A 120° ELÉTRICOS

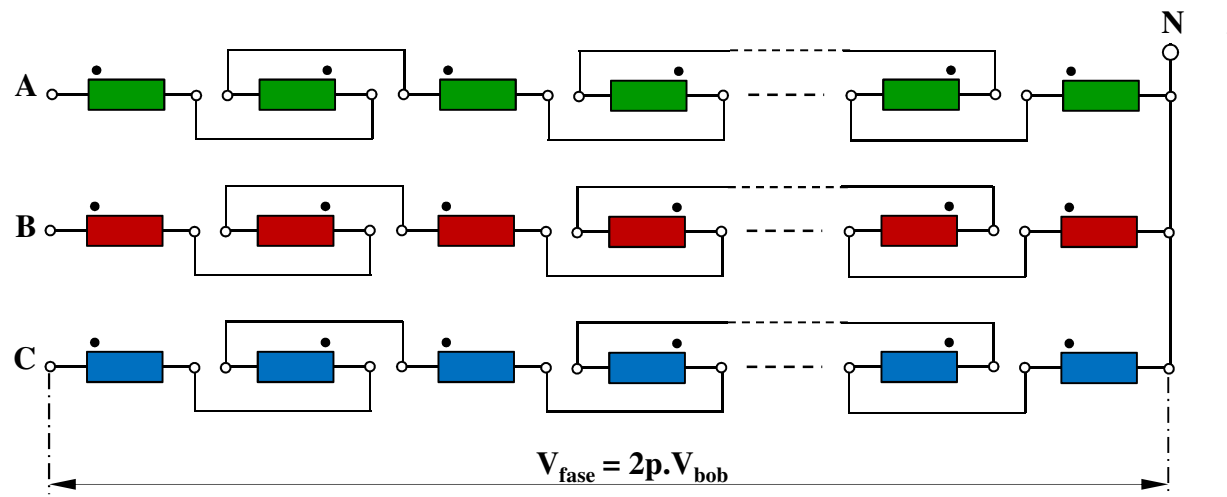
$$\begin{cases} E_A = E_M \cdot \cos \omega t \\ E_B = E_M \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \\ E_C = E_M \cdot \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$

FORMAÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSÕES → MÁQUINAS COM MÚLTIPLOS PARES DE POLOS


ALOJA-SE UMA BOBINA PARA CADA POLO EM CADA FASE

→ **CONECTAM-SE AS BOBINAS DE CADA FASE DE FORMA IDÊNTICA, EM ASSOCIAÇÕES SÉRIE / PARALELO**

→ **FORMA-SE O GERADOR TRIFÁSICO MULTIPOLAR**

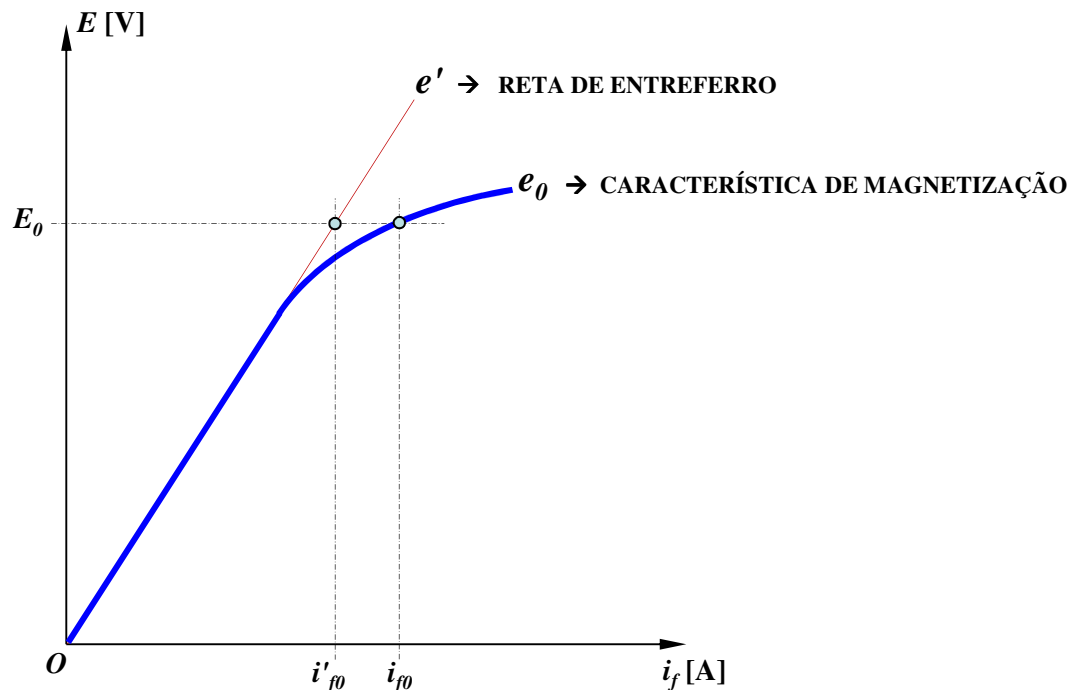


2p BOBINAS CONECTADAS EM SÉRIE EM CADA FASE

INFLUÊNCIA DA EXCITAÇÃO → CARACTERÍSTICA EM VAZIO DA MÁQUINA SÍNCRONA

$$E(\omega.t) = E_{max} \cdot \text{sen } \omega t = (2 \cdot N_{ef} \cdot B_{gmax} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot n_s) \cdot \text{sen } \omega t \quad \rightarrow \quad \text{VALOR EFICAZ: } E = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot N_{ef} \cdot B_{gmax} \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot L}{p} \cdot f$$

$$B_{gmax} = \frac{N \cdot i_f \cdot \mu_0}{l_{g0}} \quad \rightarrow \quad E = f(i_f) \quad \rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{TENSÃO INDUZIDA É FUNÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO } i_f \\ i_f \rightarrow \text{VARIÁVEL DE CONTROLE DA TENSÃO GERADA} \end{array} \right.$$



RETA DE ENTREFERRO:

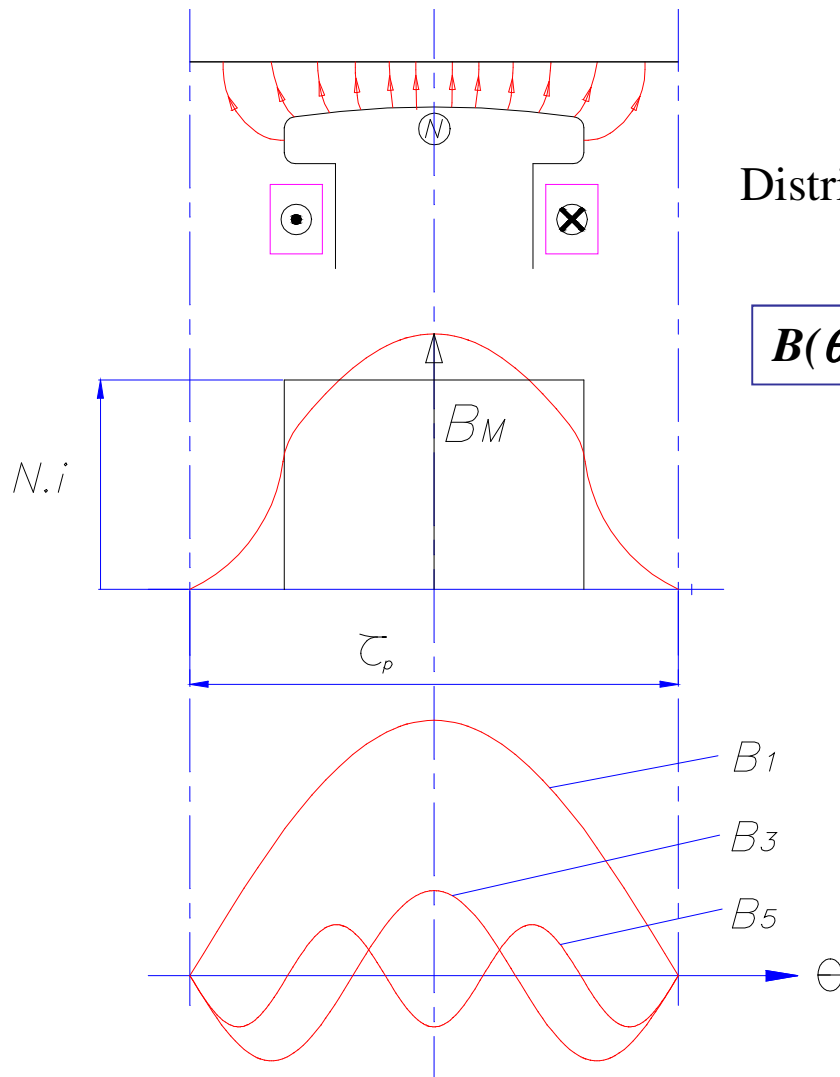
CARACTERÍSTICA DO CIRCUITO MAGNÉTICO DA MÁQUINA SEM CONTRIBUIÇÃO DO MATERIAL FERROMAGNÉTICO

CARACTERÍSTICA DE MAGNETIZAÇÃO:

CURVA COMPLETA COM A CONTRIBUIÇÃO DAS PARTES FERROMAGNÉTICAS DA MÁQUINA

FATOR DE SATURAÇÃO: $K_s = i_{f0} / i'_{f0} (>1)$

**CONTEÚDO HARMÔNICO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CAMPO
NO ENTREFERRO DA MÁQUINA SÍNCRONA**



Distribuição de induções real não é perfeitamente senoidal

$$B(\theta) = B_1 \cdot \cos \theta + B_3 \cdot \cos 3\theta + B_5 \cdot \cos 5\theta + \dots + B_h \cdot \cos h\theta$$

h : ordem da harmônica

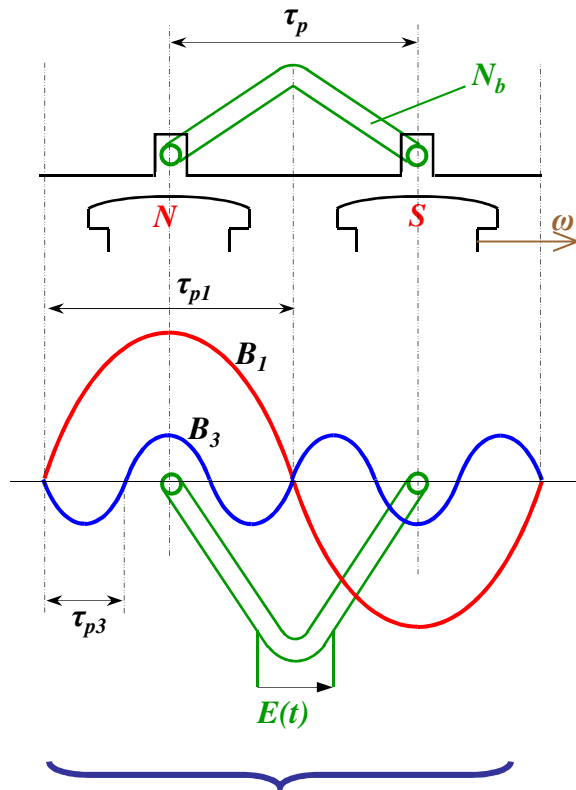
B_1 : componente fundamental

B_h : componente harmônica

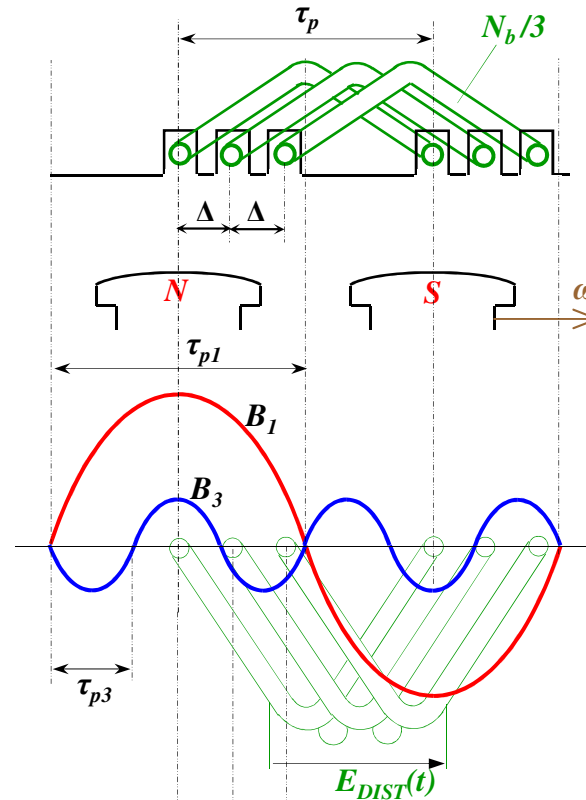
CONSEQÜÊNCIA : SURGEM TENSÕES HARMÔNICAS

INDUZIDAS NO ESTATOR → DISTORÇÃO DA FORMA DE ONDA DA TENSÃO GERADA

FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 1 - DISTRIBUIÇÃO DO ENROLAMENTO



**1 BOBINA CONCENTRADA
COM N° DE ESPIRAS N_b**



$0^\circ \Delta 2\Delta \rightarrow$ **ÂNGULO P/ FUNDAMENTAL**

$0^\circ h\Delta h2\Delta \rightarrow$ **ÂNGULO P/ HARMÔNICA "h"**

**EXEMPLO DE
DISTRIBUIÇÃO :**

$q = 3$ ranh./pólo/fase

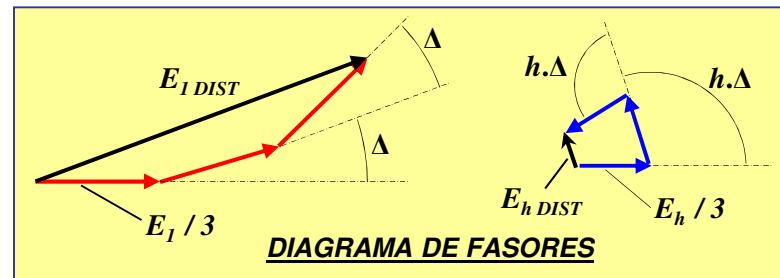
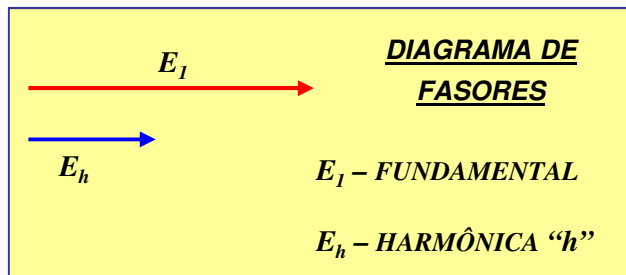


**1 GRUPO DE 3 BOBINAS
EM SÉRIE, CADA
BOBINA COM N° DE
ESPIRAS $N_b/3$**

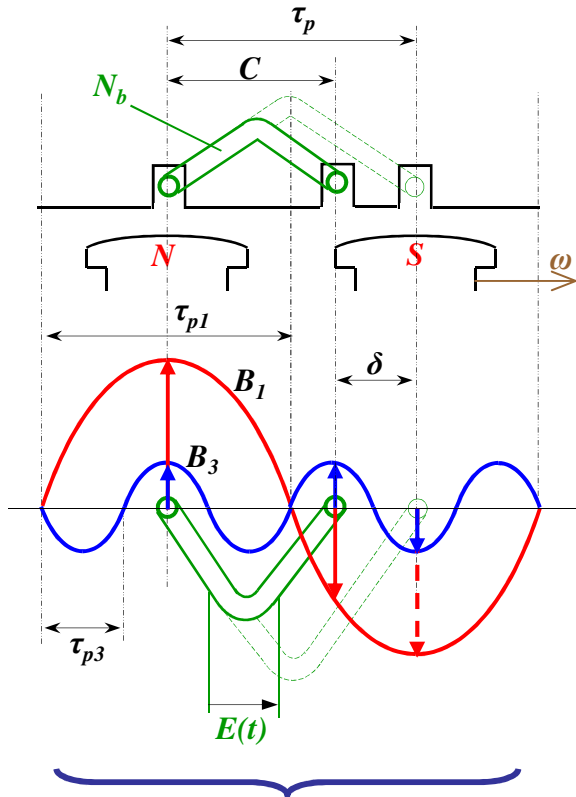
**EFEITO DA
DISTRIBUIÇÃO:**

$E_{1\text{ DIST}} \approx E_1$

$E_{h\text{ DIST}} \ll E_h$



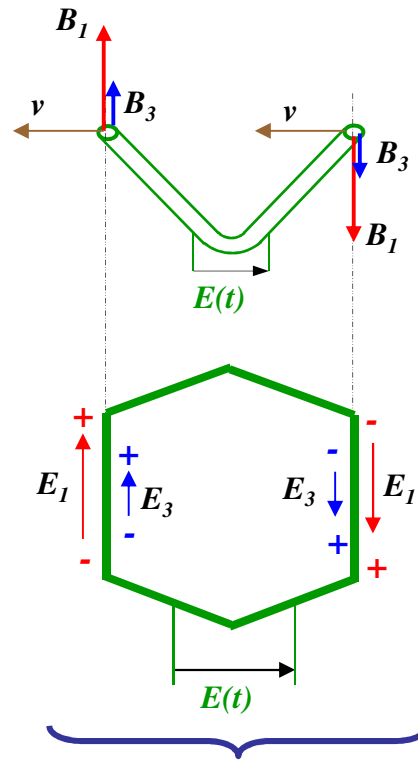
FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 2 - ENCURTAMENTO DE PASSO DAS BOBINAS



PASSO DA BOBINA : $C < \tau_p$

ÂNGULO DE ENCURTAMENTO : δ (° elet.)

$\delta = n \cdot \Delta \rightarrow n \text{ N}^\circ \text{ inteiro}$



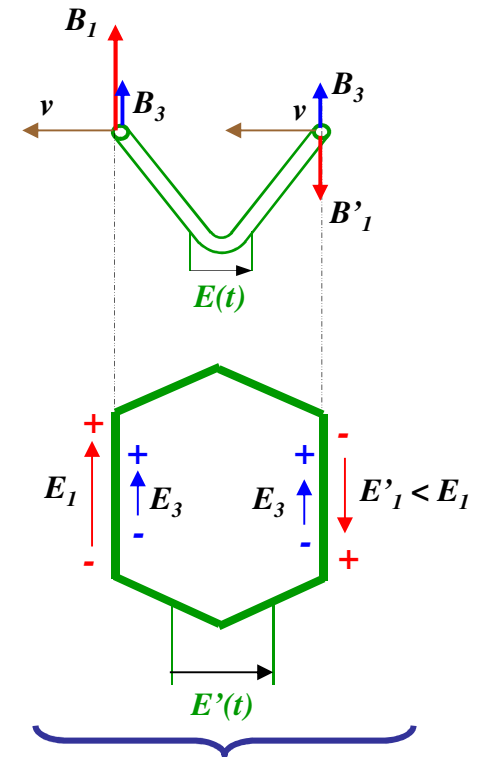
PASSO PLENO :

$E(t) = 2 \cdot E_1 + 2 \cdot E_3$

EFEITO DO ENCURTAMENTO:

$E'_1 \approx E_1$

$E'_h \ll E_h$



PASSO ENCURTADO :

(p.ex. → $\delta = 60^\circ$)

$E'(t) = E_1 + E'_1 + E_3 - E_3$

$E'(t) = E_1 + E'_1 < 2 \cdot E_1$

FILTRAGEM DE HARMÔNICOS**EFEITOS DA DISTRIBUIÇÃO E ENCURTAMENTO :**

→ **PEQUENA ATENUAÇÃO DA FUNDAMENTAL** → **FORTE ATENUAÇÃO DAS HARMÔNICAS**

EM GERAL, TODO ENROLAMENTO DE MÁQUINA SÍNCRONA É DOTADO DE DISTRIBUIÇÃO E ENCURTAMENTO

FATOR DE ATENUAÇÃO HARMÔNICA DA TENSÃO GERADA (FATOR DE ENROLAMENTO) :

$$k_{Eh} = \frac{\text{sen}(q \cdot h \cdot \frac{\Delta}{2})}{q \cdot \text{sen}(h \cdot \frac{\Delta}{2})} \cdot \cos(h \cdot \frac{\delta}{2}) \quad \left. \begin{array}{l} \text{EM GERAL:} \\ h = 1 \rightarrow k_{Eh} \approx 1 \\ h > 1 \rightarrow k_{Eh} \ll 1 \end{array} \right\}$$

CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO GERADA NA MÁQUINA SÍNCRONA:

$$v_h = \frac{\sum_{h=3}^{\infty} E_h \cdot k_{Eh}}{E_1} = \sum_{h=3}^{\infty} \frac{1}{h} \cdot k_{Eh}$$