

FUNCIONAMENTO DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

MOTORES DE INDUÇÃO: FUNCIONAMENTO

FORÇA MAGNETOMOTRIZ CRIADA PELA CIRCULAÇÃO
DE CORRENTES MAGNETIZANTES DO ESTATOR - F_S

DISTRIBUIÇÃO DE DENSIDADE DE FLUXO
MAGNÉTICO CRIADO PELO ESTATOR - B_g

CORRENTES INDUZIDAS NO ROTOR
PELO CAMPO DO ESTATOR - I_R

FORÇA MAGNETOMOTRIZ
CRIADA PELAS CORRENTES
DO ROTOR - F_R

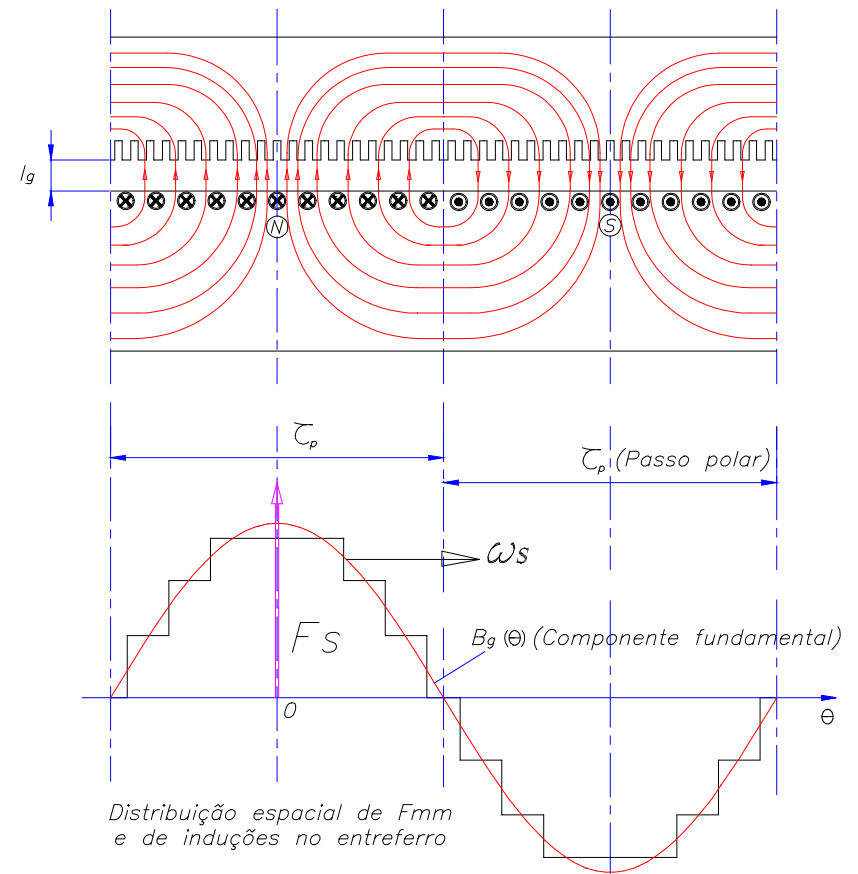
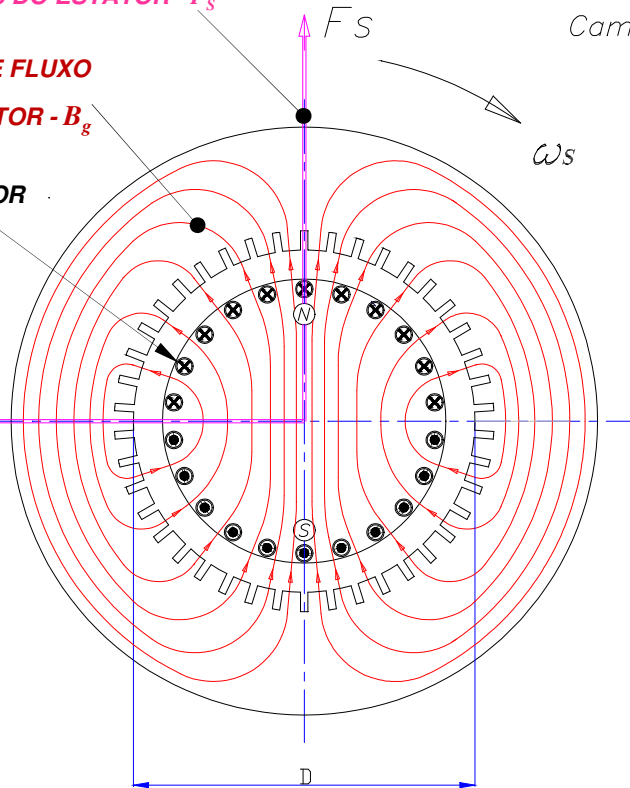
O PROCESSO DE CONVERSÃO
SE DÁ PELA INTERAÇÃO DO
CAMPO NO ENTREFERRO B_g COM
AS CORRENTES ROTÓRICAS I_R ,
INDUZIDAS POR ESSE MESMO
CAMPO.

TODAS GRANDEZAS ELÉTRICAS
DO ROTOR, COMO TENSÕES E
CORRENTES SÃO ALI INDUZIDAS
A PARTIR DO CAMPO CRIADO
PELO ESTATOR → “MÁQUINA DE
INDUÇÃO” → ELETRICAMENTE
SIMILAR AO TRANSFORMADOR

INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA NA MÁQUINA ASSÍNCRONA

Campo magnético rotativo

Vista planificada da máquina



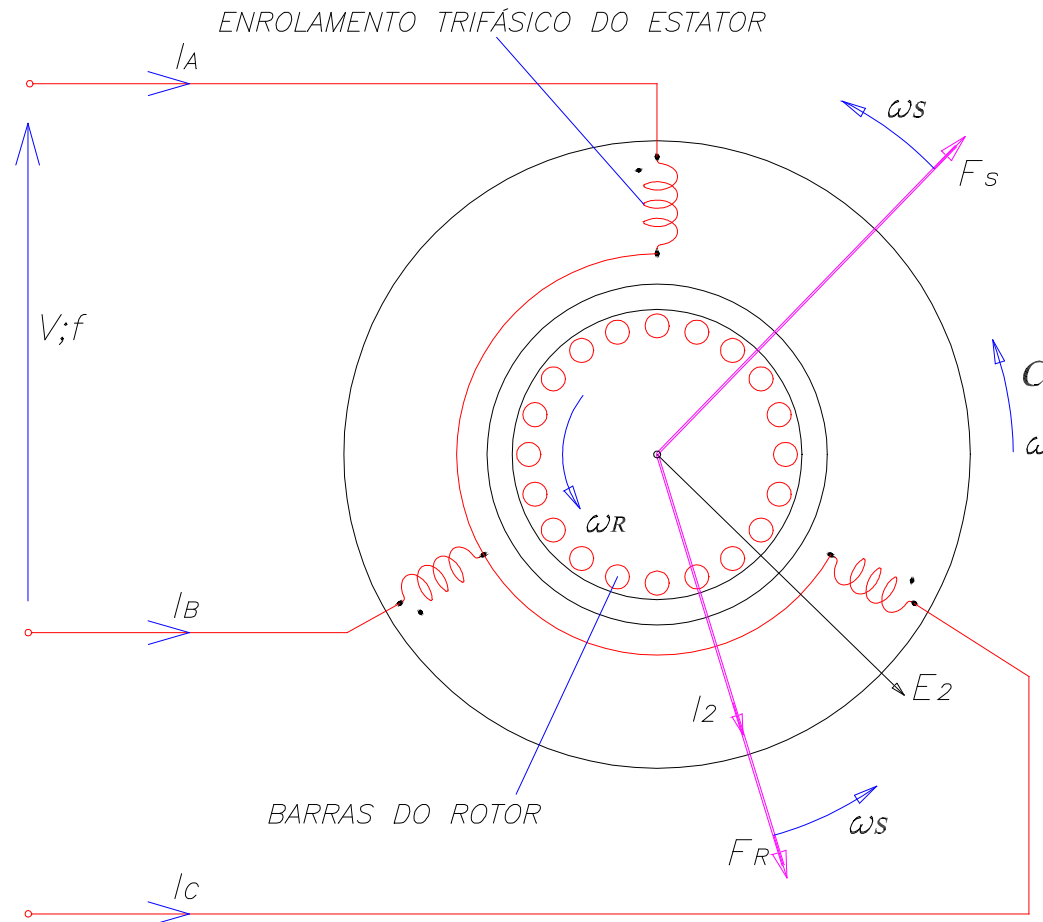
$$C_{m\acute{u}tua} = k \cdot F_S \cdot F_R \cdot \text{sen} \delta_{F_S - F_R}$$

CASO IDEAL → $\delta = 90^\circ$

(CONDUTORES DO ROTOR SEM INDUTÂNCIA)

PARA EXISTIR O PROCESSO DE INDUÇÃO NO ROTOR → **NECESSÁRIO MOVIMENTO RELATIVO ENTRE O CAMPO NO ENTREFERRO E OS CONDUTORES ROTÓRCOS** → CAMPO DEVE SER ROTATIVO

BASE DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA → CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NO ENTREFERRO

CONCEITO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR ASSÍNCRONO (DE INDUÇÃO)


CAMPO DO ESTATOR É GIRANTE :

- INDUZ TENSÕES NOS CONDUTORES DO ROTOR
- NA MÁQUINA REAL AS CORRENTES RESULTAM DA APLICAÇÃO DAS TENSÕES INDUZIDAS SOBRE A IMPEDÂNCIA COMPLEXA DOS CONDUTORES

$$C_{m\acute{u}tua} = k \cdot F_s \cdot F_R \cdot \text{sen} \delta_{F_s - F_R}$$

$$\Rightarrow \delta > 90^\circ$$

CAMPO ROTÓRICO F_R → PRODUZIDO POR CORRENTES INDUZIDAS A PARTIR DO CAMPO DO ESTATOR

$$\Rightarrow \omega_R < \omega_s$$

BASE DE OPERAÇÃO: CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO, PRODUZIDO PELO ESTATOR

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NO ENTREFERRO

CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO → ESSENCIAL NO FUNCIONAMENTO DOS MOTORES ASSÍNCRONOS

FORMAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO SÓ É POSSÍVEL COM ENROLAMENTOS POLIFÁSICOS

→ 2Φ (CONFIGURAÇÃO MÍNIMA) ; 3Φ (MAIS COMUM) ; 5Φ ; 7Φ (POUCO USUAIS)

CONDIÇÕES PARA FORMAÇÃO DO CAMPO GIRANTE COM ENROLAMENTO POLIFÁSICO:

→ NECESSÁRIO NO ESTATOR UM SISTEMA DE “ m ” CONJUNTOS DE BOBINAS, CHAMADOS FASES, ESPAÇADOS DE FORMA EQUIDISTANTE AO LONGO DA SUPERFÍCIE DO ENTREFERRO → DESLOCAMENTO ESPACIAL ENTRE FASES DE $2\pi / m$ (ÂNGULO ELÉTRICO) - EXCEÇÃO DO 2Φ → BOBINAS ESPAÇADAS DE 90° el.

→ NECESSÁRIA A ALIMENTAÇÃO DE CADA FASE COM CORRENTE ALTERNADA PERIÓDICA, SENDO O CONJUNTO DE CORRENTES FORMANDO UM SISTEMA POLIFÁSICO → DEFASAGEM TEMPORAL DAS CORRENTES ENTRE FASES TAMBÉM DE $2\pi / m$ (ÂNGULO ELÉTRICO) - EXCEÇÃO DO 2Φ → CORRENTES DEFASADAS DE 90° el.

NO CASO TRIFÁSICO: 3 CONJUNTOS DE BOBINAS EQUIDISTANTES NO ESTATOR – DESLOCADAS ESPACIALMENTE DE 120° - PERCORRIDAS POR CORRENTES ALTERNADAS - DEFASADAS ENTRE SI DE 120°



“SISTEMA TRIFÁSICO DE CORRENTES” APLICADO A UM “ENROLAMENTO TRIFÁSICO”

$$\begin{cases} I_A = I_M \cdot \cos \omega.t \\ I_B = I_M \cdot \cos(\omega.t - 120^\circ) \\ I_C = I_M \cdot \cos(\omega.t - 240^\circ) \end{cases}$$

PRINCÍPIO DO ENROLAMENTO TRIFÁSICO → CAMPO MAGNÉTICO FORMADO NO ENTREFERRO

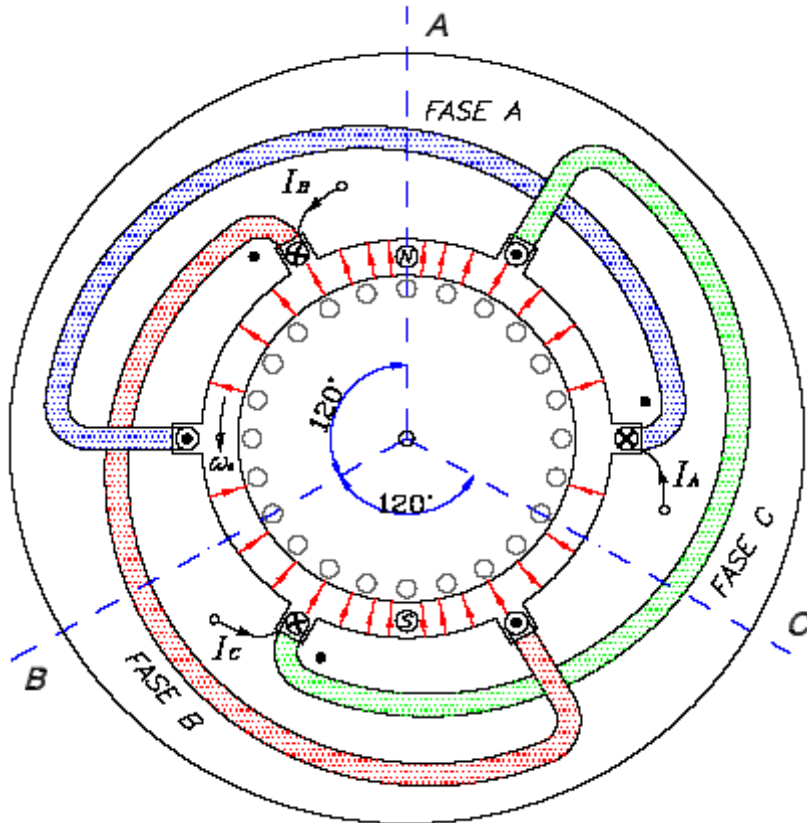
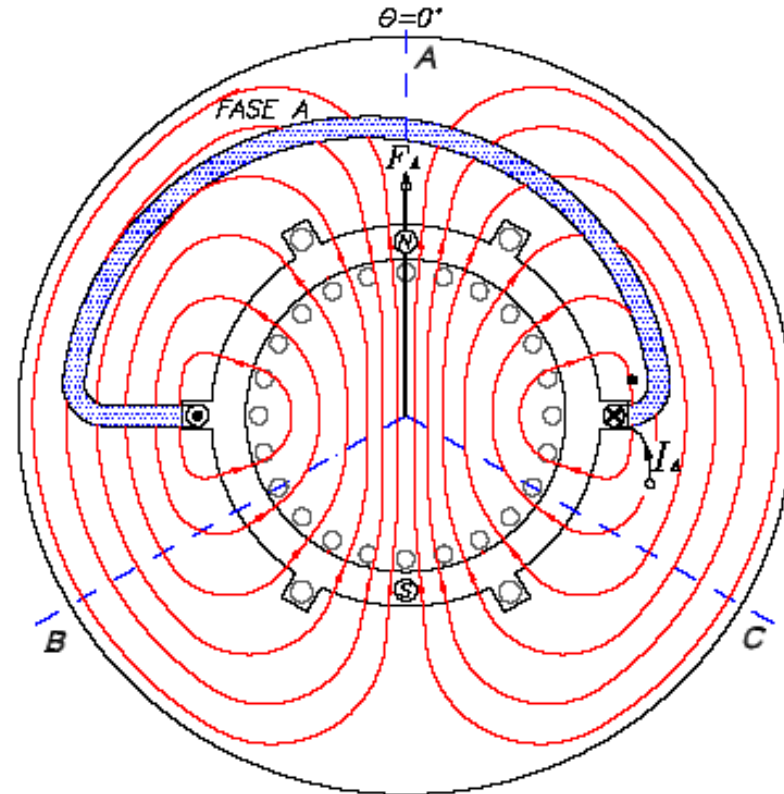


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE
ENROLAMENTO TRIFÁSICO
ELEMENTAR

→ ENROLAMENTO DE 2 PÓLOS

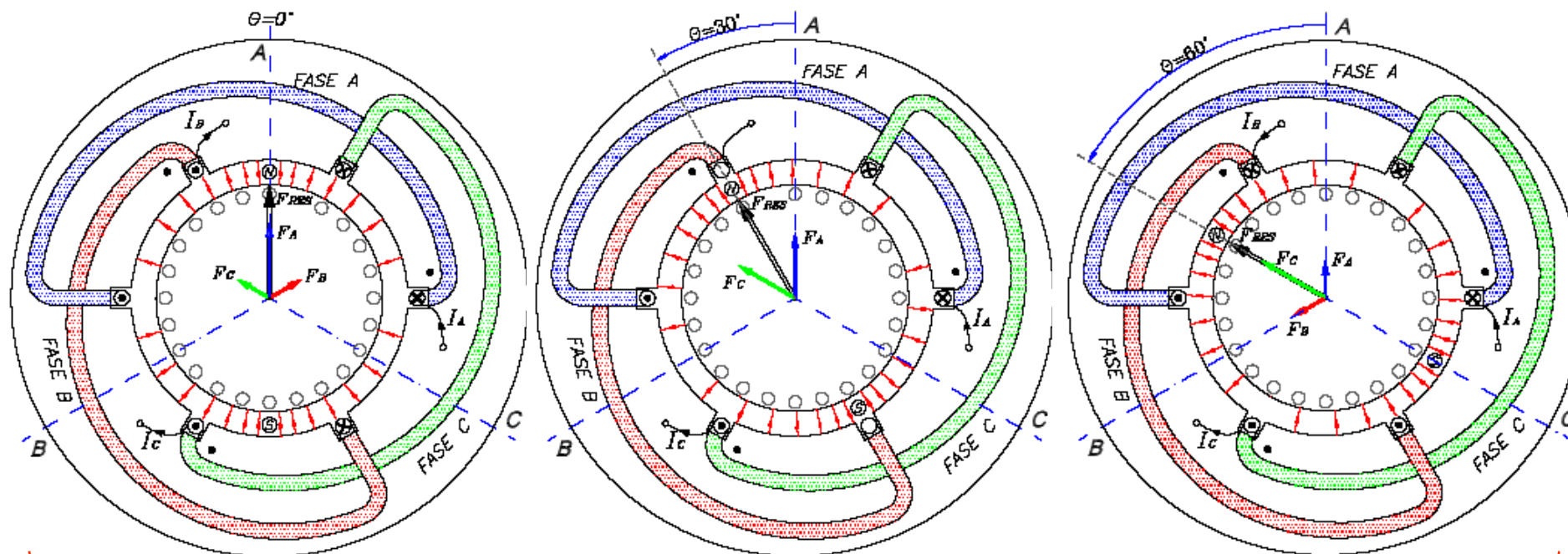


DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO CIRCUITO MAGNÉTICO,
PRODUZIDO EXCLUSIVAMENTE PELA FASE "A"

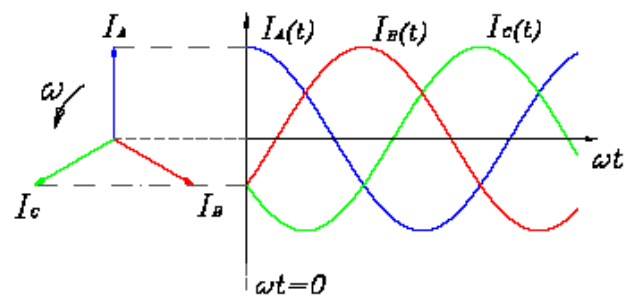
→ DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CAMPO AO LONGO DO
ENTREFERRO É CO-SENOIDAL (NO CASO IDEAL),
REPRESENTADA PELO VETOR F_A

$$\rightarrow F_A = N_f \cdot I_A = N_f \cdot I_M \cdot \cos(\omega.t) = F_M \cdot \cos(\omega.t)$$

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO - ENROLAMENTO TRIFÁSICO

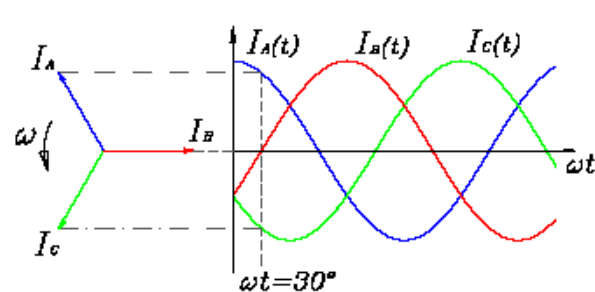


EVOLUÇÃO NO TEMPO E NO ESPAÇO DO CAMPO RESULTANTE, $F_{RES} \rightarrow$ (AÇÃO CONJUNTA DAS 3 FASES)



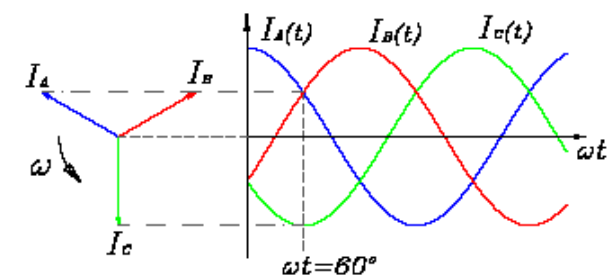
$\omega t = 0^\circ \rightarrow t = 0 \text{ s}$

$$I_A = I_M ; I_B = -0,5 I_M ; I_C = -0,5 I_M$$



$\omega t = 30^\circ \rightarrow t \approx 1,4 \text{ ms}$

$$I_A = 0,866 I_M ; I_B = 0 ; I_C = -0,866 I_M$$



$\omega t = 60^\circ \rightarrow t \approx 2,8 \text{ ms}$

$$I_A = 0,5 I_M ; I_B = 0,5 I_M ; I_C = -I_M$$

DIAGRAMAS FASORIAIS DAS CORRENTES

PROPRIEDADES DO CAMPO MAGNÉTICO FORMADO NO ENTREFERRO:

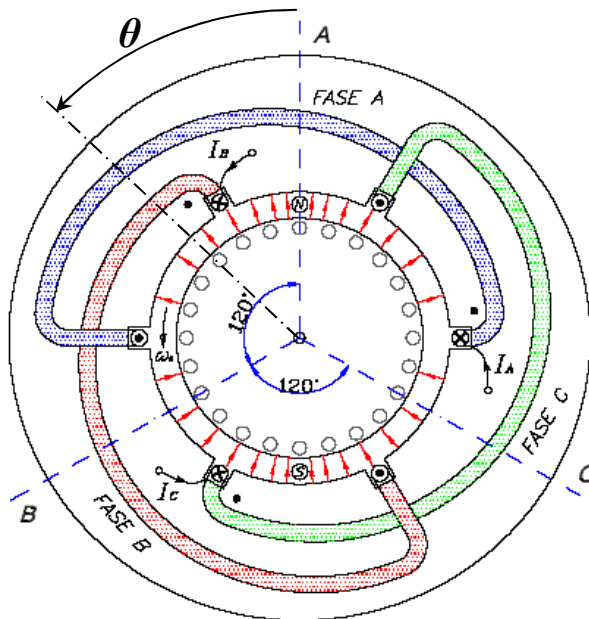
→ CAMPO RESULTANTE COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL CO-SENOIDAL (CASO IDEAL), DE AMPLITUDE CONSTANTE

→ **AMPLITUDE DO CAMPO RESULTANTE** : $F_{RES} = 1,5 \cdot F_M$ (F_M : MAGNITUDE MÁXIMA DO CAMPO INDIVIDUAL DE CADA FASE)

→ CAMPO RESULTANTE É ROTATIVO NO ENTREFERRO (CAMPO GIRANTE)

→ PARA CONFIGURAÇÃO DE 2 PÓLOS: CAMPO GIRANTE PERFAZ UMA REVOLUÇÃO COMPLETA AO LONGO DO ENTREFERRO A CADA CICLO COMPLETO DA CORRENTE NAS FASES DO ENROLAMENTO

CORRENTES DE FASE COM FREQUÊNCIA ANGULAR : $\omega = 2\pi \cdot f \rightarrow f$: FREQUÊNCIA DA REDE



$$\vec{F}_A = F_M \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \theta$$

$$\vec{F}_B = F_M \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(\theta + 120^\circ)$$

$$\vec{F}_C = F_M \cdot \cos(\omega t - 240^\circ) \cdot \cos(\theta + 240^\circ)$$

COMPONENTES
DE CAMPO
INDIVIDUAIS DE
CADA FASE

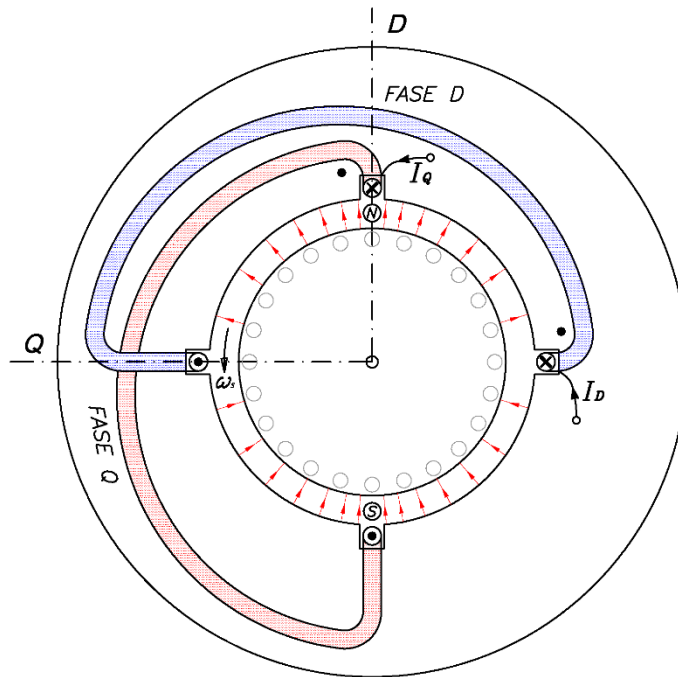
$$\vec{F}_{RES} = \vec{F}_A + \vec{F}_B + \vec{F}_C$$

$$F_{RES} = \frac{3}{2} \cdot F_M \cdot \cos(\theta - \omega t)$$

EQUAÇÃO DA ONDA
DE CAMPO ROTATIVO
NO ENTREFERRO

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA
→ VELOCIDADE SÍNCRONA DO CAMPO

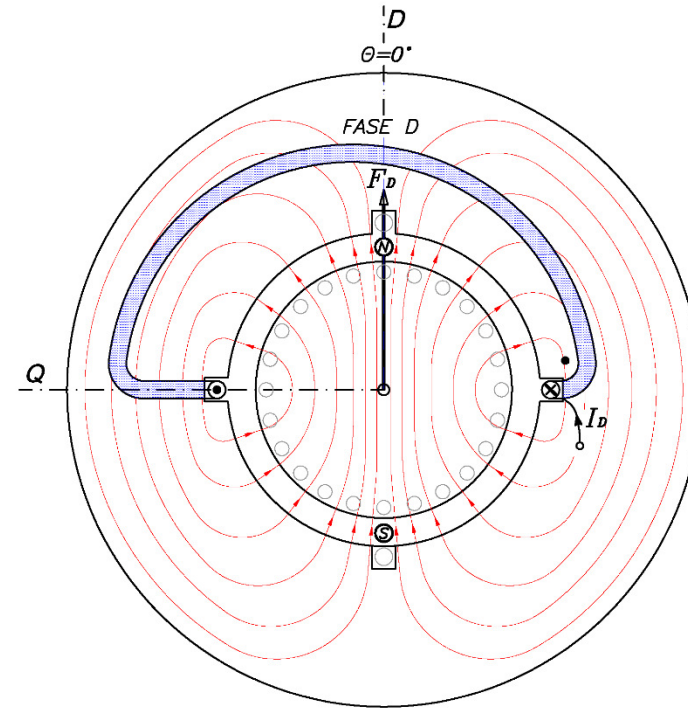
PRINCÍPIO DO ENROLAMENTO BIFÁSICO → CAMPO MAGNÉTICO FORMADO NO ENTREFERRO



**DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE
ENROLAMENTO BIFÁSICO
ELEMENTAR**

→ ENROLAMENTO DE 2 PÓLOS

$$\text{SISTEMA } 2\phi \text{ DE CORRENTES} \begin{cases} I_D = I_M \cdot \cos \omega.t \\ I_Q = I_M \cdot \cos (\omega.t - 90^\circ) \end{cases}$$

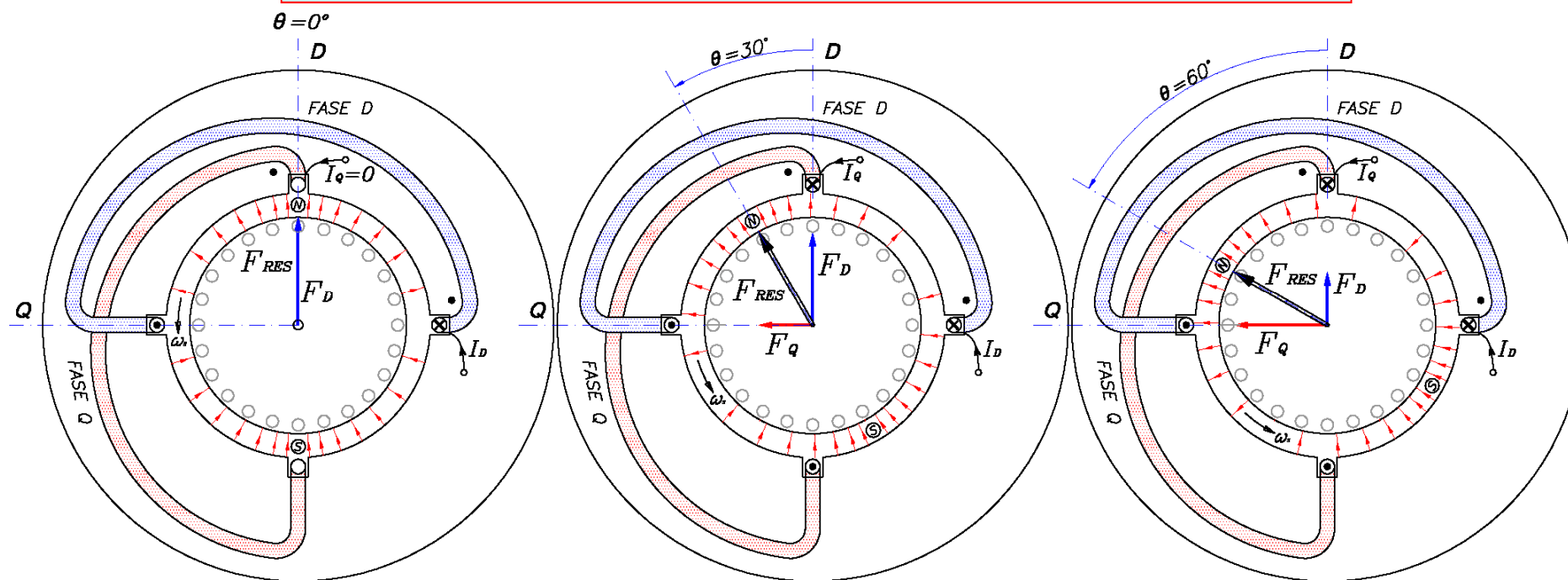


**DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO CIRCUITO MAGNÉTICO,
PRODUZIDO EXCLUSIVAMENTE PELA FASE “D”**

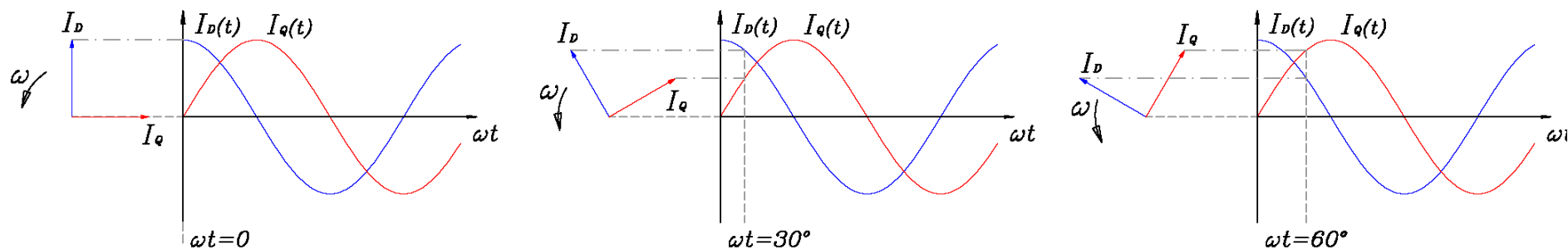
**→ DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CAMPO AO LONGO DO
ENTREFERRO É CO-SENOIDAL (NO CASO IDEAL),
REPRESENTADA PELO VETOR F_D**

$$\rightarrow F_D = N_f \cdot I_D = N_f \cdot I_M \cdot \cos(\omega.t) = F_M \cdot \cos(\omega.t)$$

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO – ENROLAMENTO BIFÁSICO



EVOLUÇÃO NO TEMPO E NO ESPAÇO DO CAMPO RESULTANTE, F_{RES} → (AÇÃO CONJUNTA DAS 2 FASES)



$\omega t = 0^\circ \rightarrow t = 0 \text{ s} ; I_D = I_M ; I_Q = 0$

$\omega t = 30^\circ \rightarrow t \approx 1,4 \text{ ms} ; I_D = 0,866 I_M ; I_Q = 0,5 I_M$

$\omega t = 60^\circ \rightarrow t \approx 2,8 \text{ ms} ; I_D = 0,5 I_M ; I_Q = 0,866 I_M$

DIAGRAMAS FASORIAIS DAS CORRENTES

PROPRIEDADES DO CAMPO MAGNÉTICO FORMADO NO ENTREFERRO – ENROLAMENTO BIFÁSICO:

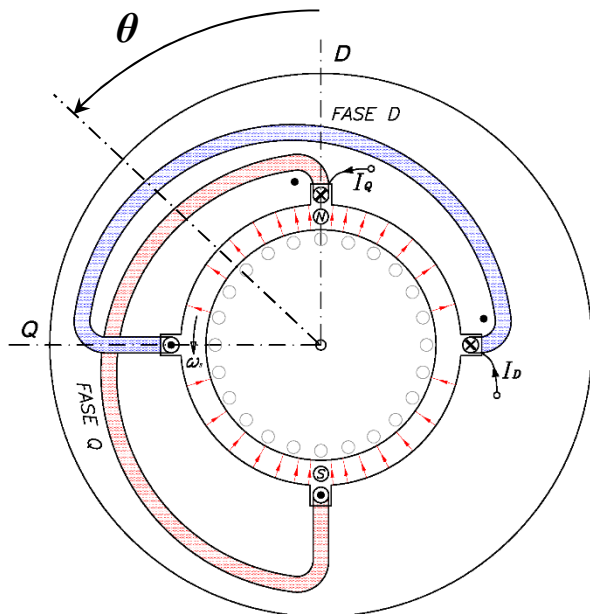
→ CAMPO RESULTANTE COM DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL CO-SENOIDAL (CASO IDEAL), DE AMPLITUDE CONSTANTE

→ AMPLITUDE DO CAMPO RESULTANTE : $F_{RES} = F_M$ (F_M : MAGNITUDE MÁXIMA DO CAMPO INDIVIDUAL DE CADA FASE)

→ CAMPO RESULTANTE É ROTATIVO NO ENTREFERRO (CAMPO GIRANTE)

→ PARA CONFIGURAÇÃO DE 2 PÓLOS: CAMPO GIRANTE PERFAZ UMA REVOLUÇÃO COMPLETA AO LONGO DO ENTREFERRO A CADA CICLO COMPLETO DA CORRENTE NAS FASES DO ENROLAMENTO

CORRENTES DE FASE COM FREQUÊNCIA ANGULAR : $\omega = 2.\pi.f \rightarrow f$: FREQUÊNCIA DA REDE



$$\vec{F}_D = F_M \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \theta$$

$$\vec{F}_Q = F_M \cdot \cos(\omega t - 90^\circ) \cdot \cos(\theta - 90^\circ)$$

COMPONENTES DE
CAMPO INDIVIDUAIS
DE CADA FASE

$$\vec{F}_{RES} = \vec{F}_D + \vec{F}_Q$$

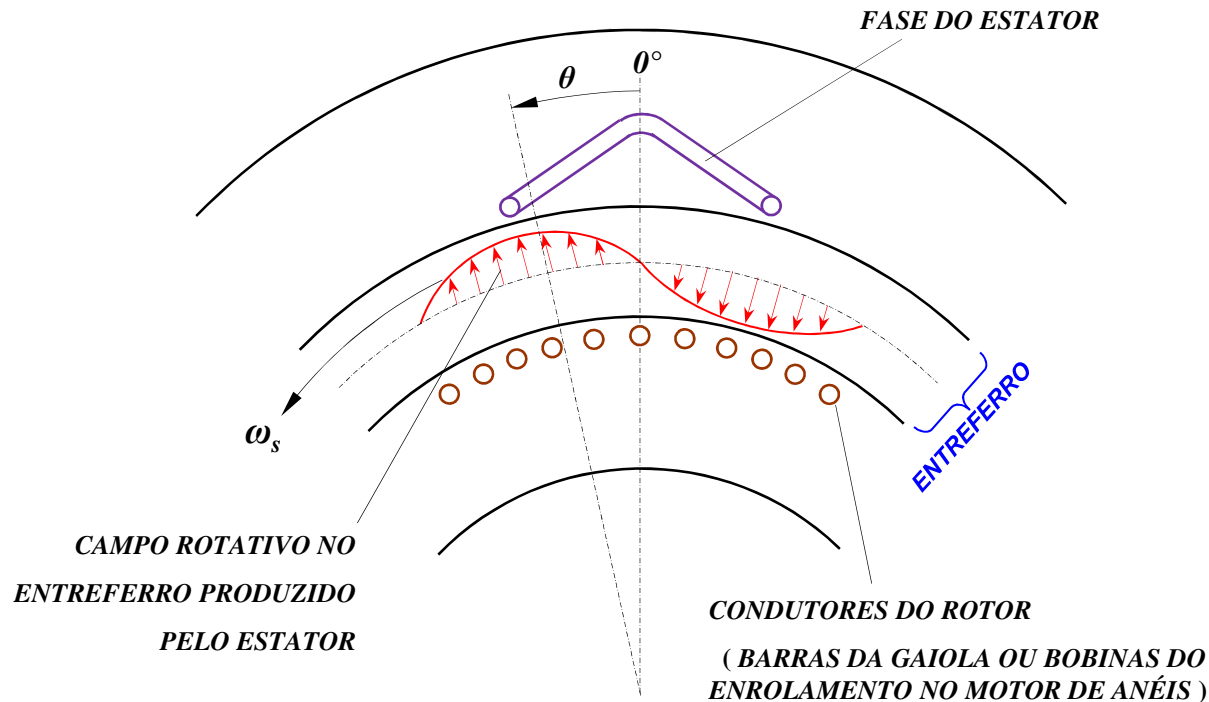


$$F_{RES} = 1 \cdot F_M \cdot \cos(\theta - \omega t)$$

EQUAÇÃO DA ONDA DE CAMPO
ROTATIVO NO ENTREFERRO

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA → VELOCIDADE SÍNCRONA DO CAMPO

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NO ENTREFERRO



ω_s : ROTAÇÃO SÍNCRONA DO CAMPO GIRANTE NO ENTREFERRO

→ DEPENDE DO NÚMERO DE POLOS MAGNÉTICOS FORMADO PELO ENROLAMENTO

→ $\omega_s = \omega / p = 2\pi f / p$

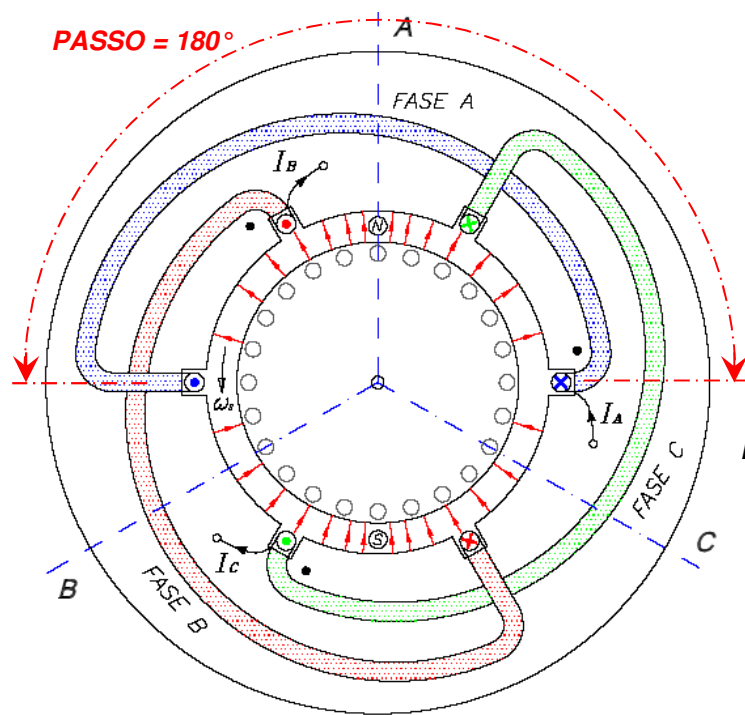
→ f : FREQUÊNCIA DAS CORRENTES NO ENROLAMENTO

→ p : Nº DE PARES DE POLOS

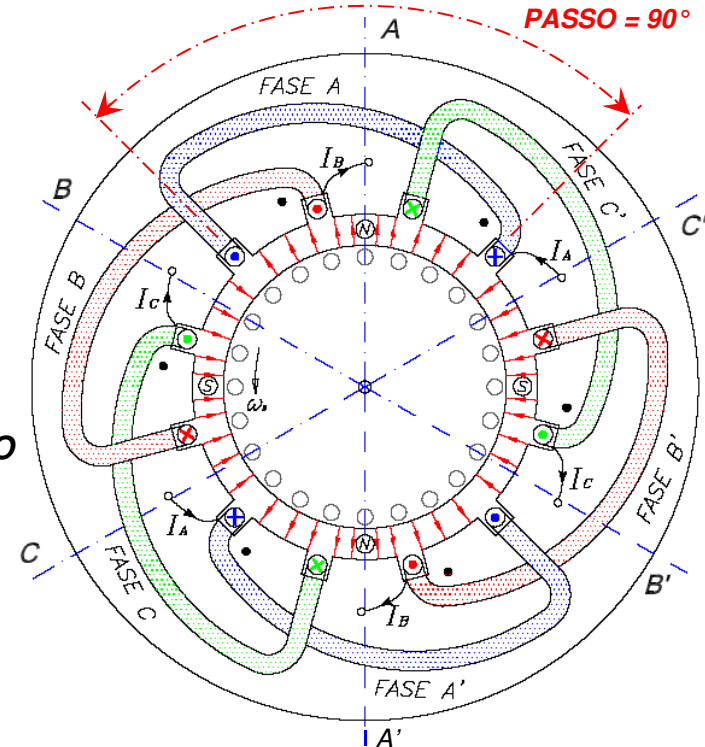
QUALQUER QUE SEJA O NÚMERO DE FASES DO ENROLAMENTO DO ESTATOR, m , FORMA-SE UMA DISTRIBUIÇÃO DE FORÇAS MAGNETOMOTRIZES ROTATIVA NO ENTREFERRO, COM AMPLITUDE CONSTANTE $(m/2) \cdot F_M$ E QUE TRASLADA COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO ω_s AO LONGO DA CIRCUNFERÊNCIA DO ENTREFERRO

$$F_{RES} = \frac{m}{2} \cdot F_M \cdot \cos(\theta - \omega_s \cdot t) \quad \left. \vphantom{F_{RES} = \frac{m}{2} \cdot F_M \cdot \cos(\theta - \omega_s \cdot t)} \right\} \begin{array}{l} \text{EQUAÇÃO DA ONDA DE CAMPO ROTATIVO QUE SE} \\ \text{PROPAGA AO LONGO DO TEMPO NA DIREÇÃO } \theta \text{ DO ESPAÇO} \end{array}$$

DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS DO ENROLAMENTO TRIFÁSICO → VELOCIDADE SÍNCRONA DO CAMPO ROTATIVO



DUPLICAÇÃO DO PADRÃO
DE BOBINAS AO LONGO
DO ENTREFERRO



ENROLAMENTO DE 2 PÓLOS → $2.p = 2 \rightarrow p = 1$

CONFIGURAÇÃO MÍNIMA: 1 CONJUNTO DE BOBINAS
POR FASE → BOBINAS COM PASSO = π rad.

VELOCIDADE SÍNCRONA: 1 ROTAÇÃO DO CAMPO A
CADA CICLO DA CORRENTE → $\omega_s = \omega = 2\pi.f$

$f = 60$ Hz → $n_s = 60$ rps = 3600 RPM

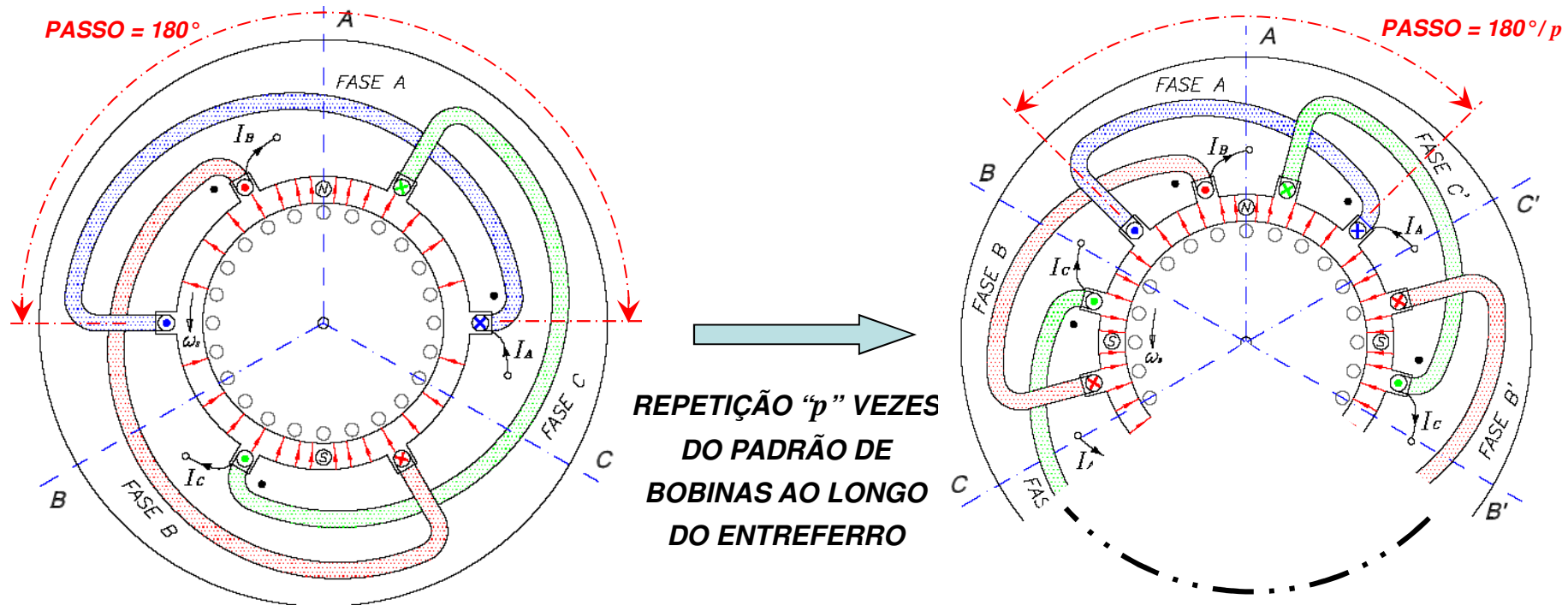
ENROLAMENTO DE 4 PÓLOS → $2.p = 4 \rightarrow p = 2$

CONFIGURAÇÃO MÍNIMA: 2 CONJUNTOS DE BOBINAS
POR FASE → BOBINAS COM PASSO = $\pi/2$ rad.

VELOCIDADE SÍNCRONA: 1/2 ROTAÇÃO DO CAMPO A
CADA CICLO DA CORRENTE → $\omega_s = \omega/2 = 2\pi.f/2$

$f = 60$ Hz → $n_s = 30$ rps = 1800 RPM

DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE PÓLOS DO ENROLAMENTO TRIFÁSICO → VELOCIDADE SÍNCRONA DO CAMPO ROTATIVO



ENROLAMENTO GENÉRICO DE $2.p$ PÓLOS → NÚMERO DE PARES DE PÓLOS: “p”

CONFIGURAÇÃO MÍNIMA: p CONJUNTO DE BOBINAS POR FASE → BOBINAS COM PASSO $2\pi/2.p$ rad.

VELOCIDADE SÍNCRONA: 1/p ROTAÇÃO DO CAMPO A CADA CICLO DA CORRENTE OU 1 ROTAÇÃO A CADA p CICLOS DA CORRENTE → $\omega_s = \omega/p = 2\pi.f/p$

$f = 60 \text{ Hz} \rightarrow n_s = f/p \text{ rps} = 60.f/p \text{ RPM}$

2 PÓLOS	→	$p = 1$	→	$n_s = 3600 \text{ RPM}$
4 PÓLOS	→	$p = 2$	→	$n_s = 1800 \text{ RPM}$
6 PÓLOS	→	$p = 3$	→	$n_s = 1200 \text{ RPM}$
8 PÓLOS	→	$p = 4$	→	$n_s = 900 \text{ RPM}$