



# MÁQUINAS SÍNCRONAS

• 86

## 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 )**

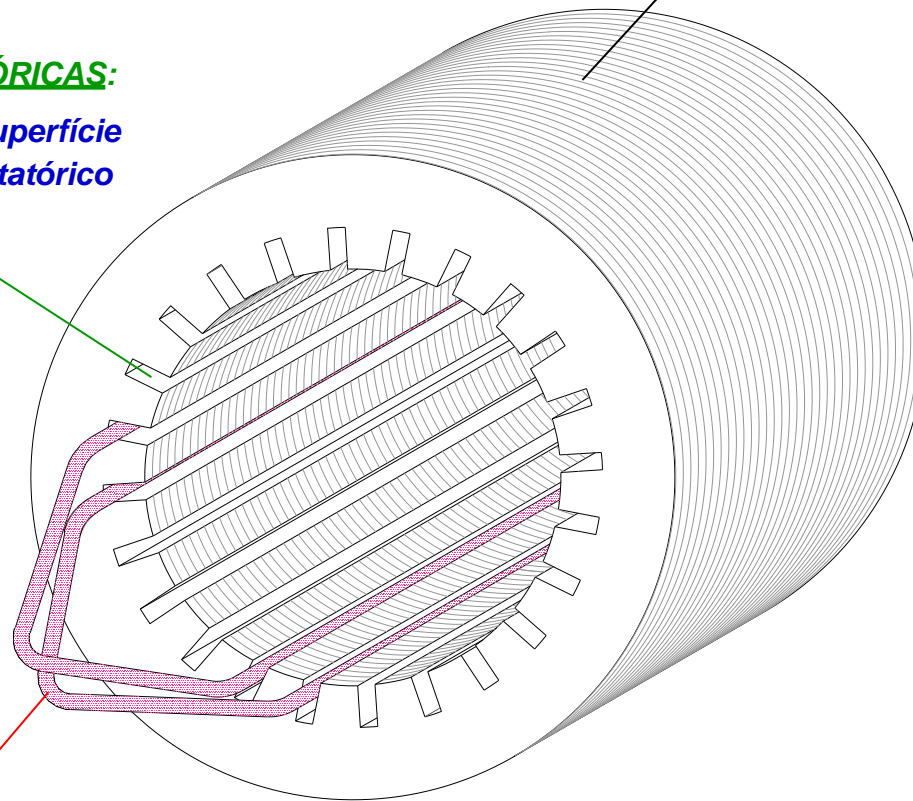
→ **IDÊNTICO NA SUA CONCEPÇÃO, TANTO NA M.S. DE POLOS SALIENTES COMO LISOS**

### **RANHURAS ESTATÓRICAS:**

**Ao longo de toda a superfície interna do cilindro estatórico**

### **NÚCLEO DO ESTATOR:**

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

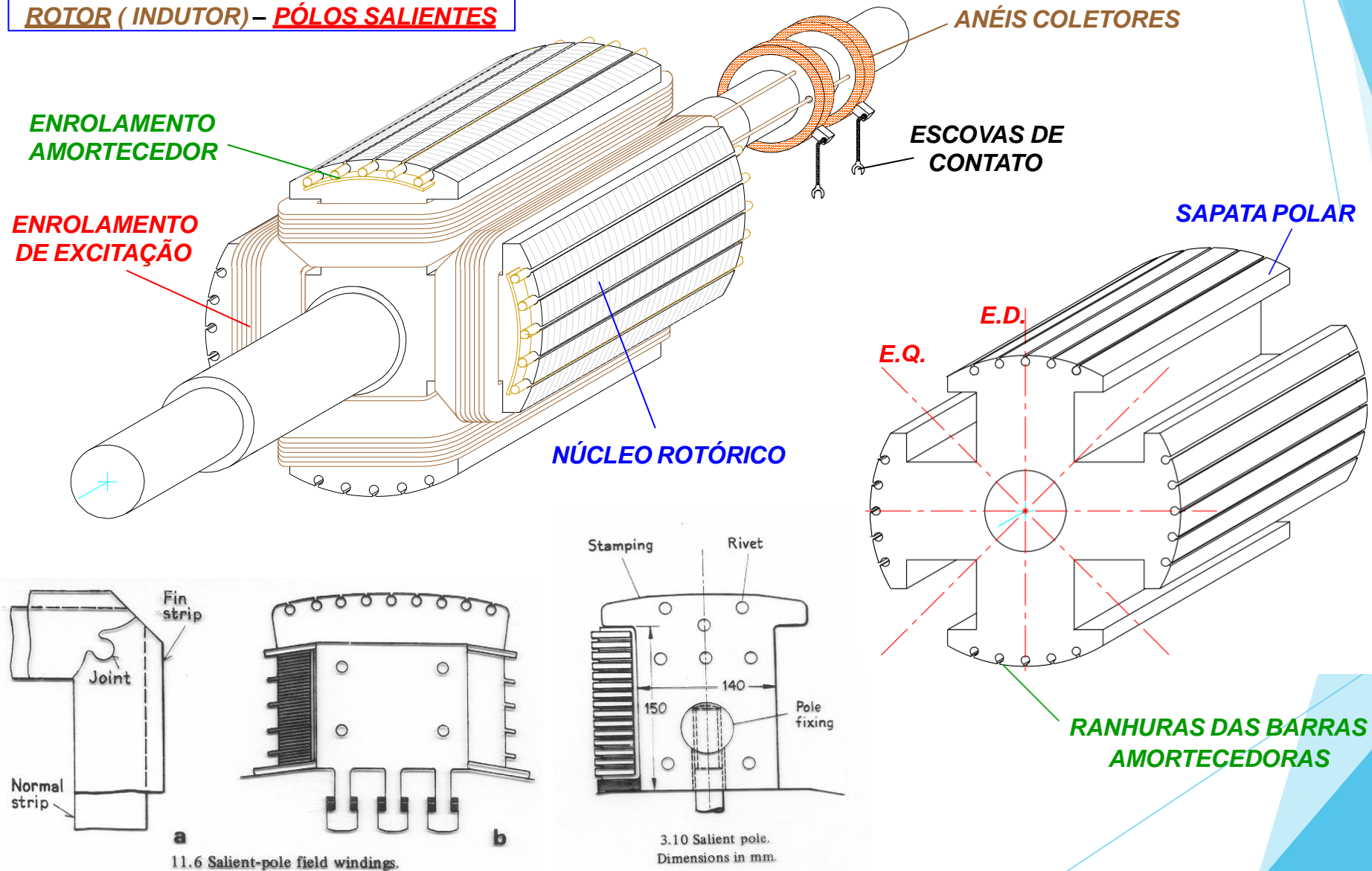


### **BOBINAS DO ESTATOR:**

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

## ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

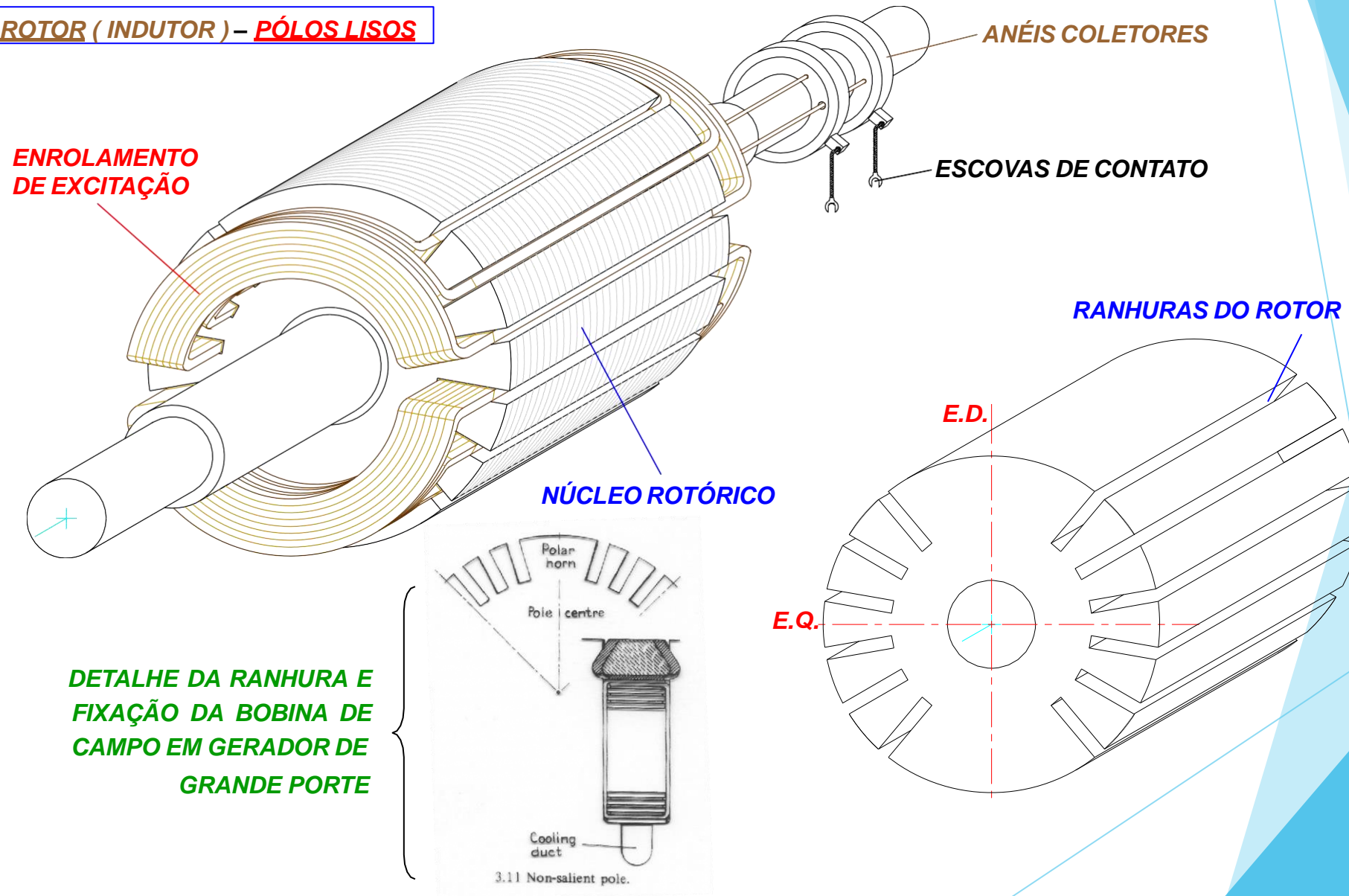
### ROTOR (INDUTOR) - PÓLOS SALIENTES



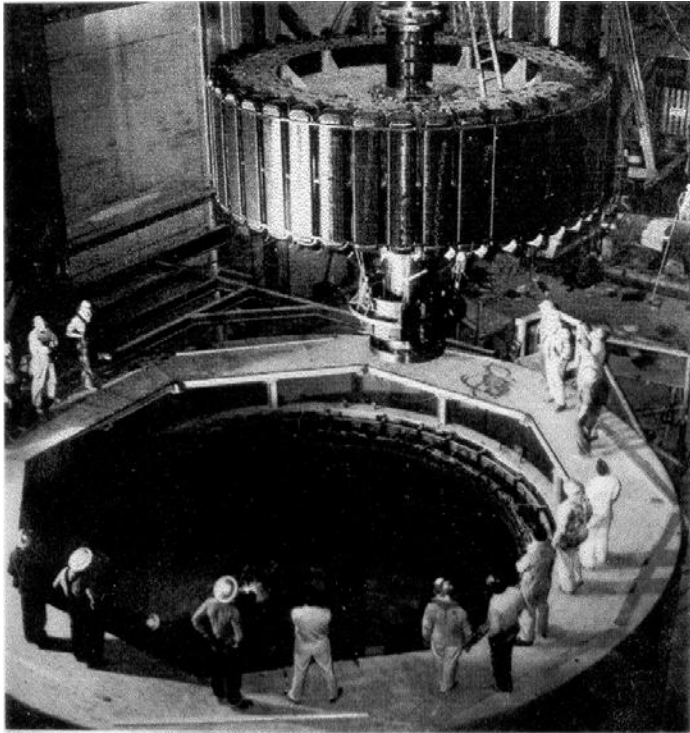


## ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA SÍNCRONA - COMPONENTES BÁSICOS

### ROTOR (INDUTOR) - **PÓLOS LISOS**



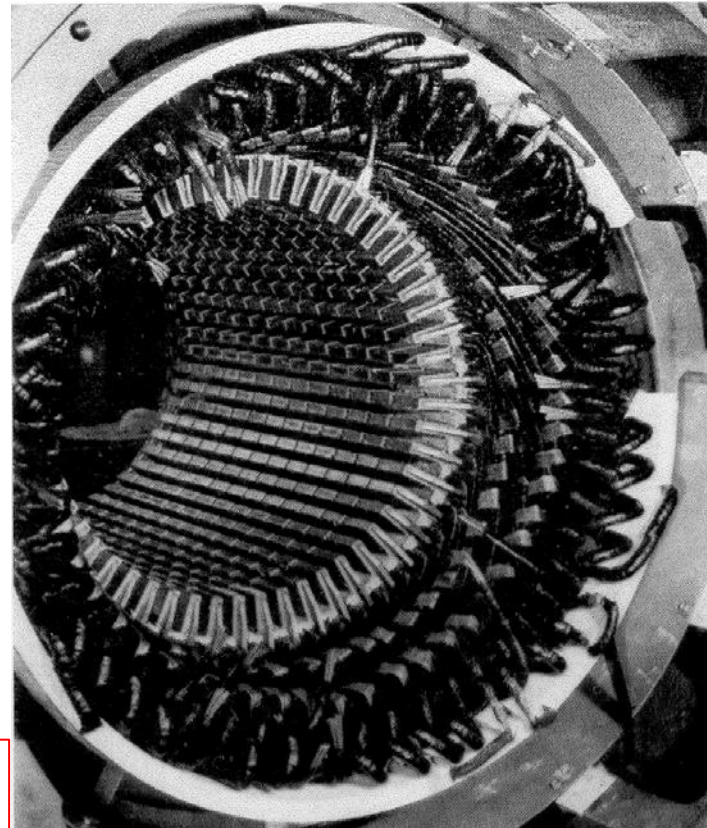
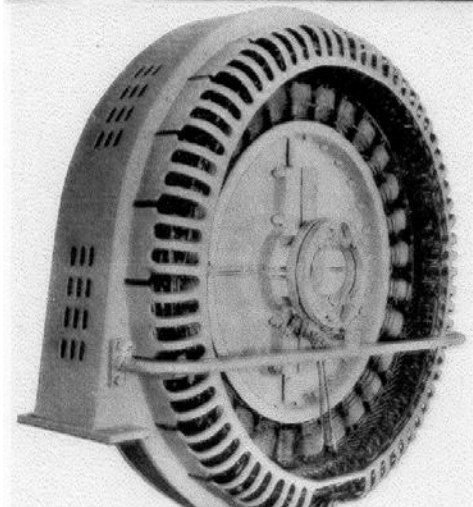
## ASPECTOS CONSTRUTIVOS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS



**MÁQUINA SÍNCRONA DE  
POLOS SALIENTES**

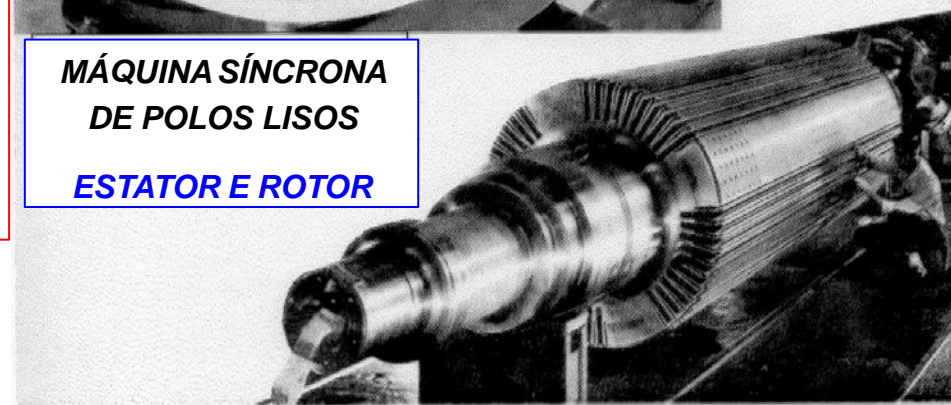
**ESTATOR E ROTOR DE  
GRANDE PORTE**

**MÁQUINA COMPLETA DE  
MÉDIO PORTE**



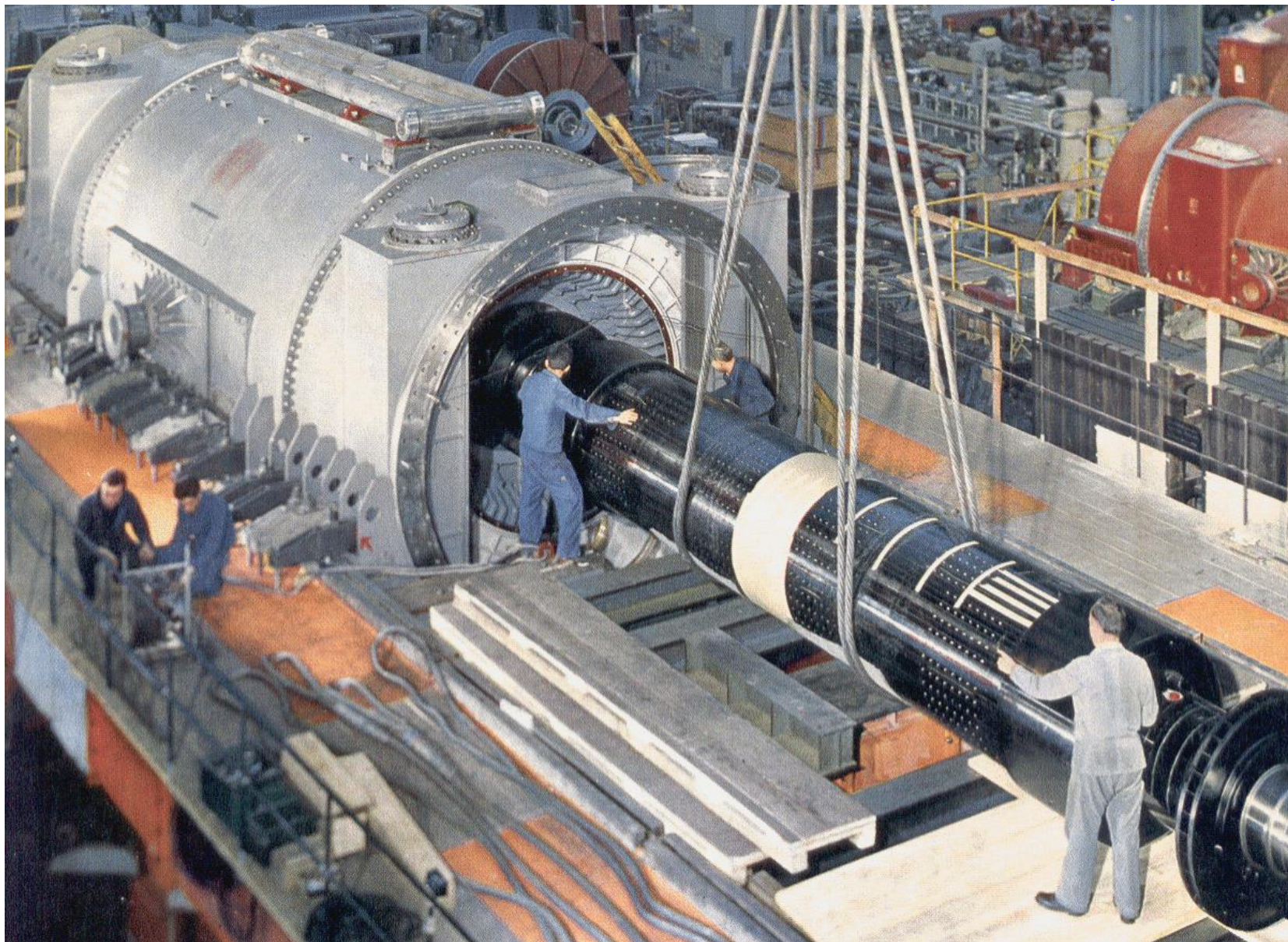
**MÁQUINA SÍNCRONA  
DE POLOS LISOS**

**ESTATOR E ROTOR**



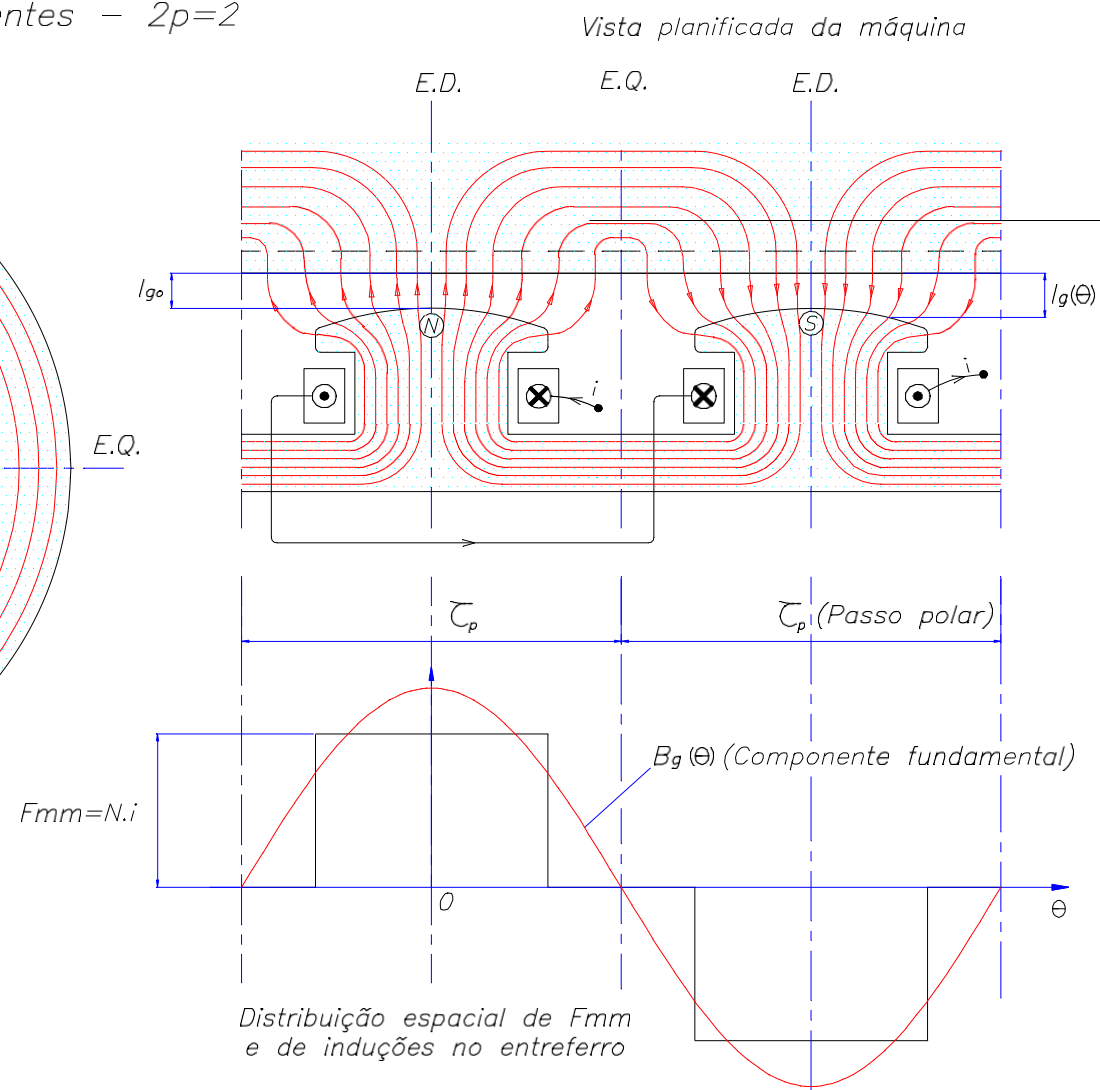
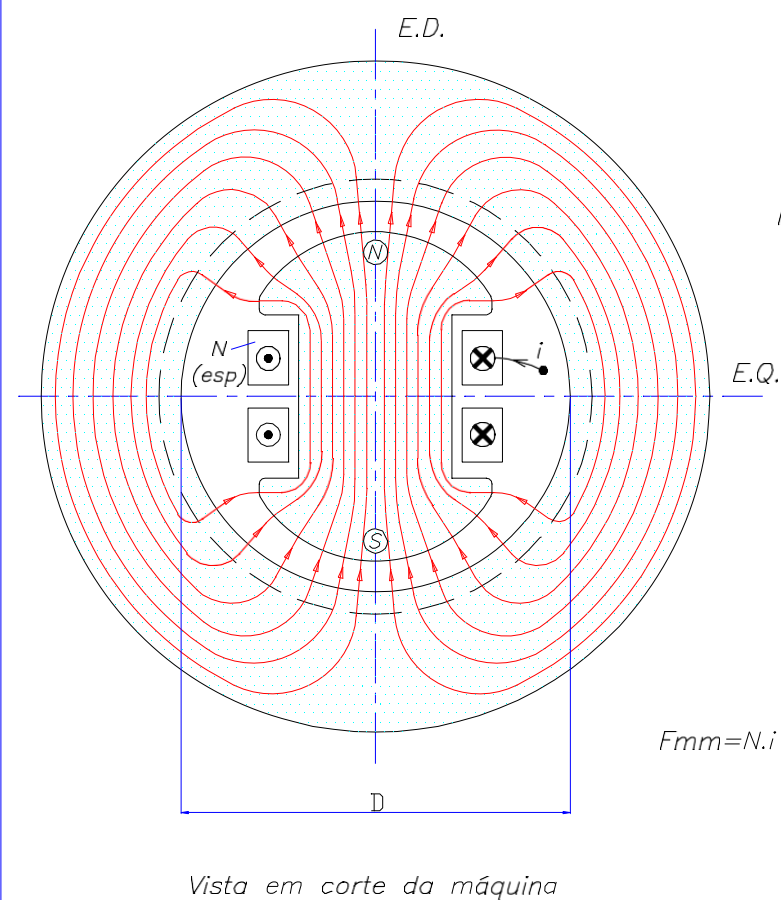


***TURBO-GERADOR SÍNCRONO DE PÓLOS LISOS ( MONTAGEM )***



## FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

Máquina de pólos salientes –  $2p=2$

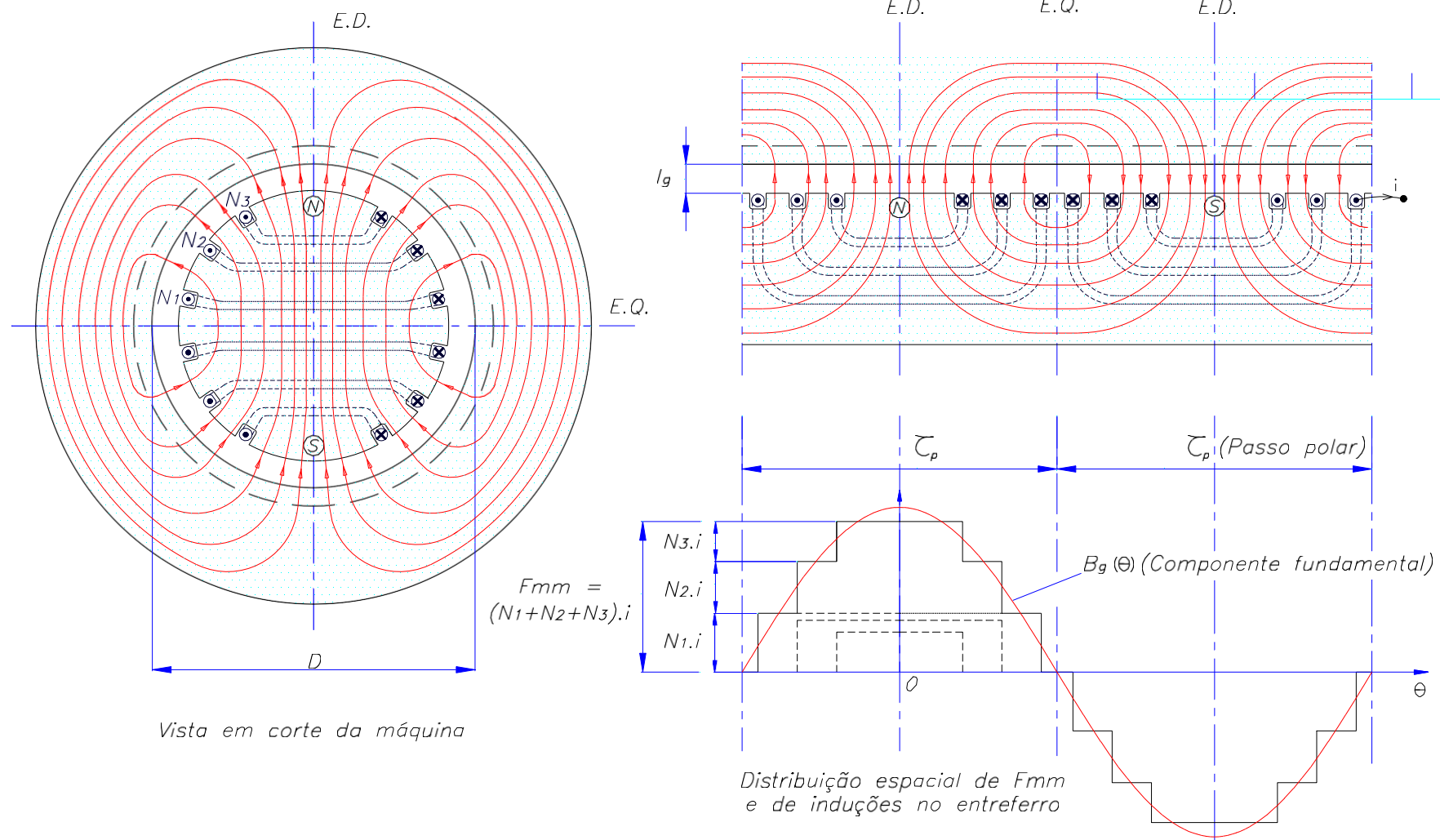


**CORRENTE CONTÍNUA DE EXCITAÇÃO  
INJETADA NO ROTOR  $\rightarrow N \cdot i = F_{mm}$**



## FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

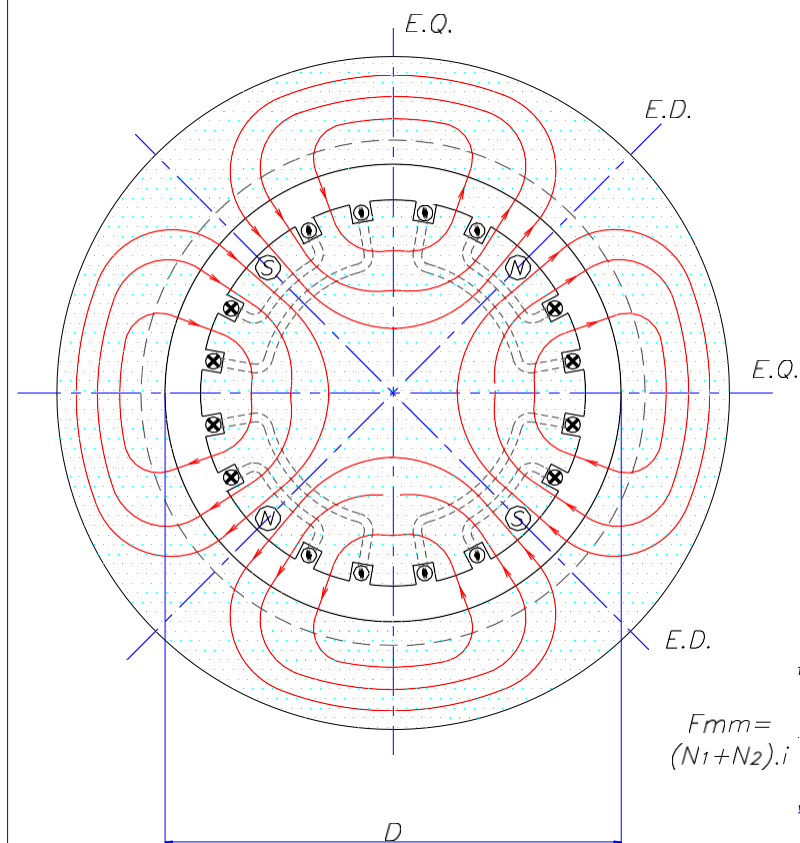
Máquina de pólos lisos –  $2p=2$



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

# FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

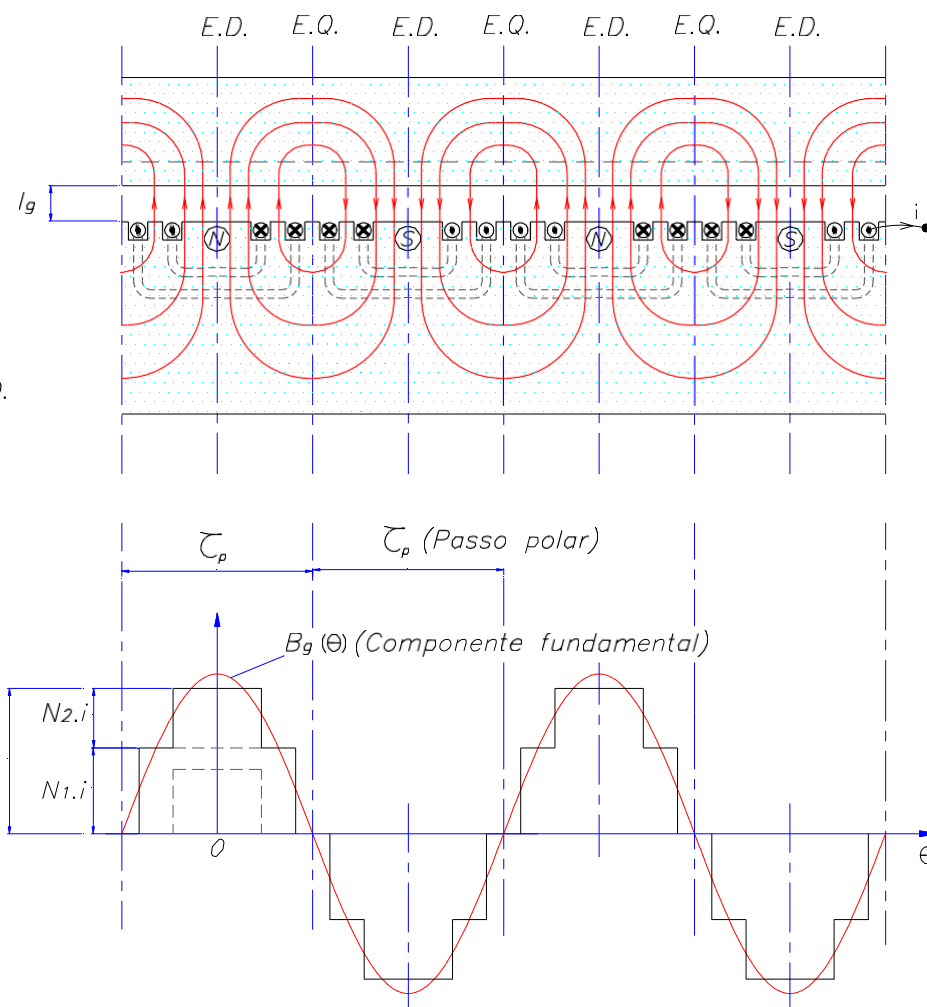
Máquina de pólos lisos –  $2p=4$



Vista em corte da máquina

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

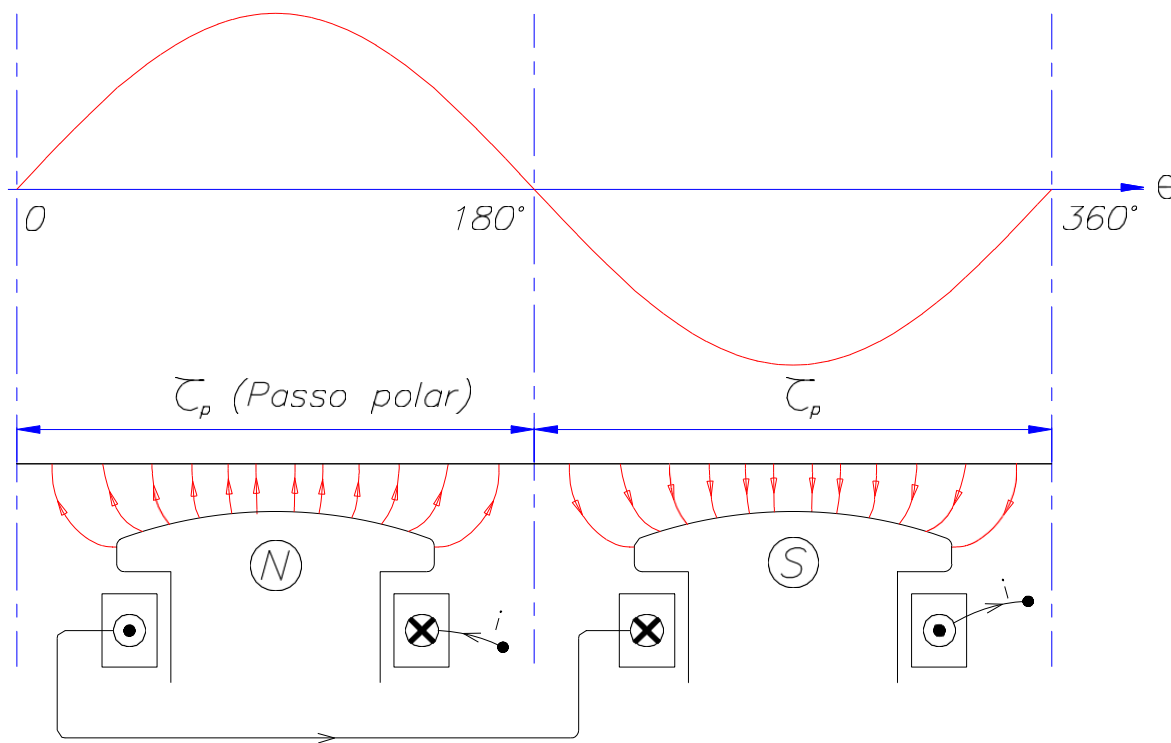
Vista planificada da máquina



Distribuição espacial de Fmm 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 –  $2p = 4$

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

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

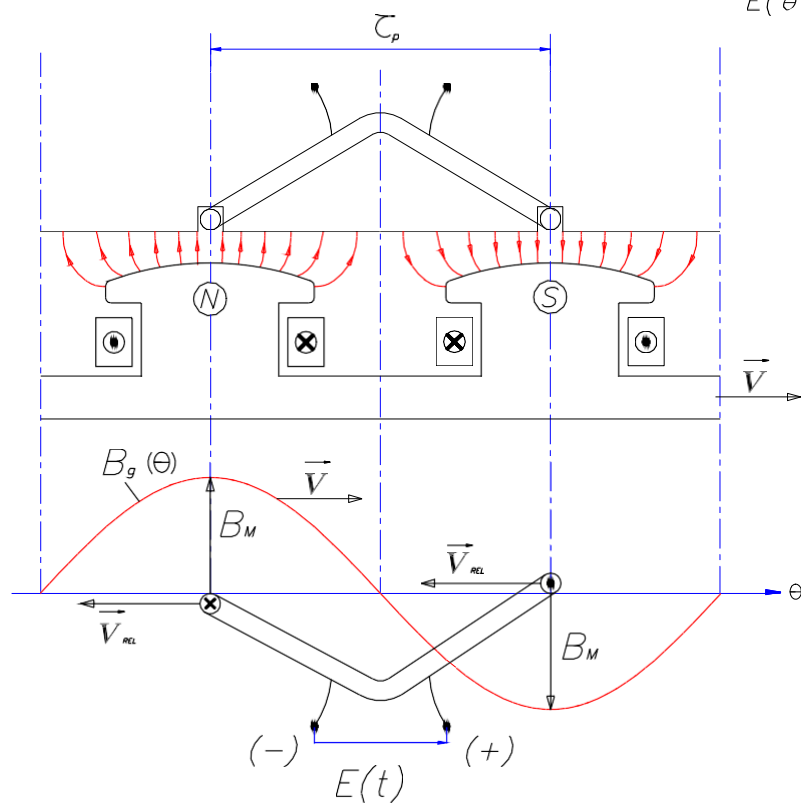
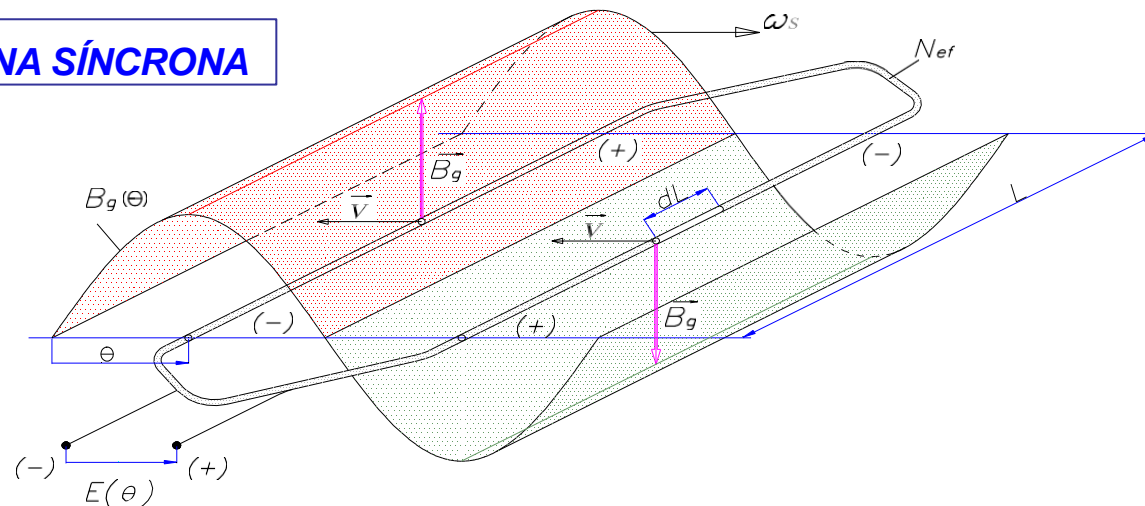
$$\text{ÂNGULO ELÉTRICO} = p \times \text{ÂNGULO GEOMÉTRICO} - p = \text{N}^\circ \text{ de pares de pólos}$$



## GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA

### EFEITO MOCIONAL

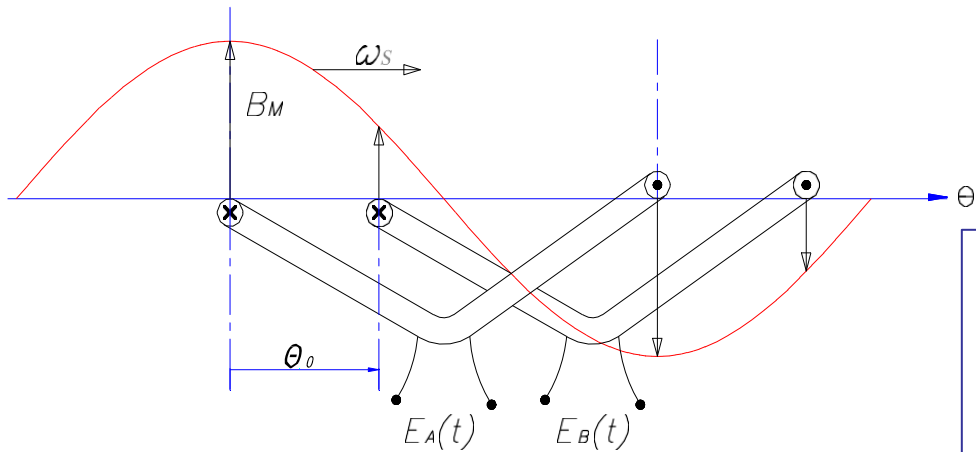
$$de = dL.(V \times \vec{B}_g) \Rightarrow e = B_g.L.V$$



Estator com bobina alojada em ranhuras  
afastadas de  $180^\circ$  elétricos ( $\tau_p$ )

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

Distribuição espacial de induções no entreferro  
solidária ao rotor – móvel com velocidade  $\omega_s$



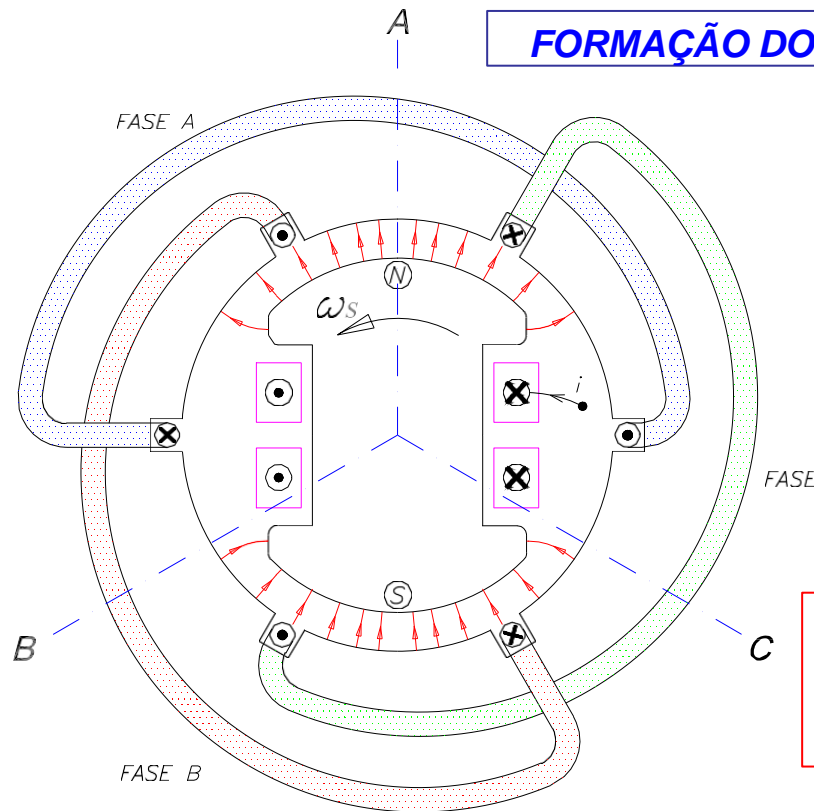
Bobinas com posições diferentes no estator sofrem tensão induzida cujos máximos ocorrem em tempos diferentes → **DEFASAGEM**

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

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

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

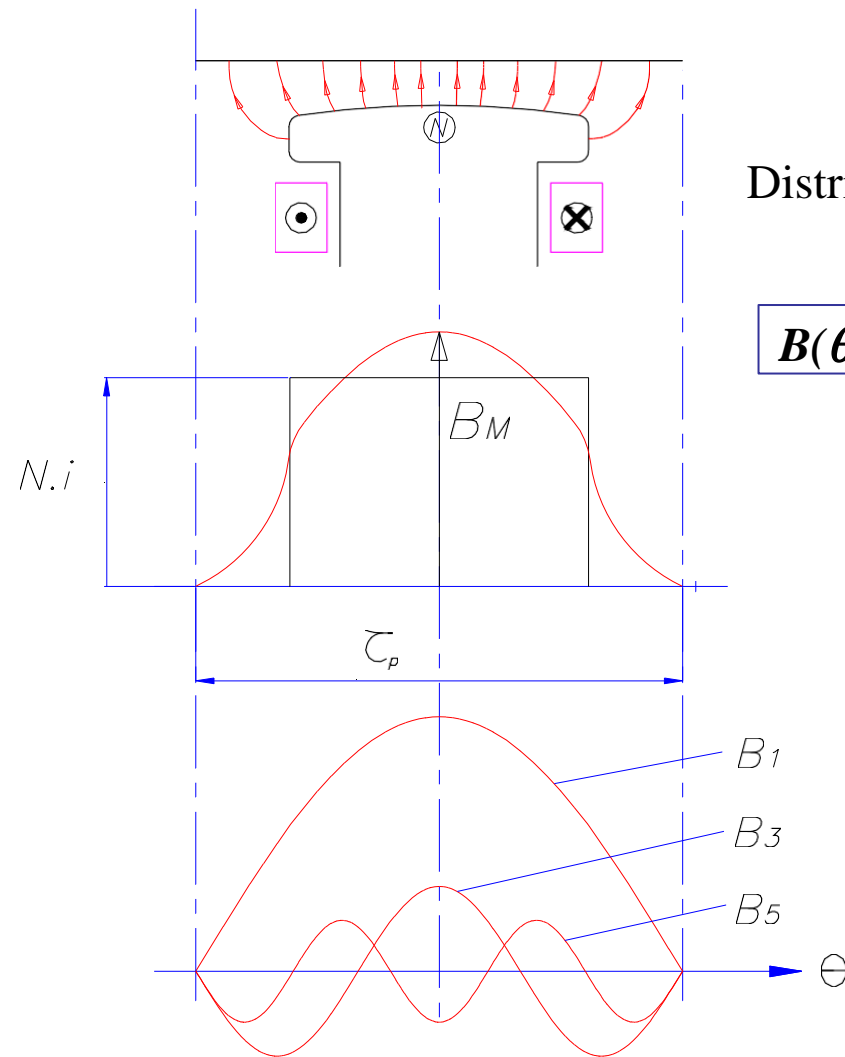
### FORMAÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSÕES



**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

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

$h$  : ordem da harmônica

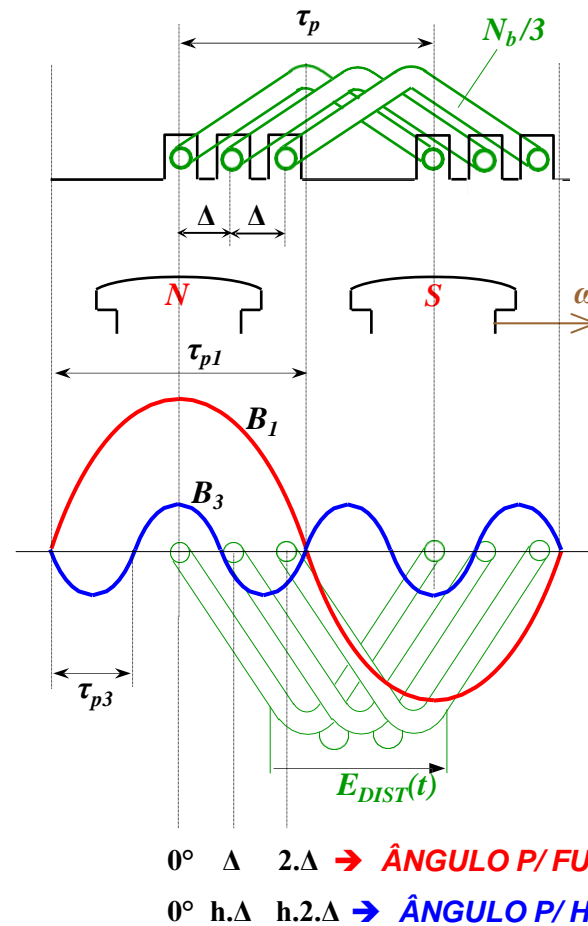
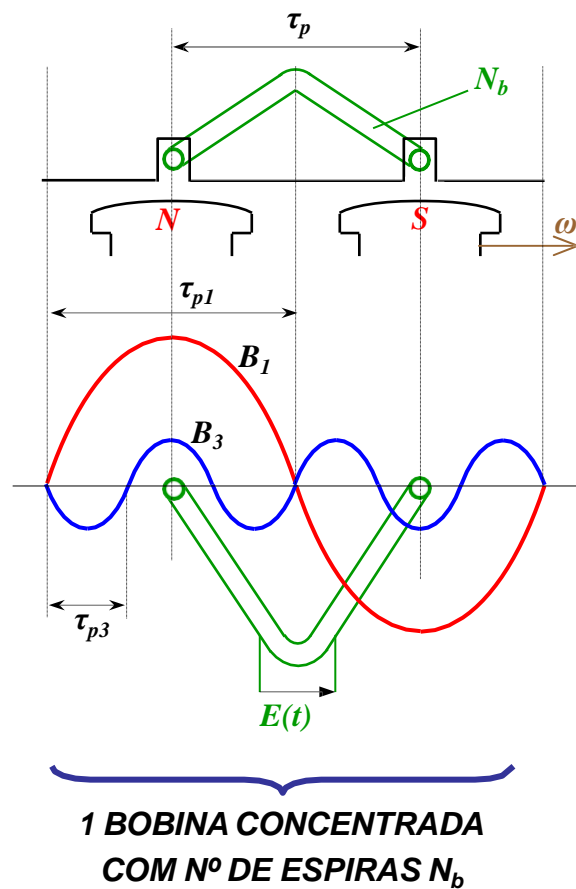
$B_1$  : componente fundamental

$B_h$  : componente harmônica

**CONSEQÜÊNCIA : SURGEM TENSÕES HARMÔNICAS**  
**INDUZIDAS NO ESTATOR → DISTORÇÃO DA FORMA DE**  
**ONDA DA TENSÃO GERADA**



## FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 1 - DISTRIBUIÇÃO DO ENROLAMENTO



### EXEMPLO DE DISTRIBUIÇÃO:

$q = 3$  ranh./pólo/fase

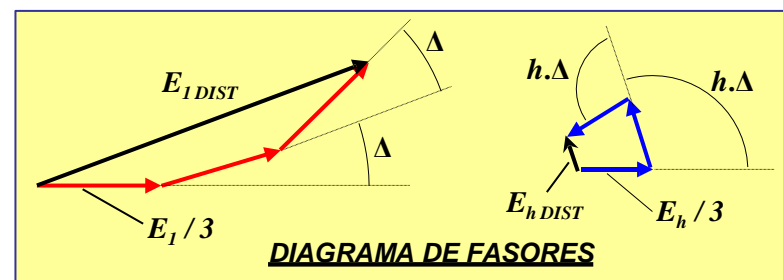
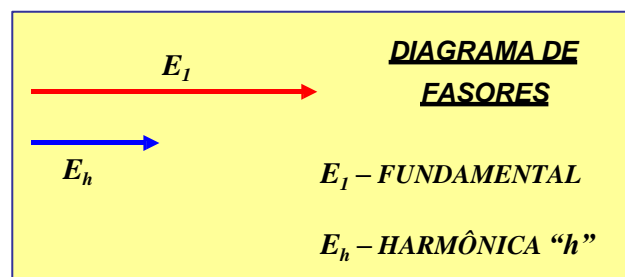


1 GRUPO DE 3 BOBINAS  
EM SÉRIE, CADA  
BOBINA COM Nº DE  
ESPIRAS  $N_b/3$

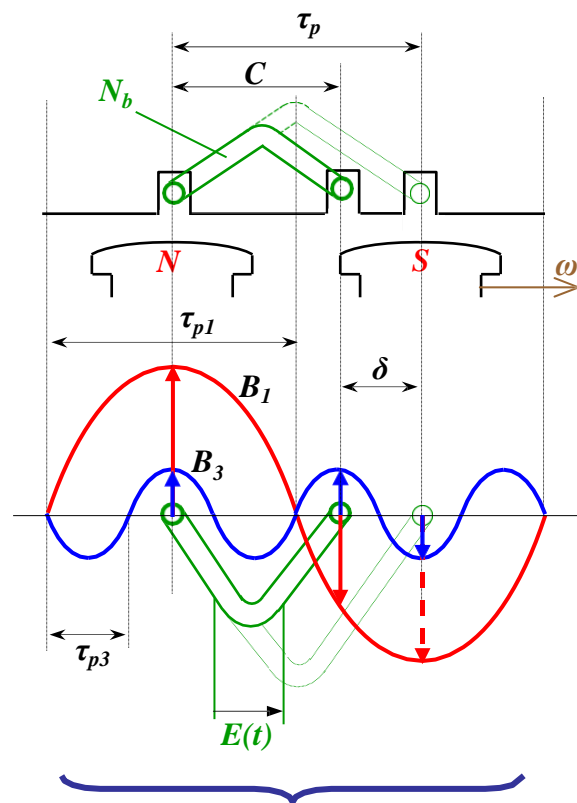
### EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO:

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

$$E_{hDIST} \ll E_h$$



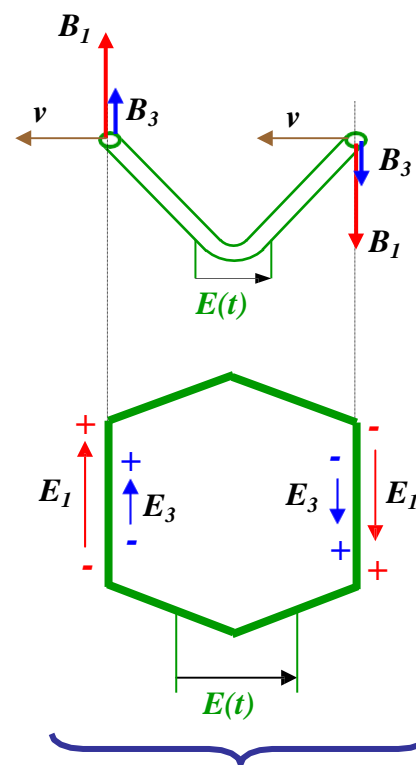
## FILTRAGEM DE HARMÔNICOS → 2 - ENCURTAMENTO DE PASSO DAS BOBINAS



PASSO DA BOBINA :  $C < \tau_p$

ÂNGULO DE ENCURTAMENTO :  $\delta$  (° elet.)

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



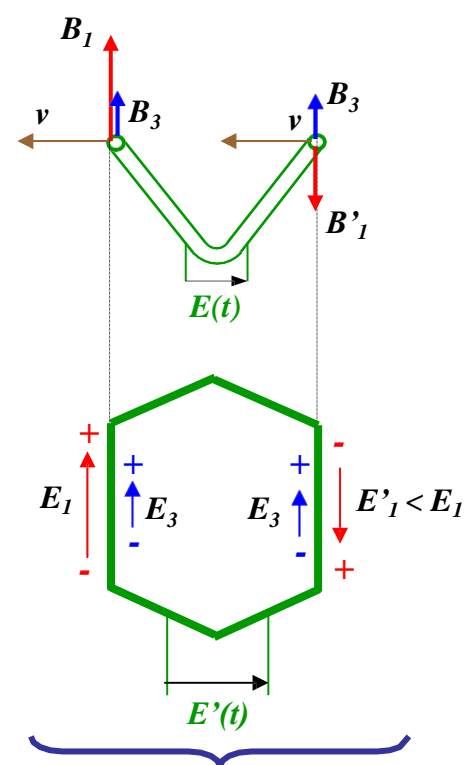
PASSO PLENO :

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

EFEITO DO ENCURTAMENTO:

$$E'_1 \approx E_1$$

$$E'_h \ll E_h$$



PASSO ENCURTADO :

(p.ex. →  $\delta = 60^\circ$ )

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

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

$$f = \frac{n \cdot p}{120} \Rightarrow n = 120 \cdot \frac{f}{p}$$

$f \Rightarrow \text{Hz}$

$n \Rightarrow \text{Rpm}$

$p \Rightarrow n^\circ \text{ de polos}$

Nº de polos	f = 50 Hz	F = 60 Hz
2	3000 rpm	3600 rpm
4	1500 rpm	1800 rpm
6	1000 rpm	1200 rpm
8	750 rpm	900 rpm
10	600 rpm	720 rpm
12	500 rpm	600 rpm





## FILTRAGEM DE HARMÔNICOS

### EFETOS 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) :**

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

**CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO GERADA NA MÁQUINA SÍNCRONA:**

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