

PEA – 2404

MÁQUINAS ELÉTRICAS E ACIONAMENTOS

Resumo das notas de aula

PROGRAMA:

1 – MÁQUINAS ASSÍNCRONAS:

Caracterização e classificação das máquinas assíncronas - Aspectos construtivos – Princípio de funcionamento das máquinas de indução polifásicas – Formação do campo magnético rotativo – Campos harmônicos – Enrolamentos trifásicos – Fluxo por polo – F.E.M. induzida - Interação do campo rotativo com os condutores rotóricos – Conjugado e escorregamento – Modos de operação – Natureza da impedância rotórica – Circuito equivalente – Fluxo de potências ativas – Expressão do conjugado – Características externas – Conformação de curvas – Categorias de conjugado – Métodos de partida – Transitório de partida – Variação de rotação da máquina assíncrona – Alimentação com frequência variável – Efeito das harmônicas sobre as características – Modos de operação especiais da máquinas assíncrona – Motores de indução monofásicos – Modelo de circuito e métodos de partida

2 –ACIONAMENTOS:

Aspectos gerais dos acionamentos industriais – Coordenação do sistema: Carga + Motor + Controlador - Aplicação e caracterização dos principais tipos de cargas mecânicas - Aplicação e caracterização dos principais tipos de motores elétricos – Tipos de acoplamentos entre motor e carga – Tempo de aceleração – Métodos de partida e frenagem – transitório térmico de aquecimento e resfriamento – Regimes de operação – Potência eficaz – Classes térmicas dos materiais isolantes – Efeito da temperatura ambiente e altitude – Conversores CA-CC – Chopper – Inversores de frequência – Exemplos de aplicação.

BIBLIOGRAFIA:

ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS – S. J. Chapman – Ed. McGraw-Hill – 1991

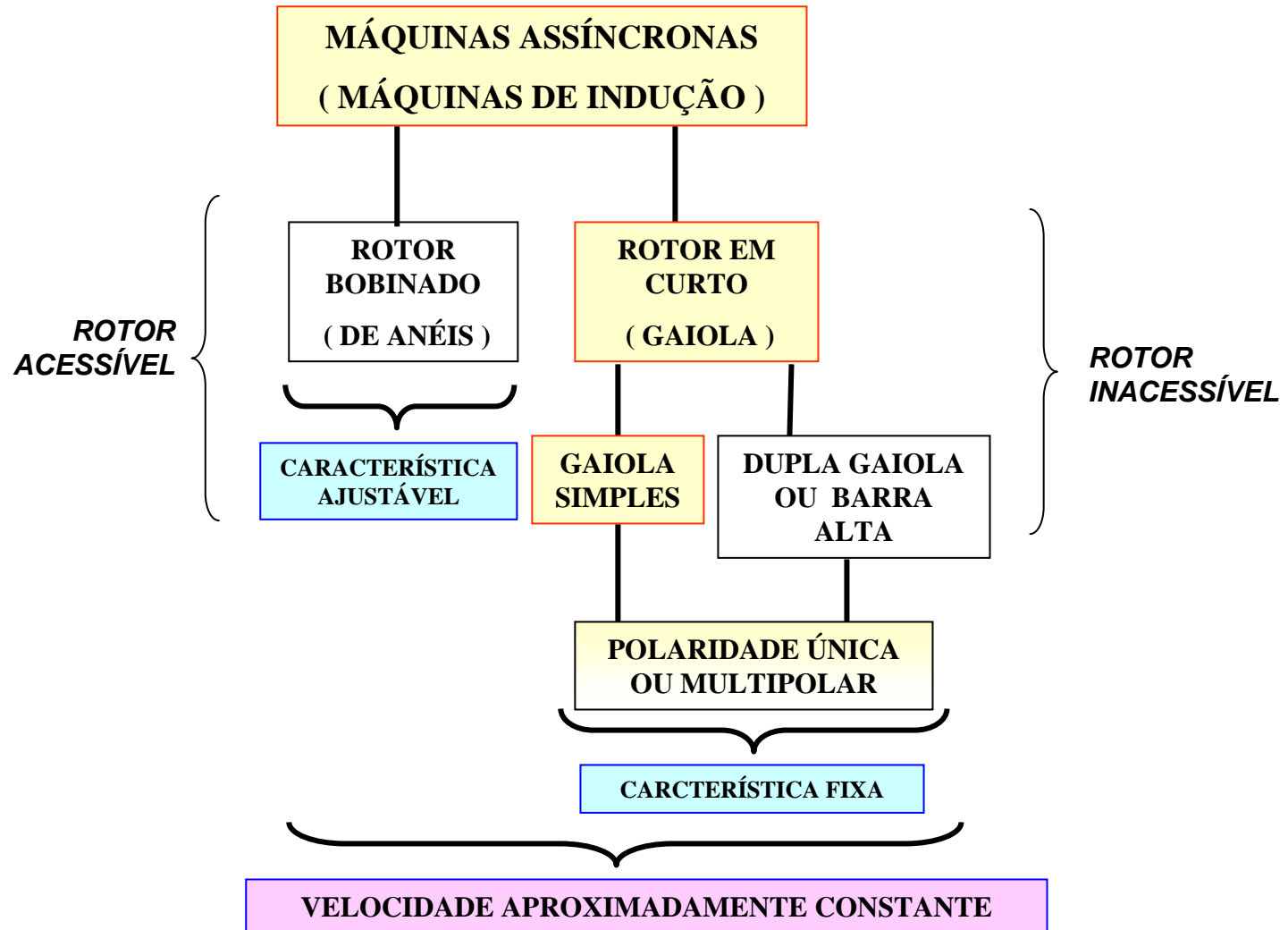
SELEÇÃO E APLICAÇÃO DE MOTORES ELÉTRICOS – O. S. Lobosco – Ed. McGraw-Hill – 1988

ELETROMECAÂNICA – A.G. Falcone – Ed. Edgard Blucher – 1996

ALTERNATING CURRENT MACHINES - M. G. Say – Pitman Publishing – 1976

ELECTRIC MOTOR HANDBOOK – E. H. Werninck – Ed. McGraw-Hill – 1978

HANDBOOK OF ELECTRIC MACHINES – S. A. Nasar – Ed. McGraw-Hill - 1987

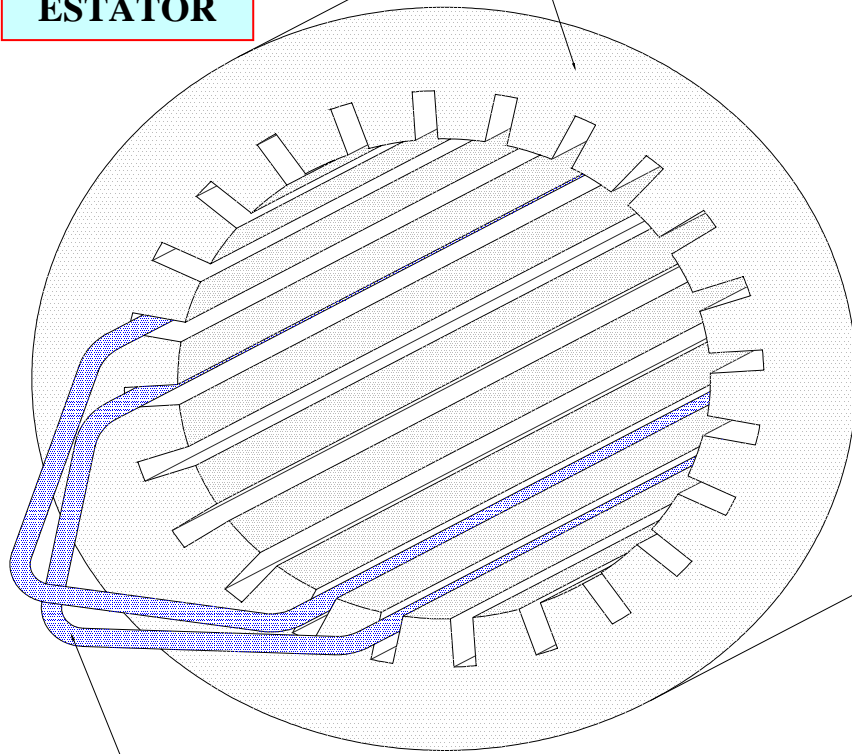


MOTORES ASSÍNCRONOS: CONSTRUÇÃO

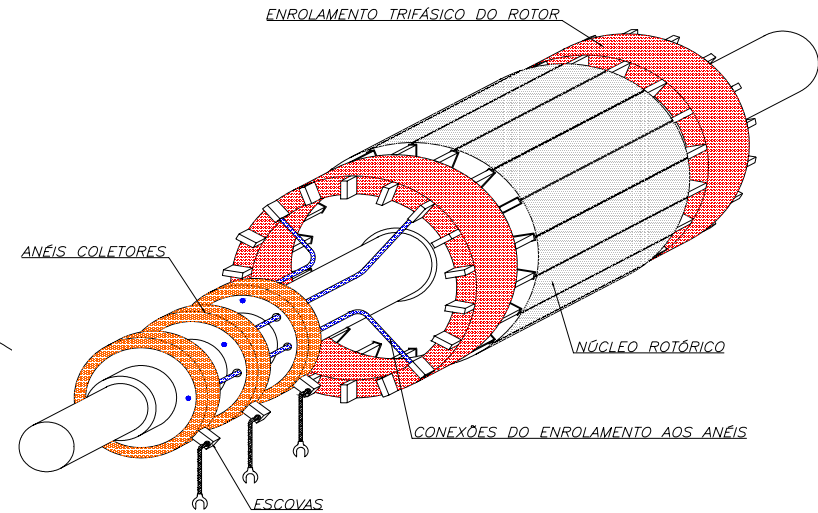
ASPECTOS CONSTRUTIVOS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA (OU DE INDUÇÃO)

NÚCLEO MAGNÉTICO DO ESTATOR

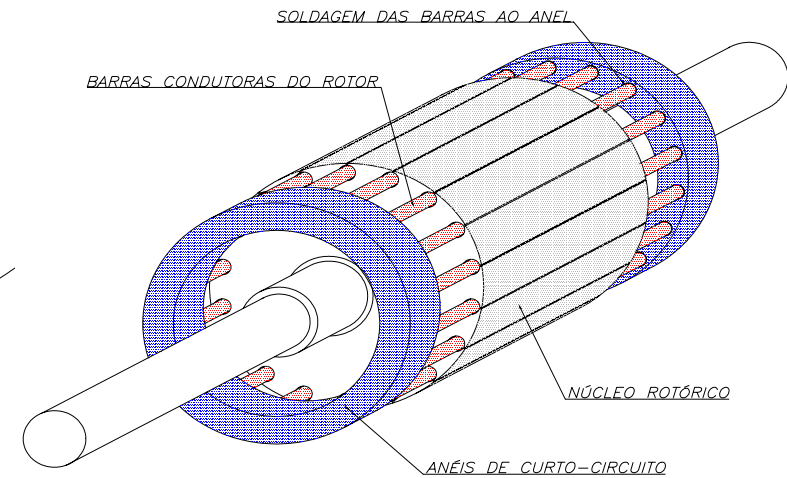
ESTATOR



BOBINAS DO ENROLAMENTO ESTATORÍCO



ROTOR BOBINADO (OU DE ANÉIS)

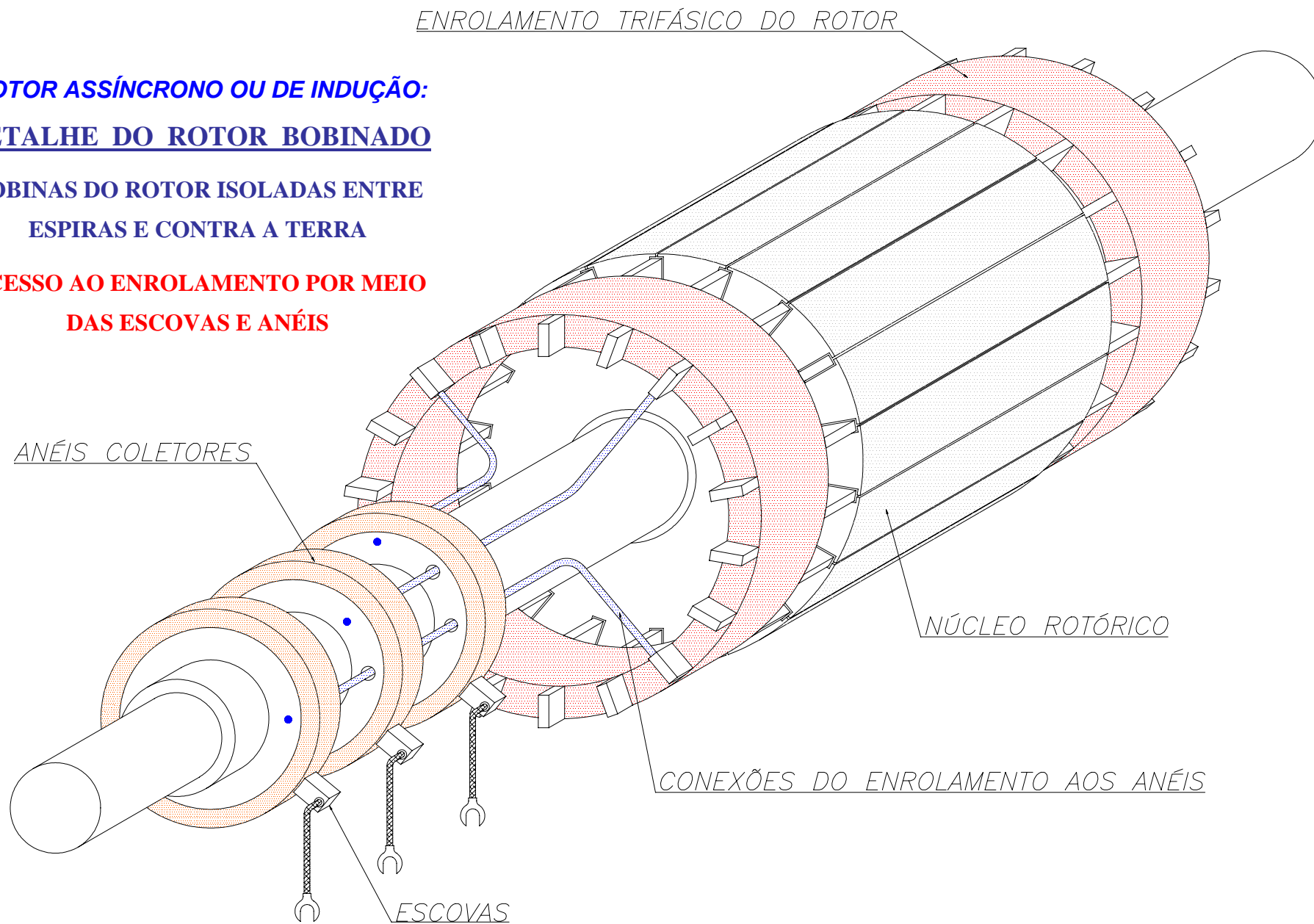


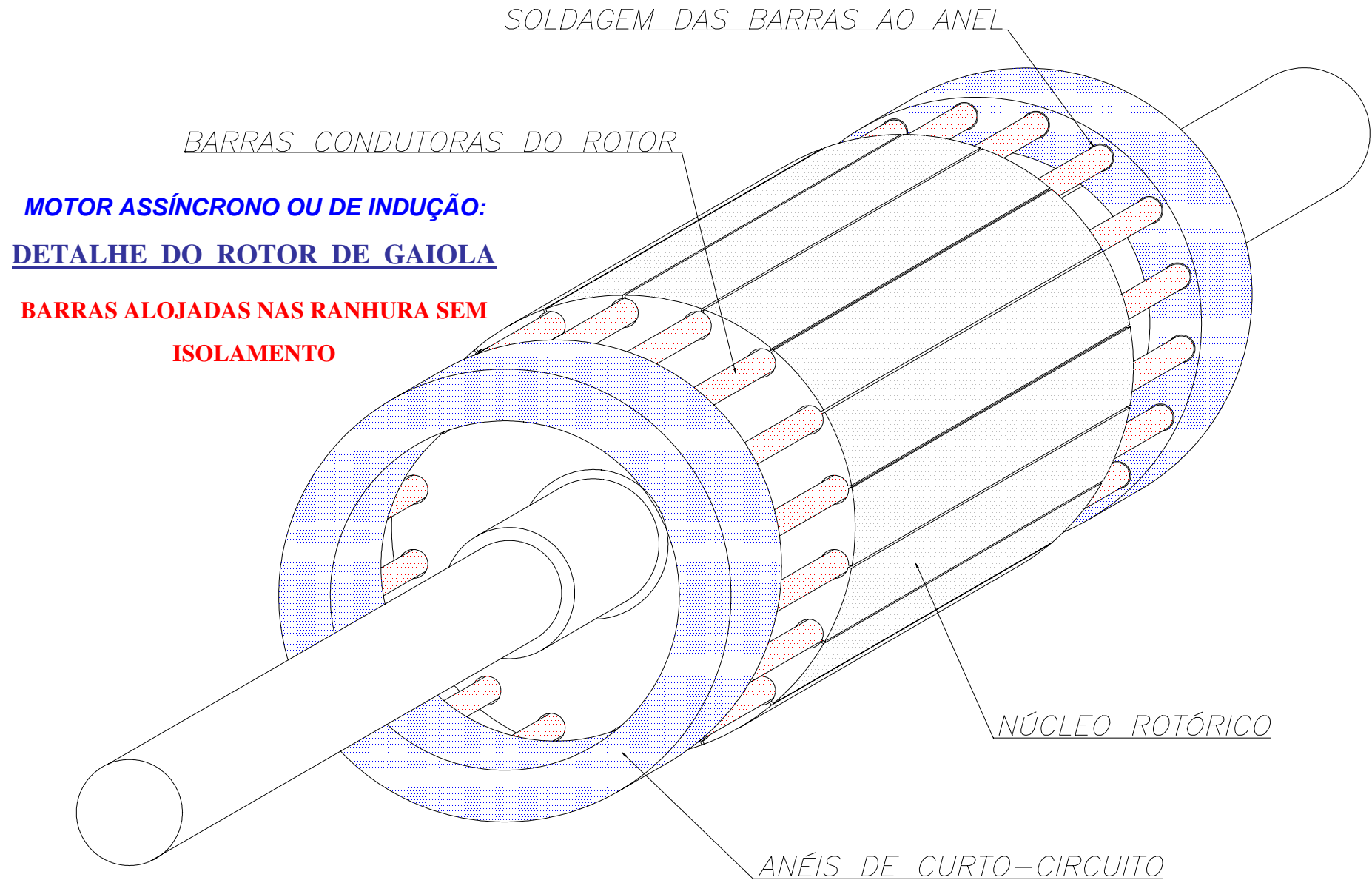
ROTOR EM CURTO (OU DE GAIOLA)

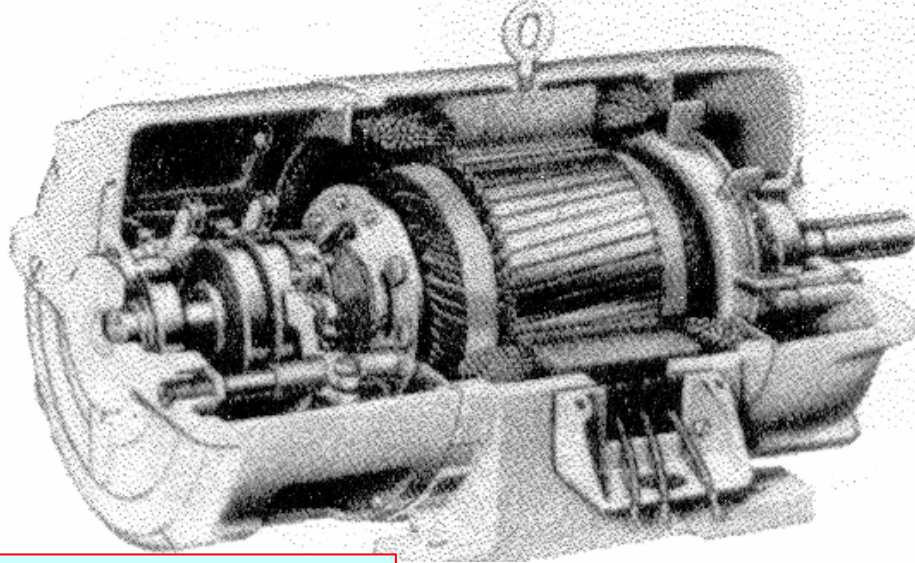
**MOTOR ASSÍNCRONO OU DE INDUÇÃO:
DETALHE DO ROTOR BOBINADO**

**BOBINAS DO ROTOR ISOLADAS ENTRE
ESPIRAS E CONTRA A TERRA**

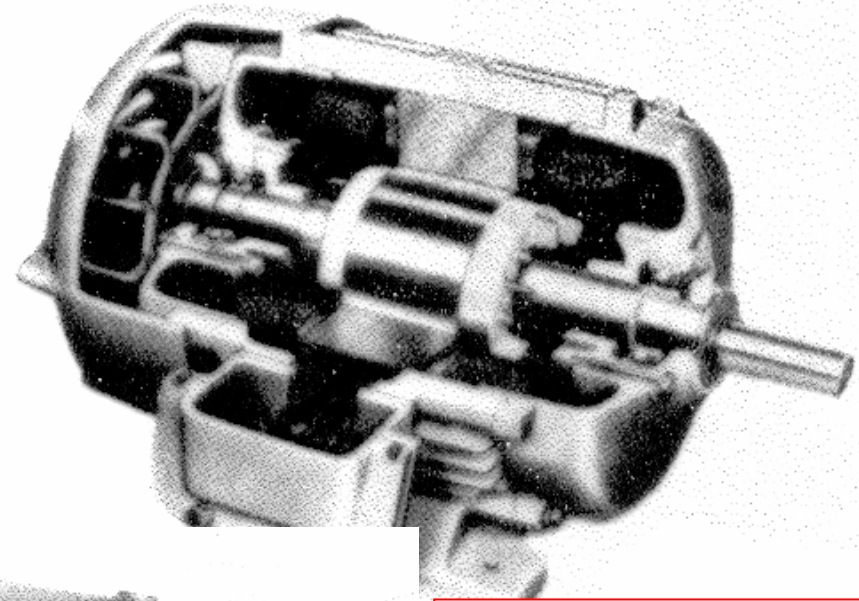
**ACESSO AO ENROLAMENTO POR MEIO
DAS ESCOVAS E ANÉIS**



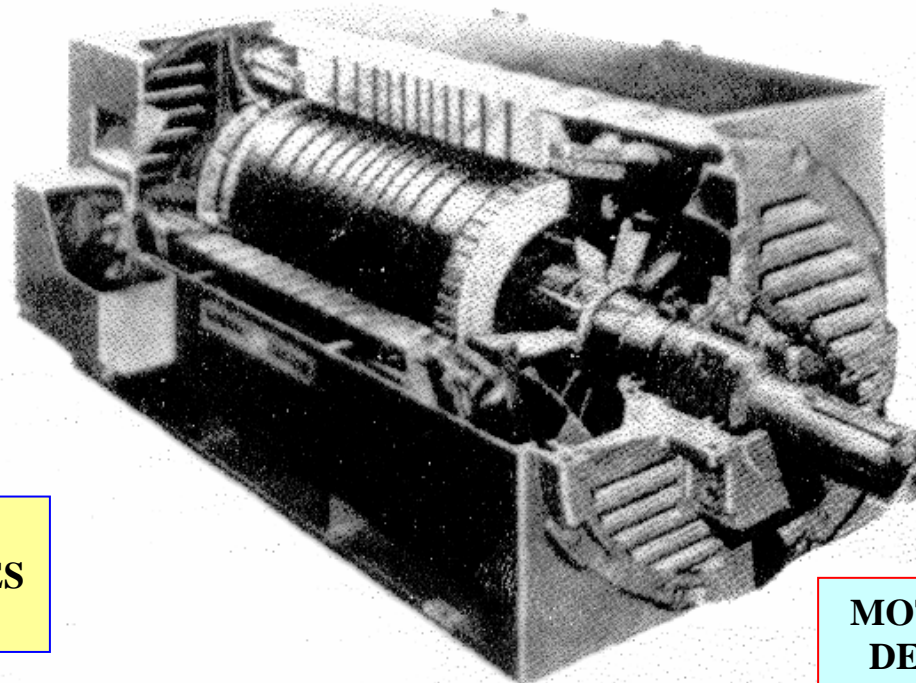




**MOTOR DE ANÉIS
DE MÉDIO PORTE**

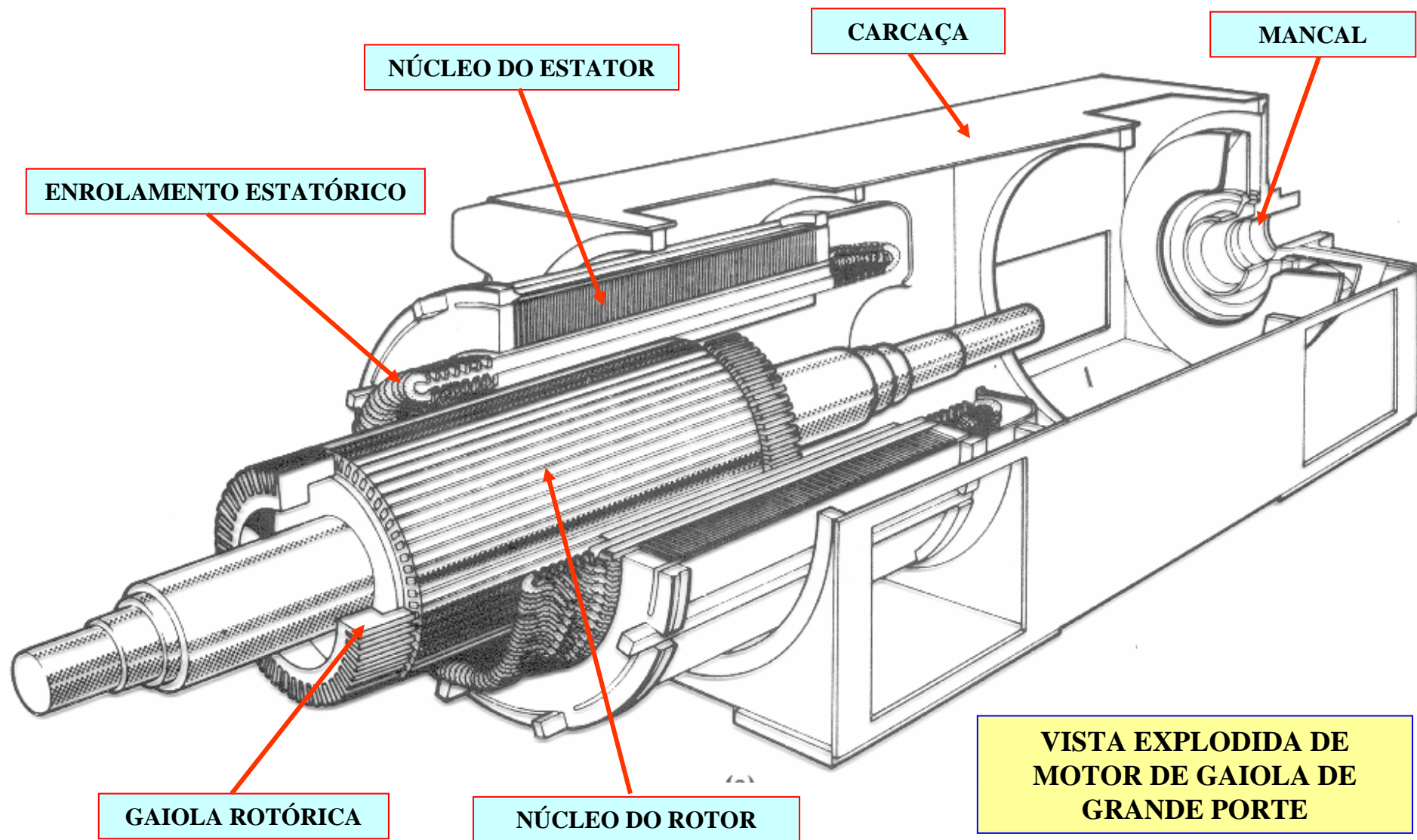


**MOTOR DE GAIOLA
DE PEQUENO PORTE**

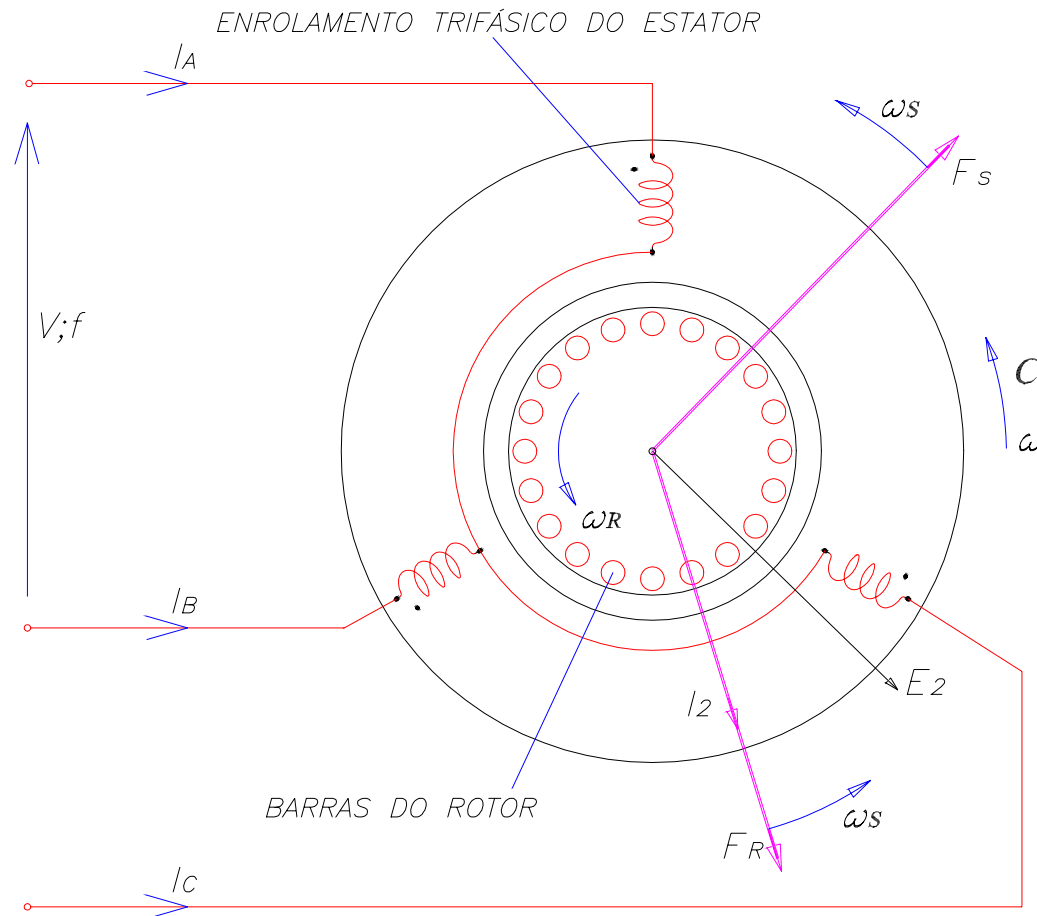


**CONSTRUÇÕES
TÍPICAS DE MOTORES
ASSÍNCRONOS**

**MOTOR DE GAIOLA
DE MÉDIO PORTE**



CONCEITO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR ASSÍNCRONO (DE INDUÇÃO)

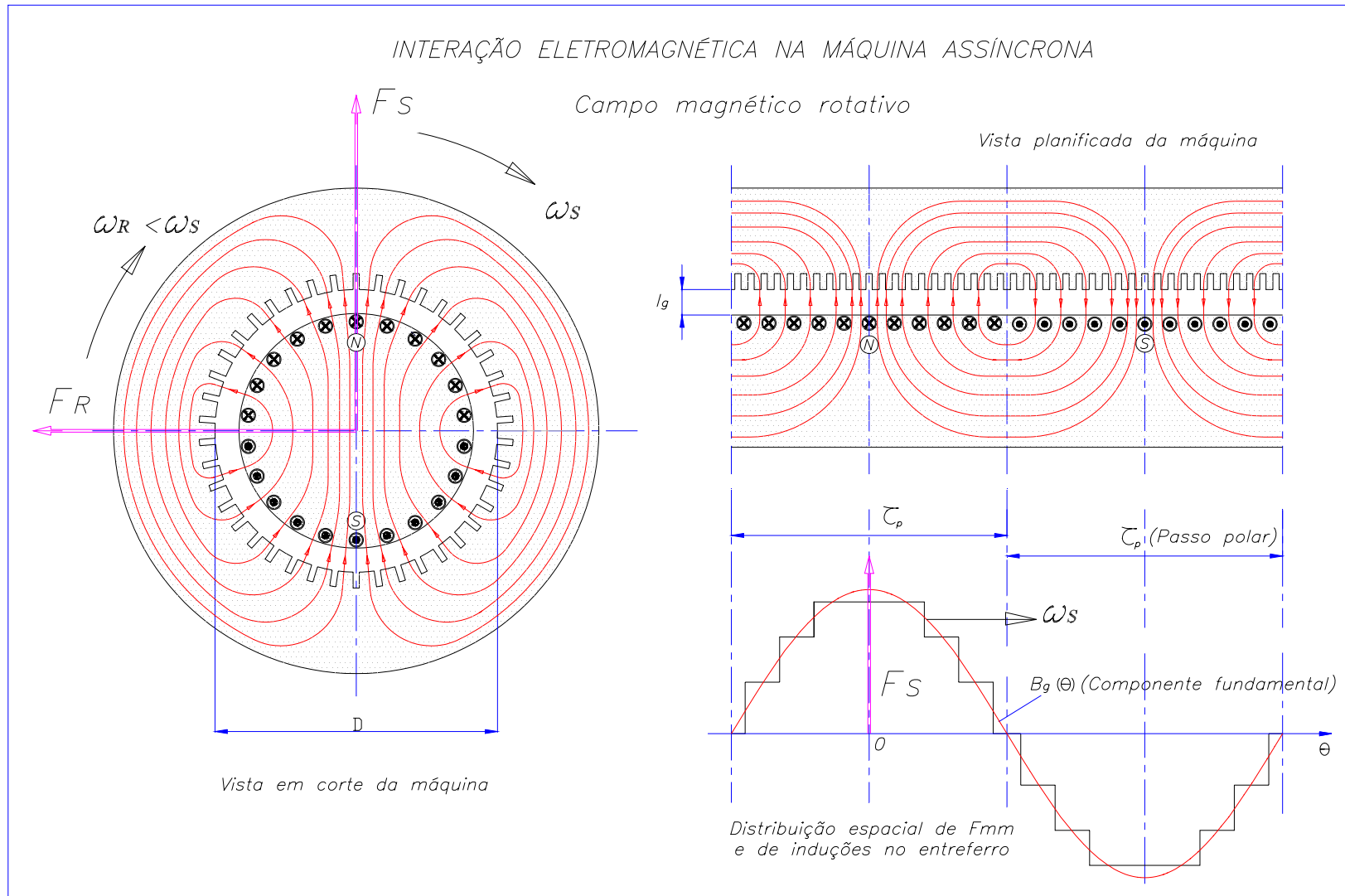


CAMPO ROTÓRICO F_R → PRODUZIDO POR CORRENTES INDUZIDAS A PARTIR DO CAMPO DO ESTATOR

→ $\omega_R < \omega_S$

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

MOTORES DE INDUÇÃO: FUNCIONAMENTO



BASE DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NO ENTREFERRO

CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO → ESSENCIAL NO FUNCIONAMENTO DOS MOTORES ASSÍNCRONOS E SÍNCRONOS

FORMAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO SÓ É POSSÍVEL COM ENROLAMENTOS POLIFÁSICOS (TRIFÁSICO MAIS COMUMENTE)

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)

→ 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)

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”

PRINCÍPIO DO ENROLAMENTO TRIFÁSICO → CAMPO MAGNÉTICO FORMADO NO ENTREFERRO

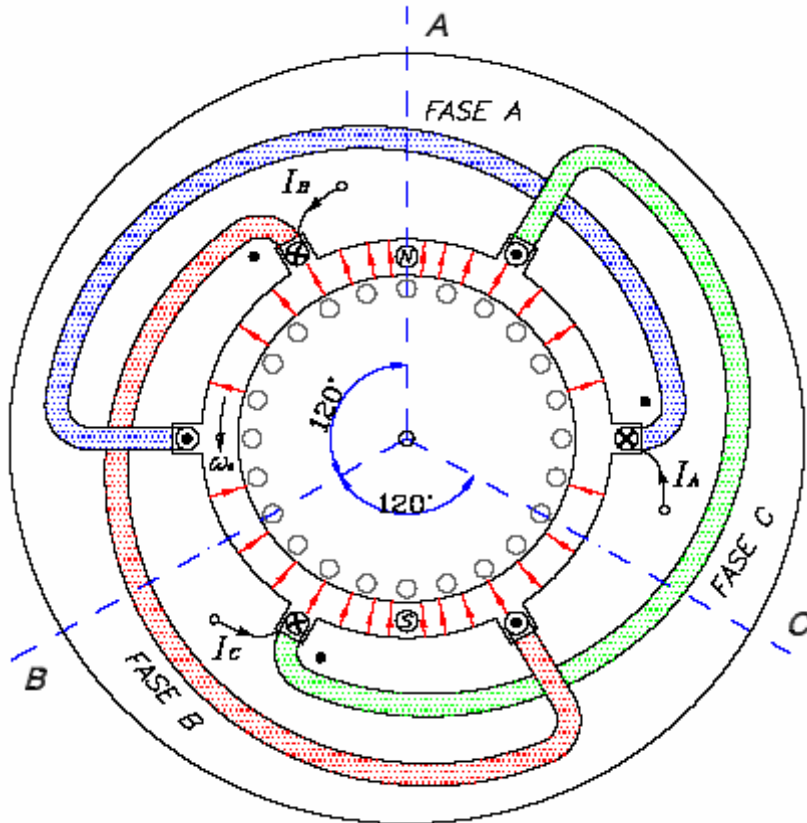
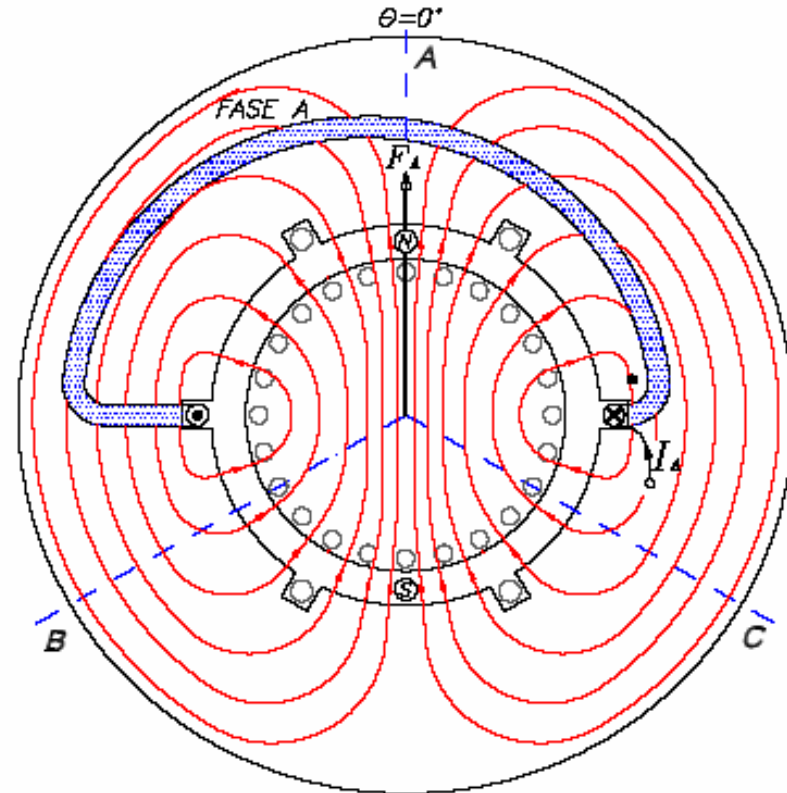


DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ENROLAMENTO TRIFÁSICO ELEMENTAR

→ ENROLAMENTO DE 2 PÓLOS

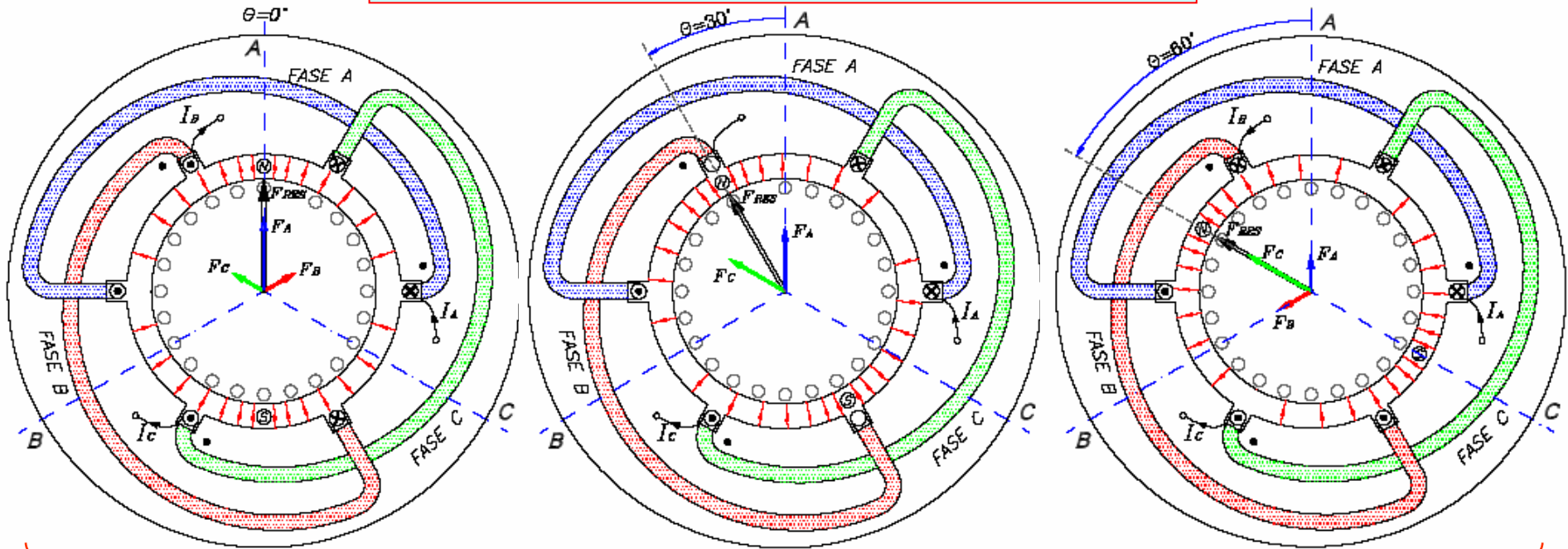


DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO CIRCUITO MAGNÉTICO, PRODUZIDO EXCLUSIVAMENTE PELA FASE "A"

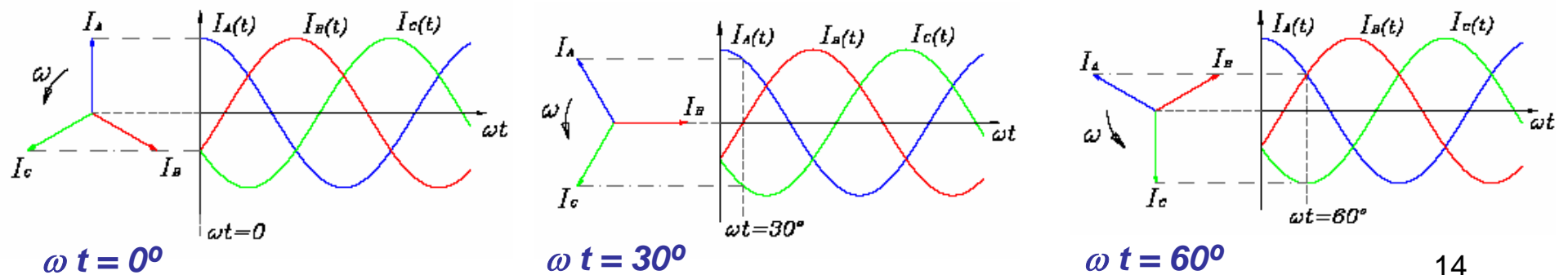
→ DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CAMPO AO LONGO DO ENTREFERRO É CO-SENOIDAL (NO CASO IDEAL), REPRESENTADA PELO VETOR F_A

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

FORMAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO



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

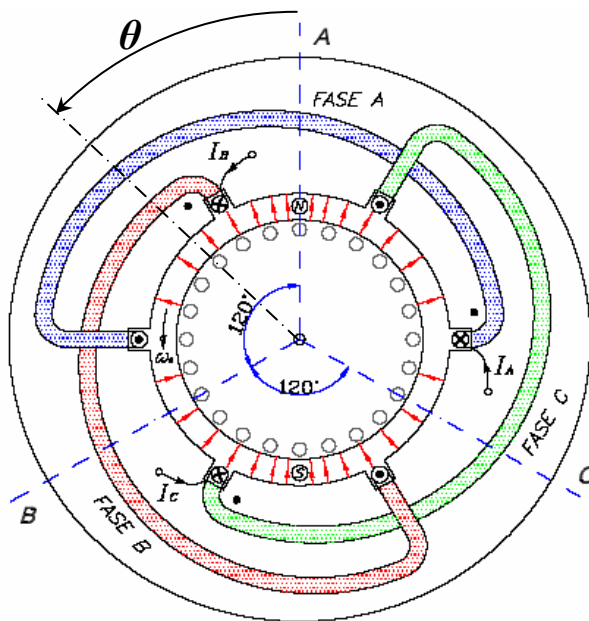


DIAGRAMAS FASORIAIS DAS CORRENTES

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 : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \rightarrow f$: FREQUÊNCIA DA REDE



$$\begin{aligned} \vec{F}_A &= F_M \cdot \cos(\omega.t) \cdot \cos \theta \\ \vec{F}_B &= F_M \cdot \cos(\omega.t - 120^\circ) \cdot \cos(\theta + 120^\circ) \\ \vec{F}_C &= F_M \cdot \cos(\omega.t - 240^\circ) \cdot \cos(\theta + 240^\circ) \end{aligned}$$

COMPONENTES DE CAMPO INDIVIDUAIS DE CADA FASE

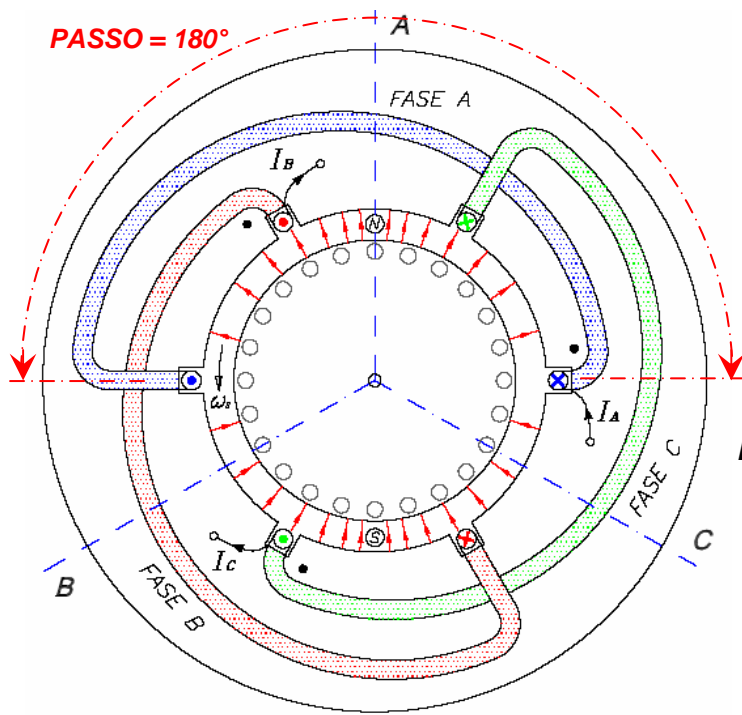
$$\vec{F}_{RES} = \vec{F}_A + \vec{F}_B + \vec{F}_C$$

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

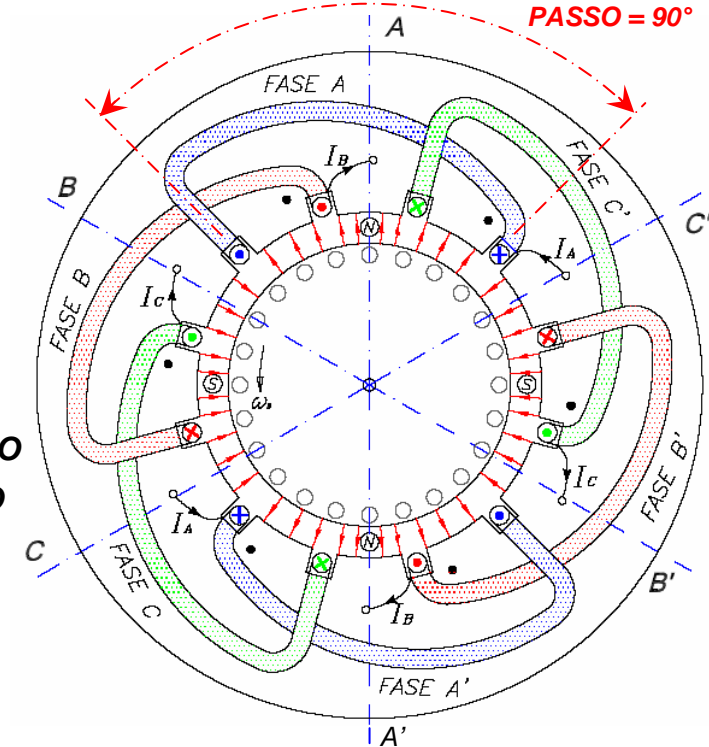
EQUAÇÃO DA ONDA DE CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO

VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA
→ VELOCIDADE SÍNCRONA DO CAMPO

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 = $\pi \text{ rad.}$

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

$f = 60 \text{ Hz} \rightarrow n_s = 60 \text{ rps} = 3600 \text{ RPM}$

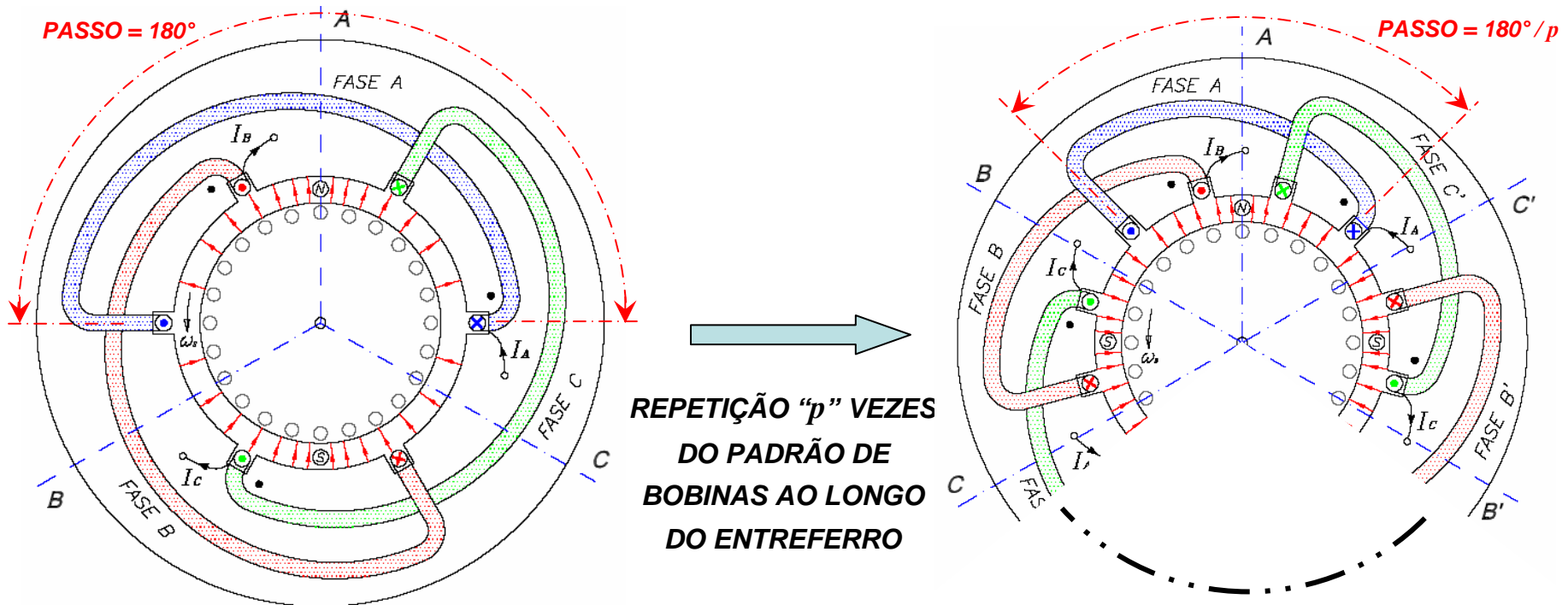
ENROLAMENTO DE 4 PÓLOS → $2.p = 4 \rightarrow p = 2$

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

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

$f = 60 \text{ Hz} \rightarrow n_s = 30 \text{ rps} = 1800 \text{ RPM}$

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

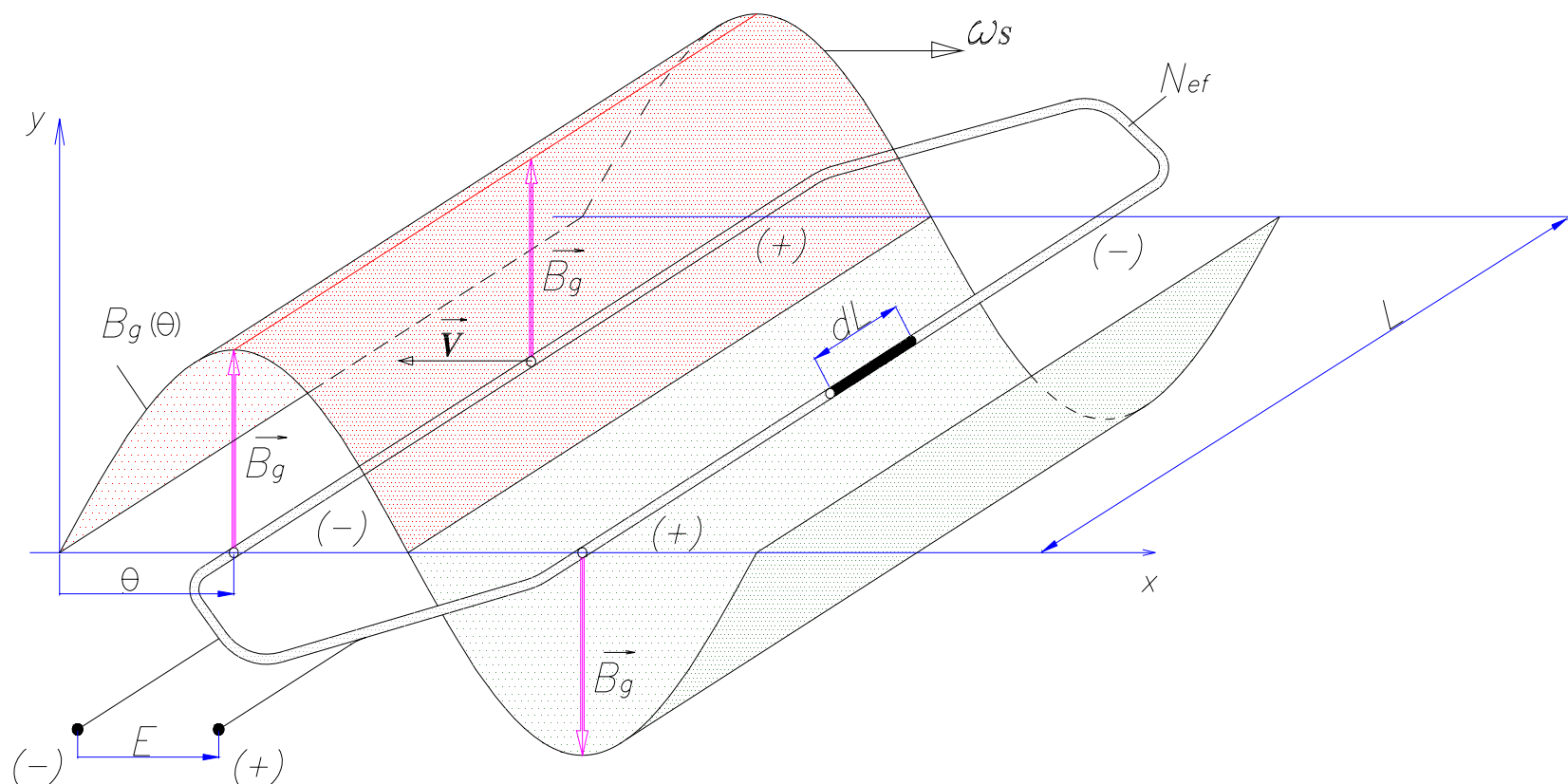
$f = 60 \text{ Hz} \rightarrow n_s = f/p \text{ rps} = 60 . f/p \text{ RPM}$

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

FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM OS ENROLAMENTOS NAS ADJACÊNCIAS DO ENTREFERRO

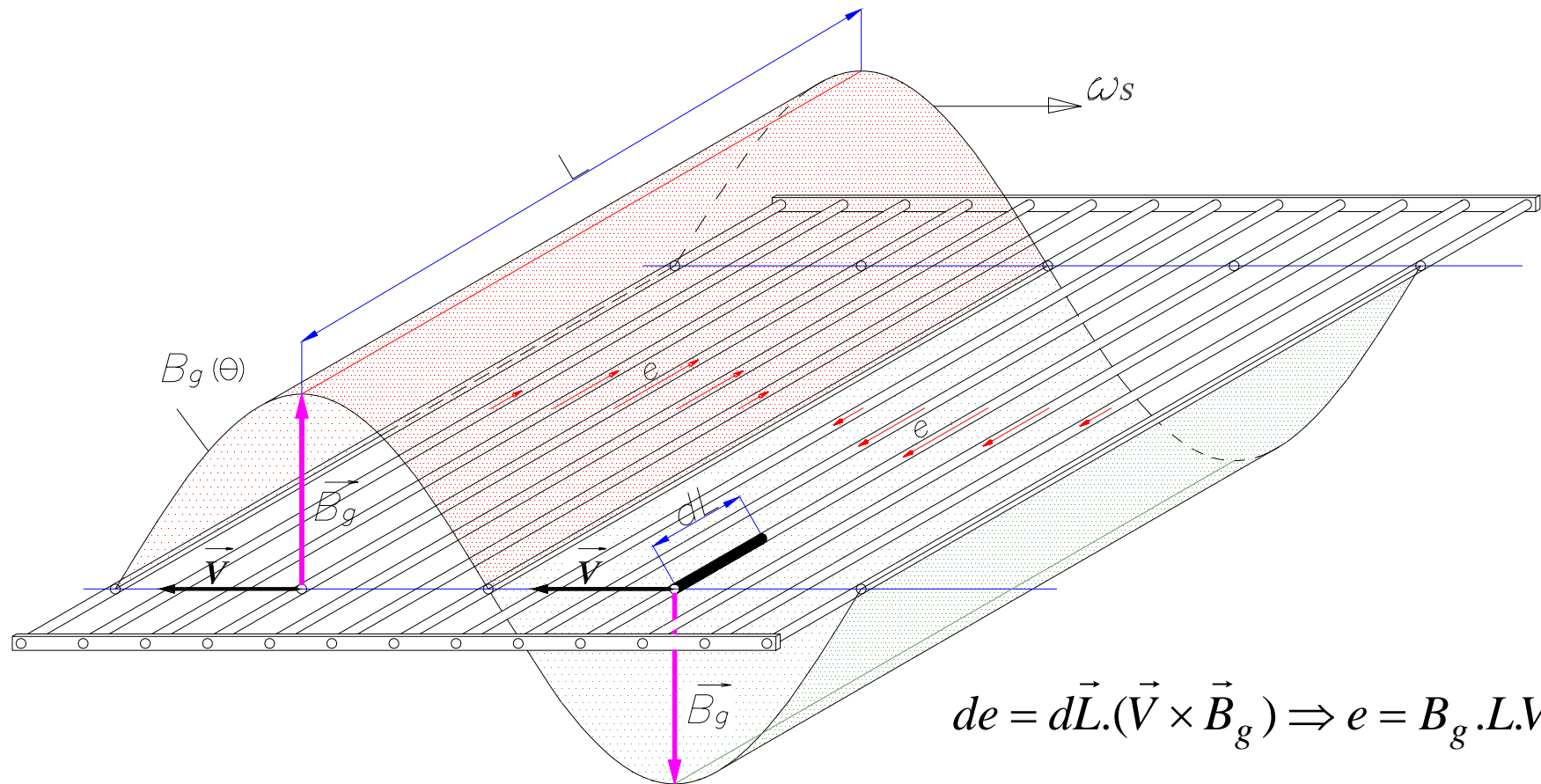
TENSÃO MOCIONAL INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO NAS BOBINAS DO ESTATOR



FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM OS ENROLAMENTOS NAS ADJACÊNCIAS DO ENTREFERRO

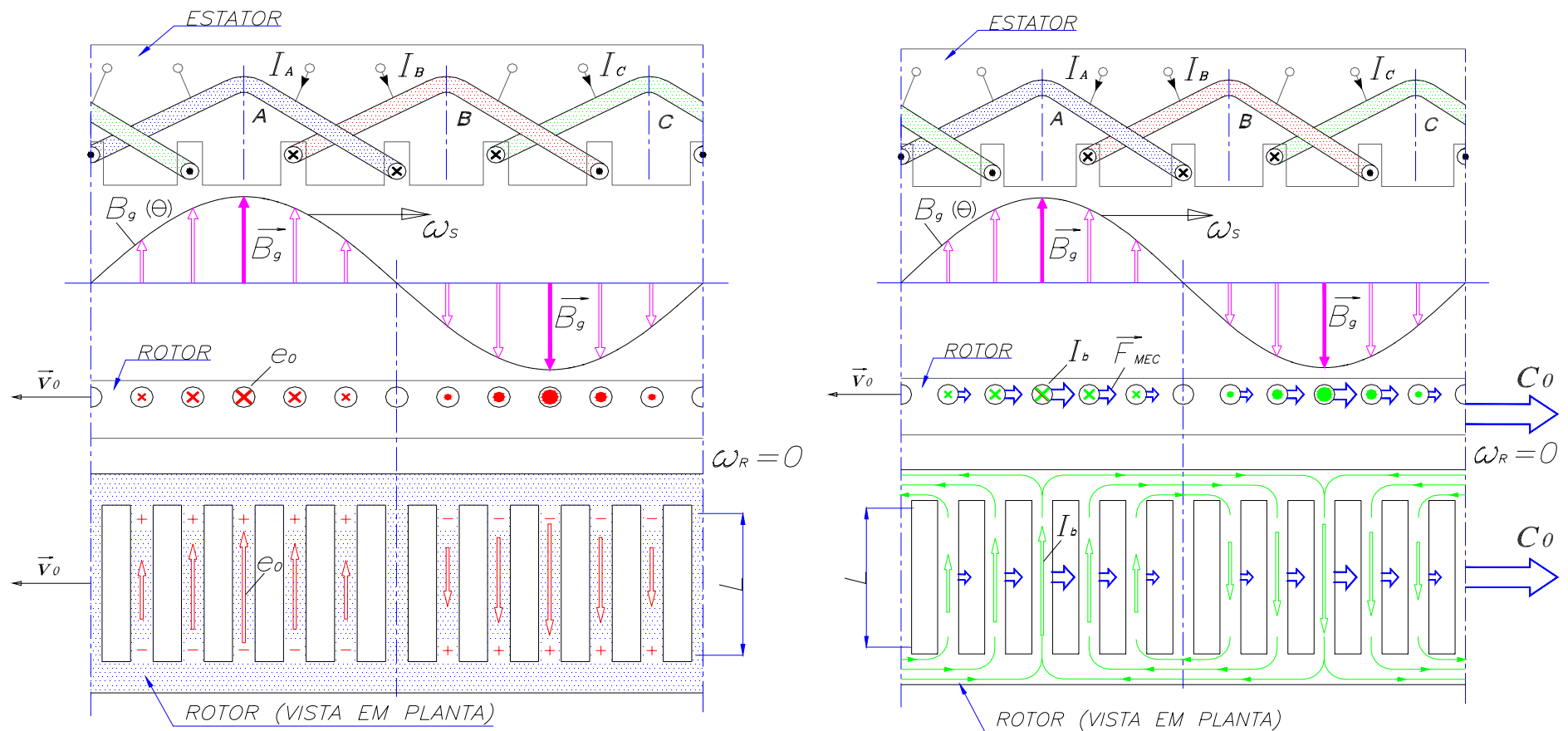
TENSÃO MECIONAL INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO NAS BARRAS DO ROTOR



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

PRODUÇÃO DE CONJUGADO E POTÊNCIA MECÂNICA NA MÁQUINA ASSÍNCRONA

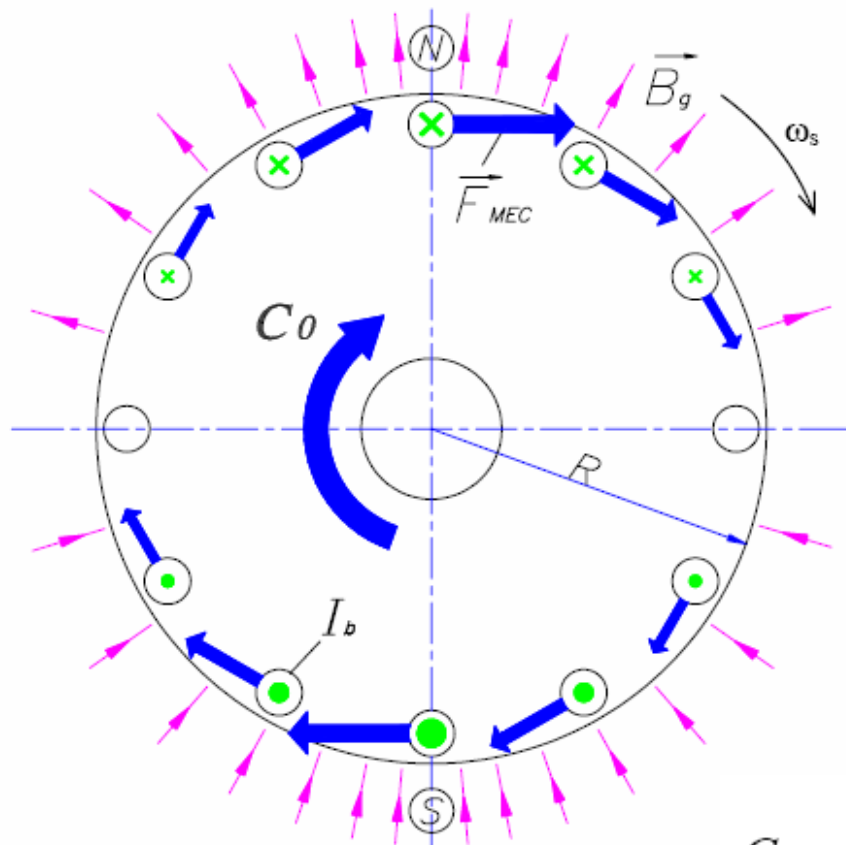
ROTOR EM REPOUSO



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

$$d\vec{f}_{mec} = I \cdot (d\vec{L} \times \vec{B}_g) \Rightarrow f_{mec} = B_g \cdot L \cdot I$$

COMPOSIÇÃO DO CONJUGADO NO EIXO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA



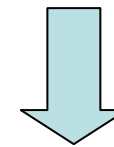
→ **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE INDUÇÕES**

NO ENTREFERRO: $B_g(\theta) = B_M \cdot \cos(\theta)$

→ **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CORRENTES**

NAS BARRAS DO ROTOR: $I_0(\theta) = I_{0M} \cdot \cos(\theta)$

INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

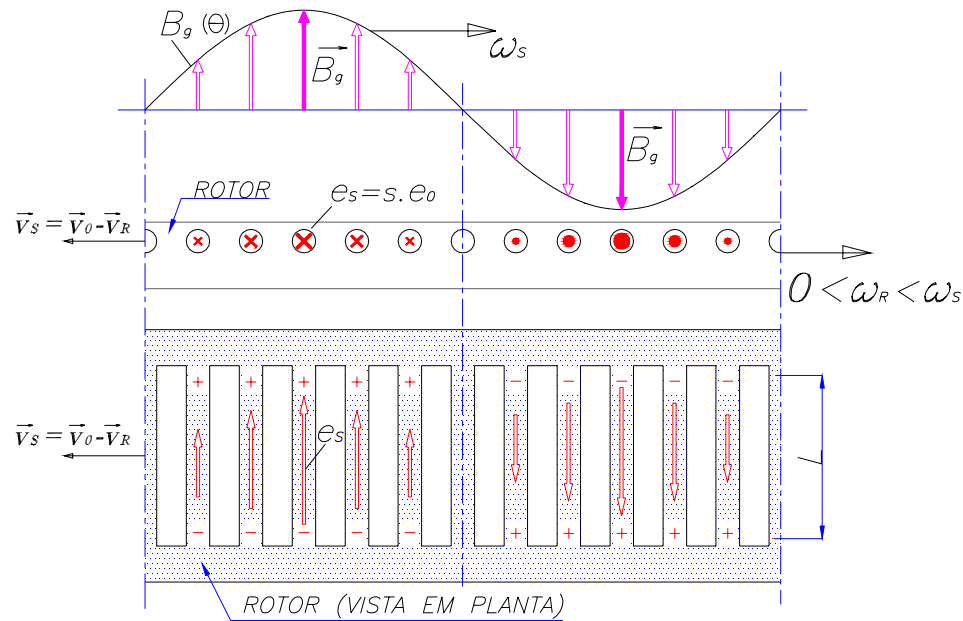


$$C_0 = \sum_{i=1}^{i=Q_b} F_{MEC_i} \cdot R = \sum_{i=1}^{i=Q_b} B_g(\theta_i) \cdot L \cdot I_b(\theta_i) \cdot R$$

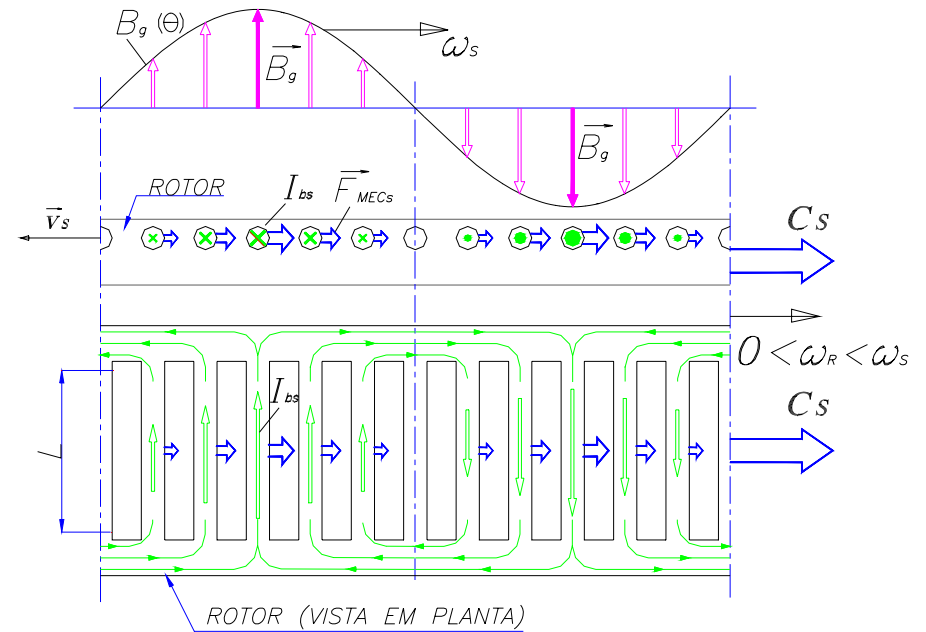
$$C_0 = \frac{Q_b \cdot R \cdot L}{2 \cdot \pi} \cdot B_M \cdot I_{0M} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} \cos^2(\theta) \cdot d\theta = \frac{1}{2} \cdot B_M \cdot I_{0M} \cdot L \cdot R \cdot Q_b$$

PRODUÇÃO DE CONJUGADO E POTÊNCIA MECÂNICA NA MÁQUINA ASSÍNCRONA

ROTOR EM MOVIMENTO



TENSÕES INDUZIDAS NAS BARRAS DO ROTOR



CORRENTES CIRCULANTES NO ROTOR

CONCEITUAÇÃO DO ESCORREGAMENTO →
$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

OPERAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO NA REGIÃO DE MOTOR ASSÍNCRONO

Velocidade angular do rotor	Escorregamento	Tensão induzida nos condutores	Freqüência nas barras da gaiola	Conjugado
0	1	e_0	f_1	C_0
$\omega_R = (1-s) \cdot \omega_S$	s	$e_S = s \cdot e_0$	$f_2 = s \cdot f_1$	C_S
ω_S	0	0	0	0

$$s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S}$$

MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

