

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 DE POLOS LISOS

RANHURAS ESTATÓRICAS:

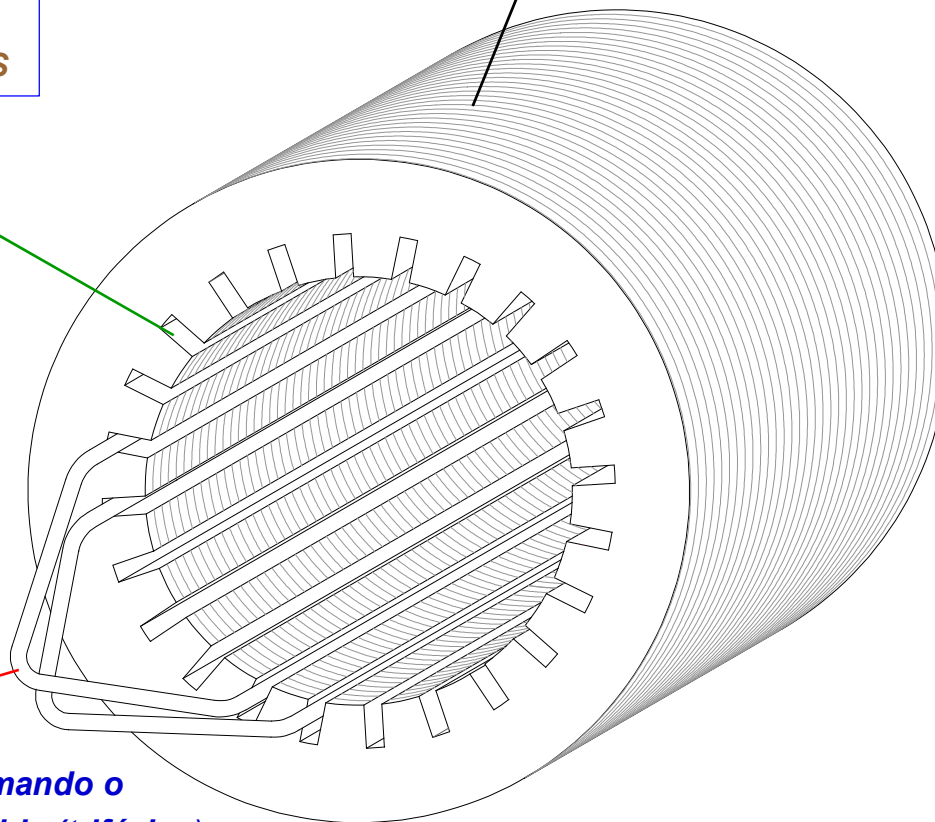
Ao longo de toda a superfície
interna do cilindro estatórico

BOBINAS DO ESTATOR:

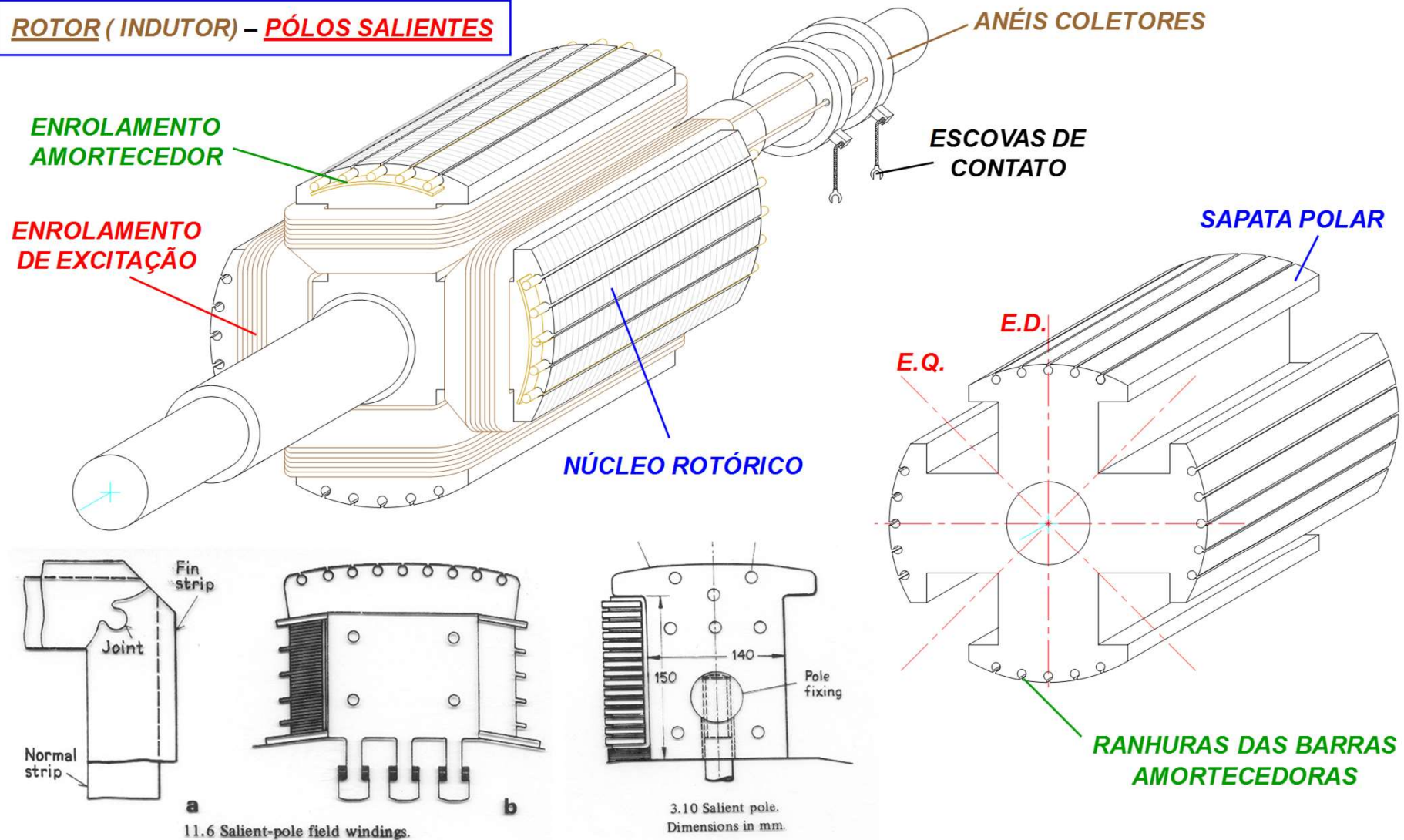
Alojadas em todas as ranhuras, formando o
enrolamento de armadura ou induzido (trifásico)

NÚCLEO DO ESTATOR:

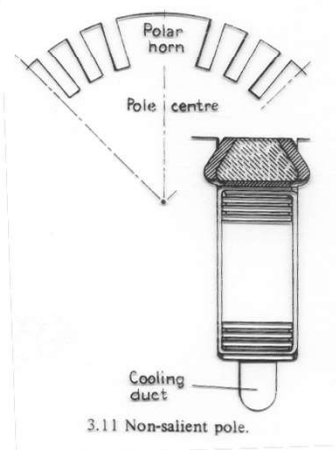
Lâminas de material ferromagnético de alta
permeabilidade (aço silício não orientado)



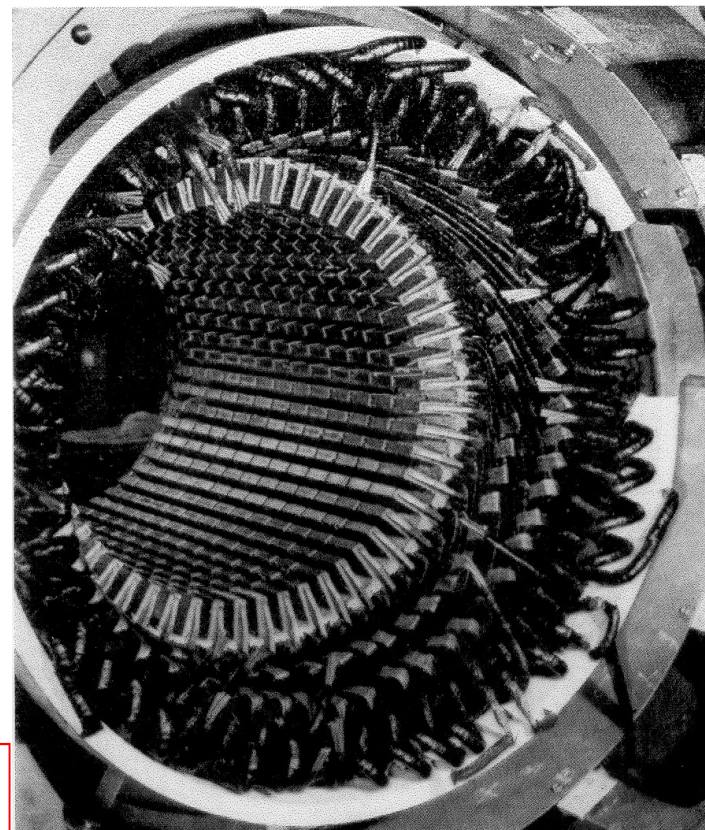
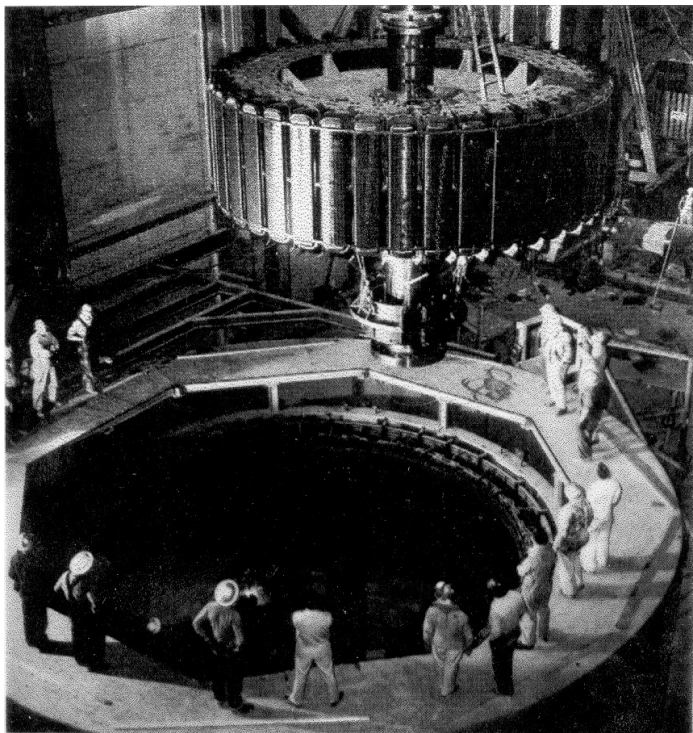
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

ROTOR (INDUTOR) – PÓLOS SALIENTES

ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

ROTOR (INDUTOR) – PÓLOS LISOS**ENROLAMENTO
DE EXCITAÇÃO****ANÉIS COLETORES****ESCOVAS DE CONTATO****NÚCLEO ROTÓRICO****RANHURAS DO ROTOR****E.D.****E.Q.****DETALHE DA RANHURA E
FIXAÇÃO DA BOBINA DE
CAMPO EM GERADOR DE
GRANDE PORTE**

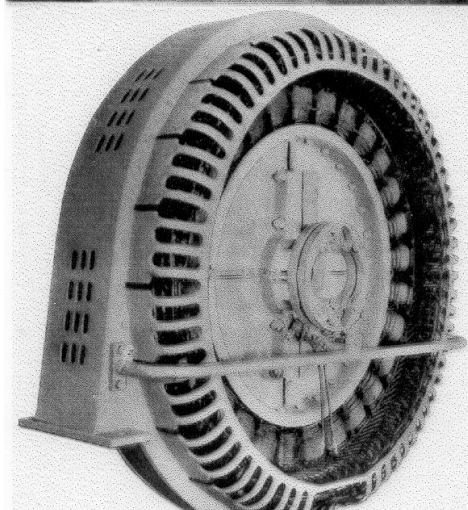
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS



**MÁQUINA SÍNCRONA DE
POLOS SALIENTES**

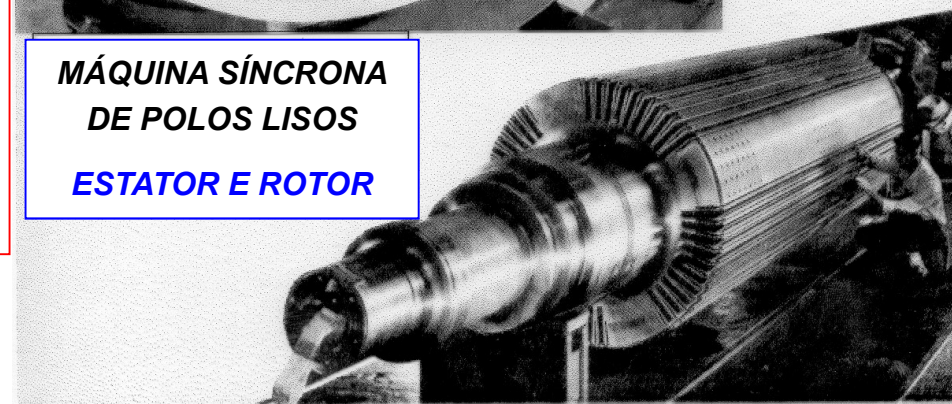
**ESTATOR E ROTOR DE
GRANDE PORTE**

**MÁQUINA COMPLETA DE
MÉDIO PORTE**



**MÁQUINA SÍNCRONA
DE POLOS LISOS**

ESTATOR E ROTOR



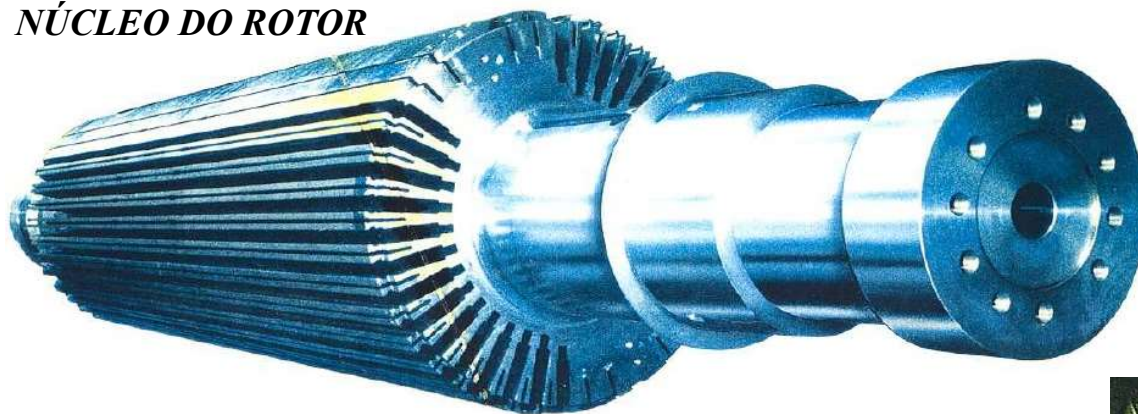
MONTAGEM DE GRANDE HIDROGERADOR

← ***ROTOR DA TURBINA (KAPLAN) E ROTOR DO GERADOR***

↙ ***ESTATOR DO GERADOR***



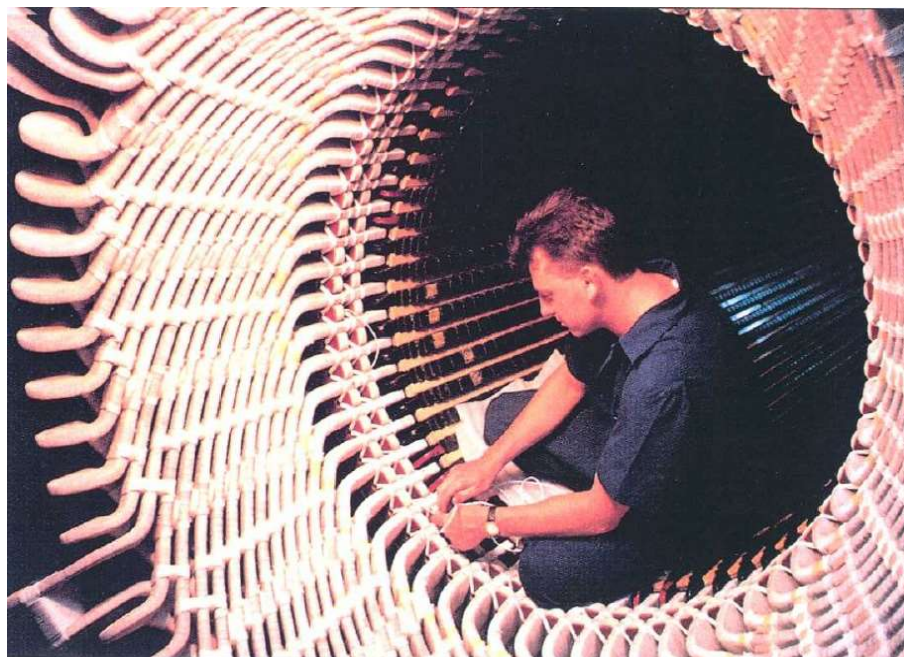
NÚCLEO DO ROTOR



*DETALHES DE EXECUÇÃO DE
TURBOGERADOR DE POLOS LISOS
MÁQUINA DE 2 POLOS*

ENROLAMENTO DO ROTOR

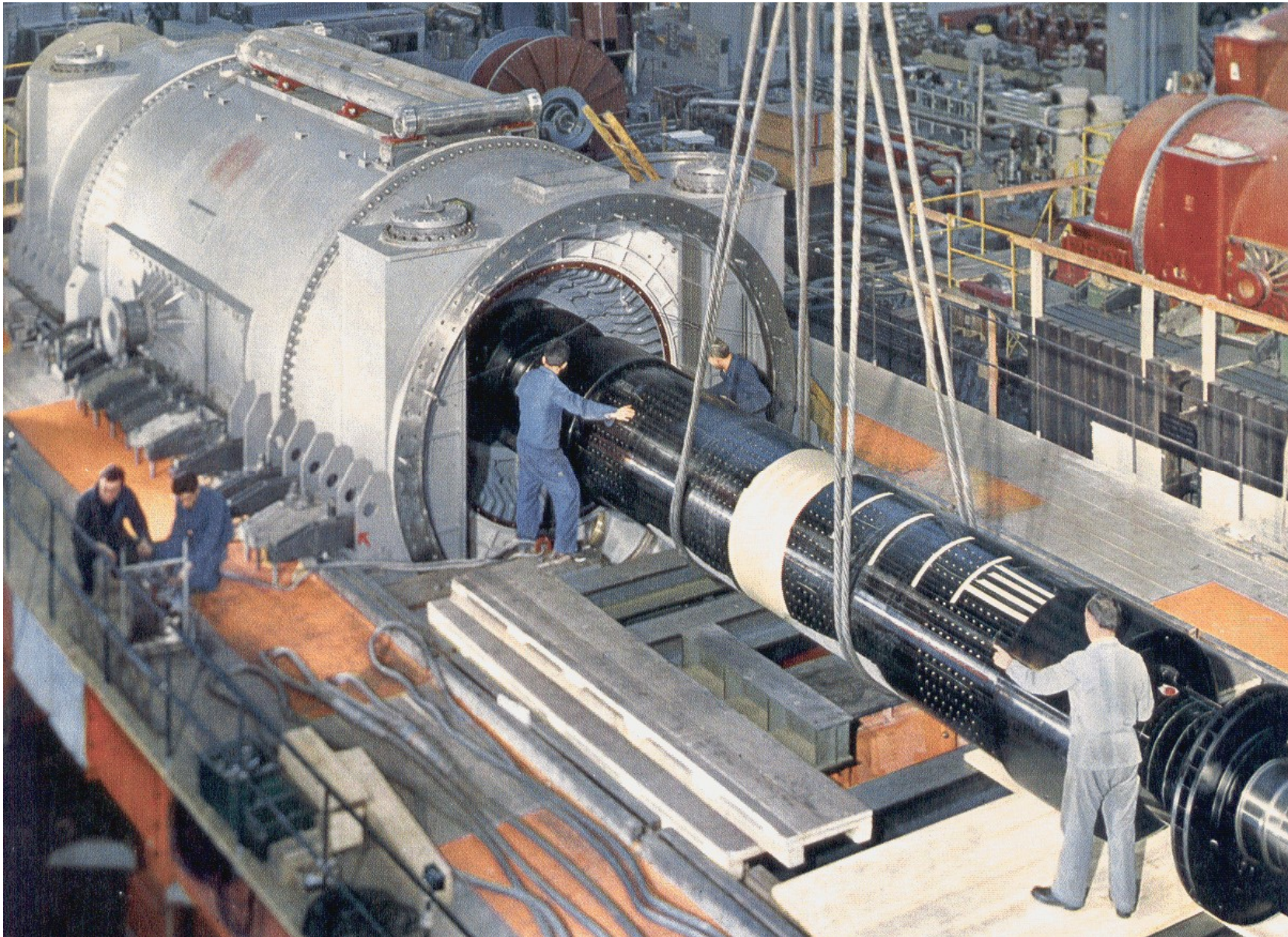
ENROLAMENTO DO ESTATOR



FONTE: MATERIAL CURSO PROMINP PETROBRÁS – REVISTA NEW WORLD SIEMENS



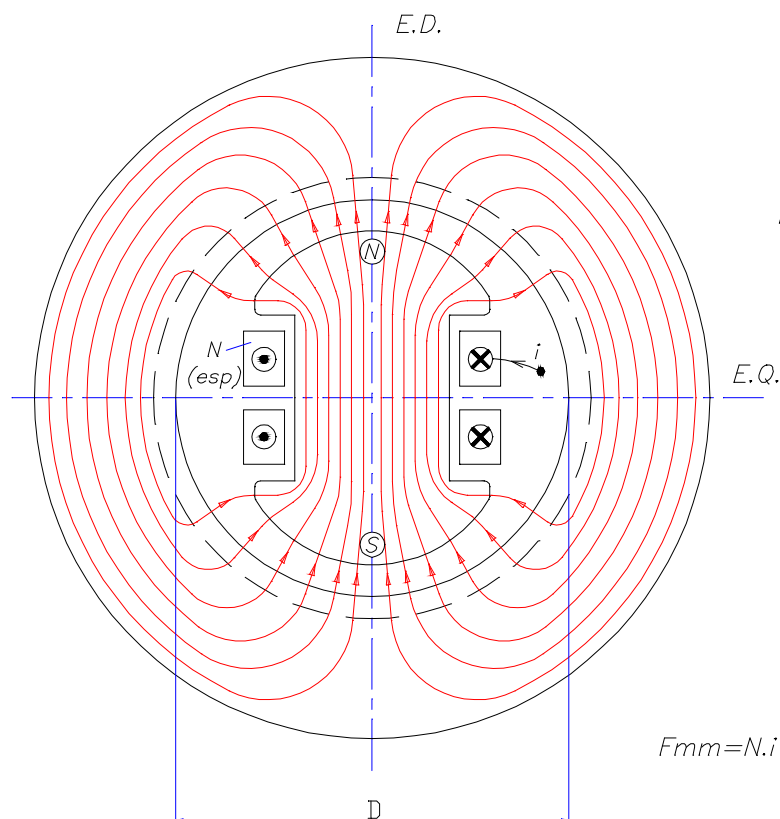
TURBO-GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS LISOS (MONTAGEM)



FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

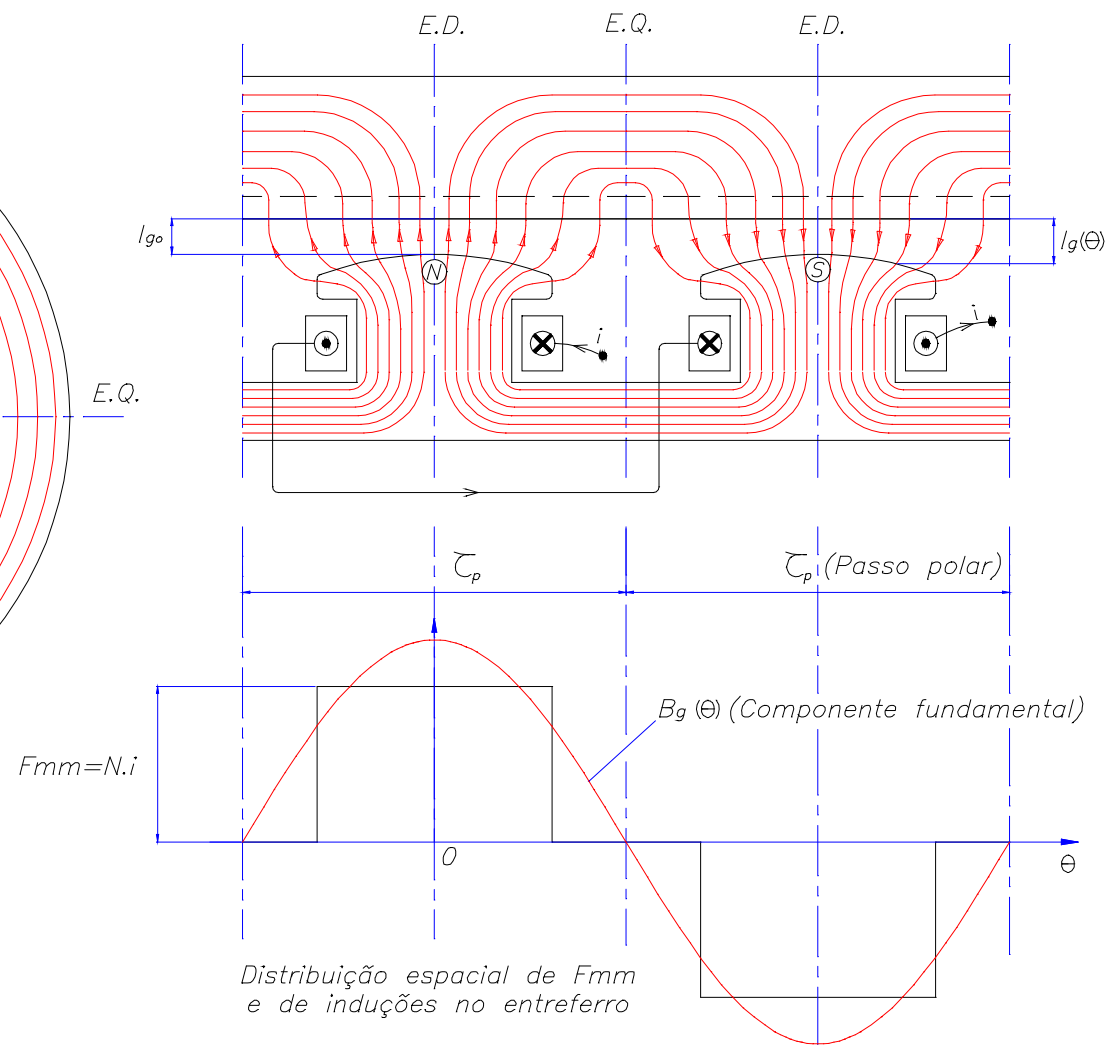
Máquina de pólos salientes – $2p=2$

Vista planificada da máquina



Vista em corte da máquina

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

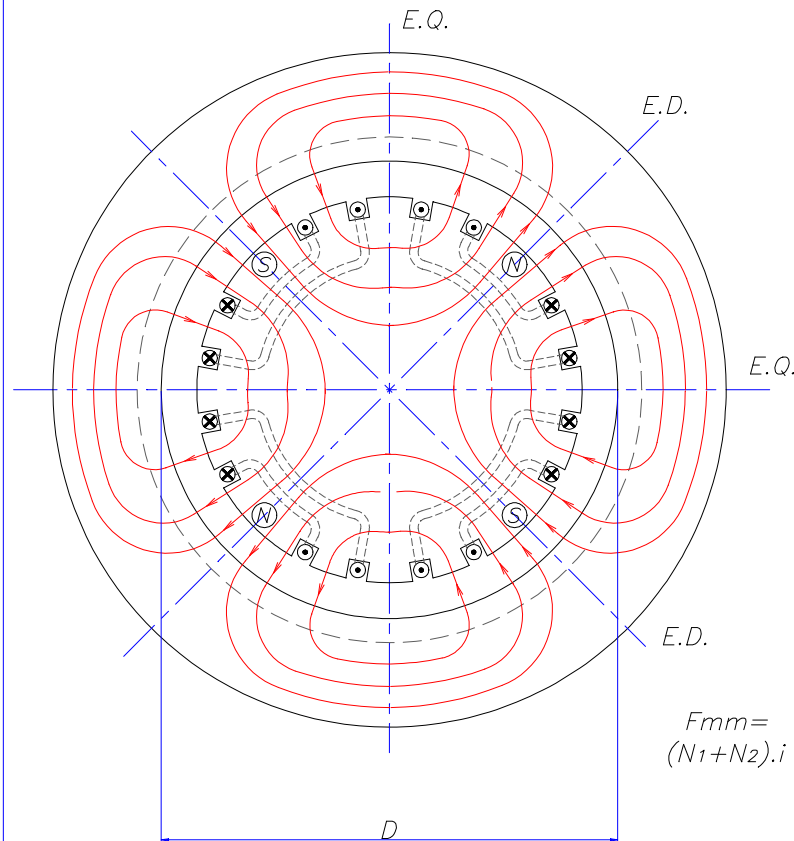


Distribuição espacial de F_{mm}
e de induções no entreferro

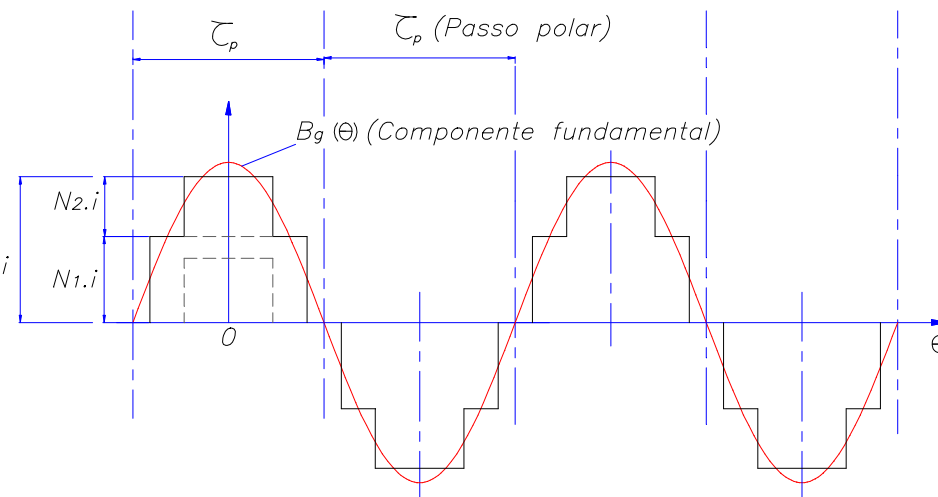
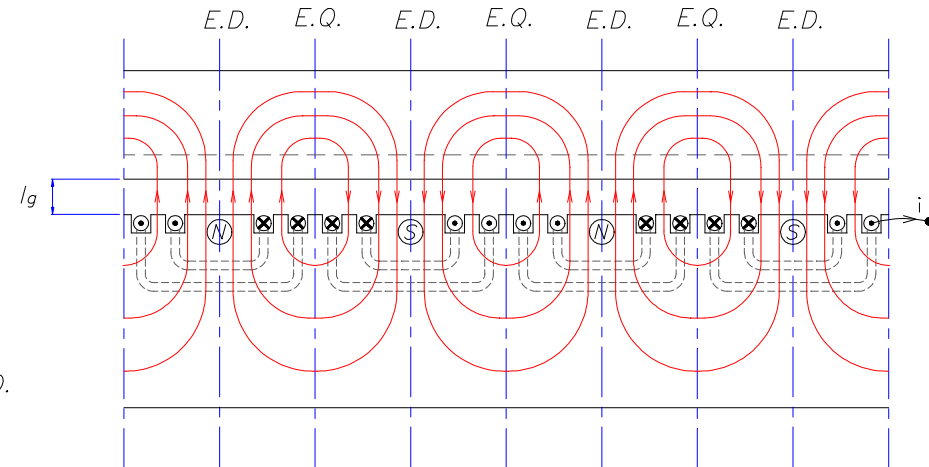
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

Máquina de pólos lisos – $2p=4$

Vista planificada da máquina



Vista em corte da máquina

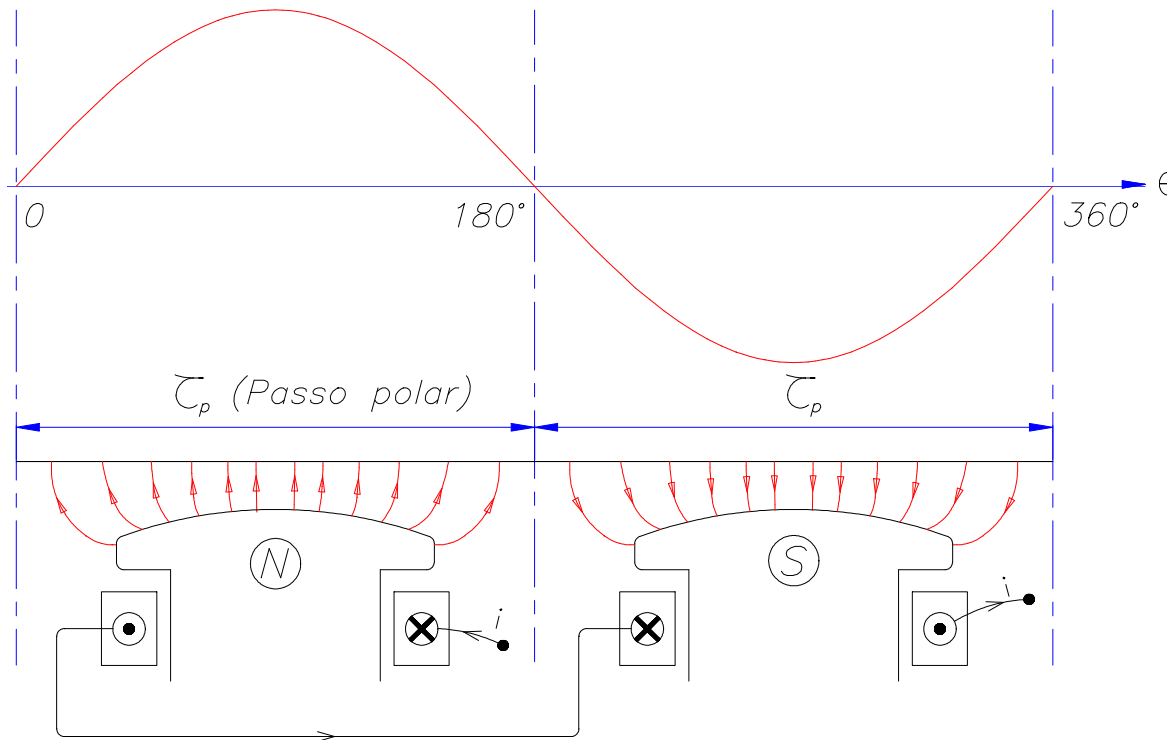


Distribuição espacial de F_{mm} e de induções no entreferro

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

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 – $2p = 4$

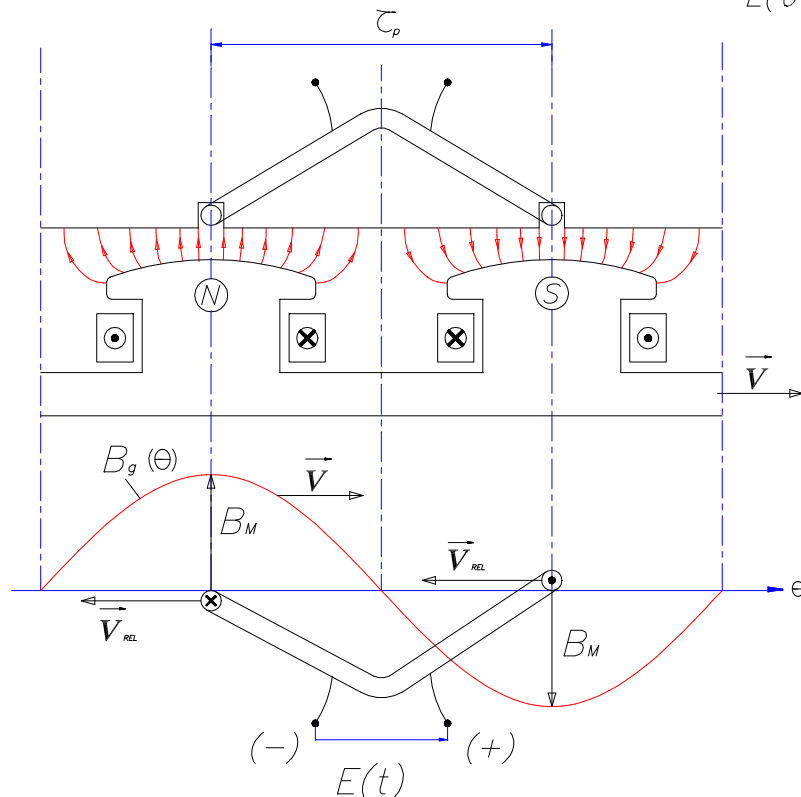
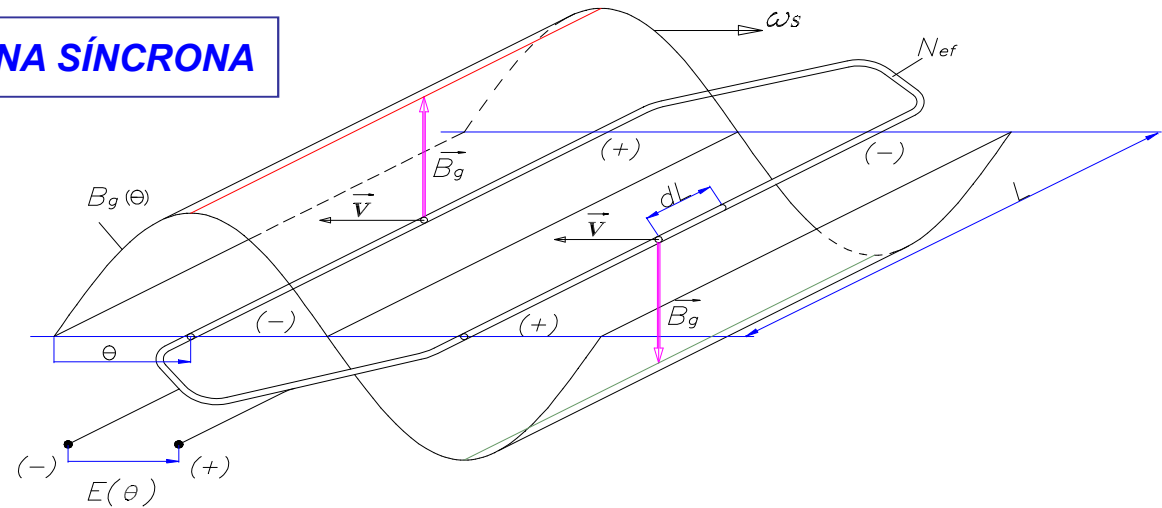
$$\tau_p = \pi.D/4 - 1/4 \text{ circunferência}$$

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

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

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)

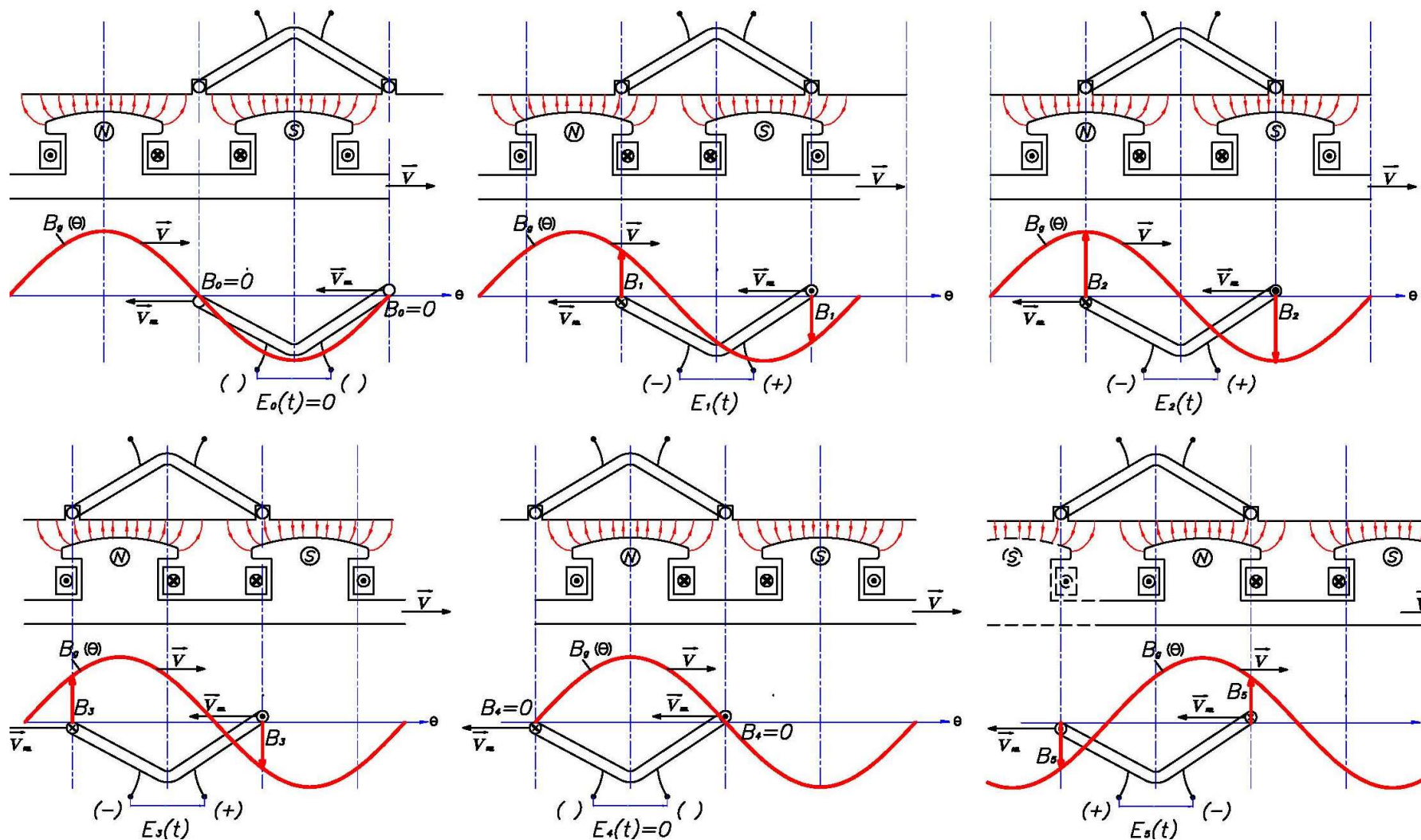
Rotor em movimento com velocidade angular ω_s

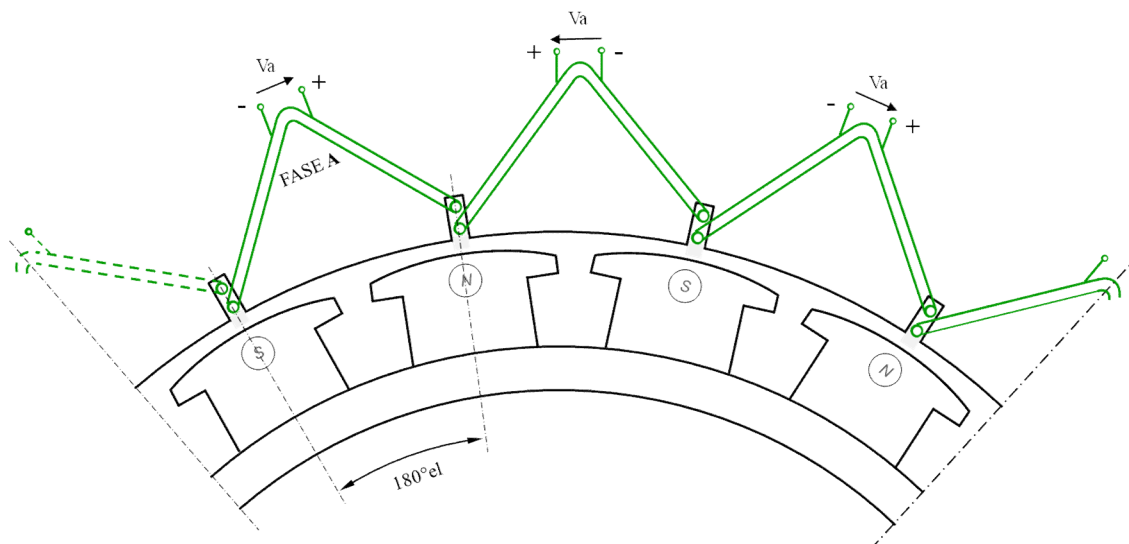
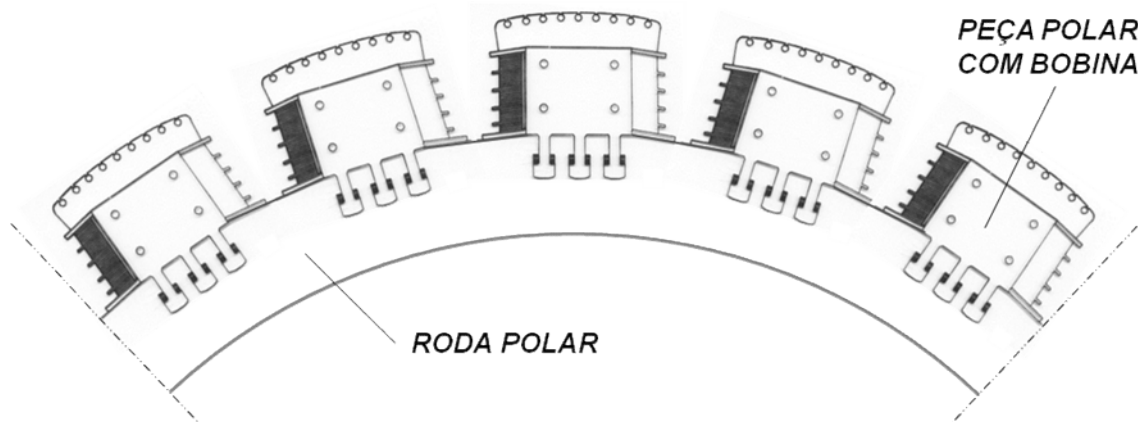
velocidade periférica $v = \pi \cdot D \cdot n_s$

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

GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA → *Evolução da tensão induzida no tempo*



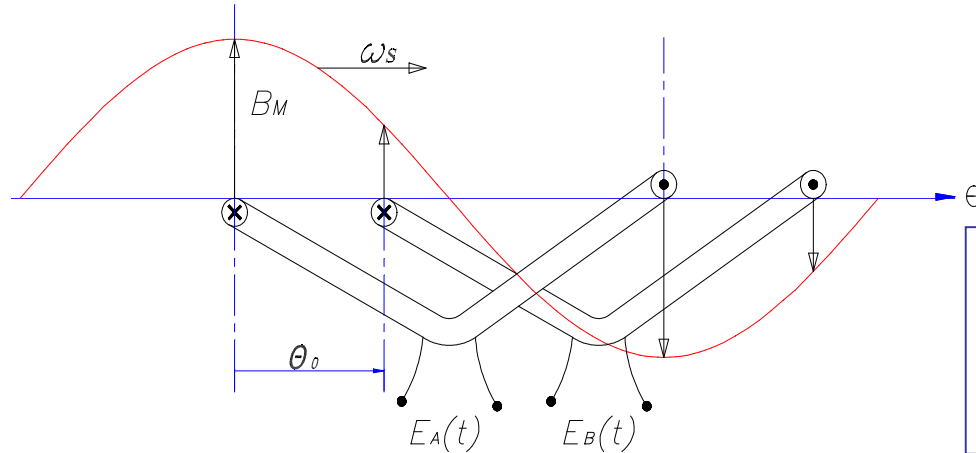
GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA → Máquinas multipolares

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



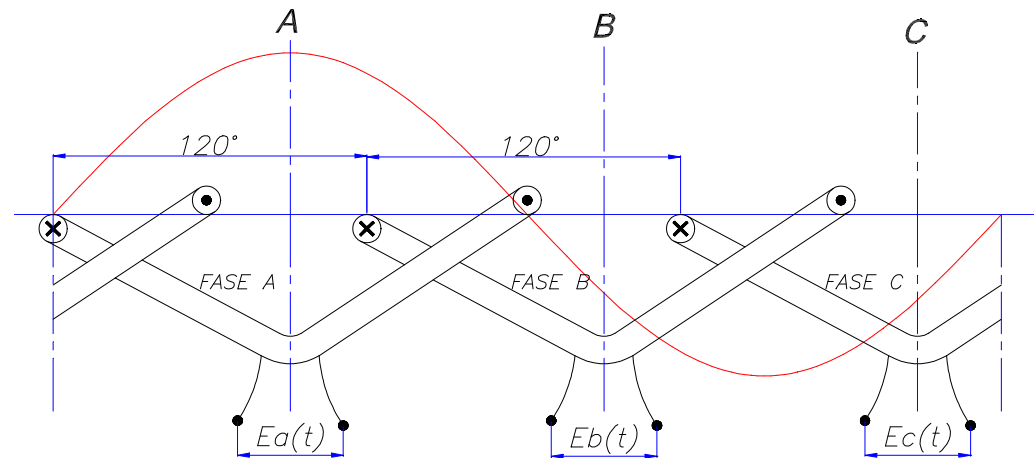
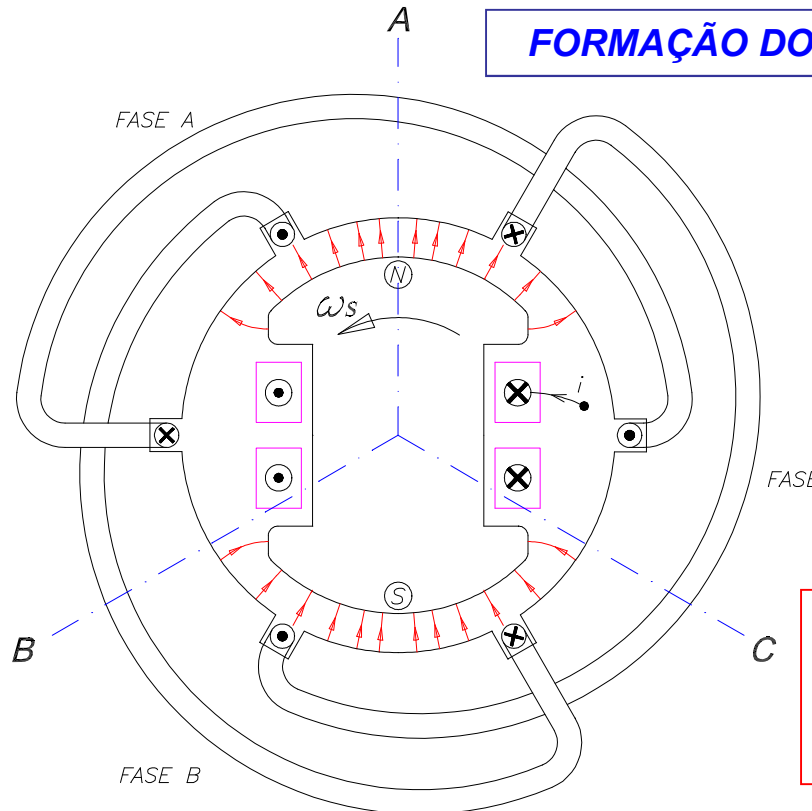
Bobinas com posições diferentes no estator sofrem tensão induzida cujos máximos ocorrem em tempos diferentes → **DEFASAGEM**

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

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

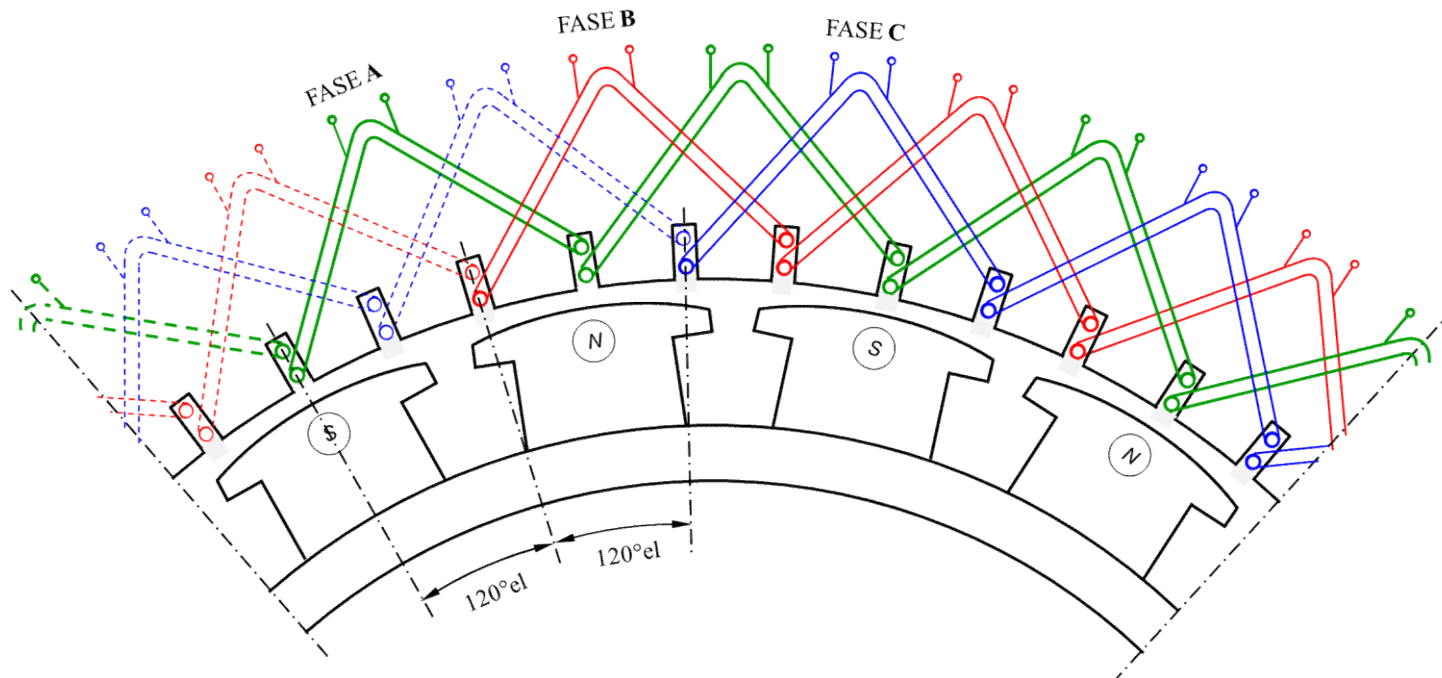
$$\rightarrow E_B = E_M \cdot \cos(\omega t - \theta_0)$$

FORMAÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSÕES

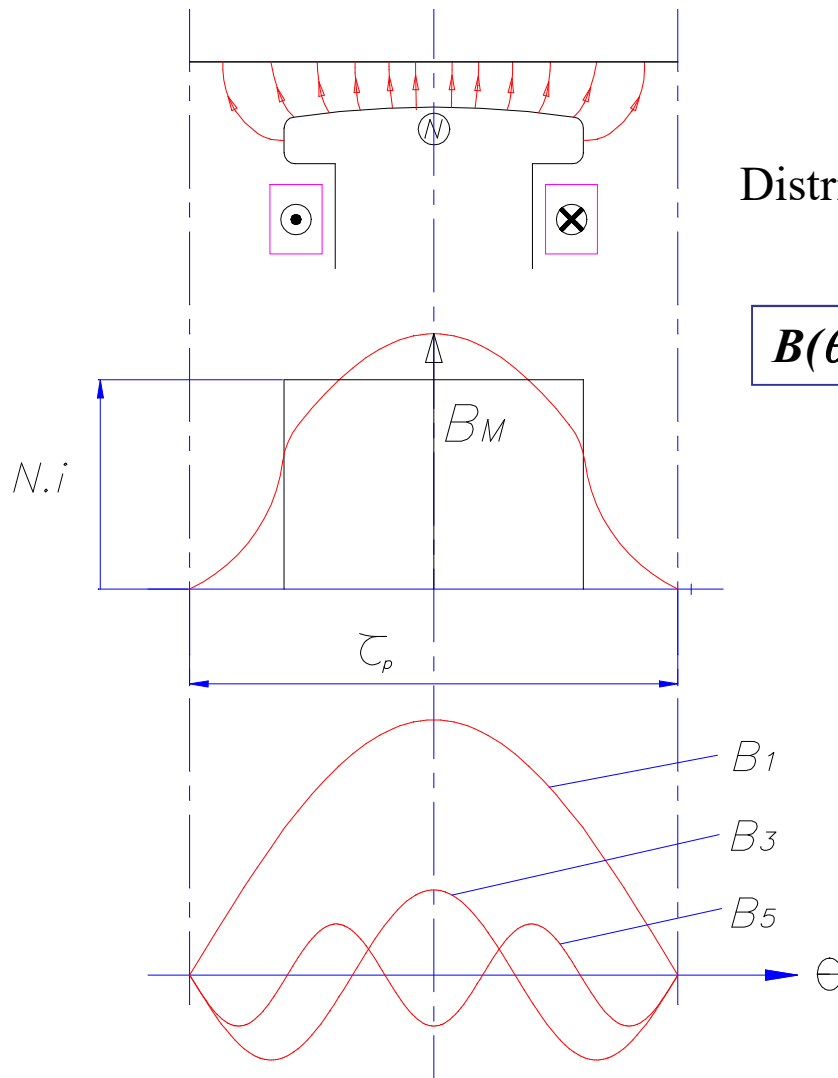


BOBINAS POSICIONADAS NO ESPAÇO (ENTREFERRO) A 120° ELÉTRICOS

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

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**

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



Distribuição de induções real não é perfeitamente senoidal

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

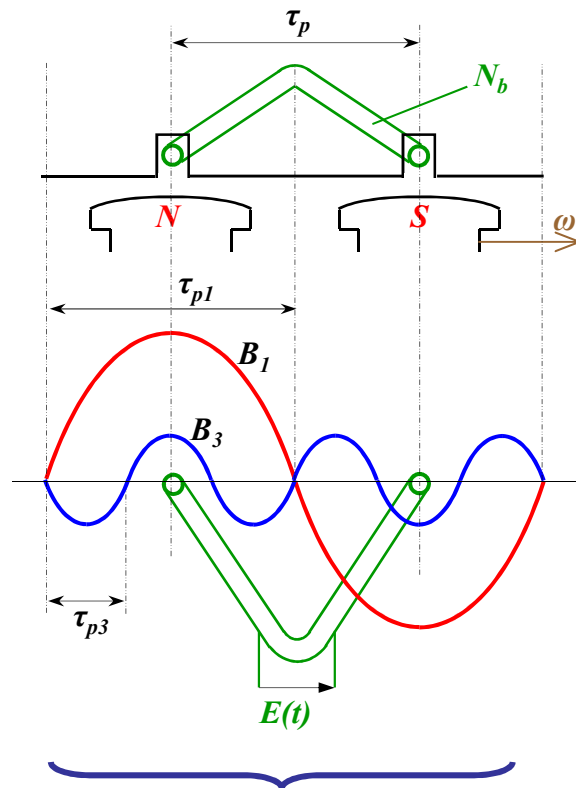
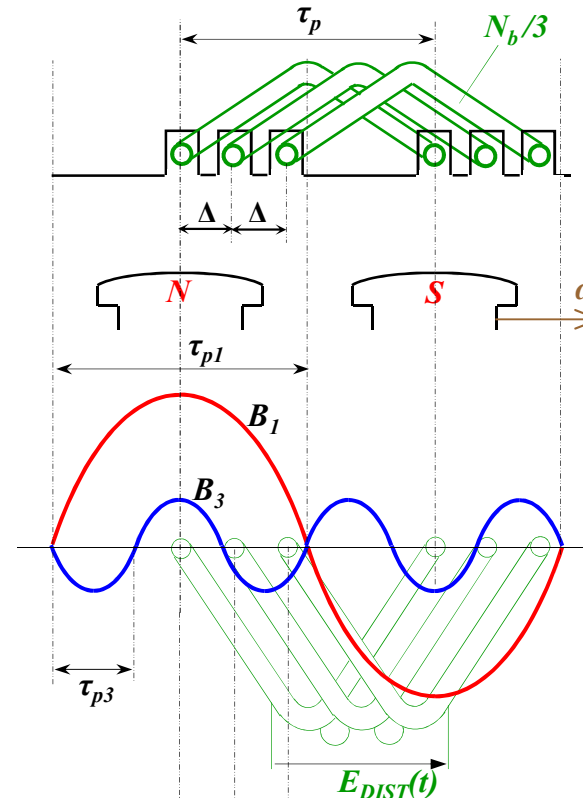
h : ordem da harmônica

B_1 : componente fundamental

B_h : componente harmônica

CONSEQÜÊNCIA : SURGEM TENSÕES HARMÔNICAS

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

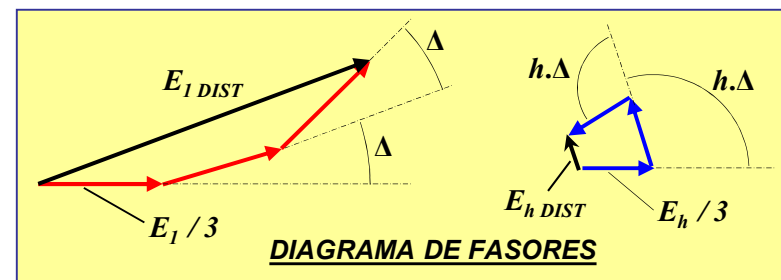
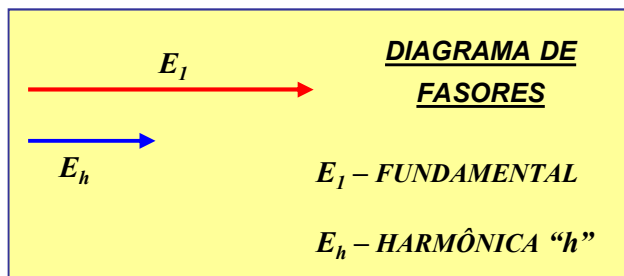
FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 1 - DISTRIBUIÇÃO DO ENROLAMENTO

 1 BOBINA CONCENTRADA
COM N° DE ESPIRAS N_b

EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO:
 $q = 3$ ranh./pólo/fase

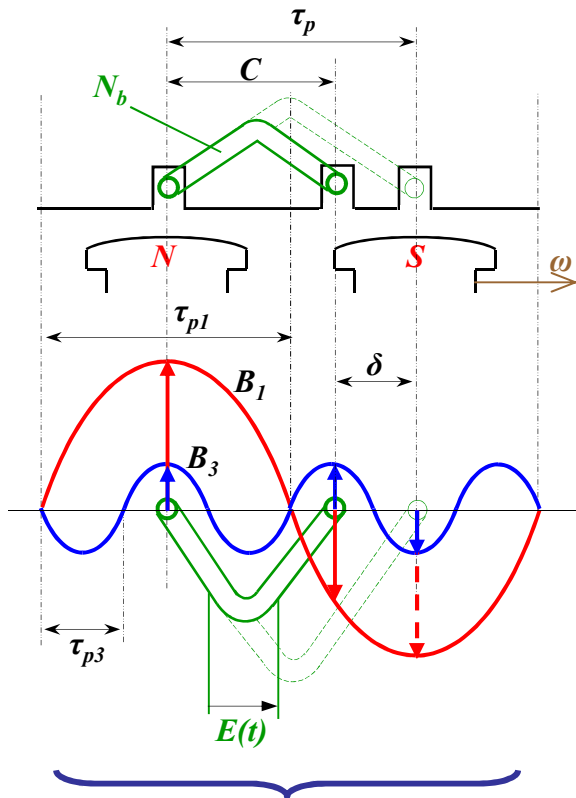
 1 GRUPO DE 3 BOBINAS
EM SÉRIE, CADA
BOBINA COM N° DE
ESPIRAS $N_b/3$
EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO:

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

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

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

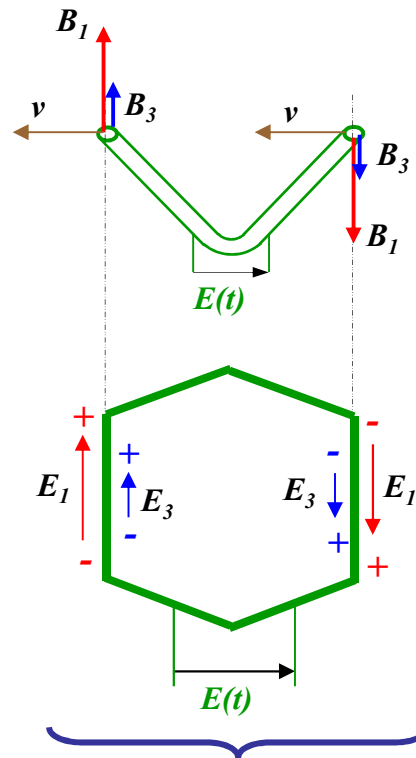
 $0^\circ \quad h.\Delta \quad h.2.\Delta \rightarrow$ ÂNGULO P/ HARMÔNICA "h"


FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 2 - ENCURTAMENTO DE PASSO DAS BOBINAS


PASSO DA BOBINA : $C < \tau_p$

ÂNGULO DE ENCURTAMENTO : δ (° elet.)

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



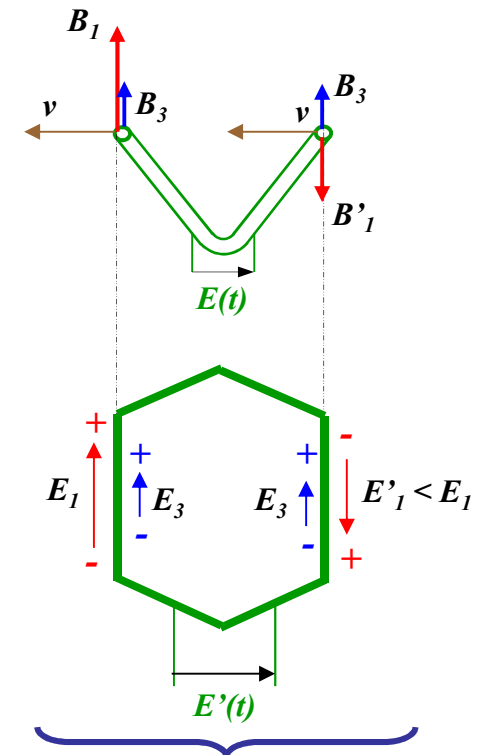
PASSO PLENO :

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

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) :

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

CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO GERADA NA MÁQUINA SÍNCRONA:

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