

PARTE 2 – MÁQUINAS SÍNCRONAS

MÁQUINAS SÍNCRONAS - CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO**MÁQUINAS SÍNCRONAS :**

→ OPERAÇÃO NO MODO MOTOR (MOTORES DE GRANDE POTÊNCIA)

→ OPERAÇÃO NO MODO GERADOR → MODO MAIS COMUM, COMO ALTERNADOR SÍNCRONO (TRIFÁSICO)

CARACTERIZAÇÃO QUANTO À TOPOLOGIA DO CIRCUITO MAGNÉTICO - CAMPO DE APLICAÇÃO :

→ **MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS SALIENTES**

EM GERAL, GRANDE NÚMERO DE PÓLOS (48 – 96 PÓLOS) – BAIXA ROTAÇÃO (150 – 75 RPM)

USO COM TURBINAS HIDRÁULICAS (HIDROGERADORES) EM POTÊNCIAS ELEVADAS (ATÉ 800 MW)

USO COMUM TAMBÉM COMO GERADORES DE POTÊNCIA PEQUENA E MÉDIA (100 kW - 5 MW) ACIONADOS A PARTIR DE MOTORES DIESEL OU PEQUENAS TURBINAS A VAPOR - REDUZIDO Nº DE PÓLOS (4 – 6 – 8 PÓLOS) - ROTAÇÕES MÉDIAS (1800 – 1200 – 900 RPM)

→ **MÁQUINA SÍNCRONA DE PÓLOS LISOS (ROTOR CILÍNDRICO)**

EM GERAL, REDUZIDO NÚMERO DE PÓLOS (2 – 4 PÓLOS) – ELEVADA ROTAÇÃO (3600 – 1800 RPM)

USO COM TURBINAS A VAPOR OU A GÁS (TURBOGERADORES) EM POTÊNCIAS ELEVADAS (ATÉ 2000 MW)

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS**ESTATOR (INDUZIDO)**

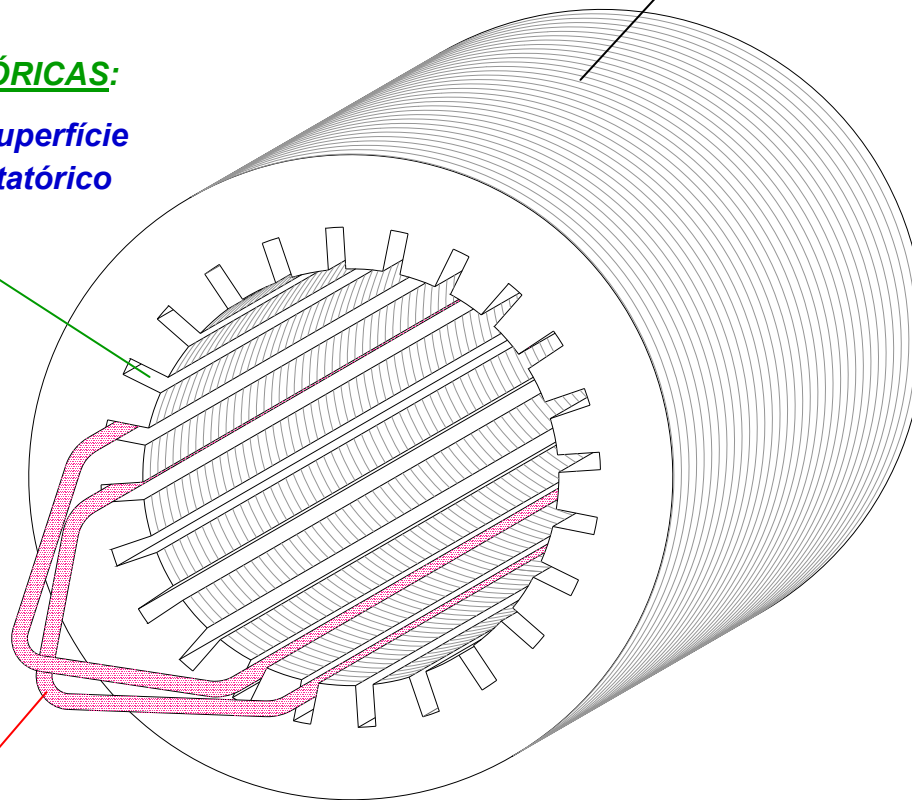
→ **IDÊNTICO NA SUA CONCEPÇÃO, TANTO NA M.S. DE POLOS SALIENTES COMO LISOS**

NÚCLEO DO ESTATOR:

Lâminas de material ferromagnético de alta permeabilidade (aço silício não orientado)

RANHURAS ESTATÓRICAS:

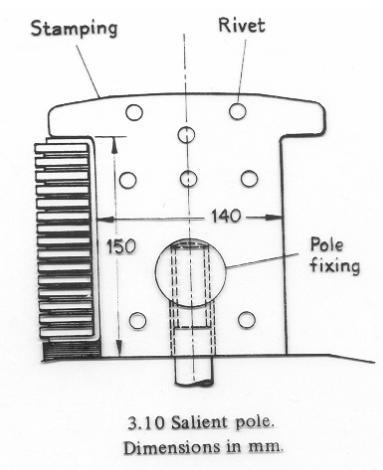
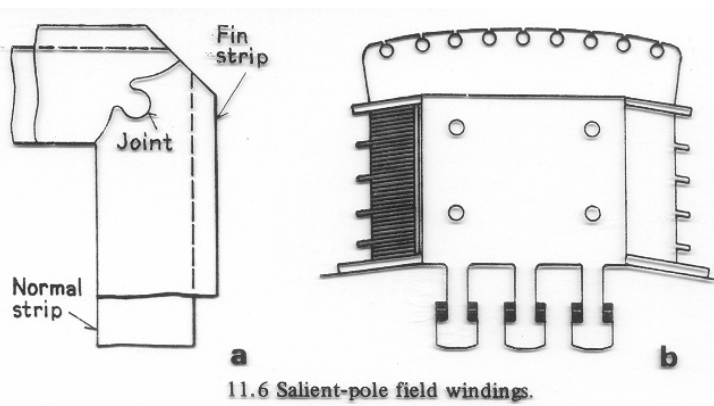
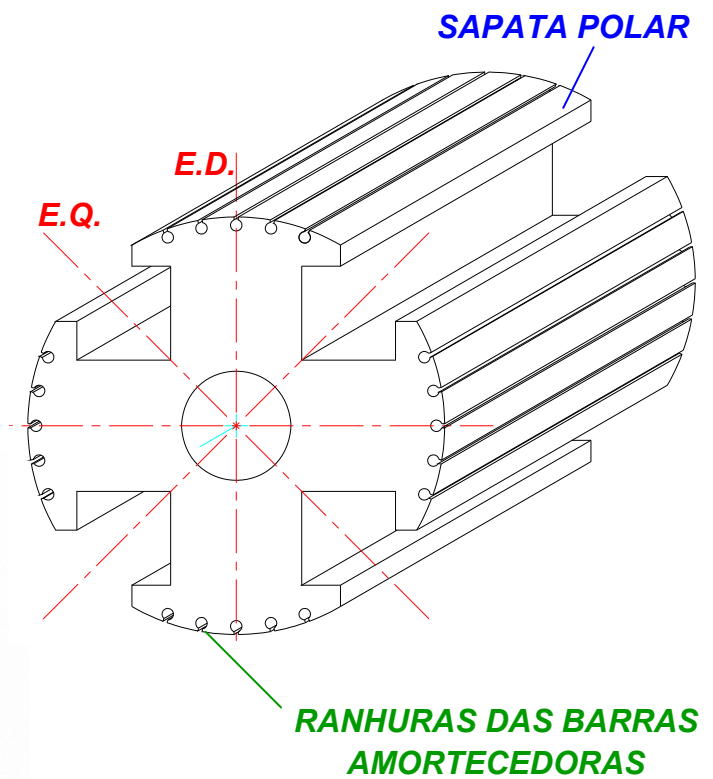
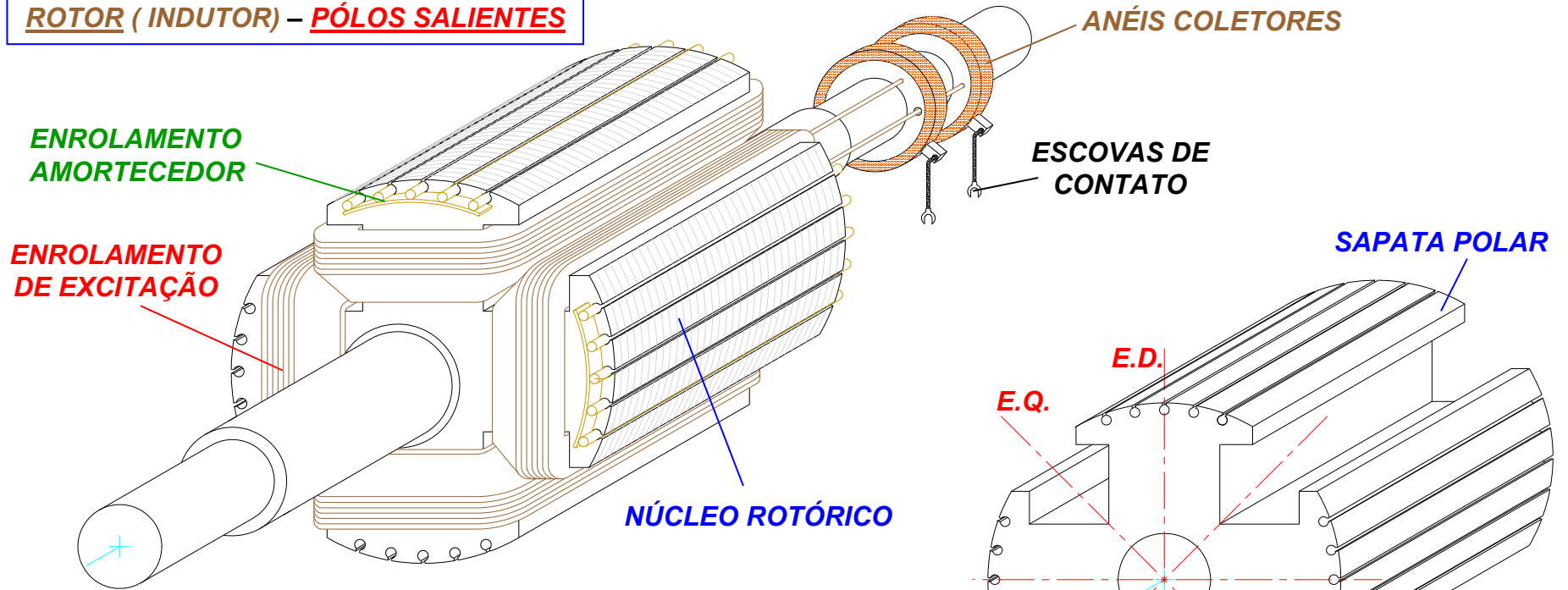
Ao longo de toda a superfície interna do cilindro estatórico

**BOBINAS DO ESTATOR:**

Alojadas em todas as ranhuras, formando o enrolamento de armadura ou induzido (trifásico)

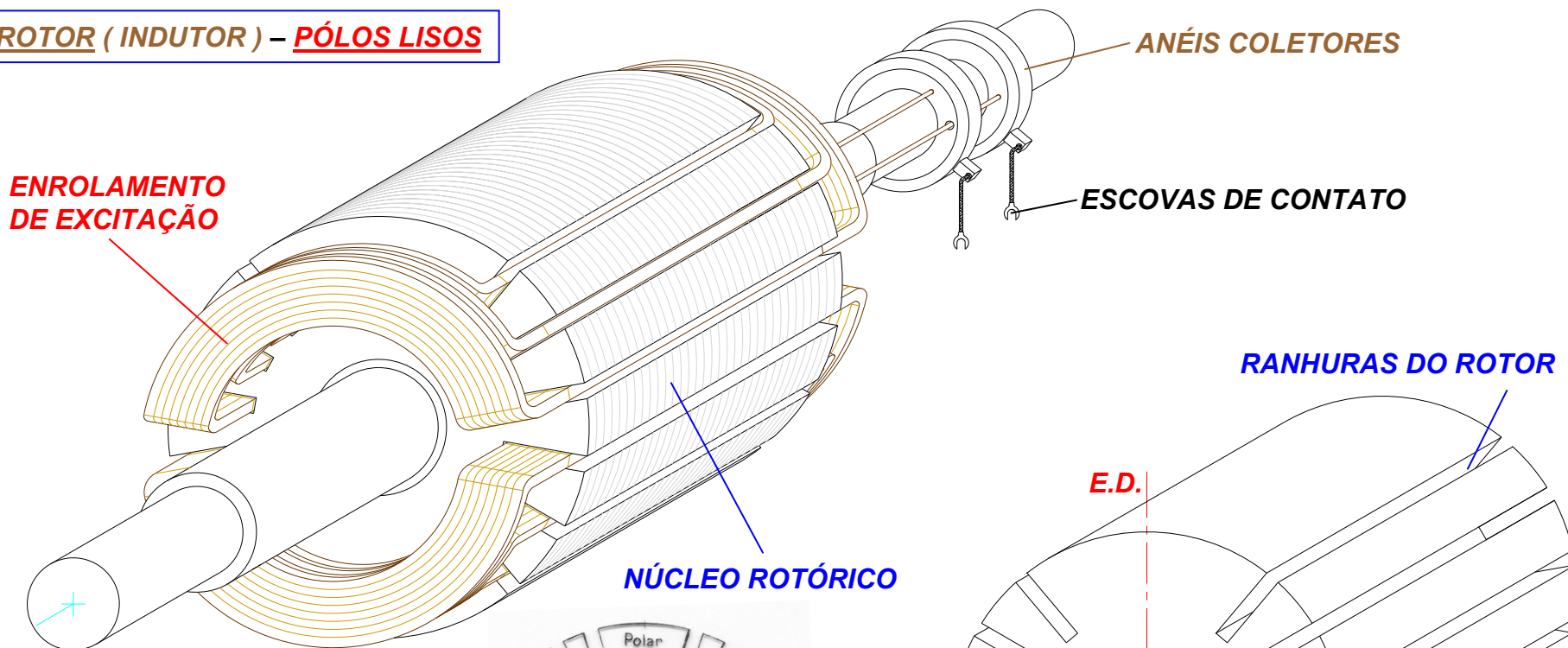
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

ROTOR (INDUTOR) – PÓLOS SALIENTES

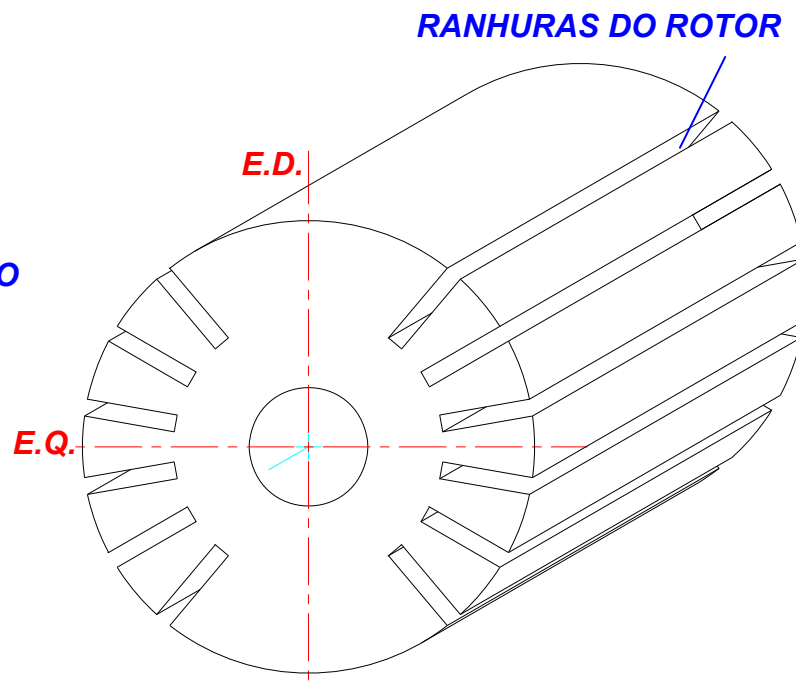
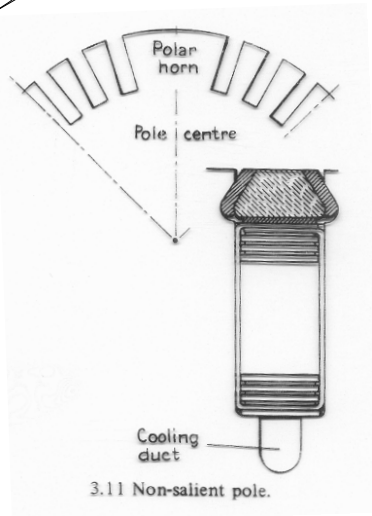


ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

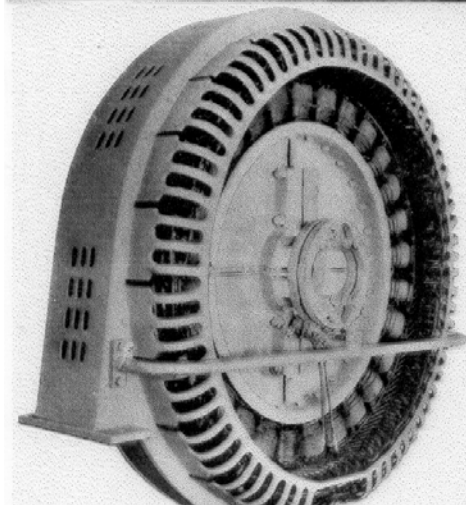
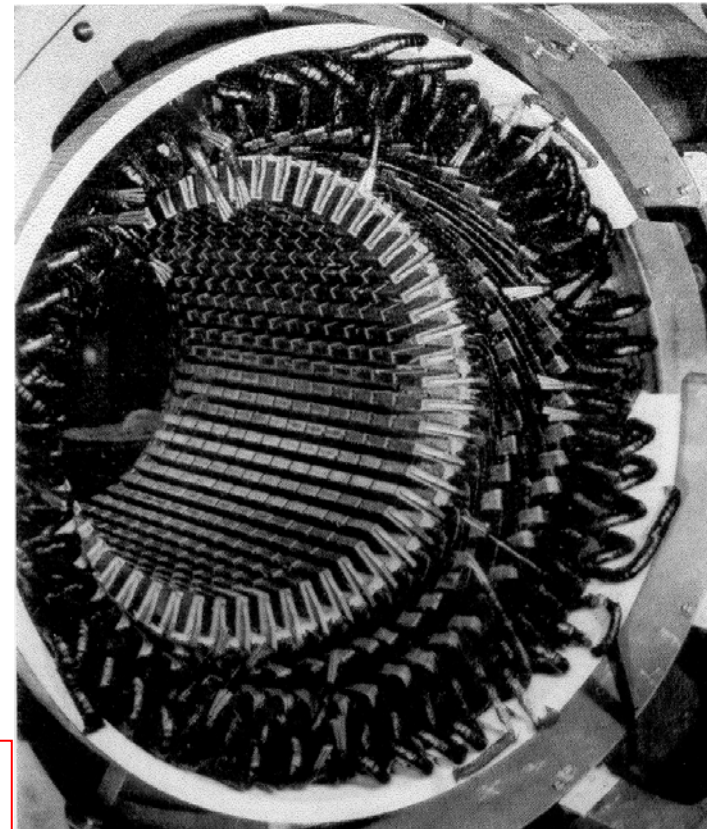
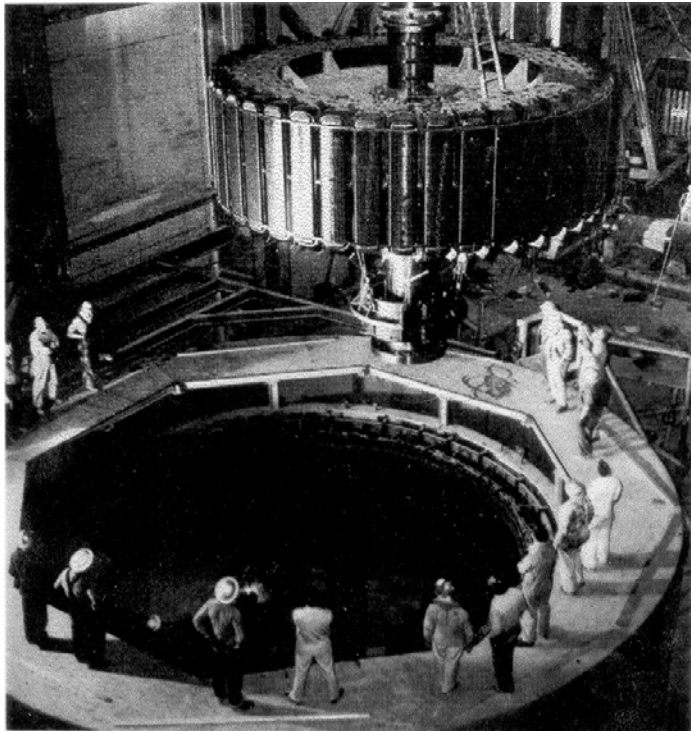
ROTOR (INDUTOR) - PÓLOS LISOS



DETALHE DA RANHURA E
FIXAÇÃO DA BOBINA DE
CAMPO EM GERADOR DE
GRANDE PORTE



ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS



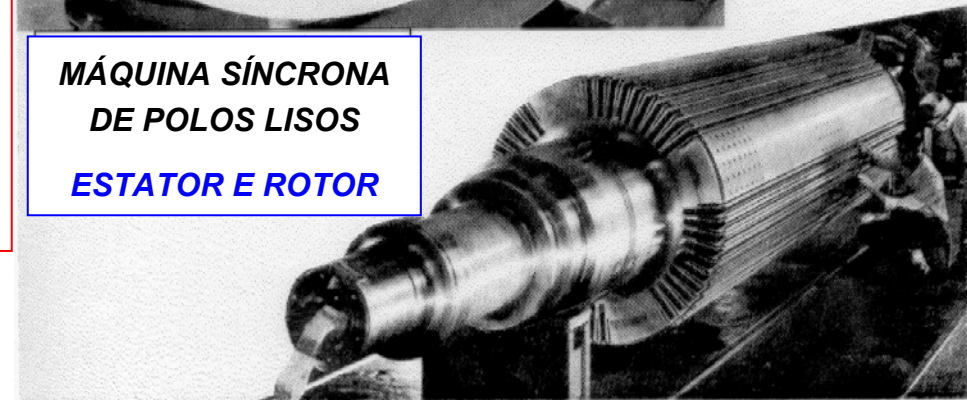
**MÁQUINA SÍNCRONA DE
POLOS SALIENTES**

**ESTATOR E ROTOR DE
GRANDE PORTE**

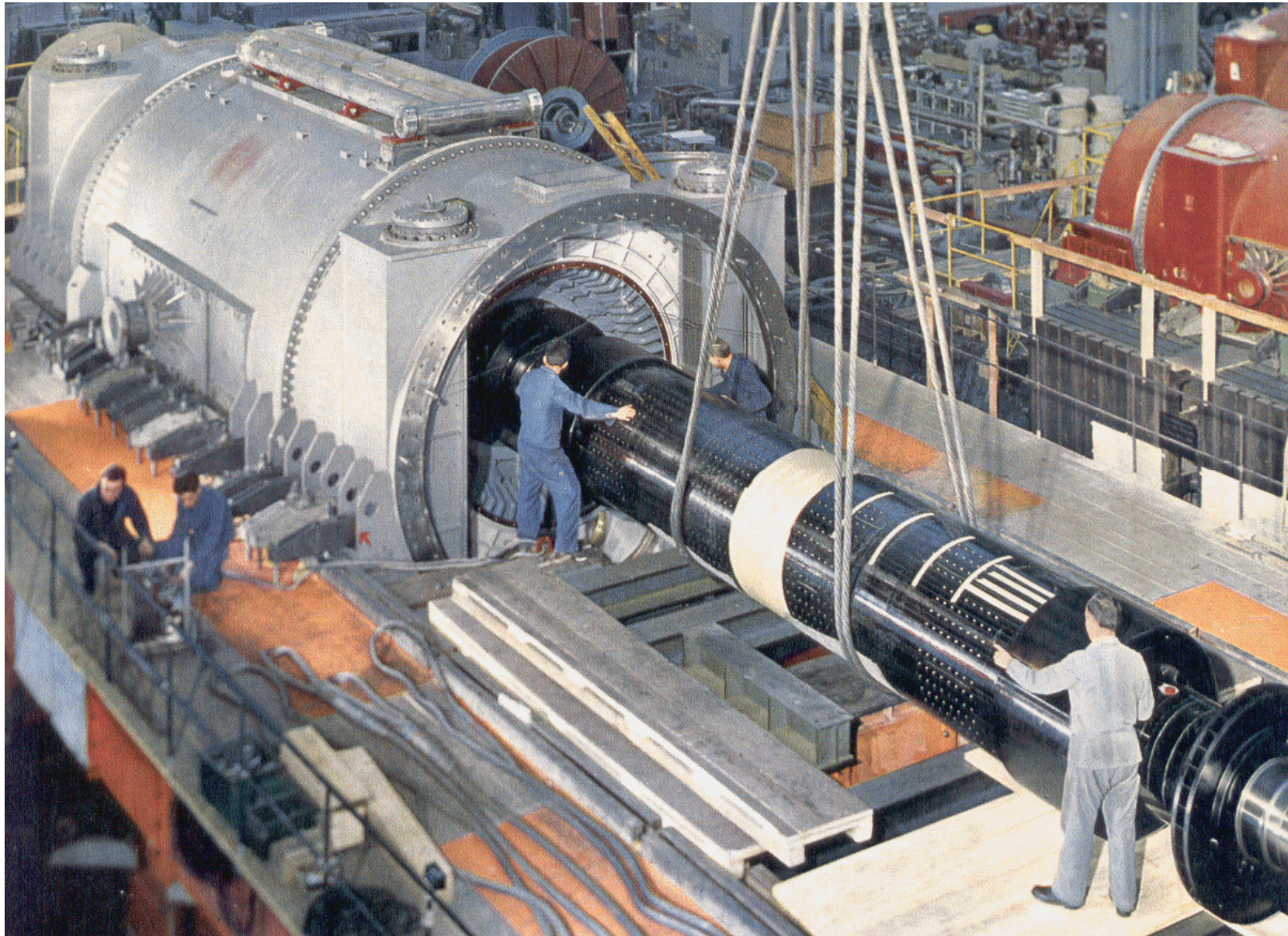
**MÁQUINA COMPLETA DE
MÉDIO PORTE**

**MÁQUINA SÍNCRONA
DE POLOS LISOS**

ESTATOR E ROTOR



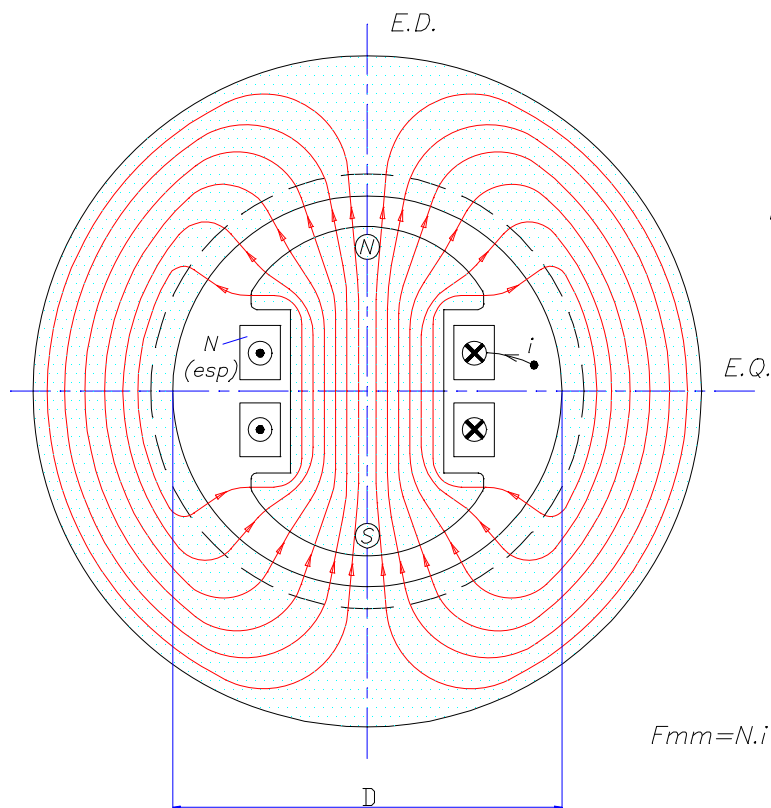
TURBO-GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS LISOS (MONTAGEM)



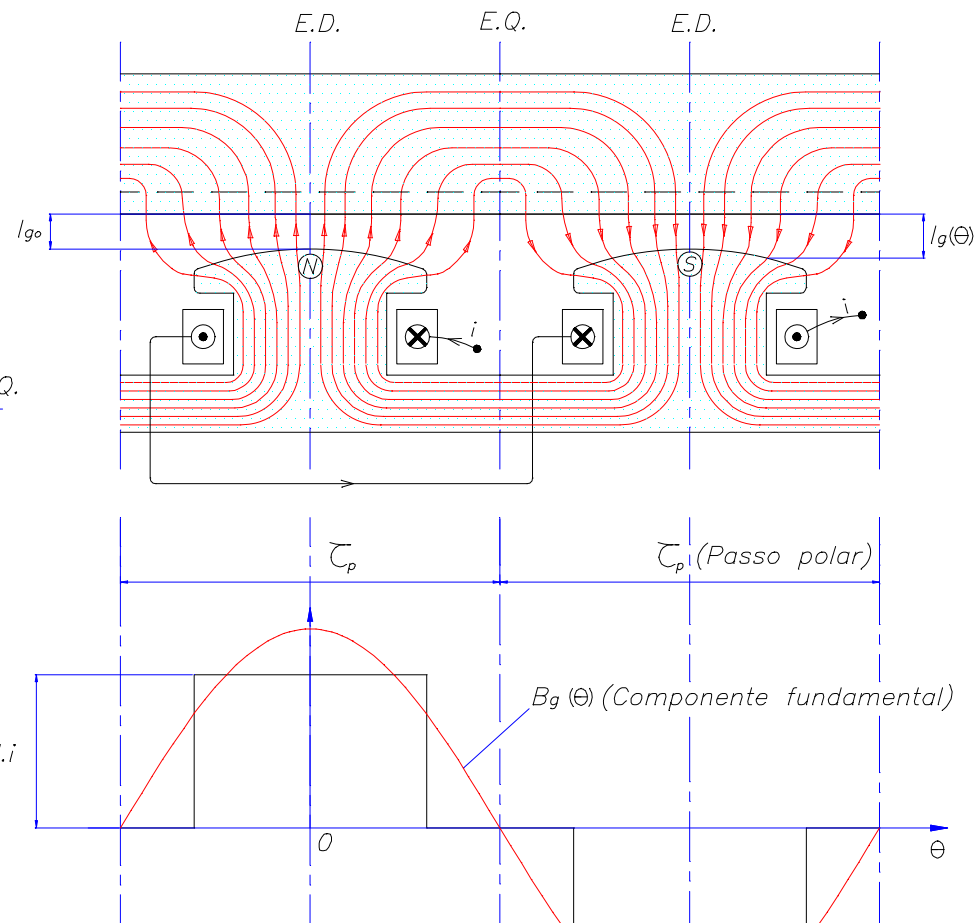
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

Máquina de pólos salientes – $2p=2$

Vista planificada da máquina



Vista em corte da máquina



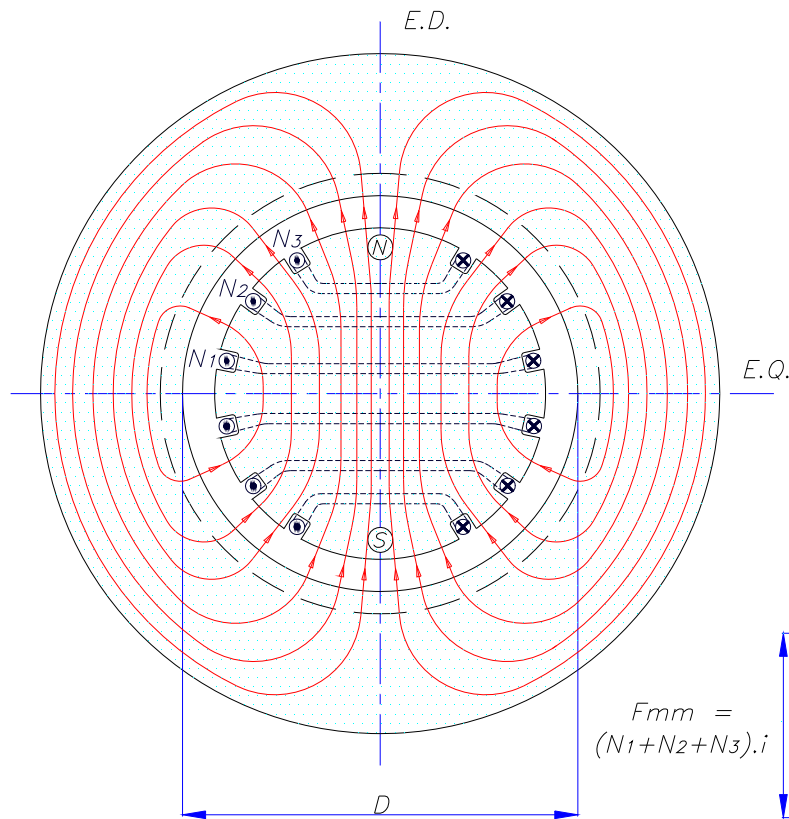
Distribuição espacial de F_{mm} e de induções no entreferro

CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO INJETADA NO ROTOR $\rightarrow N \cdot i = F_{mm}$

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

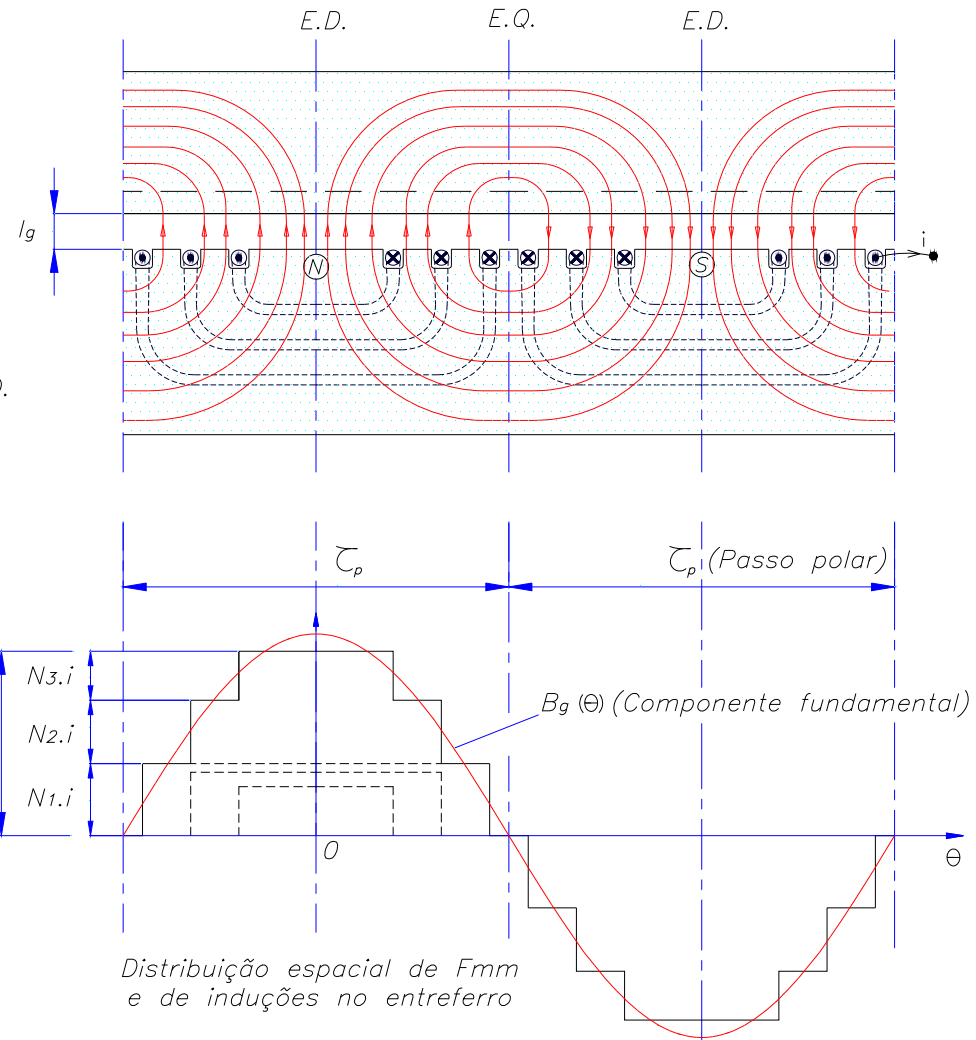
Máquina de pólos lisos – $2p=2$

Vista planificada da máquina



Vista em corte da máquina

$$F_{mm} = (N_1 + N_2 + N_3) \cdot i$$

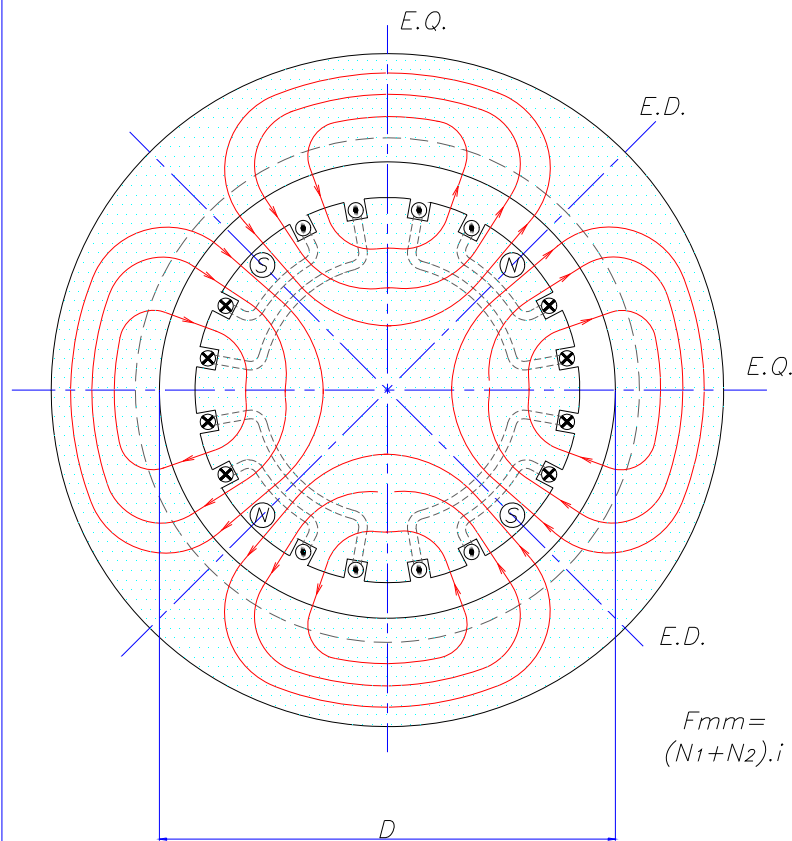


Distribuição espacial de F_{mm} e de induções no entreferro

CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO INJETADA NO ROTOR → $N \cdot i = F_{mm}$

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

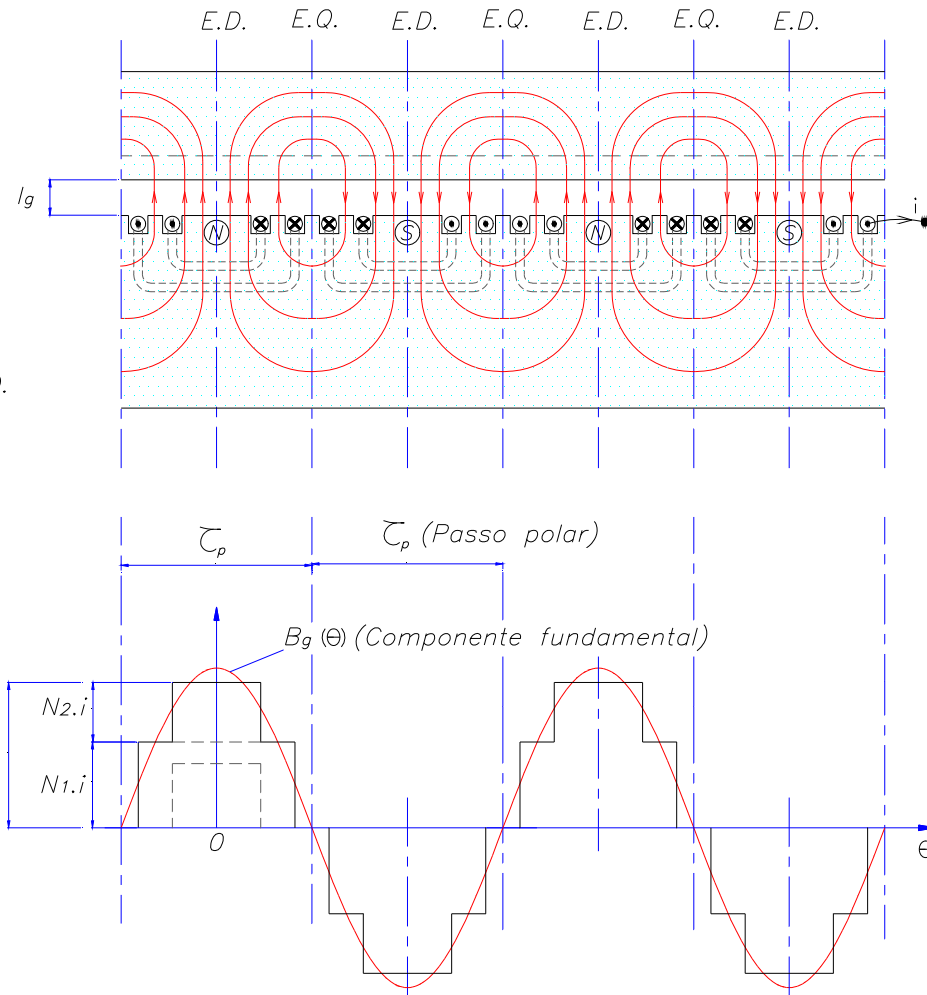
Máquina de pólos lisos – $2p=4$



Vista em corte da máquina

**CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO
INJETADA NO ROTOR $\rightarrow N.i = F_{mm}$**

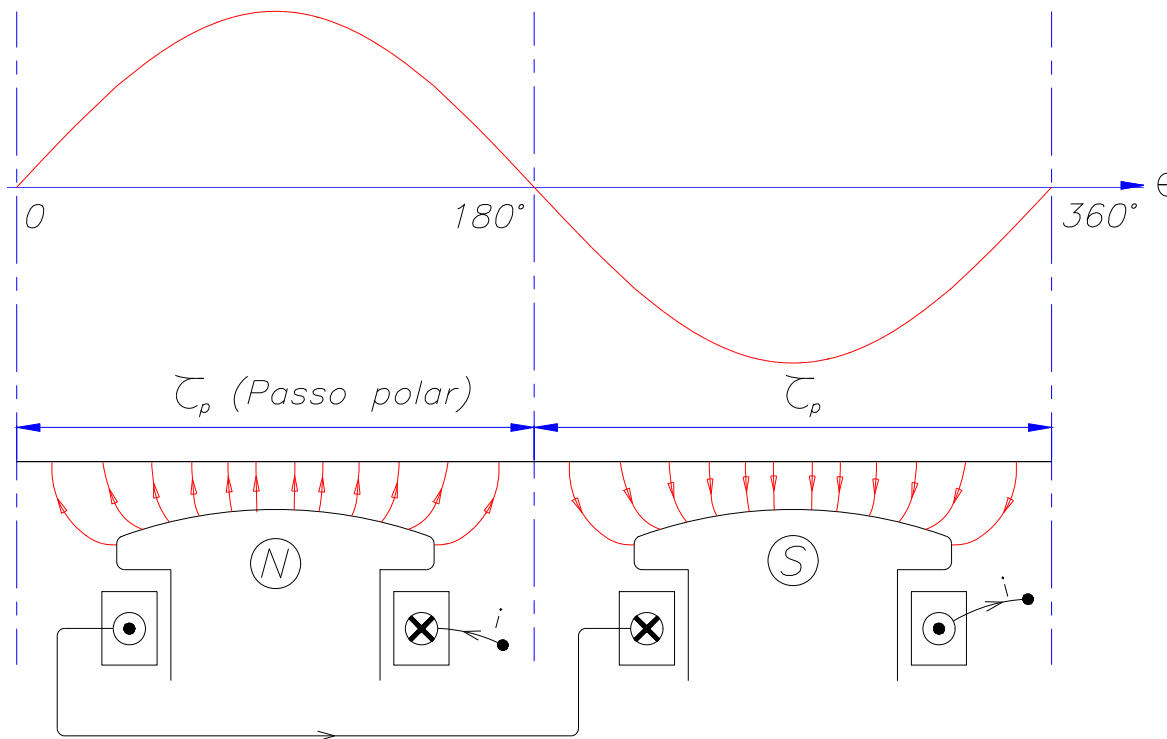
Vista planificada da máquina



Distribuição espacial de F_{mm} e de induções no entreferro

PASSO POLAR E ÂNGULOS ELÉTRICO E GEOMÉTRICO

Qualquer que seja o número de pólos da máquina, ocorre um ciclo completo de pólos magnéticos N – S em um duplo passo polar



Para 2 pólos – $2p = 2$

$$\tau_p = \pi.D/2 - 1/2 \text{ circunferência}$$

$$\tau_p - 180^\circ \text{ geométricos} = 180^\circ \text{ elétricos}$$

Para 4 pólos – $2p = 4$

$$\tau_p = \pi.D/4 - 1/4 \text{ circunferência}$$

$$\tau_p - 90^\circ \text{ geométricos} = 180^\circ \text{ elétricos}$$

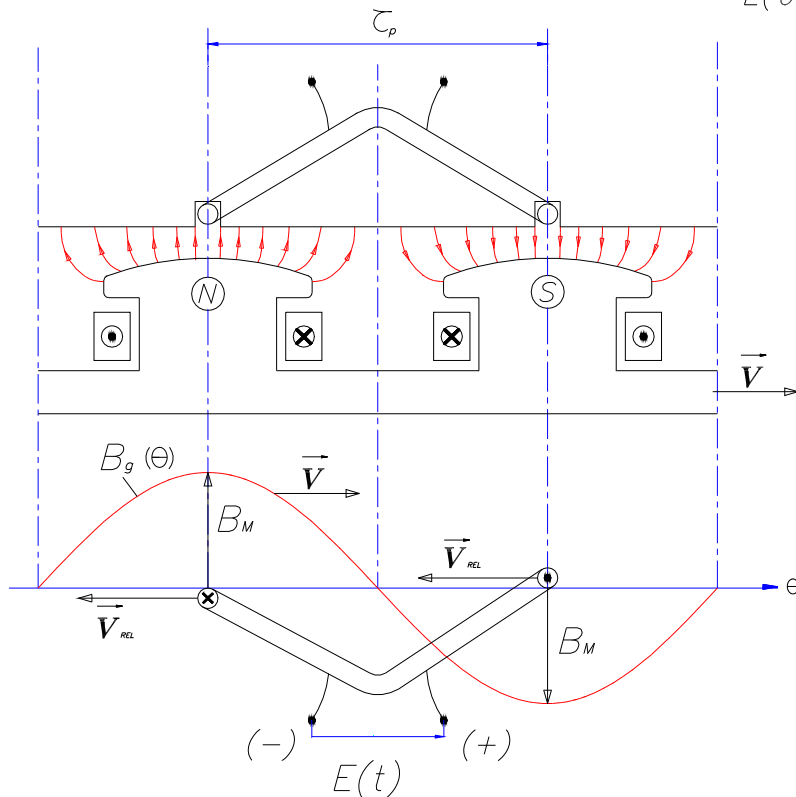
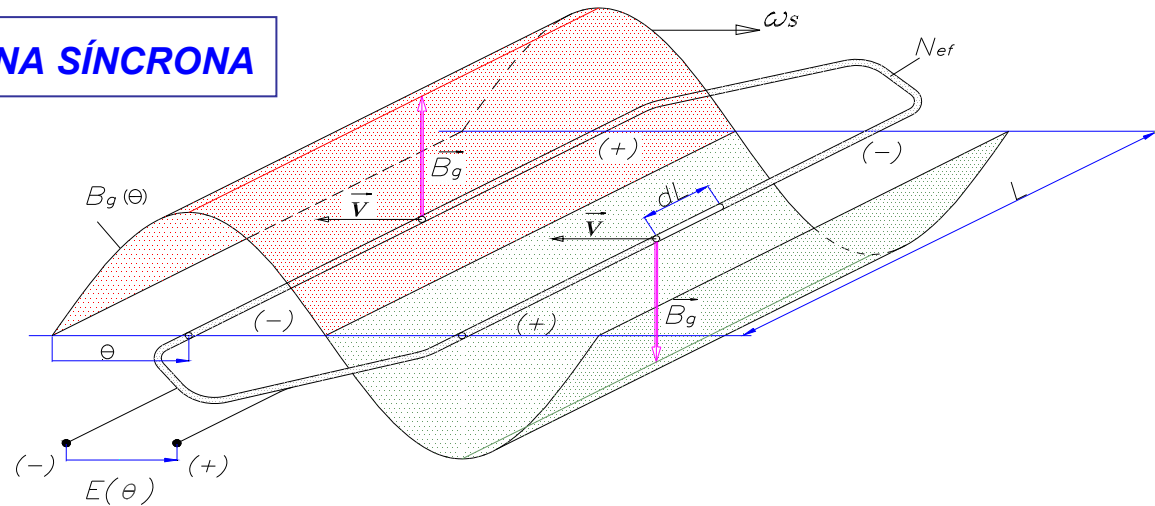
$$\text{ÂNGULO ELÉTRICO} = p \times \text{ÂNGULO GEOMÉTRICO} - p = \text{N}^\circ \text{ de pares de pólos}$$

GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA

EFEITO MOCIONAL



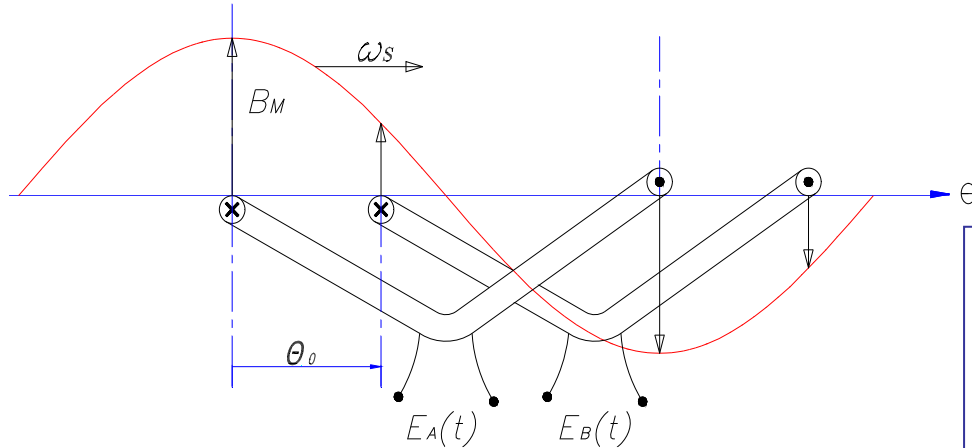
$$de = d\vec{L} \cdot (\vec{V} \times \vec{B}_g) \Rightarrow e = B_g \cdot L \cdot V$$



Estator com bobina alojada em ranhuras afastadas de 180° elétricos (τ_p)

Rotor em movimento com velocidade angular ω_s
 velocidade periférica $v = \pi \cdot D \cdot n_s$
 onde $\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n_s = 2 \cdot \pi \cdot f/p$

Distribuição espacial de induções no entreferro solidária ao rotor – móvel com velocidade ω_s



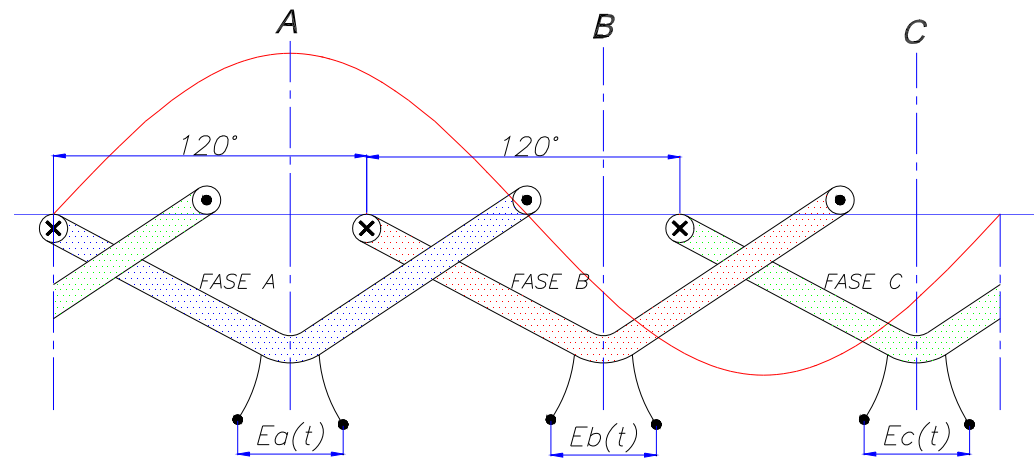
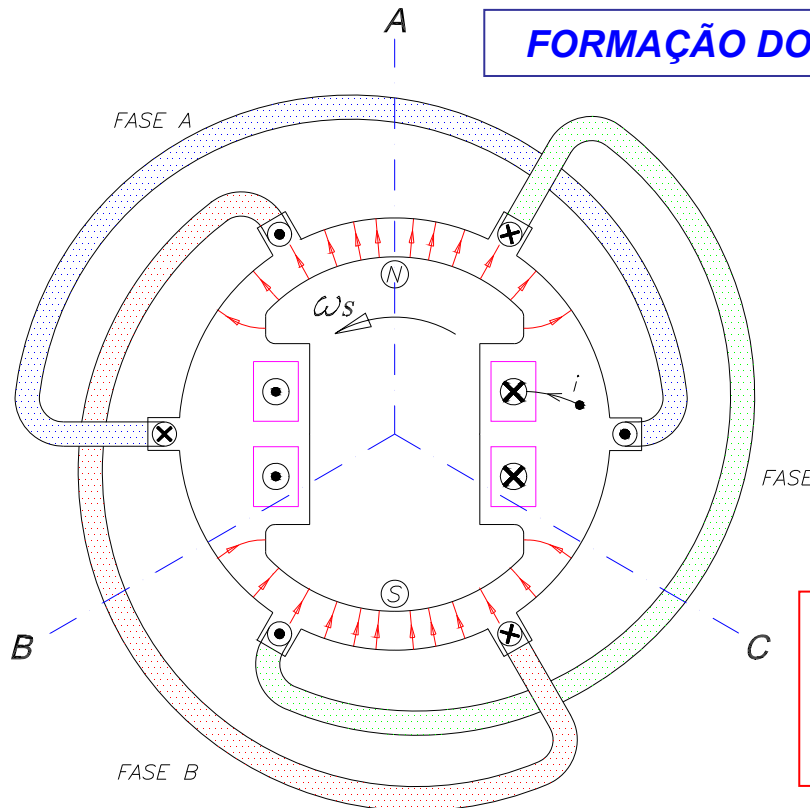
Bobinas com posições diferentes no estator sofrem tensão induzida cujos máximos ocorrem em tempos diferentes → **DEFASAGEM**

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

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

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

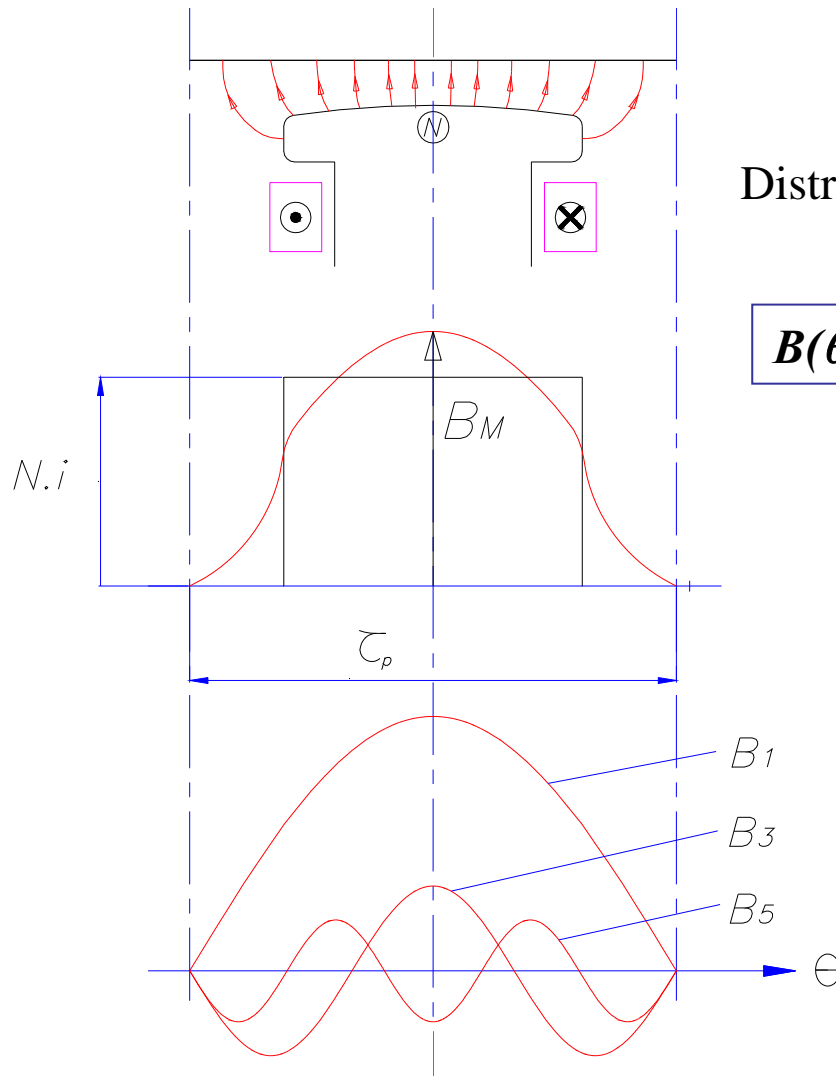
FORMAÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSÕES



BOBINAS POSICIONADAS NO ESPAÇO (ENTREFERRO) A 120° ELÉTRICOS

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

**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

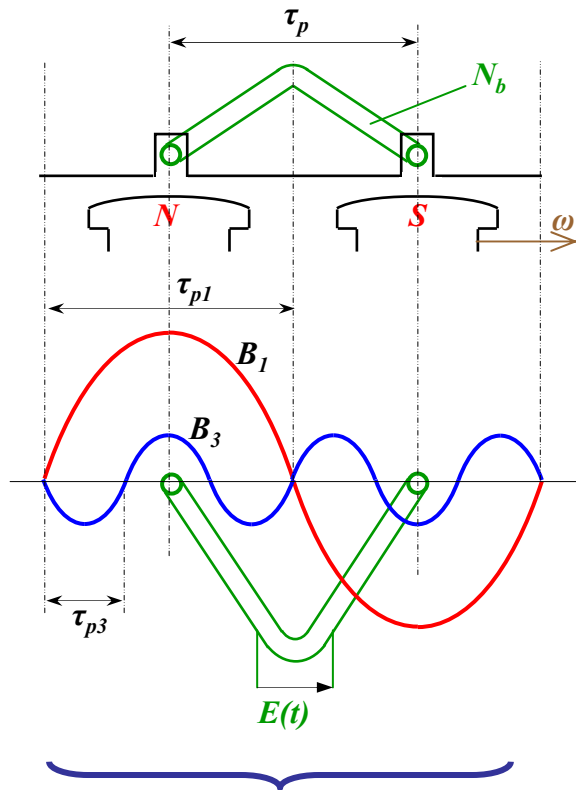
B_1 : componente fundamental

B_h : componente harmônica

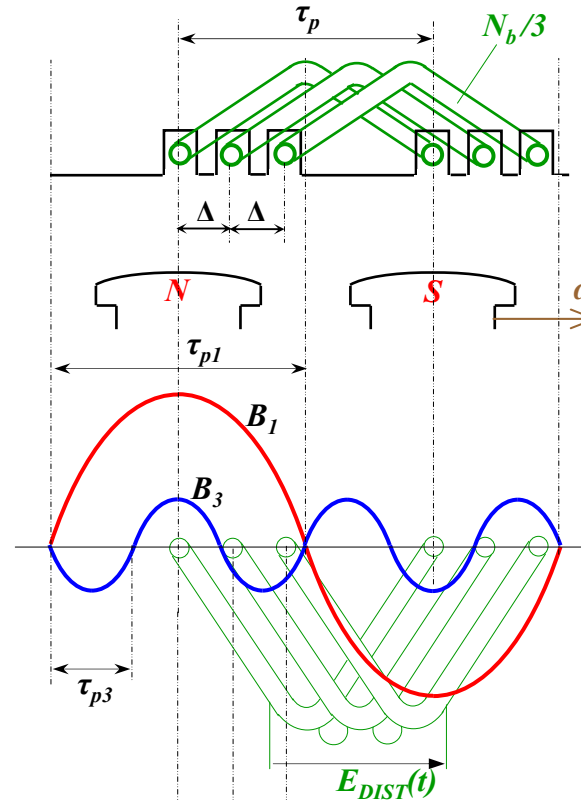
CONSEQÜÊNCIA : SURGEM TENSÕES HARMÔNICAS

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**

$0^\circ \ h.\Delta \ h.2.\Delta \rightarrow$ **ÂNGULO P/ HARMÔNICA "h"**

EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO:

$q = 3$ ranh./pólo/fase

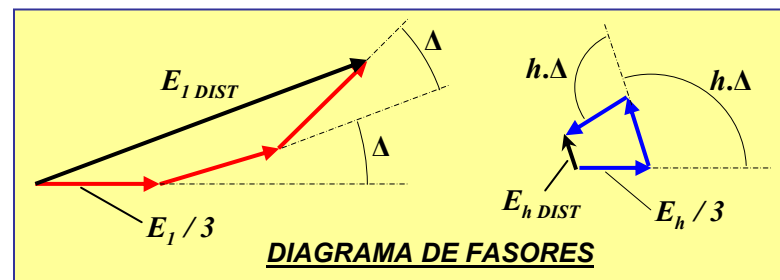
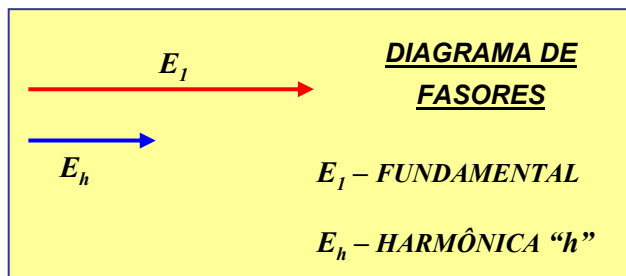


**1 GRUPO DE 3 BOBINAS
EM SÉRIE, CADA
BOBINA COM N° DE
ESPIRAS $N_b/3$**

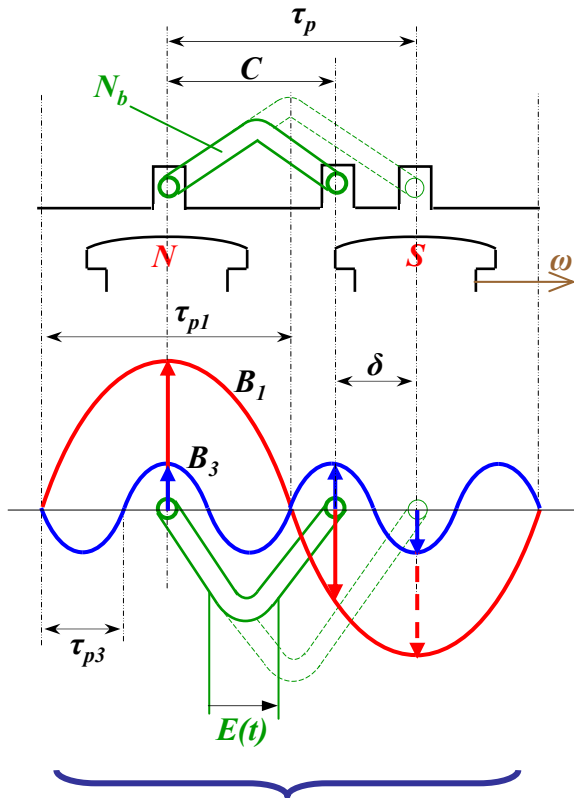
EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO:

$E_{1\ DIST} \approx E_1$

$E_{h\ DIST} \ll E_h$



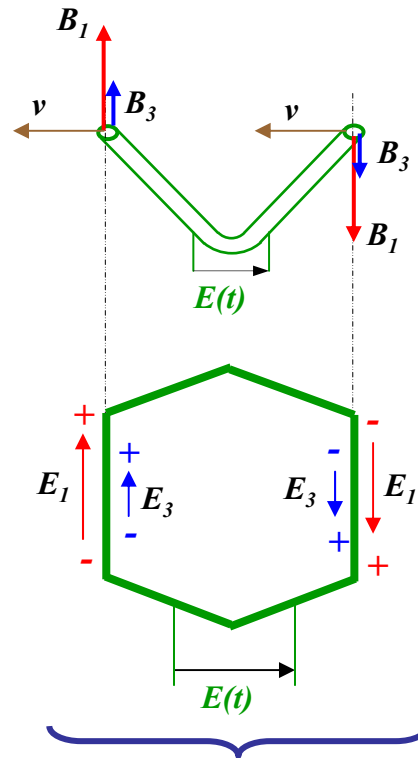
FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 2 - ENCURTAMENTO DE PASSO DAS BOBINAS



PASSO DA BOBINA : $C < \tau_p$

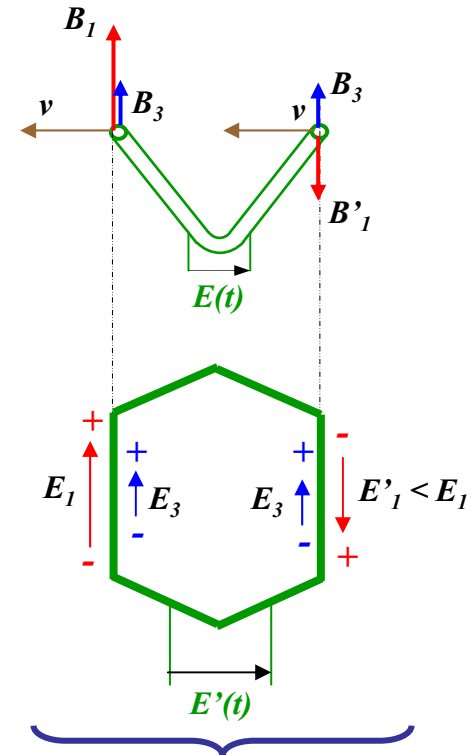
ÂNGULO DE ENCURTAMENTO : δ (° elet.)

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



PASSO PLENO :

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



PASSO ENCURTADO :

(p.ex. → $\delta = 60^\circ$)

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

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

EFEITO DO ENCURTAMENTO:

$E'_1 \approx E_1$

$E'_h \ll E_h$

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) :

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

CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO GERADA NA MÁQUINA SÍNCRONA:

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