

FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA SÍNCRONA

PRINCÍPIOS BÁSICOS DO FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA SÍNCRONA:

BOBINAS DE CAMPO DO ROTOR , COM “N” ESPIRAS, SÃO ALIMENTADAS EM CORRENTE CONTÍNUA (CORRENTE DE EXCITAÇÃO – i_f)

A FORÇA MAGNETOMOTRIZ IMPOSTA AO CIRCUITO MAGNÉTICO ($F_{mm} = N.i_f$) CRIA UM CAMPO MAGNÉTICO QUE SE DISTRIBUI ADEQUADAMENTE NO ENTREFERRO (DISTRIBUIÇÃO SENOIDAL OU COSSENOIDAL IDEALMENTE)

AO SE MOVIMENTAR O ROTOR, O CAMPO MAGNÉTICO FICA AFETADO DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO AOS CONDUTORES FIXOS DO ESTATOR

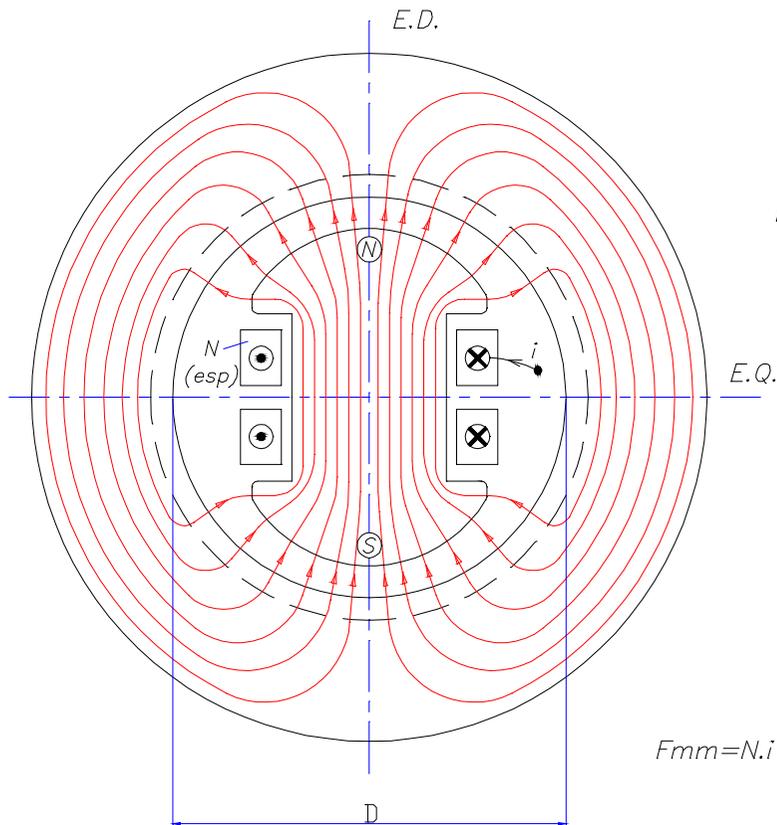
→ SURGIMENTO DE FORÇA ELETROMOTRIZ MECÂNICA INDUZIDA NOS CONDUTORES DO ESTATOR PELA INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA ENTRE O CAMPO E OS CONDUTORES (LEI DE FARADAY)

PRIMEIRO PASSO NO ENTENDIMENTO DA OPERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA:

→ ESTUDO DA FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO

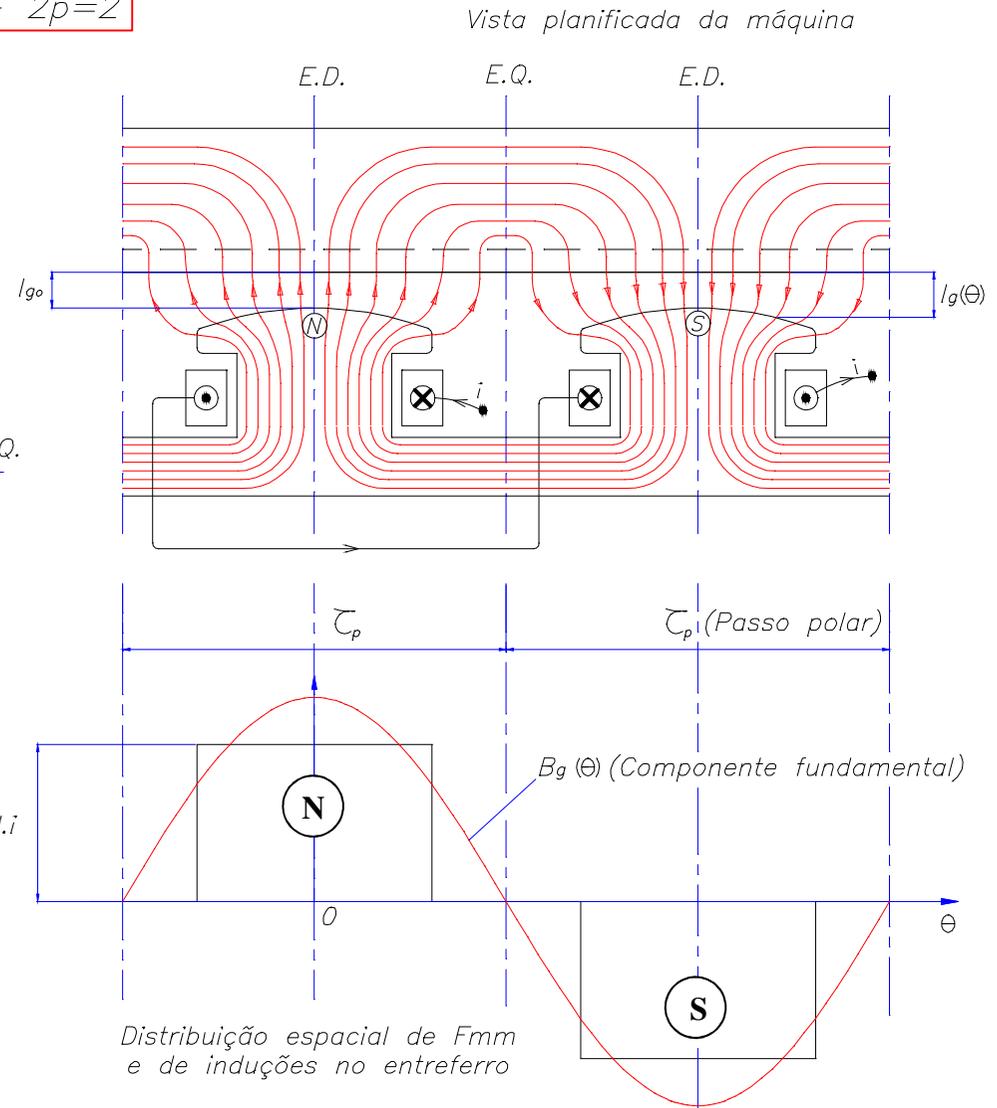
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

Máquina de pólos salientes – $2p=2$



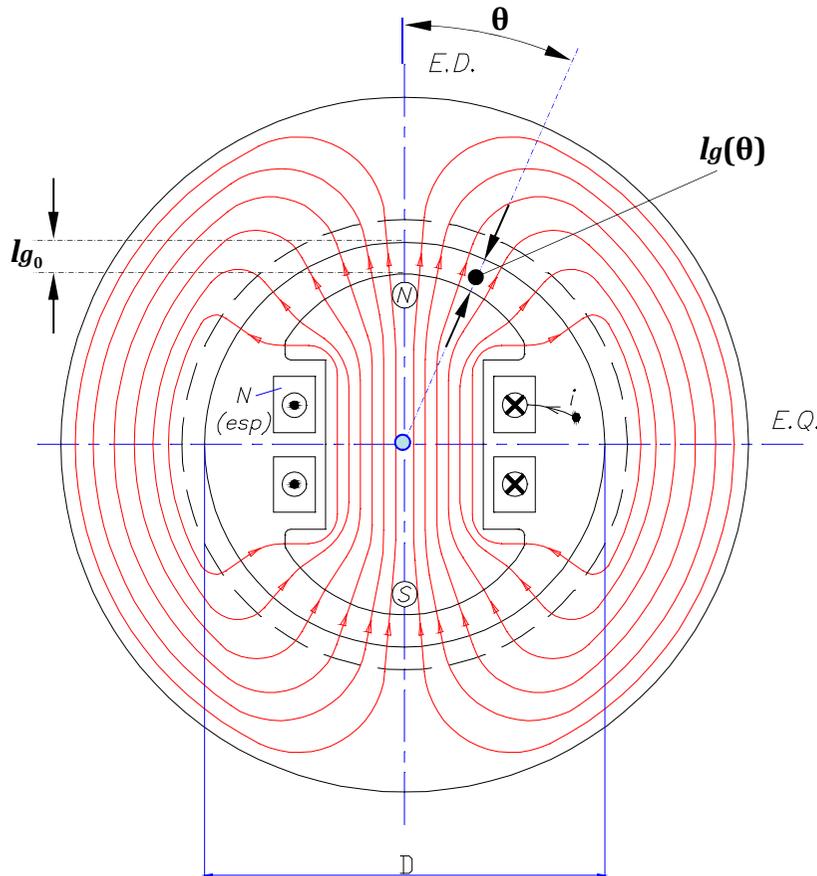
Vista em corte da máquina

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



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

FORMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL COSENOIDAL DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO



FORÇA MAGNETOMOTRIZ DE EXCITAÇÃO:

$F_{mm} = N \cdot i_f \rightarrow N$: NÚMERO DE ESPIRAS DA BOBINA DE CAMPO

RELUTÂNCIA MAGNÉTICA DO ENTREFERRO:

$$\mathfrak{R}_g(\theta) = \frac{l_g(\theta)}{\mu_0 \cdot S_p}$$

SUPERFÍCIE POLAR: $S_p = \tau_p \cdot L$

PASSO POLAR: $\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p}$ } $2p$: N° DE POLOS
 p : N° DE PARES DE POLOS

FLUXO MAGNÉTICO POR POLO NO ENTREFERRO:

$$\phi = \frac{F_{mm}}{\mathfrak{R}} = \frac{N \cdot i_f \cdot \mu_0 \cdot \tau_p \cdot L}{l_g(\theta)} = B_g(\theta) \cdot \tau_p \cdot L \quad (\phi = B_g \cdot S_p)$$

DENSIDADE DE FLUXO MAGÉTICO NO ENTREFERRO: →

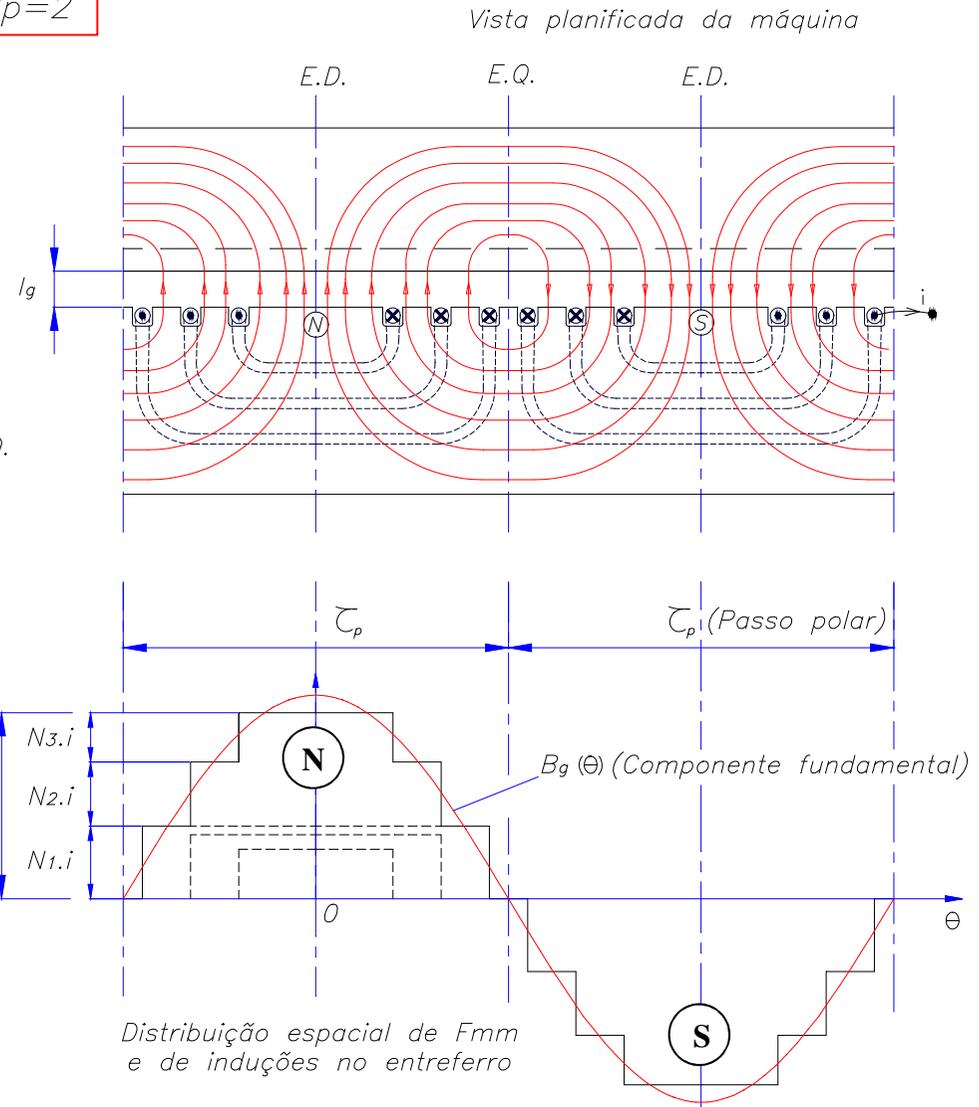
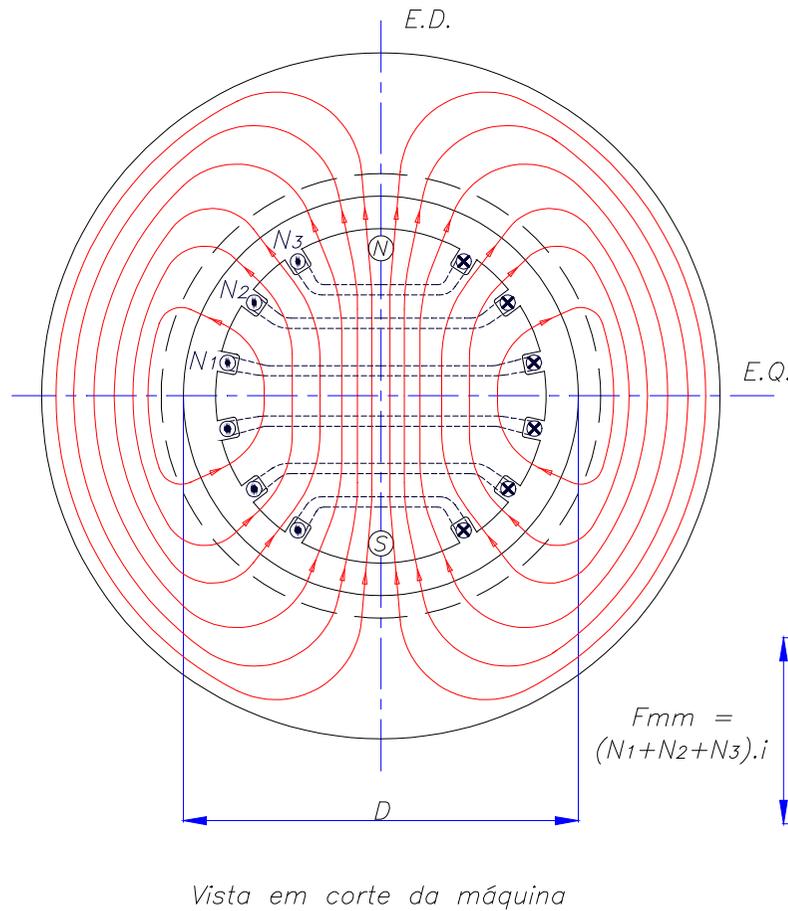
$$B_g(\theta) = \frac{N \cdot i_f \cdot \mu_0}{l_g(\theta)}$$

} DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE B_g DEPENDE DA GEOMETRIA DO ENTREFERRO

SE: $l_g(\theta) = l_{g0} \cdot \frac{1}{\cos\theta} \rightarrow B_g(\theta) = \frac{N \cdot i_f \cdot \mu_0}{l_{g0}} \cdot \cos\theta = B_{gmax} \cdot \cos\theta \rightarrow B_{gmax} = f(i_f)$ } **FUNÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO**

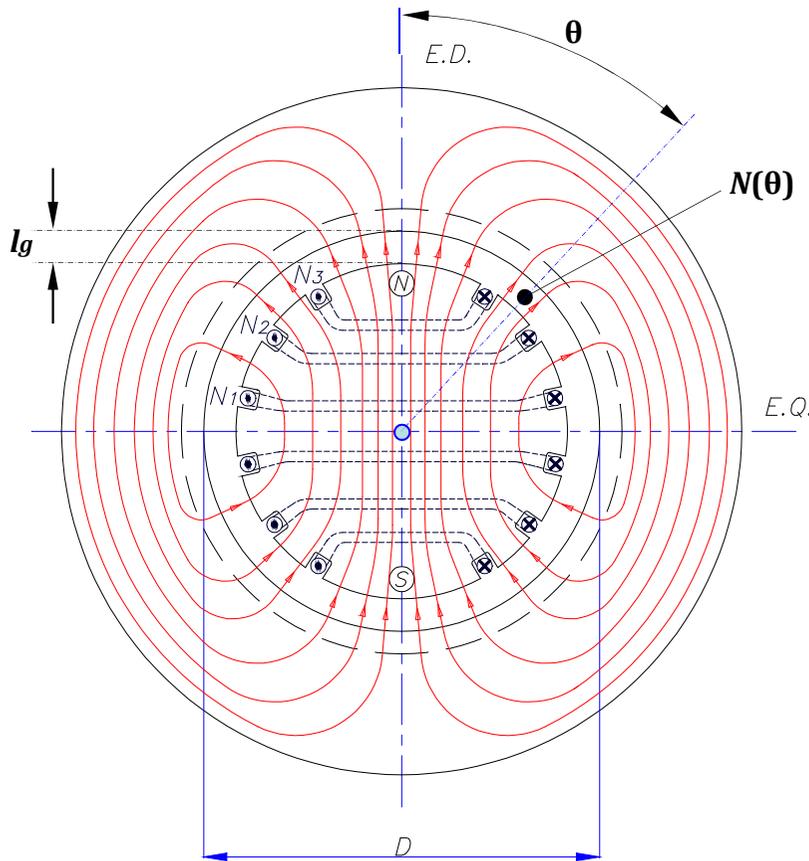
FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

Máquina de pólos lisos – $2p=2$



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

FORMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL COSENoidal DE DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO



FORÇA MAGNETOMOTRIZ DE EXCITAÇÃO:

$F_{mm} = N(\theta) \cdot i_f \rightarrow N(\theta)$: NÚMERO DE ESPIRAS DA BOBINA DE CAMPO, NA POSIÇÃO θ

RELUTÂNCIA MAGNÉTICA DO ENTREFERRO:

$\mathfrak{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot S_p} = cte.$

SUPERFÍCIE POLAR: $S_p = \tau_p \cdot L$

PASSO POLAR: $\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p}$ } $2p$: N° DE POLOS
 p : N° DE PARES DE POLOS

FLUXO MAGNÉTICO POR POLO NO ENTREFERRO:

$\phi = \frac{F_{mm}}{\mathfrak{R}} = \frac{N(\theta) \cdot i_f \cdot \mu_0 \cdot \tau_p \cdot L}{l_g} = B_g(\theta) \cdot \tau_p \cdot L \quad (\phi = B_g \cdot S_p)$

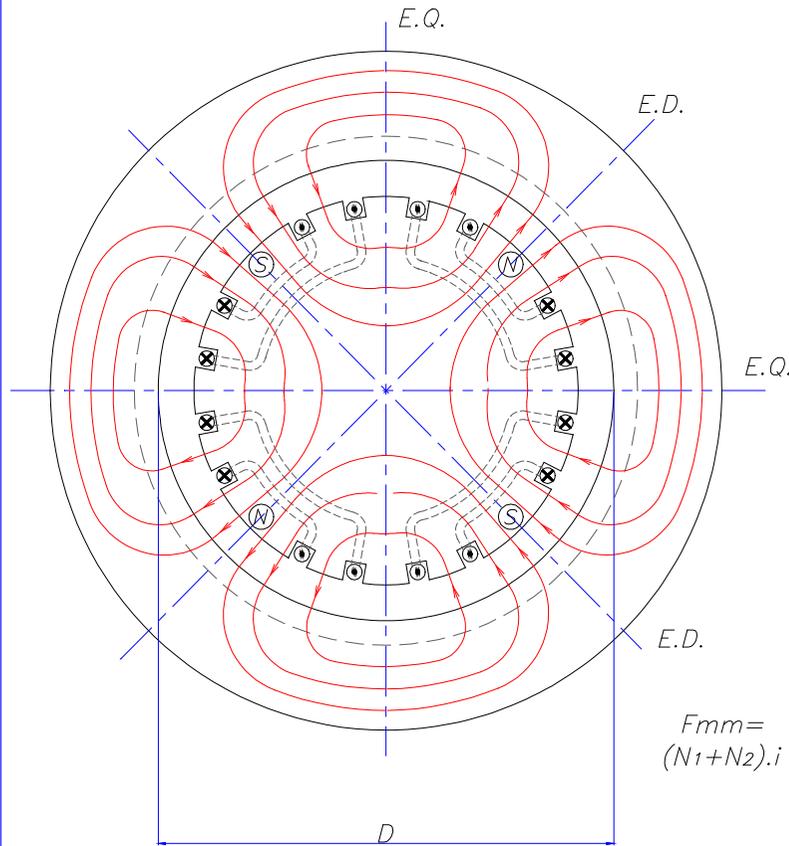
DENSIDADE DE FLUXO MAGÉTICO NO ENTREFERRO: →

$B_g(\theta) = \frac{N(\theta) \cdot i_f \cdot \mu_0}{l_g}$ } **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE B_g DEPENDE DA DISTRIBUIÇÃO DE ESPIRAS**

SE: $N(\theta) = N \cdot \cos\theta \rightarrow B_g(\theta) = \frac{N \cdot i_f \cdot \mu_0}{l_g} \cdot \cos\theta = B_{g_{max}} \cdot \cos\theta \rightarrow B_{g_{max}} = f(i_f)$ } **FUNÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO**

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO NA MÁQUINA SÍNCRONA

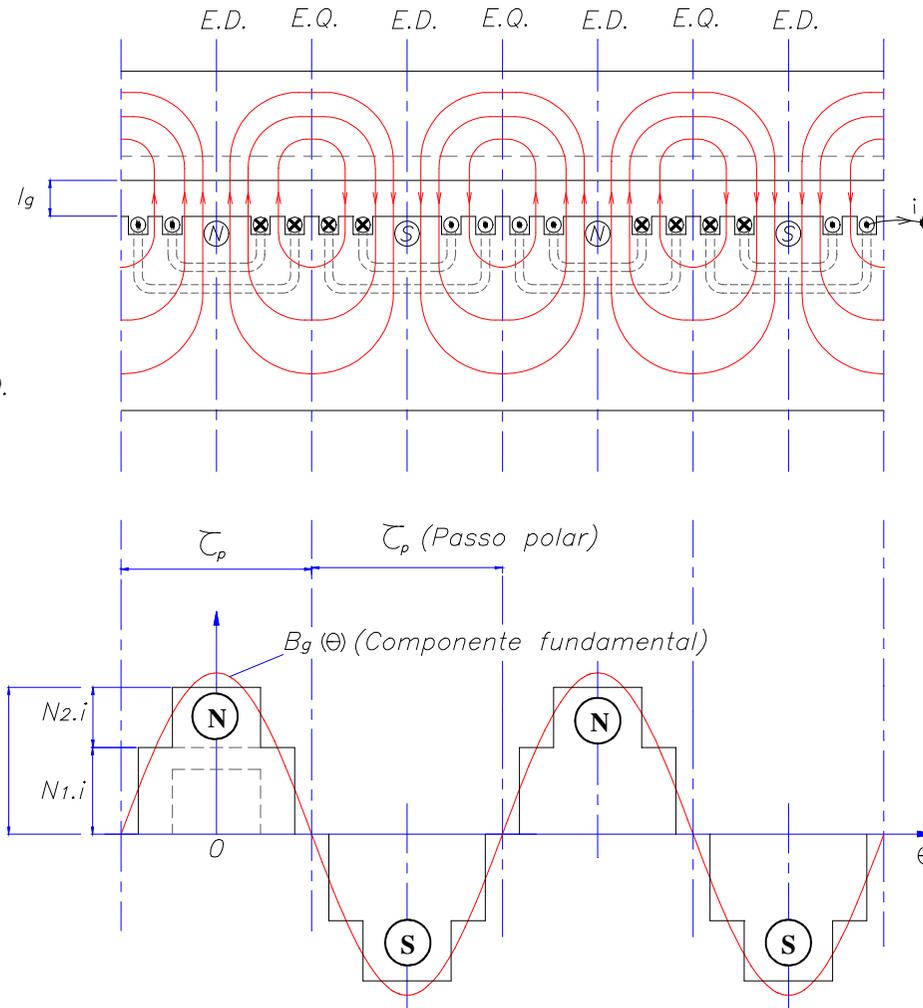
Máquina de pólos lisos – $2p=4$



Vista em corte da máquina

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

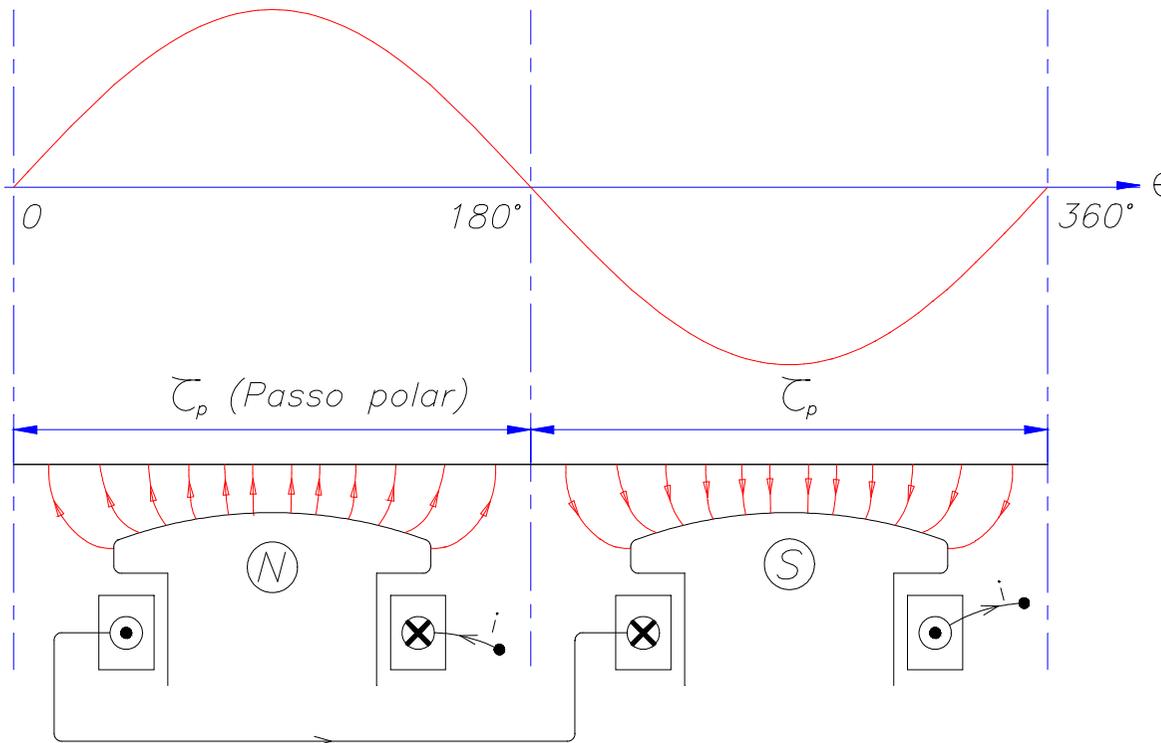
Vista planificada da máquina



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 – $2p = 2$

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

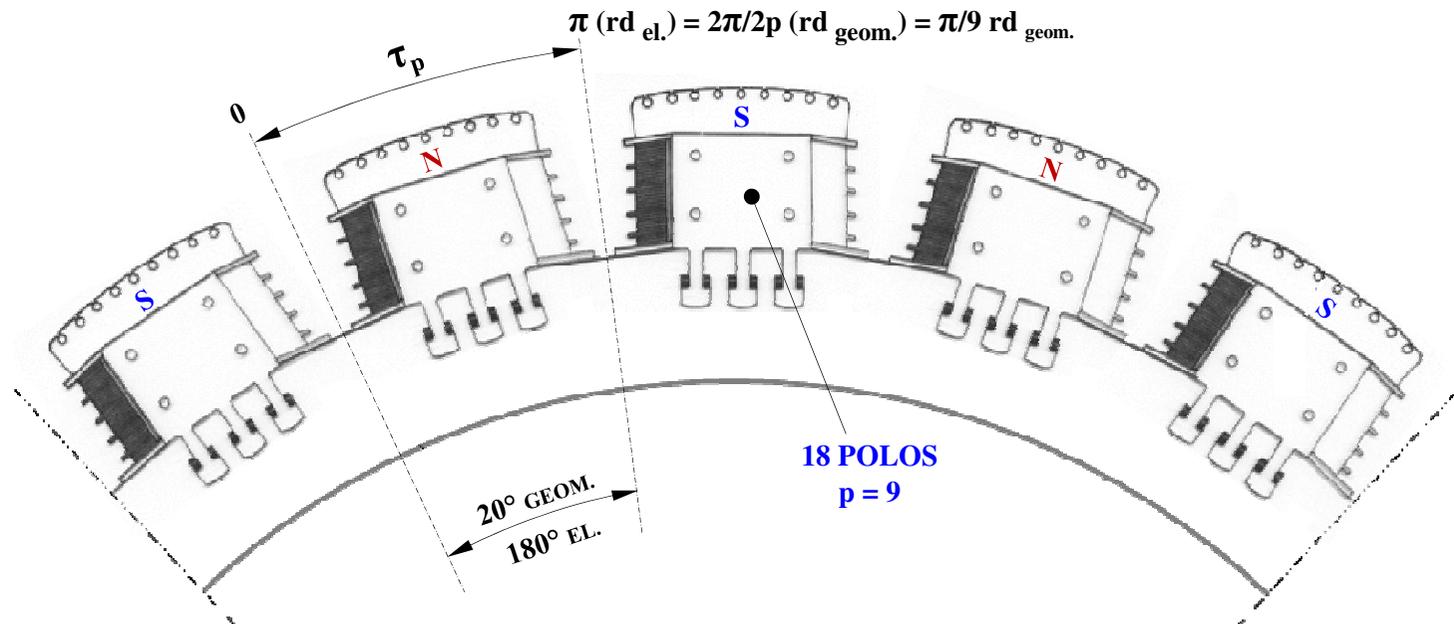
$$\tau_p - 180^\circ \text{ geométricos} = 180^\circ \text{ elétricos}$$

Para 4 pólos – $2p = 4$

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

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

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

PASSO POLAR E ÂNGULOS ELÉTRICO E GEOMÉTRICO - (e.g. gerador de 18 polos)

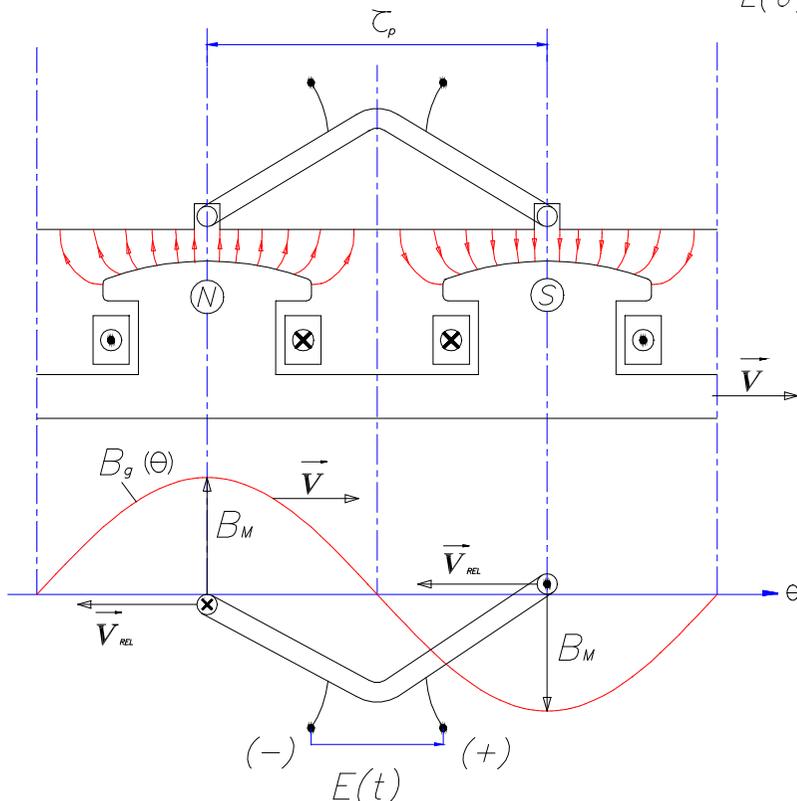
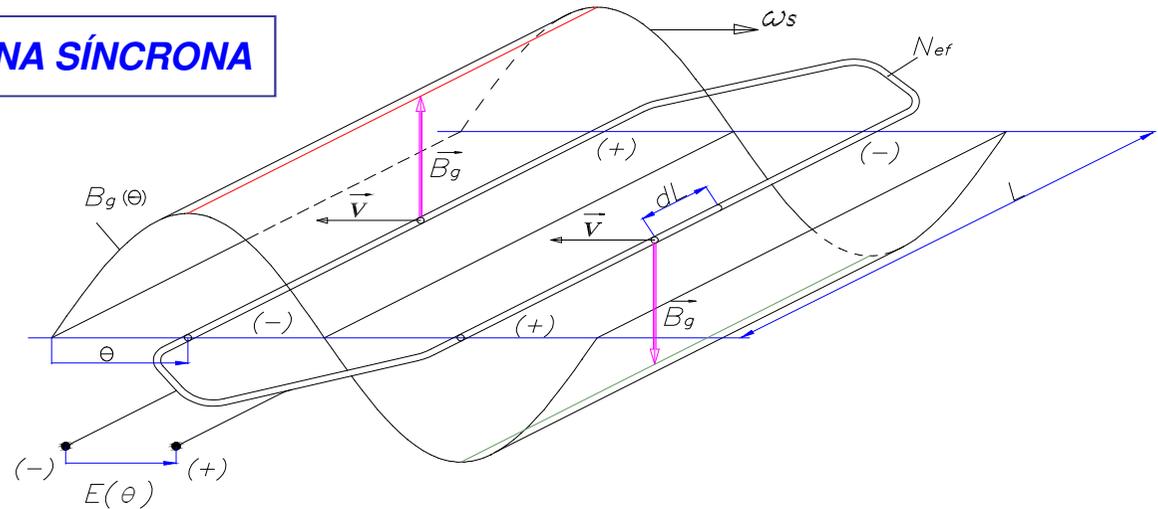
→ QUALQUER QUE SEJA O NÚMERO DE POLOS DA MÁQUINA, TODO O ESTUDO FICA COMPLETO SE REALIZADO NUM ÚNICO PAR DE POLOS

→ A ANÁLISE É PORTANTO FEITA SEMPRE PARA 2 POLOS, SENDO REPETITIVA PARA OS DEMAIS

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)

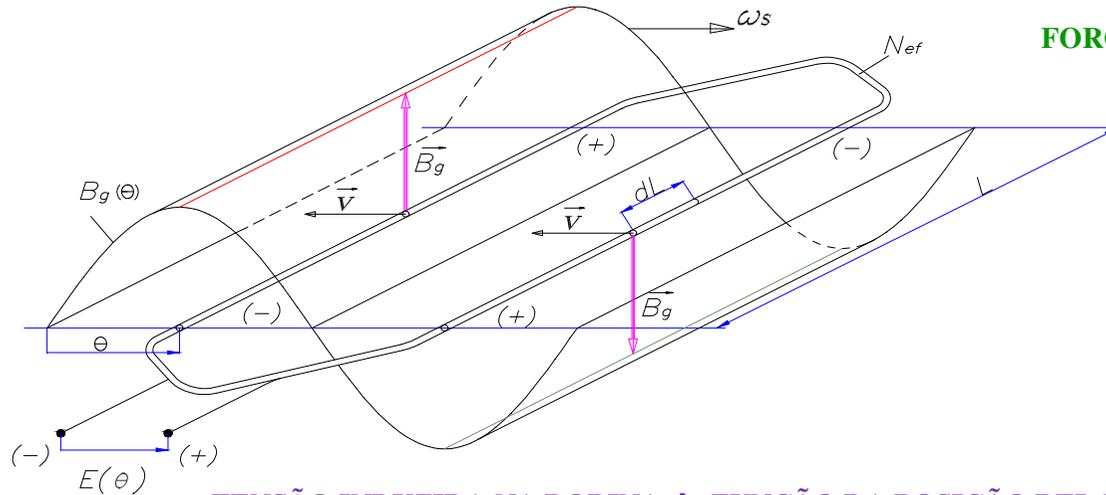
Rotor em movimento com velocidade angular ω_s

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

TENSÃO INDUZIDA POR EFEITO MOCIONAL NA BOBINA DO ESTATOR DA MÁQUINA SÍNCRONA



FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA EM CADA CONDUTOR:

→ $e_c = B_g \cdot L \cdot v_{rel}$

TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA:

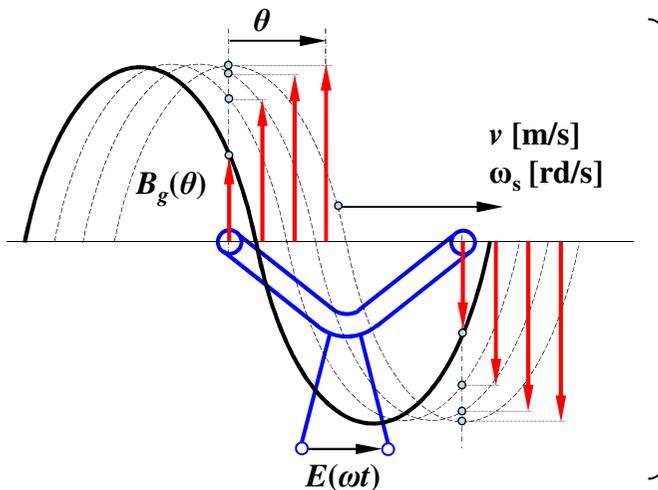
→ $E = 2 e_c \cdot N_{ef}$

N_{ef} : N° DE ESPIRAS EFETIVAS DA BOBINA ESTATÓRICA

TENSÃO INDUZIDA NA BOBINA → FUNÇÃO DA POSIÇÃO RELATIVA DA ONDA DE CAMPO SOBRE OS CONDUTORES:

→ $B_g = B_g(\theta) = B_{g\ max} \cdot \cos\theta$ → $E = E(\theta) = (2 \cdot N_{ef} \cdot B_{g\ max} \cdot L \cdot v_{rel}) \cdot \cos\theta = E_{max} \cdot \cos\theta$

$v_{rel} = \pi \cdot D \cdot n_s$; n_s : [RPS] FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO → $E_{max} = 2 \cdot N_{ef} \cdot B_{g\ max} \cdot L \cdot \pi \cdot D \cdot n_s$



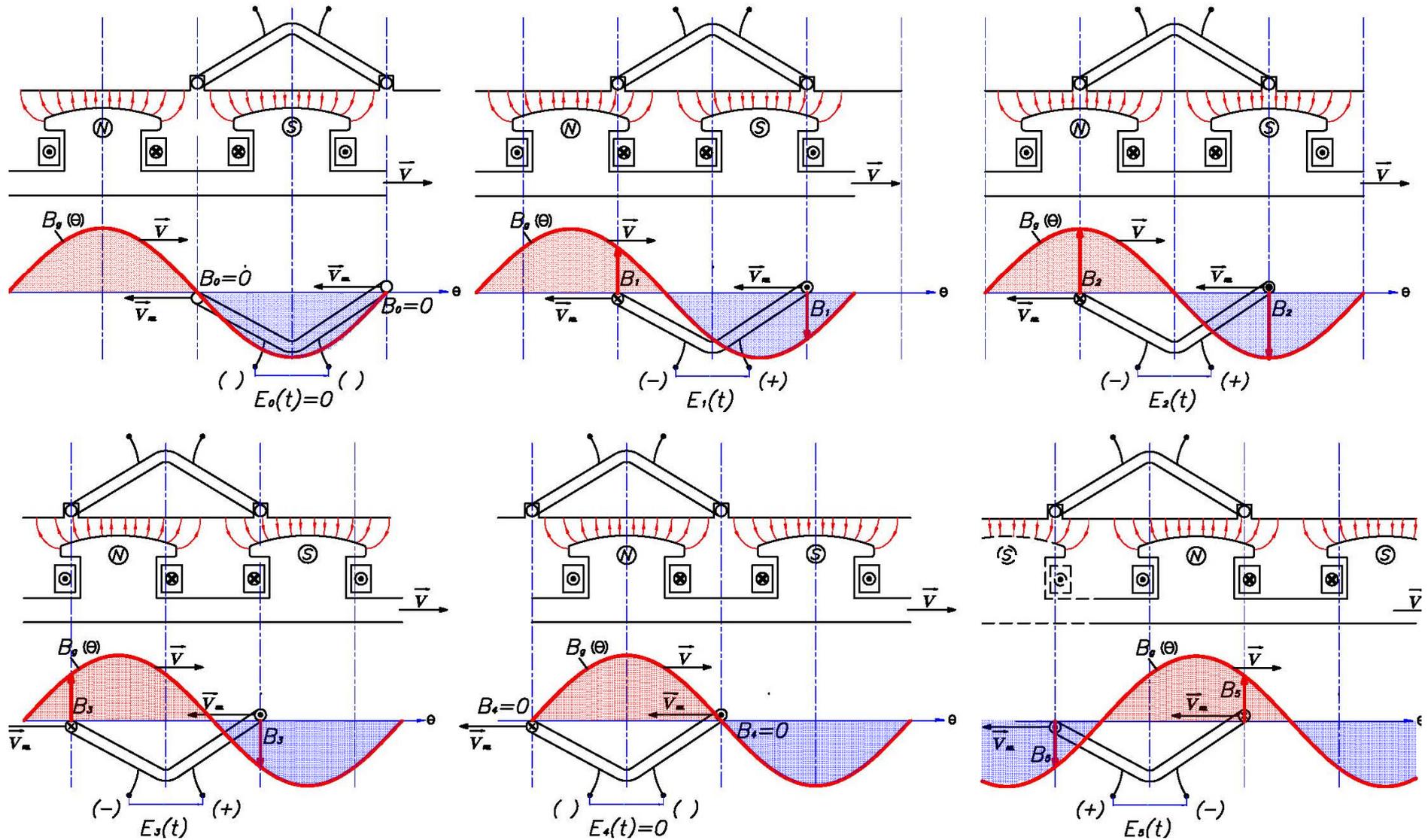
ONDA DE CAMPO EVOLUI SOBRE A BOBINA COM VELOCIDADE ANGULAR ω [rd/s]

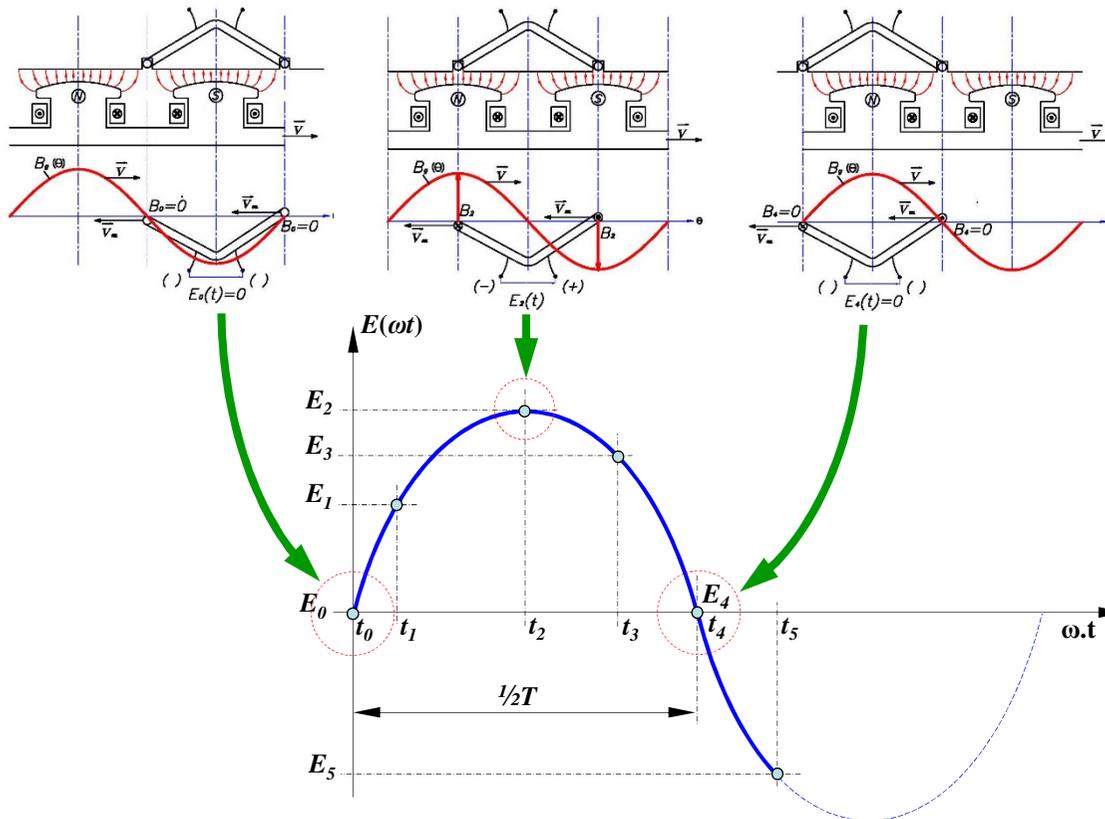
POSIÇÃO RELATIVA ENTRE A ONDA E A BOBINA EVOLUI NO TEMPO: $\theta = \omega \cdot t$

TENSÃO OBSERVADA NOS TERMINAIS DA BOBINA É VARIÁVEL NO TEMPO:

→ $E(\theta) \leftrightarrow E(\omega \cdot t)$

GERAÇÃO DE TENSÃO NA MÁQUINA SÍNCRONA → EVOLUÇÃO DA TENSÃO INDUZIDA NO TEMPO





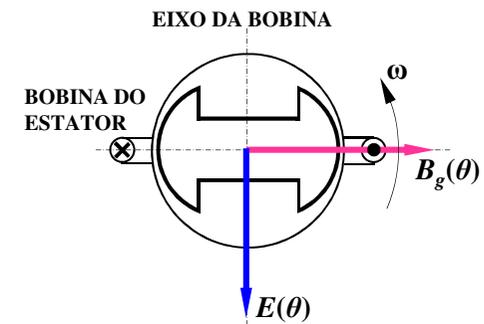
TENSÃO OBSERVADA NOS TERMINAIS DA BOBINA É VARIÁVEL NO TEMPO:

$$E(\theta) = (2.N_{ef} \cdot B_{g \max} \cdot L \cdot v_{rel}) \cdot \cos\theta$$

ANDAMENTO DA TENSÃO INDUZIDA NO TEMPO SEGUE O COMPORTAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO NO ESPAÇO

$$E(\omega.t) \leftrightarrow B(\theta) \rightarrow E(\omega.t) = E(\theta)$$

CONVENÇÃO: TENSÃO INDUZIDA CONSIDERADA COMO DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE F.E.M CENTRADA NO EIXO DA BOBINA
 → TENSÃO MÁXIMA OCORRE QUANDO O EIXO DA ONDA DE CAMPO ESTÁ A 90° DO EIXO DA BOBINA



$$\rightarrow E(\omega.t) = E(\pi/2 - \theta)$$

FREQUÊNCIA DA TENSÃO GERADA

→ MEIO CICLO DA TENSÃO INDUZIDA (MEIO PERÍODO - 1/2 T) OCORRE A CADA PASSAGEM DE UM POLO SOB A BOBINA DO ESTADOR

→ UM CICLO COMPLETO É GERADO SEMPRE QUE UM PAR DE POLOS TRASLADA SOB A BOBINA (UM CICLO MAGNÉTICO COMPLETO: N - S)

→ MÁQUINA COM “p” PARES DE POLOS, GERA “p” CICLOS POR REVOLUÇÃO COMPLETA DO ROTOR → FREQUÊNCIA GERADA: $f \text{ [Hz]} = p \cdot n_s \text{ [RPS]}$

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